

unesp  **UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA**

“JÚLIO DE MESQUITA FILHO”

Campus de Guaratinguetá – SP

LINO CHIAPINOTTO

**ANÁLISE DA COMBUSTÃO E DAS EMISSÕES DE UM MOTOR FLEX
USANDO MISTURAS HETEROGÊNEAS DE COMBUSTÍVEIS**

Guaratinguetá

2017

LINO CHIAPINOTTO

**ANÁLISE DA COMBUSTÃO E DAS EMISSÕES DE UM MOTOR FLEX
USANDO MISTURAS HETEROGÊNEAS DE COMBUSTÍVEIS**

Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica na área de Energia.

Orientadora: Profa. Dra. Ivonete Ávila

Co-orientador: Prof. Dr. Carlos M. Romero Luna

Guaratinguetá

2017

Chiapinotto, Lino
C532a Análise da combustão e das emissões de um motor Flex usando
misturas heterogêneas de combustíveis / Lino Chiapinotto –
Guaratinguetá, 2017.
93 f : il.
Bibliografia: f. 71-75

Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de
Engenharia de Guaratinguetá, 2017.
Orientadora: Prof.^a Dr.^a Ivonete Ávila
Coorientador: Prof. Dr. Carlos Manuel Romero Luna

1. Combustíveis para motores.. 2. Motores. 3. Gases de combustão.
I. Título

CDU 662.6(043)

LINO CHIAPINOTTO

**ESTA DISSERTAÇÃO FOI JULGADA ADEQUADA PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
"MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA"**

**PROGRAMA: ENGENHARIA MECÂNICA
ÁREA: ENERGIA**

APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO


Prof.^a Dr.^a Ana Paula Rosifina Alves Claro
Coordenadora

BANCA EXAMINADORA:


Prof.^a Dr.^a IVONETE ÁVILA
Orientadora / UNESP-FEG


Prof. Dr. CELSO EDUARDO TUNA
UNESP-FEG


Prof. Dr. CHRISTIAN JEREMI CORONADO RODRIGUEZ
UNIFEI

DADOS CURRICULARES

LINO CHIAPINOTTO

NASCIMENTO	04.02.1960 – HORIZONTINA/RS
FILIAÇÃO	Deoclécio Joaquim Chiapinotto Pierina Bortoli Chiapinotto
2009/2013	Curso de Engenharia Ambiental e Sanitária Faculdade de Roseira, Roseira, SP

Dedico esse trabalho aos meus pais em memória e à minha esposa Elizete Alves Ferreira Chiapinotto, que sempre esteve ao meu lado apoiando-me nos estudos e incentivando-me nas horas difíceis. Sua compreensão foi fundamental no avanço da caminhada.

“Se A é o sucesso, então A é igual a X mais Y mais Z. O trabalho é X; Y é o lazer; e Z é manter a boca fechada”.

Albert Einstein

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus pelo dom da vida.

À minha esposa Elizete Alves Ferreira Chiapinotto pelo seu incentivo e compreensão apoiando-me ao longo da jornada.

À Professora Dra. Ivonete Ávila, minha orientadora, que me deu crédito para a execução desta pesquisa. Pela sua paciência, orientação, dedicação, desprendimento e pela sua amizade. Obrigado pelo respeito e confiança ao construir um ambiente agradável para se trabalhar juntos, solidificando espírito de equipe.

Ao Prof. Dr. Carlos Manuel Romero Luna, meu co-orientador, pelo seu apoio ajudando-me a organizar o trabalho sem nunca medir esforços. Esteve sempre presente, incentivando-me na busca do sucesso. Desde o convite que me fez para o curso de mestrado da FEG, quando fui seu aluno na FARO, marcou-me o seu dinamismo e determinação. Seu companheirismo e espírito altruísta foram acima da expectativa. Passou-me confiança ao longo do curso e o êxito deste trabalho sem a sua ajuda não seria possível.

Aos docentes da pós-graduação, professores João Andrade de Carvalho Júnior, José Antônio Perrella Balestieri, Pedro Magalhães Sobrinho, Celso Tuna e Teófilo Miguel de Souza, pelos ensinamentos que contribuíram para a minha formação no mestrado.

À Dra. Gretta L. A. Arce Ferrufino pela sua amizade e respeito. Comprometida com o trabalho científico, inspirou-me a ser melhor pesquisador.

Às pessoas que disponibilizaram a infraestrutura para os ensaios nos motores, em especial ao professor Dr. Antonio Maria Laganá, Diretor do Laboratório de Sistemas Integráveis da Escola Politécnica da Universidade do Estado de São Paulo (USP), ao MSc. Michel Robert Veiga (FATEC-TAUBATÉ, SP) e ao Sr. Saulo Junior da Empresa Master Ship.

Aos colegas da Pós-Graduação, MSc. Kely Máximo, MSc. Natália da Silva Ribeiro, Eng. Fábio R. Vieira, Sérgio Alvarenga, Dr. Andrés Mendiburú e Dr. Luis Carlos Rios Quiroga, obrigado pelo carinho e companheirismo de todos ao longo do curso.

CHIAPINOTTO, L. Análise da combustão e das emissões de um motor Flex usando misturas heterogêneas de combustíveis. 2017, 93f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2017.

RESUMO

Nesta pesquisa investiga-se a viabilidade do uso de misturas heterogêneas de combustíveis compostas por etanol e gás natural veicular (GNV) em motor *flex fuel* (Flex). Os motores Flex, no Brasil, são abastecidos com gasolina E27 (com até 27% de etanol anidro e 73% de gasolina), etanol, GNV ou qualquer mistura de etanol e gasolina. Ao funcionarem com o GNV apresentam vantagens pela menor emissão de dióxido de carbono (CO₂), monóxido de carbono (CO) e óxidos de nitrogênio (NO_x), mas são desvantajosos com relação às emissões de hidrocarbonetos (HC) em baixas rotações quando comparados ao utilizarem gasolina ou etanol, além da perda de potência variando de 10 a 20%. Esta pesquisa objetiva encontrar uma mistura de etanol-GNV, cuja combustão possa reduzir, as emissões de CO, HC e NO_x do motor Flex em relação ao modo GNV. Os testes foram conduzidos num motor Flex de 2000 cilindradas, com duas válvulas por cilindro. No motor foi instalado um sistema de gerenciamento de injeção eletrônica de GNV funcionando concomitantemente com a injeção de combustível líquido. Fez-se inicialmente a medição da vazão de etanol (E100), do GNV (E0) e de diferentes misturas de etanol-GNV (E20, E40, E60, E80). Para a avaliação dos parâmetros das emissões de CO₂, CO, O₂, HC e NO_x, das eficiências (térmica, volumétrica e mecânica), consumo específico de combustível e custo operacional, calibrou-se primeiramente o motor para o uso de E0 e de E100. Os testes foram realizados em modo estacionário e dinâmico, cujas emissões foram medidas através do analisador de gases. No modo estacionário mediram-se as emissões de gases de exaustão em velocidade angular de 1000 e 2500 RPM (rotações por minuto); no modo dinâmico mediram-se além das emissões, a potência e o consumo de combustível com o motor submetido a 25% de carga a 2000, 2500, 3000 RPM e à carga total num dinamômetro ativo para até 290 kW. Os melhores resultados obtiveram-se para a mistura E20. Comparando-se com E0, a mistura E20 resultou uma média de 55,33%, 31%, 29,86% e 57,41% na diminuição das emissões de CO, O₂, HC e de NO_x, respectivamente, com um aumento médio das emissões de CO₂ em 5,81%; foi observado também perda de 2,45% de potência líquida, além do aumento de 2,35%, 1,25%, 1,41%, 16,94% e 18,85% para eficiência térmica, eficiência volumétrica, eficiência mecânica, consumo específico de combustível e do custo operacional, respectivamente.

PALAVRAS-CHAVE: Motor Flex. Injeção concomitante. Etanol. GNV. Gases de exaustão.

CHIAPINOTTO, L. **Combustion and emissions analysis of a flex fuel cycle engine using heterogeneous mixtures of fuels**. 93f. Dissertation (Master in Mechanical Engineering) - Faculty of Engineering, Guaratinguetá Campus, UNESP - Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2017.

ABSTRACT

This research has investigated the feasibility of using heterogeneous fuel blends composed of ethanol and compressed natural gas (CNG) in flex-fuel engines. In Brazil, such vehicles are fueled by E27 gasoline (up to 27% anhydrous ethanol and 73% gasoline), ethanol, CNG or any ethanol and gasoline blend. When running on CNG, they offer advantages due to lower carbon dioxide (CO₂), carbon monoxide (CO) and nitrogen oxide (NO_x) emissions, although they are disadvantageous with respect to hydrocarbon emissions (HC) at low revolutions, especially if compared to being run on gasoline or ethanol, in addition to power loss ranging from 10 to 20%. Thus, it is aimed to find an ethanol-CNG blend whose combustion can reduce CO, HC and NO_x emissions from flex-fuel engines in comparison with the CNG mode. Tests have been conducted on a 2000cc flex-fuel engine with two valves per cylinder. It was installed an electronic CNG injection system operating concomitantly with the liquid fuel injection system. Flows of ethanol (E100), CNG (E0) and different ethanol-CNG blends (E20, E40, E60, E80) were initially measured. In order to evaluate levels of CO₂, CO, O₂, HC and NO_x emissions, efficiency (thermal, volumetric and mechanical), specific fuel consumption and operating cost, the engine was initially calibrated to run on E0 and E100. The emissions tests were performed in stationary and dynamic mode. In stationary mode, exhaust emissions were measured at 1000 and 2500 RPM (revolutions per minute); in dynamic mode, power and fuel consumption were measured while the engine was subjected to 25% load at 2000, 2500, and 3000 RPM, in addition to repeating exhaust gas and power tests at full load with an active dynamometer at up to 290 kW. Optimal results were obtained for blend E20. If compared to E0, E20 resulted in an average of 55.33%, 31%, 29.86% and 57.41% at reducing CO, O₂, HC and NO_x emissions, respectively, with increased CO₂ emissions. It were also observed of 2.45% of gross power loss, besides an increase of 2.35%, 1.25%, 1.41%, 16.94% and 18.85% in thermal efficiency, volumetric efficiency, mechanical efficiency, specific fuel consumption and operating cost, respectively.

KEYWORDS: Flex engine. Concomitant injection. Ethanol. CNG. Exhaust gas emissions.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Sistema de injeção eletrônica de GNV.	41
Figura 2: Esquema do motor Flex com adaptação de um sistema de injeção GNV.....	43
Figura 3: Esquema da bancada experimental.	45
Figura 4: Analisador de gases TM 131 Tecnomotor.	46
Figura 5: Dinamômetro inercial utilizado nos ensaios preliminares.	47
Figura 6: Dinamômetro ativo de chassi utilizado nos ensaios com misturas de etanol-GNV..	49
Figura 7: Reservatórios de combustíveis: a) tanque de etanol; b) cilindro para GNV.....	49
Figura 8: Termoanemômetro digital.....	50
Figura 9: Comportamento das emissões de CO, HC e NO _x	52
Figura 10: Geometria simplificada do pistão, biela, virabrequim e cilindro do motor.	53
Figura 11: Concentrações das emissões de CO ₂ , CO, O ₂ , NO _x e HC em baixas e altas rotações para os ensaios em condição estacionária.....	58
Figura 12: Concentrações das emissões de CO ₂ , CO, O ₂ , NO _x e HC nos ensaios com motor Flex adaptado para misturas de etanol-GNV utilizando-se o dinamômetro ativo...	60
Figura 13: Potências de saída do motor Flex adaptado em função da rotação do motor e da adição do etanol ao GNV.....	64
Figura 14: Eficiência térmica do motor Flex adaptado em função da rotação do motor e da adição do etanol ao GNV.....	65
Figura 15: Eficiência volumétrica do motor Flex adaptado em função da rotação do motor e da adição do etanol ao GNV.....	67
Figura 16: Eficiência mecânica (η_m) do motor Flex adaptado em função da rotação do motor e da adição do etanol ao GNV.....	68
Figura 17: Consumo específico de combustível (CE) do motor Flex adaptado em função da rotação do motor e da adição do etanol ao GNV.....	69

Figura 18: Custo operacional utilizando-se o motor Flex adaptado em função da rotação do motor e da adição do etanol ao GNV.	70
Figura 19: Comportamento das potências do motor Flex abastecido com etanol em função da variação na rotação.	79
Figura 20: Comportamento das potências do motor Flex abastecido com GNV em função da variação na rotação.	80
Figura 21: Composição dos gases de exaustão avaliados (CO_2 , CO, HC, NO_x e O_2) durante a combustão dos combustíveis comerciais (etanol e GNV) no motor operando em duas rotações (baixa e alta) em condição estacionária.	82

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Limites de concentração de HC (ppm) e CO (%vol.) nos gases de exaustão permitidos.	25
Tabela 2: Propriedades físico-químicas do etanol hidratado.	38
Tabela 3: Composição química do GNV.	39
Tabela 4: Propriedades físico-químicas do GNV.	40
Tabela 5: Combustíveis utilizados nos ensaios com o motor Flex.	41
Tabela 6: Especificações técnicas do motor de combustão interna.	42
Tabela 7: Características do analisador de gases.	46
Tabela 8: Características do dinamômetro ativo de chassi.	48
Tabela 9: Características do termopar digital Minipa, modelo MDA-11.	50
Tabela 10: Potências máxima para E100 e E0.	81
Tabela 11: Composição dos gases de exaustão em condição estacionária.	83
Tabela 12: Condições experimentais adotadas nos ensaios executados no motor Flex adaptado para uso de misturas de etanol-GNV.	85
Tabela 13: Emissões geradas nos ensaios executados no motor Flex adaptado para uso de misturas de etanol-GNV – testes em condição estacionária em baixa rotação.	86
Tabela 14: Emissões geradas nos ensaios executados no motor Flex adaptado para uso de misturas de etanol-GNV – testes em condição estacionária em alta rotação.	87
Tabela 15: Emissões geradas nos ensaios executados no motor Flex adaptado para uso de misturas de etanol-GNV – testes a 2000 RPM executados no dinamômetro ativo.	88
Tabela 16: Emissões geradas nos ensaios executados no motor Flex adaptado para uso de misturas de etanol-GNV – testes a 2500 RPM executados no dinamômetro ativo.	90
Tabela 17: Emissões geradas nos ensaios executados no motor Flex adaptado para uso de misturas de etanol-GNV – testes a 3000 RPM executados no dinamômetro ativo.	92
Tabela 18: Análise de desempenho do motor Flex adaptado para uso de misturas de etanol-GNV.	94

Tabela 19: Potências máximas (kWh) obtidas no motor Flex adaptado para uso de misturas de etanol-GNV.	95
Tabela 20: Análise do custo operacional (R\$/h) para o motor Flex adaptado para uso de misturas de etanol-GNV.	96

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANFAVEA	Associação Nacional dos Fabricantes de Veículos Automotores
ANP	Agência Nacional do Petróleo, Biocombustíveis e Gás Natural
BEN	Balanco Energético Nacional
CCS	Carbon Capture and Storage/Sequestration
CFR	Cooperative Fuel Research
C ₃ H ₈	Propano
C ₈ H ₁₈	Gasolina
CH ₃ CH ₂ OH	Etanol
CH ₄	Metano
CO _{2eq}	Dióxido de carbônico equivalente
COMGAS	Companhia de Gás
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
DENATRAN	Departamento Nacional do Trânsito
EPA	Agência de Proteção Ambiental Americana
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
GEE	Gases de efeito estufa
GHG	Greenhouse gases
GNV	Gás natural veicular
INMETRO	Instituto Nacional de Metrologia
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
IPEM/SP	Instituto de Pesos e Medidas do Estado de São Paulo
HC	Hidrocarbonetos
ISO	International Organization for Standardization
MMA	Ministério do Meio Ambiente
MCT	Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação
MP	Material particulado
MPH	Milha
NMHC	Hidrocarbonetos não metano
OBD	<i>Onboard diagnostic</i>

OICA	Organização Internacional dos Fabricantes de Veículos Automotores
O ₃	Ozônio
PCI	Poder calorífico inferior
PCS	Poder calorífico superior
PETROBRÁS	Petróleo Brasileiro
PNMC	Política Nacional sobre Mudança do Clima
Tep	Tonelada equivalente de petróleo
THC	Hidrocarbonetos totais
UNICA	União da Indústria da Cana de açúcar
UV	Ultravioleta

LISTA DE SÍMBOLOS

CE	Consumo específico	[kg/kW]
COp	Custo operacional	[R\$/km]
m	Massa	[kg]
$\dot{m}$	Vazão mássica	[kg/min]
M	Massa molar	[g/mol]
ppm	Partícula por milhão	[1/10 ⁻⁶]
P _{etanol}	Preço do etanol	[R\$]
P _{GNV}	Preço do GNV	[R\$]
r _c	Razão de compressão	
t	Tempo	[s]
V	Volume	[cm ³]
W	Potência	[W]

SÍMBOLOS GREGOS

λ	Razão ar/combustível	
η	Eficiência	
ρ	Massa específica	[kg/m ³]

SUBSCRITOS

bi	Bruta indicada
c	Corrigido
Cc	Câmara de combustão
Comb	Combustível
d	disponível
D	Saída
At	Atrito

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	18
1.1	OBJETIVOS	20
1.1.1	Objetivos específicos.....	20
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	22
2.1	MOTOR DE COMBUSTÃO INTERNA DO CICLO OTTO	22
2.1.1	Motores convencionais	22
2.1.2	Motores <i>flex-fuel</i> (Flex)	22
2.1.3	Motores com sistema a GNV	23
2.2	COMPOSIÇÃO DOS GASES DE EXAUSTÃO.....	24
2.2.1	Dióxido de carbono	26
2.2.2	Monóxido de carbono	26
2.2.3	Hidrocarbonetos	27
2.2.4	Óxidos de nitrogênio.....	27
2.3	COMBUSTÍVEIS CONVENCIONAIS	28
2.4	COMBUSTÍVEIS ALTERNATIVOS	30
2.5	MISTURAS DE COMBUSTÍVEIS	32
3	MATERIAIS E MÉTODOS	38
3.1	COMBUSTÍVEIS UTILIZADOS	38
3.1.1	Etanol.....	38
3.1.2	Gás Natural Veicular (GNV)	39
3.1.3	Misturas de etanol-GNV	40
3.2	MOTOR FLEX ADAPTADO COM SISTEMA DE INJEÇÃO DE GÁS	41
3.3	ENSAIOS NO MOTOR FLEX ADAPTADO	44
3.3.1	Descrição da bancada experimental.....	44
3.3.2	Analizador de gases.....	45
3.3.3	Dinamômetros	47
3.3.4	Reservatórios para combustível	49
3.3.5	Termoanemômetro digital	50
3.3.6	Condições de execução dos testes em dinamômetro ativo.....	51
3.3.7	Programação dos ensaios no motor Flex adaptado	51

3.4	METODOLOGIAS UTILIZADAS	51
3.4.1	Análise do comportamento da combustão	51
3.4.2	Análise do desempenho do motor	52
3.4.3	Determinação do custo operacional	55
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	57
4.1	ANÁLISE DA COMBUSTÃO DO MOTOR FLEX ADAPTADO	57
4.1.1	Ensaio para misturas de etanol-GNV em condição estacionária	57
4.1.2	Ensaio para misturas de etanol-GNV utilizando-se o dinamômetro ativo	59
4.2	ANÁLISE DE DESEMPENHO DO MOTOR FLEX ADAPTADO	63
4.2.1	Determinação da potência	64
4.2.2	Análise da eficiência térmica	65
4.2.3	Análise da eficiência volumétrica	67
4.2.4	Análise da eficiência mecânica	68
4.2.5	Análise do consumo específico de combustível	69
4.3	ANÁLISE DO CUSTO OPERACIONAL	70
5	CONCLUSÕES	72
5.1	SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS	72
	REFERÊNCIAS	73
	APÊNDICE A: ENSAIOS PRELIMINARES	79
	APÊNDICE B: PROGRAMAÇÃO DOS ENSAIOS NO MOTOR FLEX ADAPTADO	85
	APÊNDICE C: ENSAIOS EM CONDIÇÃO ESTACIONÁRIA	86
	APÊNDICE D: ENSAIOS NO DINAMÔMETRO ATIVO	88
	APÊNDICE E: ANÁLISE DE DESEMPENHO DO MOTOR FLEX ADAPTADO	94
	APÊNDICE F: ANÁLISE DO CUSTO OPERACIONAL	96
	ANEXO A: LAUDO DAS POTÊNCIAS (KWH)	97

1 INTRODUÇÃO

O uso de combustíveis fósseis se faz presente em quase todos os tipos de veículos. A queima de combustíveis fósseis em motores de combustão interna, ao longo do seu ciclo de vida, emite grandes quantidades de gases efeito estufa (GEE), os quais afetam de forma significativa a qualidade do meio ambiente (EYIDOĞAN et al. 2010; KLELL; EICHLSEDER; SARTORY, 2012; MASUM et al. 2013; NAVARRO; LEO; CORRAL, 2013). Dentre os GEE, o dióxido de carbono (CO_2) é o mais relevante devido a que está diretamente relacionado com o aquecimento global (KLELL; EICHLSEDER; SARTORY, 2012).

Atualmente com a finalidade de reduzir as emissões de GEE, a legislação ambiental está cada vez mais severa, colocando limites mais restritos às emissões de gases de exaustão veicular. Além disso, melhorar o consumo específico de combustível e a eficiência dos motores de combustão interna tornaram-se fundamentais (MARTINS; ROCHA; SODRÉ, 2014). Nos veículos com motor do ciclo Otto, o combustível mais utilizado é a gasolina, porém devido a problemas associados ao seu uso, tais como quantidade de veículos, aquecimento global, emissões de GEE, instabilidade dos preços e esgotamento das reservas do petróleo, motivam o desenvolvimento de pesquisas para a viabilização da aplicação de outras fontes de combustível.

Dessa forma, diversas alternativas têm sido propostas, tais como o uso de biocombustíveis, combustíveis de menor impacto ambiental (baixo carbono) e combustíveis alternativos, assim como as suas possíveis misturas. Comercialmente, o etanol é o combustível mais representativo entre os biocombustíveis. O gás natural veicular (GNV) é considerado como o combustível fóssil de menor impacto ambiental (KHAN et al. 2016). Entre os combustíveis alternativos, temos o metanol, butanol, dimetil-eter, hidrogênio, gás liquefeito de petróleo (GLP), biogás (SALVI; SUBRAMANIAN; PANWAR, 2013). Na prática, a mistura de combustíveis tem por finalidade aproveitar principalmente as vantagens de cada um dos combustíveis (MOMENI MOVAHED; BASIRAT TABRIZI; MIRSALIM, 2014). O motor do ciclo Otto pode operar também com misturas de combustíveis líquido/líquido (KARAVALLAKIS et al. 2012; MELO et al. 2012; CANAKCI et al. 2013; TURKCAN; OZSEZEN; CANAKCI, 2013; BALKI; SAYIN; CANAKCI, 2014; THOMAS et al. 2016; SAKAI; ROTHAMER, 2017), gás/gás (THURNHEER; SOLTIC;

DIMOPOULOS EGGENSCHWILER, 2009; THURNHEER; SOLTIC; DIMOPOULOS EGGENSCHWILER, 2009; DENG et al., 2011; KLELL; EICHLSEDER; SARTORY, 2012; MORENO et al. 2012; NAVARRO; LEO; CORRAL, 2013; CHUGH et al. 2015; KACEM et al. 2016) e líquido/gás (GREENWOOD et al. 2014 ; WANG et al. 2014; MOVAHED et al. 2014; MOMENI; BASIRAT e MIRSALIM, 2014; GENCHI e PIPETONI, 2015; NIU et al. 2016).

Atualmente, no Brasil, usam-se comercialmente o etanol hidratado, gasolina (com até 27% de etanol anidro na sua composição) e o GNV. O etanol veicular passou a ser utilizado a partir do programa PRO-ÁLCOOL, nos anos 70 devido à crise do petróleo. A gasolina E27 é uma mistura de combustível líquido/líquido, composta por gasolina pura com 27% de etanol anidro. Esta mistura é usada também em veículos com motor Flex (MARTINS; ROCHA; SODRÉ, 2014; MELO et al. 2012). No caso do gás natural, seu uso em veículos teve início pelo Decreto nº 1787, de 12 de janeiro de 1996.

Devido ao crescimento da frota de veículos Flex, espera-se uma maior demanda por combustíveis. Segundo o Departamento Nacional de Trânsito (DENATRAN¹), no Brasil, a frota nacional de veículos automotores de passageiros em operação até junho de 2016, era de 50.530.969 veículos. Em relação aos combustíveis, a oferta de etanol depende muito da produtividade da cana-de-açúcar, a qual depende das condições climáticas (temperatura, período de chuvas, etc.). Assim, o preço e a oferta do etanol podem ter algumas oscilações e o preço da gasolina E27 está sujeito às variações do preço do etanol anidro e às variações do preço internacional do barril de petróleo. Consequentemente, um incremento no preço do petróleo, induzirá o uso de combustíveis de menor custo, tais como o etanol e o GNV. Entretanto, se o preço do etanol também aumenta, motiva o uso de GNV. Atualmente, muitos veículos com motor Flex estão sendo convertidos para uso com GNV, principalmente devido ao seu baixo custo. No entanto, o motor a GNV exibe uma série de desafios devido principalmente à oferta de GNV e estações de abastecimento, problemas técnicos entre os mais importantes, a temperatura e a perda de potência (BALKI; SAYIN, 2014; THOMAS et al. 2016).

Com a finalidade de reduzir as emissões de GEE, garantir a segurança energética de

¹ DENATRAN - Disponível em <http://www.denatran.gov.br/frota2014.htm>, acesso em 18 Ago. 2016.

combustíveis e aumentar o desempenho dos motores Flex, o uso de misturas combustíveis líquido/gás tais como etanol-GNV, mostra-se como uma opção atrativa, uma vez que estes combustíveis estão disponíveis no mercado nacional. O etanol e o GNV são menos poluentes quando comparados com a gasolina (BIELACZYC et al. 2015; ELFASAKHANY, 2015; ELFASAKHANY, 2016). A mistura aproveita as principais vantagens de ambos os combustíveis e promove o consumo sustentável. Entretanto, o estudo de misturas líquido/gás em comparação com os outros tipos de misturas de combustíveis tem sido pouco explorado. Aliás, os trabalhos disponíveis se concentram principalmente no uso de misturas gasolina-GNV (MOMENI MOVAHED; BASIRAT TABRIZI; MIRSALEM, 2014), observando-se uma carência de pesquisas envolvendo misturas etanol-GNV.

Nesse contexto, este trabalho apresenta uma alternativa para o setor de transporte brasileiro pelo estudo de misturas do etanol-GNV para veículos com motor Flex. Os resultados darão subsídio a uma nova perspectiva quanto ao rendimento dos combustíveis, economia e emissões de GEE, prováveis de impactar na qualidade do ar nos grandes centros urbanos, além de mitigar as mudanças climáticas.

1.1 OBJETIVOS

Avaliar o desempenho e as emissões de um motor Flex ao operar com etanol, GNV e pela injeção concomitante de misturas compostas por etanol-GNV.

1.1.1 Objetivos específicos

1. Realizar os ajustes no sistema de injeção de um motor Flex para receber os dois combustíveis estudados (o etanol e o GNV);
2. Proceder a montagem e instrumentação da bancada para os ensaios experimentais;
3. Executar os ensaios preliminares e calibração do sistema de medição;
4. Definir as condições para os ensaios de combustão para diferentes misturas bifásicas de etanol-GNV;
5. Executar ensaios no motor Flex com etanol, GNV e mistura com diferentes proporções de ambos;
6. Medir a potência desenvolvida pelo motor com as diferentes misturas de etanol-

GNV e comparar com o desempenho do mesmo com um único combustível (etanol e GNV);

7. Medir e avaliar a composição dos gases de exaustão gerados nos testes com etanol, GNV e para as diferentes misturas etanol-GNV;
8. Determinar o custo operacional do motor operando com as misturas etanol-GNV;
9. Avaliar a viabilidade do uso de misturas etanol-GNV em motores Flex.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 MOTOR DE COMBUSTÃO INTERNA DO CICLO OTTO

2.1.1 Motores convencionais

O invento do engenheiro alemão Nicolaus August Otto, em 1876, o motor de combustão interna (MCI) por centelha a gasolina, deu início à revolução do transporte, cujo princípio de funcionamento é utilizado ainda pela maioria dos veículos atuais (HEYWOOD J.B, 1988). Os motores de combustão interna são máquinas térmicas que transformam a energia química dos combustíveis, a partir da sua combustão, em calor para logo ser convertido em trabalho mecânico (BAE; KIM, 2017; HEYWOOD J.B, 1988).

Os motores do ciclo Otto utilizam como fonte primária de energia a gasolina, etanol, metanol, butanol, gás liquefeito de petróleo e o GNV para liberação de energia no processo de combustão, que acontece, por exemplo, em 4 tempos: admissão, compressão, combustão e escape (HEYWOOD J.B, 1988).

Para cada combustível, o motor opera numa razão de compressão específica, por exemplo, 9:1 para a gasolina, 12,5:1 para o etanol e 15:1 para o GNV. Nos últimos 50 anos os MCI tiveram muitos avanços tecnológicos com vistas à redução do (1) consumo específico de combustível, (2) emissões, (3) atrito e (4) aumento da eficiência térmica. A eficiência térmica de MCI varia de 26 a 30% para os motores a gasolina; 34 a 40% para os motores a diesel (CHAVES, 2013).

2.1.2 Motores *flex-fuel* (Flex)

Os motores Flex foram lançados no Brasil em 2003, cuja tecnologia transformou o motor convencional em um motor que é capaz de funcionar com mais de um combustível ao mesmo tempo, misturados em qualquer proporção (LARANJA, 2010; MELO et al. 2012). A principal característica do motor Flex é a taxa de compressão, sendo menor do que nos motores dedicados a etanol e maior do que nos motores a gasolina (OLANYK, 2013).

2.1.3 Motores com sistema a GNV

Os motores do ciclo Otto com sistema a GNV são denominados *bi-fuel*, uma vez que podem funcionar alternadamente com gasolina ou GNV, etanol ou GNV, e não com a mistura de ambos. Os primeiros motores a GNV surgiram na Itália em 1930, porém somente na década de 1970 o GNV foi consagrado como um combustível alternativo para uso em MCI, principalmente pelo fato da crise do petróleo em 1973. Porém, foi a partir de 2000 que o mercado de automóveis a GNV se tornou mais atraente (KHAN; YASMIN; SHAKOOR, 2015).

No Brasil, o uso do GNV em motores se iniciou pelo Decreto nº 1787, de 12 de janeiro de 1996, quando o governo federal autorizou o consumo do GNV nos seguintes tipos de veículos: frota de ônibus urbanos e interurbanos, veículos de carga e transporte, frotas de serviços públicos, frotas cativas de empresas, táxi e veículos particulares.

A idéia original era de se utilizar o GNV como substituto do óleo diesel para a propulsão da frota de veículos pesados nos centros urbanos, composta por micro-ônibus, ônibus e caminhões diversos. Em 1992 houve a liberação do uso de GNV para taxistas e frotas de empresas. Em 1996 o governo concedeu a isenção de impostos para os taxistas que optassem pelo uso de GNV, o que acarretou em uma grande renovação da frota de veículos, principalmente em São Paulo. A partir de 1997 até os dias de hoje é liberado o uso de GNV para veículos particulares como substituto da gasolina e do etanol, com a conscientização dos benefícios ambientais de seu uso, que resultou numa grande demanda de GNV com um maior número de postos de serviço oferecidos ao público (GASNET, 2017).²

O início da tecnologia do GNV foi em motores carburados, passando pela injeção eletrônica e, atualmente, são instalados nos veículos com sistemas sequenciais de injeção eletrônica que funcionam em série com a central de comando original do veículo. Estes, possuem eletroinjetores dedicados que são instalados no coletor de admissão, de forma sequencial, um para cada cilindro. Nestes equipamentos o avanço da ignição é configurado eletronicamente para cada faixa de trabalho, permitindo menores perdas de potência

² www.gasnet.com.br, acessado em 18 Mar 2017

(LARANJA, 2010).

O desempenho do motor do ciclo Otto usando GNV tem estreita relação com a taxa de compressão. No trabalho Laranja (2010) foram feitos experimentos e ajustes de otimização para o uso de GNV em motor FIRE³ da FIAT com diferentes valores de taxa de compressão (11:1, 12,5:1 e 15:1). O autor concluiu que o desempenho do motor abastecido com GNV operando nas taxas de compressão de 12,5:1 e 15:1 foi bem melhor ao obtido na taxa de compressão de 11:1. Não foram encontradas diferenças significativas entre as taxas de compressão de 12,5:1 e 15:1, mas apresentou um consumo específico menor para a taxa de compressão 15:1.

2.2 COMPOSIÇÃO DOS GASES DE EXAUSTÃO

A composição dos gases de exaustão pode alterar em função da combustão, a qual tem relação direta com as propriedades físico-químicas do combustível, além das condições de operação, tais como temperatura e pressão da câmara de combustão, tempo de injeção, rotação do motor e relação ar/combustível (HEYWOOD J.B, 1988).

Os GEE referem-se ao dióxido de carbono (CO_2) e vapor de água (H_2O), além dos poluentes como monóxido de carbono (CO), óxidos de nitrogênio (NO_x), hidrocarbonetos não queimados (HC), aldeídos (RHO) e compostos orgânicos voláteis (COV). O CO_2 está diretamente relacionado ao aquecimento global (EYIDOGAN et al. 2010; KLELL; EICHLSEDER; SARTORY, 2012; MASUM et al. 2013; NAVARRO; LEO; CORRAL, 2013).

Considerando uma combustão completa, os gases resultantes são CO_2 , H_2O e nitrogênio (N_2), principalmente. Entre esses gases, o CO_2 tem maior destaque do ponto de vista ambiental devido a sua relação com o efeito estufa. Outros gases também são formados, tais como os NO_x , HC , CO e COV (CARLOS; QUIROGA, 2016).

Gases como NO_x , CO , assim como os materiais particulados (MP), além de serem poluentes no meio ambiente, dependendo da concentração, podem influenciar na saúde

³ FIRE - Fully Integrated Robotized Engine.

humana. Por exemplo, a intoxicação por CO reduz a oxigenação do sangue, provocando náuseas; o NOx provoca problemas respiratórios; o MP pode atingir os alvéolos pulmonares causando irritações, asma, bronquite e câncer no pulmão (DRUMM et al. 2014).

Os estudos desenvolvidos por YE et al. (2000) com ratos e embriões de *hamsters* investigaram os efeitos da poluição atmosférica oriunda dos veículos na cidade de Xangai (China). Todos os resultados mostraram que as emissões dos veículos podem não só induzir a efeitos adversos sobre o sistema respiratório e imunológico das pessoas expostas à poluição, mas também são potencialmente cancerígenas para os seres humanos.

No Brasil, para o controle dos gases de exaustão dos veículos do ciclo Otto, o Ministério do Meio Ambiente, pela Resolução (CONAMA, 2009) nº 315, de 29 out. 2002, estabeleceu os limites máximos de emissões de poluentes, que passou a vigor a partir de 1º jan. 2009, sendo: monóxido de carbono (CO) 2,7 g/km; hidrocarbonetos (HC) somente para veículos a GNV, 0,50 g/km; hidrocarbonetos não metano (NMHC) 0,06 g/km; óxidos de nitrogênio (NOx) 0,25 g/km; aldeídos (R-HCO), (exceto GNV), 0,04 g/km; teor de monóxido de carbono em baixa rotação, 0,50% vol.

Todas estas emissões devem ser atendidas pelo fabricante, porém somente o HC e CO são exigidas na inspeção quando um veículo é adquirido ou adaptado para o uso de GNV.

Na Tabela 1 são apresentados os limites máximos de emissões por motores do ciclo Otto, considerando o ano de fabricação, permitidos pela Resolução CONAMA NR 418, de 25 nov. 2009.

Tabela 1: Limites de concentração de HC (ppm) e CO (%vol.) nos gases de exaustão permitidos.

Ano de Fabricação	Motores projetados para determinados combustíveis							
	Gasolina		Etanol		Flex		GNV	
	HC	CO	HC	CO	HC	CO	HC	CO
1997 – 2002	700	1,0	700	1,0	na	na-	700	1,0
2003 – 2005	200	0,50	250	0,50	200	0,50	500	1,0
2006 - Atual	100	0,30	250	0,50	100	0,30	500	1,0

Obs.: na – não aplicável.

Fonte: Resolução CONAMA NR 418, de 25 nov. 2009.

Para avaliação das emissões são usados os limites máximos estabelecidos para o ano 2006. Isto significa que independentemente da mistura e da condição de operação, a concentração do gás nas emissões não deverá ultrapassar esses valores. Entretanto, neste trabalho, o limite para a concentração de NO_x será a maior obtida em alta rotação quando o motor é abastecido com os combustíveis puros. A seguir se apresentará brevemente uma explanação dos principais gases poluentes.

2.2.1 Dióxido de carbono

Em motores de combustão interna a emissão de dióxido de carbono (CO_2) é proporcional ao consumo de combustível, porém a legislação brasileira e de outros países não fala em limites máximos e a frota de automóveis com este tipo de motor vem aumentando significativamente, contribuindo com o aumento do efeito estufa (CARVALHO, 2011).

O CO_2 é um dos principais componentes da combustão, o qual se forma pela oxidação completa do carbono. Em motores de combustão interna, a análise da emissão de CO_2 é importante para verificar a eficiência da combustão, que aumenta quando tende a ser completa (MARTINS; ROCHA; SODRÉ, 2014). Para Bielaczyc et al. (2015), a emissão de CO_2 é considerada um indicador importante da eficiência energética do motor.

2.2.2 Monóxido de carbono

O monóxido de carbono (CO) é resultado da oxidação incompleta do carbono. É comum o motor emitir altas concentrações de CO em partidas frias e rotações transientes (ERAN SHER, 1998).

Formado na combustão pela falta de oxigênio e baixa temperatura, o CO é um gás de alta toxicidade, sendo considerado um gás asfixiante (CARVALHO JR; LACAVA, 2003).

Os veículos frequentemente operam em regime de mistura rica devido ao aquecimento do motor, assim como nas operações transientes as emissões de CO são bastante consideráveis (OLANYK, 2013).

As emissões de CO nos gases de exaustão são importantes, pois representam perda de energia devido à combustão incompleta. Uma das formas de melhorar o processo da

combustão em motores do ciclo Otto a gasolina é adicionar etanol à gasolina, uma vez que esse combustível é oxigenado (BALKI; SAYIN; CANAKCI, 2014).

Quando a reação de oxidação do combustível não é estequiométrica, uma fração de energia química não é liberada dentro da câmara de combustão e sai na forma de CO (HEYWOOD J.B, 1988).

2.2.3 Hidrocarbonetos

A concentração de hidrocarbonetos (HC) nos gases de exaustão está associada com a capacidade de mistura entre os reagentes e o tempo de residência da câmara de combustão (CARVALHO JR; LACAVA, 2003). A emissão de HC está ligada diretamente com as características de queima do combustível (ROCHA, 2014). Os derivados de petróleo têm níveis mais elevados de concentração deste gás quando comparado com os combustíveis renováveis, como etanol e biodiesel (ROCHA, 2014). A emissão deste gás é alta quando a combustão opera na região rica e cai à medida que a razão ar/combustível (λ) se aproxima do ponto estequiométrico ($\lambda=1$) (BRAGA, 2007).

2.2.4 Óxidos de nitrogênio

O óxido de nitrogênio (NO_x) é a denominação dada para as emissões de óxido nítrico (NO) e dióxido de nitrogênio (NO₂). O NO_x está presente na química da atmosfera. As principais fontes emissoras são a queima de combustíveis fósseis e de biomassa. Os gases de NO_x na atmosfera desencadeiam reações que provocam chuva ácida. (TEIXEIRA; FELTES; SANTANA, 2008). Na atmosfera, em contato com o vapor d'água, os NO_x formam o ácido nítrico, o qual é um dos constituintes da chuva ácida com impactos ambientais (CARVALHO JR; LACAVA, 2003).

A formação de NO_x na combustão em motores depende principalmente da temperatura da câmara de combustão. A maior concentração desse gás se dá no ponto estequiométrico, em que ocorre a maior geração de calor e a máxima temperatura (HEYWOOD J.B, 1988). Em motores de combustão interna por centelha, predomina a formação de NO. A formação de NO₂ é peculiar do processo da combustão em motores de ignição por compressão (ERAN SHER, 1998).

De acordo com Masum et al. 2013, a formação do NO_x térmico ocorre em temperatura menor que a oxidação de hidrocarbonetos. Durante a combustão a formação do NO_x térmico pode ser explicado conforme a cinética proposta por Zeldovich ($O+N_2 \leftrightarrow NO+N$; $N+O_2 \leftrightarrow NO+O$; $N+OH \leftrightarrow NO+H$) e a partir da origem do combustível. A parcela de NO_x derivada da composição química do combustível é desprezível.

2.3 COMBUSTÍVEIS CONVENCIONAIS

Os motores do ciclo Otto podem operar com hidrocarbonetos, tais como a gasolina, o gás liquefeito de petróleo (GLP) ou GNV e álcoois como o etanol (CHAVES, 2013).

A gasolina é uma mistura de hidrocarbonetos saturados, olefínicos e aromáticos. É obtida pelo processos de refino do óleo cru (CHAVES, 2013). No Brasil, a gasolina mais comercializada para veículos automotores leves é a gasolina comum (gasolina tipo C), que contém quantidades de 20 a 27% de etanol anidro, sem nenhum tipo de corante ou aditivo. A gasolina comum, possui um índice antidetonante de 87 e um teor de enxofre de 50 ppm. Existe também a gasolina aditivada que se diferencia da comum principalmente pelo menor teor de enxofre de até 30 ppm e índice antidetonante de 95, além disso, possui aditivos dispersantes, detergentes, corantes (cor levemente alaranjada) (PETROBRÁS, 2016)⁴.

O etanol de cana de açúcar foi o primeiro combustível renovável a ser utilizado em larga escala no Brasil e já provou sua viabilidade técnica e econômica. É uma fonte inesgotável de energia que possui imenso potencial de aumento da produção, seja via ampliação da área plantada ou pelo aumento na produtividade agrícola. Pode ser produzido a partir da cana-de-açúcar, da beterraba, do milho e do trigo, o que permite a obtenção do produto nas mais diferentes regiões geográficas⁵.

Sob o ponto de vista ambiental, as emissões de gases geradas na combustão do etanol

⁴PETROBRÁS - Disponível em <http://www.petrobras.com.br/pt/produtos-e-servicos/produtos/automotivos/gasolina>, acesso em 13 Ago. 2016)

⁵Ministério do Desenvolvimento, Indústria e Comércio Exterior, disponível em www.bndes.gov.br/bibliotecadigital).

em um motor, principalmente CO e HC, são menores comparadas à gasolina. Olanyk (2013) afirma que as emissões de CO₂ do etanol são consideradas neutras. Ressalta-se, entretanto, que as diretrizes do IPCC⁶ não consideram que a produção de energia a partir da biomassa como "carbono neutro", mesmo que a biomassa seja produzida de forma sustentável. Uma atividade de produção de energia somente pode ser classificada como neutra em emissões de carbono se ela não produz nenhum aumento líquido de GEE na base de seu ciclo de vida (BRACMORT; SISSINE, 2015). Considerando todo o ciclo de vida da cana de açúcar, desde o plantio até a utilização do combustível nos automóveis, em 2010, o EPA classificou ainda o etanol de cana-de-açúcar como um combustível avançado, capaz de reduzir as emissões de GEE de 61% a 91% em relação à gasolina (UNICA⁴).

A crise do petróleo ocorrida em 1973 fez que o Brasil criasse o PROÁLCOL, que a partir de 1975 produzisse o etanol da cana-de-açúcar em substituição à gasolina. Surgiu com a finalidade de evitar as políticas de preços realizadas pelos países exportadores de petróleo. Outros países o produzem a partir do milho (Estados Unidos da América), ou da beterraba e trigo nos países da Europa (CHAVES, 2013).

O etanol é usado no Brasil desde 1930, quando o governo autorizou a adição de 5% à gasolina. A partir 1975, em virtude da crise do petróleo de 1973, a adição de etanol anidro na gasolina passou a ser 25%, além do incentivo à fabricação de veículos dedicados a etanol (LEITE et al., 2009). O etanol é apropriado para a utilização em motores do ciclo Otto, uma vez que apresenta propriedades físico-químicas semelhantes à gasolina.

O gás natural veicular (GNV) contém principalmente moléculas de hidrocarbonetos de baixo peso molecular, sendo o metano (CH₄) seu principal constituinte (89%). O uso de GNV em motores de combustão interna oferece vantagens tais como alta resistência à detonação, baixa emissão de CO₂, além de ser mais econômico (BALOO et al., 2015). O emprego do GNV para o setor de transporte é incentivado pelos aspectos ambientais, econômicos e de segurança, além da sua eficiência (KHAN; YASMIN; SHAKOOR, 2015). O uso do GNV promove a geração de emprego, como em estações de abastecimento, além da redução dos gases de efeito estufa na ordem de 20 a 29% comparado com a gasolina e reduz a

⁶IPCC - Intergovernmental Panel on Climate Change, disponível em https://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/syr/SYR_AR5_FINAL_full.pdf

dependência do uso do petróleo (PATEL et al. 2016; KHAN et al. 2016).

Do ponto de vista ambiental, o gás natural apresenta algumas vantagens, como a menor emissão de gases poluentes comparado ao diesel e à gasolina. Sob o ponto de vista estratégico, o uso do GNV viabiliza uma diversificação da matriz energética. Entretanto, por ser um combustível fóssil, sua utilização pressupõe a retirada de carbono do subsolo e, assim, contribui com o aumento do efeito estufa (Ministério do Desenvolvimento, Indústria e Comércio Exterior, disponível em BNDES).⁷

Em condições normais de temperatura e pressão, o gás natural tem uma massa específica de 0,714 kg/Nm³. Para ser utilizado como um combustível veicular é comprimido a 220 bar por polegada ao quadrado (CARVALHO JR; LACAVA, 2003). O consumo de GNV no setor de transporte no Brasil decresceu, sendo que passou de 1,711 milhões de TEP para 1,594 milhões de TEP (EPE, 2016) no período de 2005 a 2014.

2.4 COMBUSTÍVEIS ALTERNATIVOS

Os combustíveis alternativos são aqueles usados em substituição parcial ou total dos combustíveis fósseis convencionais tais como a gasolina e óleo diesel. O uso de combustíveis alternativos ganhou atenção devido à instabilidade do preço e da disponibilidade dos combustíveis fósseis convencionais, além disso, da aplicação de limites de emissões cada vez mais rigorosos.

O significado do uso de combustíveis alternativos pode ser atribuído aos seguintes aspectos: (1) busca da sustentabilidade energética pelo uso prolongado de fontes de energias renováveis, mitigando as preocupações de energia limitada de combustíveis fósseis; (2) melhoria da eficiência do motor e a redução das emissões com o auxílio de propriedades físicas ou químicas superiores aos combustíveis convencionais; (3) alívio do uso desequilibrado de combustíveis fósseis à base de petróleo (BAE; KIM, 2017).

Os combustíveis alternativos são amplos. Incluem os álcoois, dentre os mais usados o etanol (incluindo misturas com gasolina 85%) e o metanol (CH₃OH); biodiesel (B100);

⁷ www.bndes.gov.br/bibliotecadigital

derivados de materiais biológicos, combustíveis que são substancialmente de origem não-petrolífera, podem produzir segurança energética e benefícios ambientais. Os combustíveis gasosos, tais como gás natural comprimido (GNC) e o gás liquefeito de petróleo (GLP) são muito utilizados na Ásia e na Europa. Todos esses combustíveis são adequados para motores de ignição por centelha, mas seus parâmetros físico-químicos diferem daqueles da gasolina padrão (BAE; KIM, 2017; BIELACZYK et al., 2015).

O gás liquefeito de petróleo (GLP) é um subproduto da transformação do gás natural ou da refinação do petróleo bruto. Consiste principalmente em propano e quantidades variadas de butano, propileno e butilenos. Em outros países, este é comumente utilizado em veículo de frota, táxi, ônibus escolares e automóveis particulares e, no mundo, é também aplicado para uso doméstico e industrial (YUNES A. ÇENGEL AND MICHAEL A. BOLES, 2015).

O biogás pode ser produzido a partir de uma grande diversidade de fontes, contanto que contenham material orgânico. Como exemplo pode-se citar fontes os esgotos municipais, resíduos agrícolas, lixões e estrume. Dependendo da fonte, a composição do biogás pode variar significativamente, mas o componente dominante será sempre o metano. A conversão da massa orgânica em biogás é geralmente realizada por biodigestão anaeróbica. A vantagem principal e mais significativa do biogás como combustível alternativo é que pode ser produzido a partir de fontes de energia renováveis. Sendo o biogás formado principalmente por metano, seus efeitos sobre as emissões de gases de escape serão semelhantes aos do gás natural (ERAN SHER, 1998).

O hidrogênio (H_2) como combustível rodoviário desperta grande interesse dos pesquisadores e da comunidade científica. O motor a H_2 é atrativo em relação às emissões de CO, HC e CO_2 . Além disso, não há grandes problemas na concepção de um motor para funcionar com misturas de combustíveis fósseis e H_2 . No entanto, o H_2 apresenta alguns desafios como a sua contenção no reservatório. É extremamente perigoso em casos de colisão. Além disto, a sua distribuição nas estações de abastecimento é outro grande desafio (ERAN SHER, 1998). O H_2 pode ser utilizado puro ou em misturas com outros combustíveis. Sua presença na mistura leva ao aumento na eficiência de conversão do combustível e redução das emissões no motor de combustão devido à diminuição na duração da combustão, que pode ser atribuída à sua elevada velocidade da chama laminar (SHIVAPUJI; DASAPPA, 2015).

2.5 MISTURAS DE COMBUSTÍVEIS

A busca pelo aumento do desempenho e redução das emissões dos MCI levou ao estudo das possíveis misturas entre os combustíveis fósseis e renováveis. Na prática, a mistura de combustíveis tem por finalidade aproveitar, principalmente, as vantagens de cada combustível. O motor do ciclo Otto pode operar com misturas de diferentes combustíveis, independentemente da fase, tais como misturas líquido/líquido, gás/gás e líquido/gás.

Destaca-se que as misturas líquido/líquido são de imediata aplicação, uma vez que não são necessárias modificações no sistema de injeção. A literatura apresenta uma quantidade expressiva de pesquisas sobre misturas de combustíveis líquido/líquido, os quais são descritos na sequência.

Karavalakis et al.(2012) investigaram o impacto da mistura de etanol-gasolina nas emissões de hidrocarbonetos não queimados (UHC), monóxido de carbono (CO), óxidos de nitrogênio (NOx) e dióxido de carbono (CO₂) em sete diferentes MCI veicular. Os autores fizeram os testes com diferentes percentuais de adição de etanol à gasolina (10, 20, 50 e 85%). Os resultados demonstraram que a mistura com etanol reduz significativamente as emissões de CO e NOx, porém não foi observada redução significativa para o CO₂. No entanto, a mistura com 85% de etanol e 15% de gasolina pura produziu significativa emissão de formaldeído (CH₂O), o qual é um gás incolor e extremamente irritante para as mucosas em condições ambientes.

Melo et al. (2012) investigaram a combustão e as emissões de CO, HC, NO_x e CO₂ de um motor Flex 1400 cc em dinamômetro de chassi com diferentes misturas de etanol e gasolina em várias condições de operação. Neste estudo a adição de etanol reduziu as emissões de CO e HC, porém aumentou a emissão de CO₂, aldeídos e etanol não queimado. A emissão de NOx apresentou uma tendência complexa com a adição de etanol, dependendo das condições de operação, tempo de ignição e outros parâmetros.

Canakci et al. (2013) investigaram os impactos da mistura etanol/gasolina e metanol/gasolina nas emissões de um motor de ignição comandada em testes no dinamômetro de chassi aplicando potência de rodas de 5, 10, 15 e 20 kW. Nos testes, os autores utilizaram misturas de 5 e 10% de etanol à gasolina pura e 5 e 10% de metanol à gasolina pura e compararam com a gasolina pura. Verificaram que na velocidade de 80 km/h as emissões de CO, CO₂, HC e NOx decresceram. No entanto quando a velocidade do veículo foi alterada de

80 para 100 km/h, observaram tendências complexas nas emissões de escape para as misturas de combustível, especialmente para a tração de 15 kW. Constataram também que a relação de equivalência de ar e combustível aumentou com o aumento de etanol ou metanol em percentagens quando comparado ao caso gasolina pura.

Turkcan; Ozsezen; Canakci (2013) estudaram os efeitos da injeção concomitante de etanol e metanol em um motor de combustão interna a gasolina sobre as características de combustão e emissões geradas. Os resultados mostraram que as melhores características de combustão, com menores emissões de NO_x, HC, CO e melhores valores de eficiência indicados foram obtidos usando a injeção concomitante de combustível para as misturas metanol-etanol-gasolina em comparação com a gasolina pura.

Balki; Sayin; Canakci (2014) estudaram os efeitos de diferentes combustíveis de álcool (metanol e etanol) nas características de desempenho, emissão e combustão de um motor a gasolina. Os resultados mostraram que o uso de álcool combustível aumentou o torque do motor, o consumo específico de combustível, a eficiência térmica e a eficiência de combustão. Além disso, a emissão de CO₂ aumentou enquanto as emissões de HC, CO e NO_x diminuíram.

Thomas et al. (2016) investigaram a eficiência térmica e as emissões de um motor de combustão interna monocilíndrico submetido a diferentes taxas de compressão (7:1, 8,5:1 e 10:1), abastecido com gasolina pura e mistura de 20% de n-butanol (B20) na gasolina. Observaram que a eficiência térmica aumentou em função do aumento da taxa de compressão, independente da carga do motor, especialmente quando foram utilizados combustíveis com melhores características antidetonante. Concluíram que uma aplicação criteriosa do conceito de taxa de compressão variável em diferentes condições de carga é uma alternativa viável para melhor desempenho do motor, bem como características de emissão. Além disso, observaram que o uso de combustíveis alcoólicos, como o n-butanol, melhorou o desempenho do motor com maiores proporções de compressão.

Sakai; Rothamer (2017) investigaram o efeito da adição de etanol à gasolina em motor de combustão interna monocilíndrico em ampla faixa de funcionamento com diversas proporções de etanol misturado à gasolina. Os resultados mostraram que a adição do etanol à gasolina contribui para a diminuição de materiais particulados nos gases de exaustão. No entanto existe um ponto crítico na mistura que promove o aparecimento de fumaça.

Referente ao estudo de misturas gás/gás, a literatura apresenta principalmente

estudos envolvendo GNV, GLP, H_2 , gás de síntese, biogás e as possíveis misturas destes combustíveis. As misturas mais estudadas são as de GNV e H_2 .

Thurnheer; Soltic; Dimopoulos Eggenschwiler (2009) realizaram um estudo experimental do desempenho de diferentes combustíveis usados em motores de combustão interna tais como, gasolina, CH_4 e misturas contendo CH_4 com 5%, 10% e 15% de H_2 em volume. Eles observaram que o aumento da fração de H_2 na mistura CH_4 - H_2 decresce a duração total de queima.

Deng et al. (2011) estudaram o comportamento da combustão do GNV com adição de 30, 55 e 75% de H_2 em motor de combustão interna por centelha em várias condições de operação, incluindo diferentes taxas de ar e tempos de ignição. Observaram que as emissões de CO da combustão do CH_4 são reduzidas com a adição de H_2 , porém as emissões de NO_x aumentaram e houve a redução do tempo da combustão. Além disto a adição de H_2 melhorou a eficiência térmica do motor e reduziu o consumo específico de combustível

Klell; Eichlseder; Sartory (2012) examinaram os efeitos de sinergia de uma mistura de H_2 e metano num motor de combustão interna. O estudo demonstrou uma redução das emissões de CO_2 , além do potencial da aplicação deste combustível no setor de transporte.

Moreno et al. (2012b) analisaram a combustão de um motor de combustão interna utilizando diversas proporções gasosas entre metano e H_2 . A presença de H_2 melhorou as características da combustão. O principal inconveniente detectado foi a alta concentração de emissões de NO_x , especialmente em condições estequiométricas, devido principalmente ao aumento na temperatura de combustão provocada pelo H_2 .

Navarro; Leo; Corral (2013) avaliaram as emissões e o desempenho de um motor de combustão interna abastecido com misturas de gás natural e H_2 . Os resultados demonstraram que a máxima pressão do cilindro aumentou em função da fração volumétrica de H_2 . A presença do H_2 na mistura levou ao decréscimo da emissão de CO_2 sem afetar o desempenho do motor.

Kacem et al. (2016) investigaram experimentalmente, pela Dinâmica Computacional de Flúidos em 3D, o efeito do enriquecimento de H_2 no motor a GLP. Analisaram o efeito sobre as características de caudal no cilindro, os desempenhos do motor, as emissões de gases de escape e a influência da geometria do sistema de admissão no comportamento do fluxo da mistura no cilindro. Além disto analisaram a característica de turbulência, a fração de massa

de H_2 , bem como a velocidade de fluxo no cilindro. O desempenho do motor foi investigado com diferentes frações de H_2 (0%, 10% e 20%) na mistura com GLP. Os resultados mostraram que o torque produzido pela mistura GLP- H_2 aumentou em 12% e 20% em comparação com operações com gasolina e GLP comerciais, respectivamente, na fração de H_2 a 20%, com o motor operando em altas rotações. As emissões de CO tenderam a zero com a adição de H_2 ; as emissões de NO_x para a operação com a mistura GLP- H_2 foram reduzidas em 3,25% e 1,89% em relação à gasolina e GLP.

Chugh et al. (2015) realizaram um estudo adicionando 18% de H_2 ao GNV em testes com um motor de combustão interna modificado para funcionar com GNV. Os autores observaram que as emissões de NO_x e CH_4 aumentaram quando comparado ao funcionamento do motor com GNV comercial. Eles verificaram que para reduzir essas emissões, a calibração do motor deve ser otimizada ou o desempenho fica comprometido. Observaram que a característica da combustão do GNV é lenta, porém, a adição de H_2 ao GNV melhora a combustão. Atribuíram essa melhoria à elevada velocidade de chama laminar do H_2 .

Estudos envolvendo misturas líquido/gás, comparado com misturas nas fases líquido-líquido ou gás-gás, ganharam maior importância a partir da última década. Misturas de combustíveis líquidos com gases em motor de combustão interna são possíveis de serem realizadas por meio de uma injeção concomitante. A literatura apresenta diversos estudos de misturas líquido/gás envolvendo principalmente misturas entre a gasolina, etanol e metanol (líquidos) com o GNV e H_2 (gases).

Sopena et al. (2011) investigaram experimentalmente a utilização do H_2 em um veículo WV Polo 1.4 a gasolina tornando-o bicombustível. Incorporaram no veículo um sistema eletrônico de condicionamento e alimentação de H_2 comprimido, cuja mudança de combustível do motor pudesse ser feita por uma chave seletora instalada no painel. A velocidade máxima atingida com o veículo operando com H_2 foi de 125 km/h e o consumo de H_2 na velocidade média de 90 km/h foi de 1 kg para 100 km.

Greenwood et al. (2014) investigaram o desempenho e as emissões geradas em um motor de combustão interna de 2 cilindros (0,750 litros) funcionando com misturas de etanol anidro e H_2 o qual foi modificado para operar tanto com etanol ou com hidrogênio. No estudo foram analisadas misturas de combustível a 0%, 15% e 30% de H_2 operando em regimes de mistura pobre. Os dados foram coletados para calcular as emissões de NO, HC, potência, temperatura dos gases de escape, eficiência térmica, eficiência volumétrica e consumo

específico de combustível. Os resultados dos testes demonstraram que o enriquecimento do etanol com o H_2 reduziu a emissão de NO_x , estabilizou e acelerou o processo da combustão. Além disto, os experimentos mostraram que o motor operando com 15% e 30% de H_2 em volume reduziu a emissão de NO_x em mais de 95% em comparação com a operação no modo gasolina estequiométrico. Esta redução de emissões é comparável à eficiência de um catalisador moderno de três vias às atuais tecnologias de redução de NO_x .

Wang et al. (2014) pesquisaram o desempenho da combustão em condições de mistura pobre com gasolina e hidrogênio operando o motor na rotação de 1400 RPM. Os testes foram realizados com a adição de 0 a 3% de H_2 na gasolina. A proporção de ar foi aumentada desde 1,00 até 1,45 para cada fração de H_2 adicionada. Para as condições de combustão estequiométrica e pobre, a fração de H_2 teve um efeito benéfico para a melhoria da eficiência térmica do motor, bem como para a redução do tempo de chama da combustão. Os testes experimentais demonstraram que o H_2 contribui no sentido da redução das emissões tóxicas incluindo HC, CO e MP.

Momeni Movahed; Basirat Tabrizi; Mirsalim, (2014) investigaram a injeção concomitante de gasolina e GNV num motor de combustão interna turbinado a 25 e 80% de carga do acelerador com rotação acima de 4800 RPM. As frações mássicas de GNV usadas foram 10, 20, 30, 50 e 75%. Os resultados demonstraram melhoria da eficiência térmica e do consumo de combustível, além de menores emissões de CO e HC quando comparado com a gasolina. Observaram também a redução da temperatura do motor, quando comparado com o modo GNV.

Genchi e Pipitone (2015) estudaram experimentalmente um motor de combustão interna que combina a queima de misturas de gasolina e GNV pela ignição por compressão de carga homogênea. Os experimentos foram realizados em um motor CFR (*Cooperative Fuel Research*), no qual dois sistemas de injeção foram usados para o controle preciso da proporção de combustíveis na mistura e razão ar/combustível. Os autores demonstraram que a principal vantagem desse inovador processo de combustão é o notável aumento na eficiência do motor (mais de 23%) e uma forte redução de emissão de NO_x em comparação ao motor convencional com ignição por faísca.

Niu et al. (2016) consideram o H_2 como um combustível de baixa energia de ignição, amplo limite de inflamabilidade e excelente taxa de combustão. A utilização da mistura de gasolina enriquecida com H_2 no motor de combustão por centelha é uma forma favorável no

processo de queima, particularmente na condição de mistura pobre. Os autores analisaram as características estratificadas de mistura pobre de gasolina com H_2 em motor com injeção direta de H_2 . Foram utilizadas 5 frações adicionais de H_2 (3,9 – 5,3 – 7,2 – 8,9 e 10,5%) sob 4 diferentes razões de excesso de ar (1 – 1,2 – 1,5 e 1,8) a 1500 RPM. Os resultados mostraram que a duração da chama e da combustão foram reduzidas. Além disso, com as proporções de H_2 estudadas o motor apresentou maior pressão no cilindro e taxa de liberação de calor, bem como uma melhora da eficiência térmica, sendo que as emissões de HC e CO foram reduzidas, enquanto que a emissão de Nox aumentou. A emissão de material particulado permaneceu em um nível baixo.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Nesta seção é mostrada a organização utilizada no desenvolvimento do trabalho. Apresentam-se a descrição dos insumos, bancada experimental, equipamentos e as metodologias utilizadas.

3.1 COMBUSTÍVEIS UTILIZADOS

3.1.1 Etanol

No estudo foram utilizados combustíveis especificados e autorizados pela Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP), órgão autárquico vinculado ao Ministério das Minas e Energias do Governo Federal, que tem a função de promover a regulação, contratação e fiscalização das atividades econômicas inerentes da indústria do petróleo. Assim foram utilizados o etanol, o GNV e suas misturas, ou seja, etanol-GNV.

O etanol foi adquirido na rede de postos PETROBRAS. De acordo com a Resolução ANP nº. 36, de 2005. Na Tabela 2 apresentam-se as propriedades físico-químicas do etanol.

Tabela 2: Propriedades físico-químicas do etanol hidratado.

Propriedades	Valores/Informação
Fórmula química	C ₂ H ₆ O
Ponto de fulgor	13°C
Ponto de auto-ignição	363°C
Ponto de ebulição	78,4°C
Ponto de solidificação	- 114,3°C
Massa específica	789 kg/m ³ a 25°C
Potencial Energético	28,54 mJ/kg
pH	Entre 6 e 8
Octanagem	110

Fonte: Novacana⁸ – adaptado.

3.1.2 Gás Natural Veicular (GNV)

O GNV utilizado no trabalho foi adquirido da rede de postos de serviço da cidade de Taubaté, SP, distribuído pela Companhia de Gás (COMGAS). A composição química e as propriedades físico-químicas são apresentadas nas Tabelas 3 e 4, respectivamente.

Tabela 3: Composição química do GNV.

Elemento químico	Porcentagem molar (%)
Metano	88,683
Etano	5,844
Propano	2,339
Dióxido de carbono	1,616
Nitrogênio	0,594
Isobutano	0,328
Normal butano	0,443
Isopentano	0,443

Fonte: COMGÁS⁹ – adaptado.

⁸ Propriedades Físico-Químicas do etanol – disponível em <https://www.novacana.com/etanol/propriedades-fisico-quimicas>, acesso em 18 Ago. 2016.

⁹ <http://www.comgas.com.br/pt/gasNatural/conhecaGasNatural/Paginas/conhe%C3%A7a-gas-natural.aspx>

Tabela 4: Propriedades físico-químicas do GNV.

Propriedades	Valores/Informações
Aspecto	Gasoso e inodoro; odorado para distribuição.
Ponto de fusão	-186,6°C a 1 atm.
Ponto de ebulição	-161,4°C a 1 atm.
Limite inferior de inflamabilidade	5% em volume no ar
Limite superior de inflamabilidade	15% em volume no ar
Massa específica	0,65 a 0,80 kg/m ³
Solubilidade na água	0,42 g/100g
Temperatura de autoignição	482 a 632°C
Peso molecular médio	18,387 g/mol
PCI	7.532 a 9306 kcal/m ³ a 1 atm. E 20°C
PCS	8.362 a 10274 kcal/m ³ a 1 atm. E 20°C
Velocidade de chama	35 a 50 cm/s
Temperatura adiabática da chama a 20 °C	No ar: 1957°C – No O ₂ : 2810°C

Fonte: COMGÁS – adaptado.¹⁰

3.1.3 Misturas de etanol-GNV

Foram consideradas diferentes misturas de etanol e GNV, cujas proporções mássicas (% m/m) consideradas se mantiveram a fim de se identificar alguma interação entre os combustíveis (efeito sinérgico), avaliando-se dois casos em que o etanol e o GNV podem ser complementos.

Em geral utiliza-se a nomenclatura “Ex” para mistura de etanol-gasolina, sendo x o percentual de etanol na mistura. Assim, para facilitar na apresentação dos resultados, neste trabalho será utilizada esta mesma nomenclatura para indicar o percentual em massa do etanol presente no combustível. Na Tabela 5 apresentam-se as denominações das misturas

¹⁰ <http://www.comgas.com.br/pt/gasNatural/conhecaGasNatural/Paginas/conhe%C3%A7a-gas-natural.aspx>

consideradas neste estudo, bem como a denominação dos combustíveis comerciais. Observa-se que E0 refere-se ao GNV puro e E100 ao etanol puro.

Tabela 5: Combustíveis utilizados nos ensaios com o motor Flex.

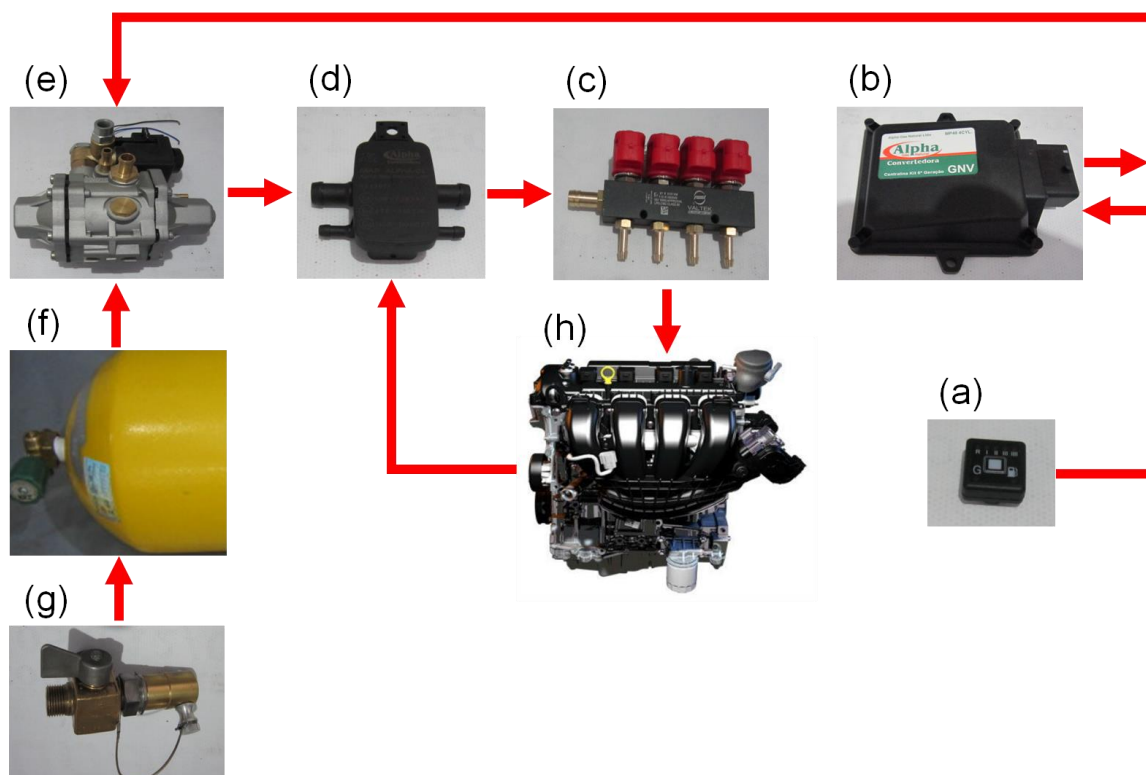
Denominação	Combustíveis Utilizados
E0	100% GNV
E20	20% etanol e 80% GNV
E40	40% etanol e 60% GNV
3E60	60% etanol e 40% GNV
E80	80% etanol e 20% GNV
E100	100% etanol

Fonte: Autoria própria.

3.2 MOTOR FLEX ADAPTADO COM SISTEMA DE INJEÇÃO DE GÁS

Para o desenvolvimento desta pesquisa foi necessário fazer a adaptação do motor. Esta adaptação foi feita pelo próprio autor, uma vez que não existe um sistema de injeção concomitante de GNV-etanol comercial. Assim, foi utilizado um sistema de injeção eletrônica de 5ª geração para GNV, composto principalmente pelas peças mostradas na Figura 1.

Figura 1: Sistema de injeção eletrônica de GNV.



Fonte: Autoria própria.

As peças mostradas na Figura 1 são: (a) chave seletora de combustível, que é instalada no painel do veículo; (b) módulo de gerenciamento eletrônico do sistema GNV; (c) rampa de bicos injetores do GNV, instalada nos dutos do coletor de admissão de ar do motor; (d) sensor de pressão absoluta do coletor de admissão de ar do motor (MAP); (e) válvula redutora de pressão, que reduz a pressão de 200 para 2 bar; (f) cilindro para acondicionamento do GNV e (g) válvula de abastecimento do GNV.

Nos testes foi utilizado um motor Chevrolet 2.0 de duas válvulas por cilindro modelo Flex, o qual apresenta um sistema sequencial de injeção de combustível líquido. As especificações técnicas do motor são apresentadas na Tabela 6.

Tabela 6: Especificações técnicas do motor de combustão interna.

Especificações	Valores/Informações
Número de cilindros	4 cilindros em linha
Diâmetro do cilindro	86 mm
Curso do cilindro	86 mm
Marcha lenta	800 – 1000 RPM

CC	1998 cm ³
Potência máxima	89 kW a 5200 RPM (gasolina)
(ABNT/NBR 5484/ISO 1585)	94 kW a 5200 RPM (etanol)
Taxa de compressão	11,3:1
Combustível recomendado	Gasolina brasileira ou etanol (E100)
Rotação máxima	6400 RPM
Sistema de injeção	Bosch (SFI)

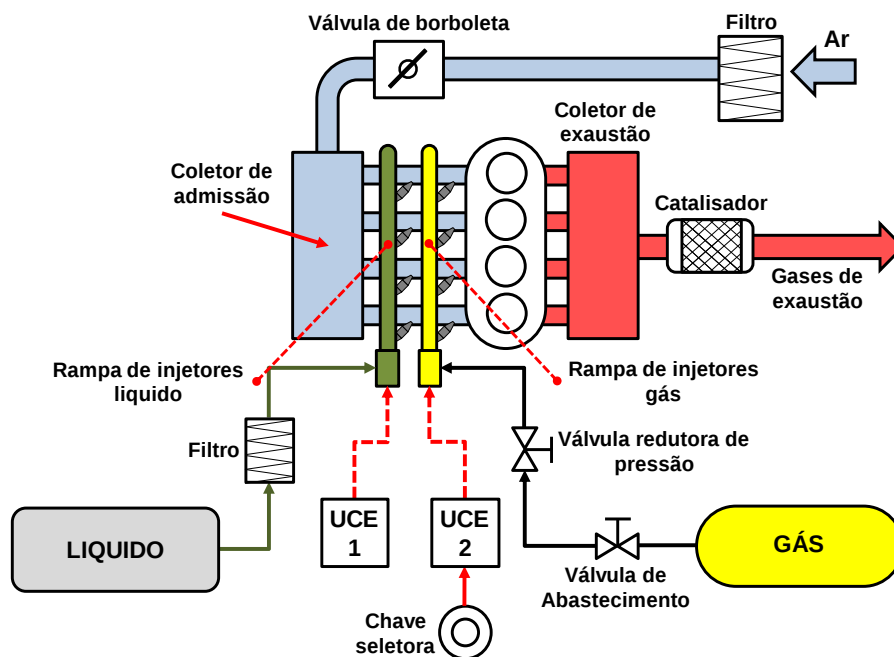
Fonte: Manual do proprietário General Motors.

Na Figura 2 apresenta-se o esquema do motor de combustão interna Flex, adaptado com sistema de injeção eletrônica sequencial do combustível líquido e gasoso.

O GNV encontra-se em um cilindro de armazenamento a 200 bar. Do cilindro o GNV é conduzido até a válvula redutora de pressão por uma tubulação de aço e 6 mm. A válvula redutora de pressão reduz a pressão do GNV de 200 para 2 bar. Posteriormente, o GNV ingressa por uma rampa de bicos injetores instalados no coletor de admissão próxima das válvulas de admissão do cilindro, onde se mistura com o ar de admissão.

Os veículos Flex os quais apresentam uma instalação do sistema sequencial de GNV denominam-se tri-combustível. Nesta classe de veículos, o cilindro para o GNV, além do tanque para etanol, permite aumentar a autonomia do veículo ou escolher o combustível desejado. O sistema eletrônico de injeção de GNV permite comutar de um combustível para outro a partir de uma chave seletora instalada no painel do veículo. As centrais de comando do combustível líquido e do GNV funcionam em série. Isto permite a programação da injeção concomitante de combustíveis a partir de um computador conectado à central de comando do GNV.

Figura 2: Esquema do motor Flex com adaptação de um sistema de injeção GNV.



Fonte: Autoria própria.

3.3 ENSAIOS NO MOTOR FLEX ADAPTADO

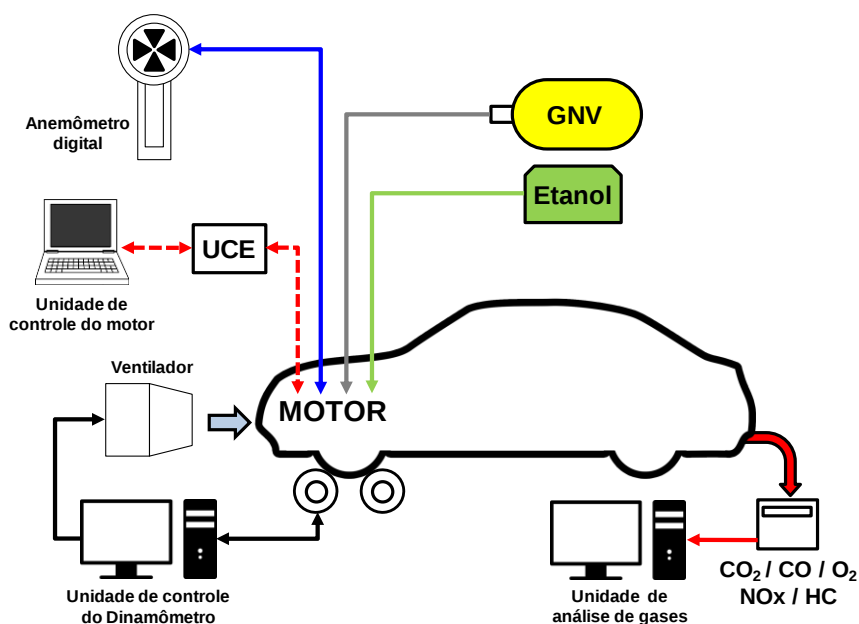
3.3.1 Descrição da bancada experimental

Na Figura 3 apresenta-se um esquema simplificado da bancada experimental utilizada no trabalho. A bancada conta com um analisador de gases capaz de medir o CO_2 , CO , HC , O_2 , NO_x e a relação ar/combustível (λ), conectado a um computador. São utilizadas duas balanças digitais com capacidade para 40 kg com divisão de um grama, para medição da massa do etanol e do GNV consumidas nos testes. Um tanque externo com bomba de combustível e um cilindro com capacidade para até 4 kg de GNV a pressão de 200 bar são utilizados para acondicionamento do etanol e GNV, respectivamente. É utilizado um dinamômetro ativo com capacidade para medir potência de até 290 kW e um veículo automotor Chevrolet modelo Vectra equipado com motor 2.0 de 4 cilindros, com duas válvulas por cilindro em que foi instalado um sistema sequencial de injeção de GNV de 5ª geração funcionando em série com a injeção eletrônica original do motor. O termoanemômetro digital é instalado no coletor de admissão do motor, com o qual faz-se a medição da massa de ar consumida durante cada teste.

O veículo foi posicionado sobre o dinamômetro ativo, onde foram realizados os testes de potência, emissões de gases de exaustão e consumo de etanol e GNV. Para obtenção

de parâmetros fez-se inicialmente os testes nos combustíveis puros numa com carga de 25%, em três regimes de funcionamento: 2000, 2500 e 3000 RPM. Em seguida procederam-se os testes com as misturas propostas neste trabalho.

Figura 3: Esquema da bancada experimental.



Fonte: Autoria própria.

A determinação do consumo de combustível é realizada pelo monitoramento da variação da massa dos combustíveis em função do tempo. Para isto são utilizados um tanque para o etanol e um cilindro para o GNV, os quais são alocados externamente ao veículo, sobre as balanças digitais.

A unidade de controle eletrônica do GNV é conectada a um computador para monitorar a injeção do gás e etanol, o funcionamento dos bicos injetores do GNV, o tempo de injeção do etanol e do GNV e a pressão do GNV que ingressa na rampa de bicos injetores via coletor de admissão. O ar de admissão é medido por um termoanemômetro digital, instalado no tubo de admissão de ar do motor. A seguir é detalhada a descrição dos principais elementos da bancada experimental.

3.3.2 Analisador de gases

Na Tabela 7 são apresentadas as suas principais características do analisador de gases

utilizado.

Tabela 7: Características do analisador de gases.

Parâmetros	Faixa de medição	Resolução	Precisão
CO (% vol.)	0 a 15	0,01.	0,02
CO ₂ (% vol.)	0 a 20	0,1.	0,3
O ₂ (% vol.)	0 a 25.	0,01.	0,1
HC (ppm)	0 a 40000	1	4
NO _x (ppm)	0 a 5000	1	1
Temperatura (°C)	-10 a 140	1	1

Fonte: Manual do Equipamento da Tecnomotor.¹¹

O analisador de gases TM 131 utilizado foi o da TECNOMOTOR (Figura 4) para a medição das concentrações dos gases exaustão, tais como CO, HC, CO₂, O₂ (célula eletroquímica) e NO_x (célula eletrônica). Além disto, o sistema de análise de gases permite registrar a rotação e a temperatura do óleo do motor. Previamente aos ensaios experimentais, o analisador de gases é aferido pelo Instituto de Pesos e Medidas do Estado de São Paulo (IPEM/SP) e está em conformidade com as normas internacionais OIML, R99, Classe 0 (zero) e Bar 97 (Califórnia, EUA). As especificações técnicas do analisador são apresentadas no Anexo A.

Figura 4: Analisador de gases TM 131 Tecnomotor.

¹¹ Disponível em <http://www.tecnomotor.com.br/novo/index.php/manuais-de-produtos>, acesso em 13 Ago. 2016.



Fonte: Autoria própria.

3.3.3 Dinamômetros

Foram utilizados dois dinamômetros, um inercial e um ativo. No dinamômetro inercial são obtidas as medidas da potência máxima para diferentes velocidades angulares e carga total. No dinamômetro ativo são obtidas medidas de potência com carga de 25% (1/4 da válvula borboleta da entrada de ar aberta).

O dinamômetro inercial utilizado possui capacidade para até 730 kW/h, mostrado na Figura 5, utilizados nos ensaios preliminares com etanol e GNV.

Figura 5: Dinamômetro inercial utilizado nos ensaios preliminares.



Fonte: Autoria própria.

Este foi utilizado somente para os ensaios preliminares. Os valores de potência e torque são medidos simultaneamente com a rotação da árvore de manivelas do motor. O equipamento faz a medição tanto das potências da árvore de manivelas como das rodas do veículo. Uma característica importante deste método é a capacidade de medir a perda de potência, que é absorvida pelos elementos da caixa de câmbio e do conjunto da transmissão. Esta medição é realizada na fase de desaceleração do veículo.

O dinamômetro ativo, foi aplicado nos testes de misturas etanol-GNV, sendo que na Tabela 8 são apresentadas as suas características.

Tabela 8: Características do dinamômetro ativo de chassi.

Características	Dados
Sistema de frenagem	Quatro rolos
Possibilidade de instalação	Vala ou sobre o solo
Capacidade de carga máxima	2500 kg
Capacidade de teste	Veículos com pneus de 13 a 19 polegadas
Velocidade máxima de teste	300 km/h
Potência máxima	400 kW
Força de tração máxima	7.500 Nm
Alimentação	Elétrica 220/ 380V AC Trifásica / 6kW
Comprimento total	3.188mm
Largura total	1.060 mm
Peso total	1.100kg
Largura dos rolos	650 mm
Diâmetro dos rolos	318 mm
Pressão máxima do ar comprimido	8 bar

Fonte: NAPRO Eletrônica Industrial Ltda.

O dinamômetro ativo de chassi é mostrado na Figura 6, o qual é utilizado para a medição da potência e torque. Este dinamômetro possui quatro rolos, sendo que as rodas motrizes do veículo são apoiadas e freadas por um sistema elétrico de corrente de Foucault. Os dados obtidos são disponibilizados em banco de dados, possuindo um gerenciamento do controle operacional.

Figura 6: Dinamômetro ativo de chassi utilizado nos ensaios com misturas de etanol-GNV.



Fonte: NAPRO Eletrônica Industrial Ltda.

3.3.4 Reservatórios para combustível

Na Figura 7 são apresentados os reservatórios dos combustíveis que fazem parte da bancada experimental utilizada nos ensaios.

Figura 7: Reservatórios de combustíveis: a) tanque de etanol; b) cilindro para GNV.



(a)

(b)

Fonte: Autoria própria.

O reservatório do etanol é um tanque externo com capacidade de 20 litros onde foi instalada uma bomba de combustível com pressão de 4 bar (Figura 7a). Este reservatório externo de combustível permiti medir o consumo de etanol pela diferença de massa inicial e

final em cada teste. O GNV utilizado nos ensaios foi acondicionado em um cilindro de 30 litros com manômetro com indicação da pressão até 200 bar e tubulação flexível, (Figura 7b), em que se pôde alimentar o motor pela válvula de abastecimento do sistema GNV instalado no veículo.

3.3.5 Termoanemômetro digital

Para a medição da vazão da massa de ar consumida na combustão utiliza-se um termoanemômetro digital (

Figura 8) conectado ao tubo de admissão de ar do motor.

Figura 8: Termoanemômetro digital



Fonte: Manual técnico Minipa MDA-11.

Na Tabela 9 são apresentadas as principais características do termoanemômetro digital utilizado no experimento.

Tabela 9: Características do termoanemômetro digital Minipa, modelo MDA-11.

Característica	Dados
Tempo para medida da veloc. do vento	2 segundos
Amostragem para medida de temperatura	1 vez por segundo
Velocidade do fluxo de ar	m/s, ft/min, knots, km/h e mph
Precisão básica	3%
Temperatura	°C e °F
Diâmetro da área de escoamento de ar	7 cm
Ambiente de operação	0 a 50°C

Fonte: Manual técnico Minipa MDA-11.

3.3.6 Condições de execução dos testes em dinamômetro ativo

As condições de execução dos testes de desempenho, em particular as curvas de potência, torque, gases de exaustão e o consumo específico de combustível são realizados considerando a temperatura ambiente (25°C), no período de tempo de 180 s, na carga de 25% em três regimes distintos de funcionamento: 2000, 2500 e 3000 RPM, tanto para os combustíveis puros (etanol e GNV) como para as misturas etanol-GNV. Os testes para verificação da potência máxima foram realizados com o veículo em 3ª marcha partindo-se de 1500 RPM até que atingisse a rotação de 6000 RPM, para o etanol e para o GNV, seguindo-se da mesma maneira com as misturas etanol-GNV, onde foi verificada a potência líquida do motor.

3.3.7 Programação dos ensaios no motor Flex adaptado

Inicialmente, procederam-se ensaios preliminares para avaliar o funcionamento do motor Flex após a adaptação para uso concomitantemente de etanol e GNV. Estes ensaios foram importantes para avaliar o funcionamento do motor adaptado, porém não foram executados com misturas de etanol-GNV e, assim, não fazem parte dos objetivos propostos no trabalho. Estes resultados preliminares são apresentados no Apêndice A.

A partir dos ensaios preliminares determinaram-se as condições experimentais adotadas para os ensaios finais. Foram executados um total de 30 testes no motor adaptado, sendo consideradas testes com etanol, GNV e 4 misturas de ambos e avaliadas diferentes rotações (2000, 2500 e 3000 RPM). No Apêndice B são apresentados em detalhes, as condições experimentais adotadas nos 30 testes.

3.4 METODOLOGIAS UTILIZADAS

3.4.1 Análise do comportamento da combustão

A análise estequiométrica da combustão é feita pela avaliação pelo fator λ . Esse

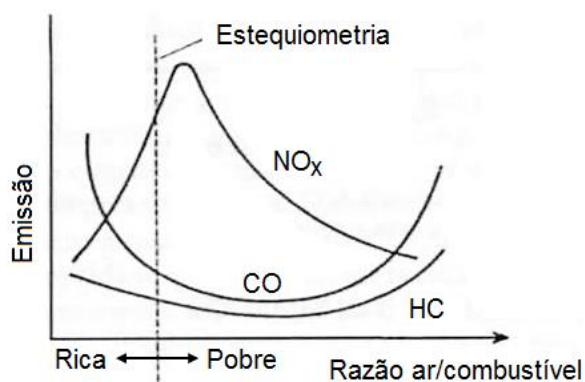
parâmetro é útil para avaliar o balanço da combustão e a emissão de gases, sendo calculado pela equação [1].

$$\lambda = \overline{AC} \left(\frac{M_{Ar}}{M_C} \right) \quad [1]$$

sendo que λ é a relação ar/combustível dada na base mássica, $\overline{AC}$ é a razão ar/combustível na base molar, M_{Ar} , M_C referem-se a massa molar do ar e combustível respectivamente.

Na Figura 9 mostra-se o comportamento das emissões (CO, HC e NO_x) em função de λ . Denomina-se por mistura rica quando λ é inferior à unidade ($\lambda < 1$), estequiométrica quando λ é igual à unidade ($\lambda = 1$) e pobre quando o λ é superior à unidade ($\lambda > 1$) (CARVALHO JR; LACAVA, 2003).

Figura 9: Comportamento das emissões de CO, HC e NO_x



Fonte: (CARVALHO JR; LACAVA, 2003) – adaptada.

Nos ensaios do motor Flex adaptado foi considerado um fator λ para a combustão estequiométrica ($\lambda=1$).

3.4.2 Análise do desempenho do motor

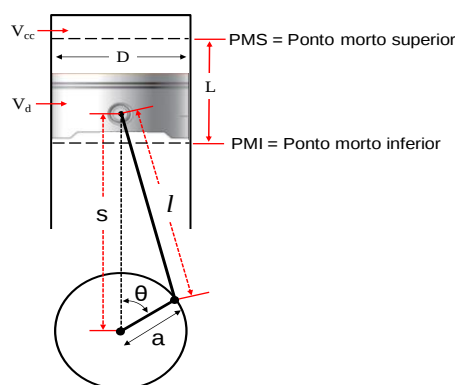
O estudo do desempenho do motor Flex é realizado a partir da determinação das eficiências térmica, volumétrica e mecânica, que para o qual é necessária a medida da potência líquida pelo uso do dinamômetro ativo de chassi. As emissões dos gases da combustão (CO₂, CO, HC, NO_x e O₂), rotação e temperatura do óleo do motor, bem como o valor de λ foram medidas pelo analisador de gases TM 131, conectado a um computador.

Cada teste possui uma duração de 180 s. Os testes de emissão, potência, torque e consumo são realizados em três regimes distintos de funcionamento: 2000, 2500 e 3000 RPM numa carga de 25%, sendo alimentado com etanol, GNV e pelas misturas de etanol/GNV. Para cada teste são registrados 5 valores de emissões, 1 do consumo de combustível e 1 da potência. O consumo específico para cada combustível, ou para as determinadas misturas de combustíveis, é obtido pela medição da massa de cada reservatório de combustível ou soma das frações de combustíveis que compõem as misturas em função da potência desenvolvida no tempo de 180 s de cada teste. O custo operacional da utilização de cada combustível ou mistura é determinado pelo custo do combustível puro ou pela soma dos custos de cada fração de combustível consumidas nos ensaios em função do tempo.

A eficiência térmica pode ser definida como o resultado da potência de saída em função da energia consumida; da eficiência volumétrica é da massa de ar que entra no motor em função do deslocamento dos pistões. Por outro lado, a eficiência mecânica é a relação da potência de saída pela potência bruta indicada.

Para melhor visualizar os fundamentos dos motores de combustão interna, apresenta-se na Figura 10 um esquema simplificado de um pistão se deslocando dentro de um cilindro, o qual é conectado ao virabrequim pela biela. Observa-se que o V_d é o volume deslocado, desde o ponto morto superior (PMS) até o ponto morto inferior (PMI), e V_{cc} é o volume da câmara de combustão. Os parâmetros l é o comprimento da biela, D é o diâmetro do pistão, L é o curso do pistão e a é o raio do virabrequim.

Figura 10: Geometria simplificada do pistão, biela, virabrequim e cilindro do motor.



Fonte: (HEYWOOD J.B, 1988)

Um parâmetro importante é a razão de compressão (r_c), apresentada na Equação [2]

e definida como a relação entre o volume da câmara e o volume deslocado pelo pistão na etapa de admissão, que é calculado pela Equação [3].

$$r_c = \frac{V_d + V_{cc}}{V_{cc}} \quad [2]$$

$$V_d = \pi L \left(\frac{D^2}{4} \right) \quad [3]$$

Em motores de combustão interna, a eficiência térmica, Equação [4], é definida pela relação entre a potência de saída do motor pela energia de entrada do combustível (HEYWOOD, 1988).

$$\eta_t = \frac{W_d}{\dot{m} \cdot PCI_{comb}} \quad [4]$$

sendo η_t , a eficiência térmica, W_d a potência de saída do motor determinada pelo dinamômetro, $\dot{m}$ a vazão mássica de combustível, PCI_{comb} é o poder calorífico inferior do combustível.

A potência bruta indicada (W_{bi}) é representada pela soma da potência de saída (W_d) com a potência de atrito (W_{at}), dada pela Equação [5].

$$W_{bi} = W_d + W_{at} \quad [5]$$

A eficiência mecânica do motor (η_m) é a relação entre a potência de saída (W_d) e a potência bruta indicada (W_{bi}) (HEYWOOD, 1988).

$$\eta_m = \frac{W_d}{W_{bi}} \quad [6]$$

A eficiência volumétrica (η_v) é definida como a massa de ar ambiente que entra no cilindro no tempo de admissão, dividida pela massa da mistura que vai preencher o espaço disponível na câmara considerando-se a massa específica do ar na admissão (TAYLOR, 1985).

$$\eta_v = \frac{2\dot{m}_{ar}}{RPM \cdot V_d \cdot \rho_{ar}} \quad [7]$$

sendo que $\dot{m}_{ar}$ é a vazão mássica da mistura ambiente, RPM (rotação por minuto) refere-se às revoluções do motor, V_d é o volume deslocado e ρ_{ar} é a massa específica do ar de admissão do motor. O número 2 na equação representa o ciclo de admissão por volta do virabrequim.

Uma definição equivalente para a eficiência volumétrica é apresentada na Equação [8].

$$\eta_v = \frac{\dot{m}_{ar}}{\rho_{ar} \cdot V_d} \quad [8]$$

O consumo específico de combustível (CE), dado em (kg/kWh), é calculado pelo consumo mássico de combustível por unidade de trabalho de saída, Equação [9]. Essa medida representa a eficiência de um motor considerando o combustível utilizado (HEYWOOD, 1988).

$$CE = \frac{\dot{m}_{comb}}{W} \quad [9]$$

sendo que $\dot{m}_{comb}$ é a vazão mássica de combustível (kg/s), W é a potência em unidade de energia (kW).

A eficiência térmica do motor, Equação [10] também pode ser calculada pela relação entre o consumo específico de combustível e a eficiência da conversão de combustível, dada pela equação (8) (HEYWOOD, 1988). A potência é obtida pelo dinamômetro.

$$\eta_t = \frac{1}{CE \cdot PCI_{comb}} \quad [10]$$

3.4.3 Determinação do custo operacional

O custo operacional ($C_{Op \text{ comb}}$) da utilização do etanol e do GNV é calculado pela Equação [11]. O custo operacional do combustível corresponde ao custo envolvido de uma quantidade de combustível por unidade de distância percorrida ou tempo de funcionamento.

$$\text{COP}_{\text{comb}} = \frac{\frac{p_{\text{comb}}}{l} \left(\frac{m_{\text{comb}}}{\rho_{\text{comb}}} \right)}{\text{distância ou tempo}} \quad [11]$$

No caso das misturas etanol-GNV, o custo da operação, em Reais (R\$), é determinado pela Equação [12].

$$\text{COP}_{\text{mistura}} = \frac{\frac{p_{\text{Etanol}}}{l} \left(\frac{m_{\text{Etanol}}}{\rho_{\text{Etanol}}} \right) + \frac{p_{\text{GNV}}}{m^3} \left(\frac{m_{\text{GNV}}}{\rho_{\text{GNV}}} \right)}{\text{distância ou tempo}} \quad [12]$$

sendo que m é a massa e ρ é a massa específica referente a cada um dos combustíveis da mistura (GNV ou etanol).

A massa de cada combustível corresponde à massa consumida por unidade de distância percorrida (km) ou pelo tempo de teste. Assim, a soma dos produtos do etanol e do GNV em função do preço da unidade comercial (litro de etanol ou m^3 de GNV), dividida pela distância percorrida ou tempo de ensaio, conforme a equação.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados apresentados neste capítulo referem-se aos ensaios no motor Flex que foram executados em duas etapas. Na primeira etapa, realizaram-se os ensaios para a obtenção das concentrações dos gases de exaustão com o veículo em condição estacionário. Na segunda etapa, além das medições dos gases de exaustão, foram feitas também as medidas de potência, vazão de ar e massa dos combustíveis utilizados e, para esta etapa, os ensaios foram executados em um dinamômetro ativo.

No Brasil, os limites máximos de emissões poluentes, tais como CO e HC, quando um motor é modificado ou adaptado devem estar de acordo com a Resolução CONAMA NR 418, de 25 nov. 2009. Estes limites foram apresentados na Tabela 1.

4.1 ANÁLISE DA COMBUSTÃO DO MOTOR FLEX ADAPTADO

4.1.1 Ensaios para misturas de etanol-GNV em condição estacionária

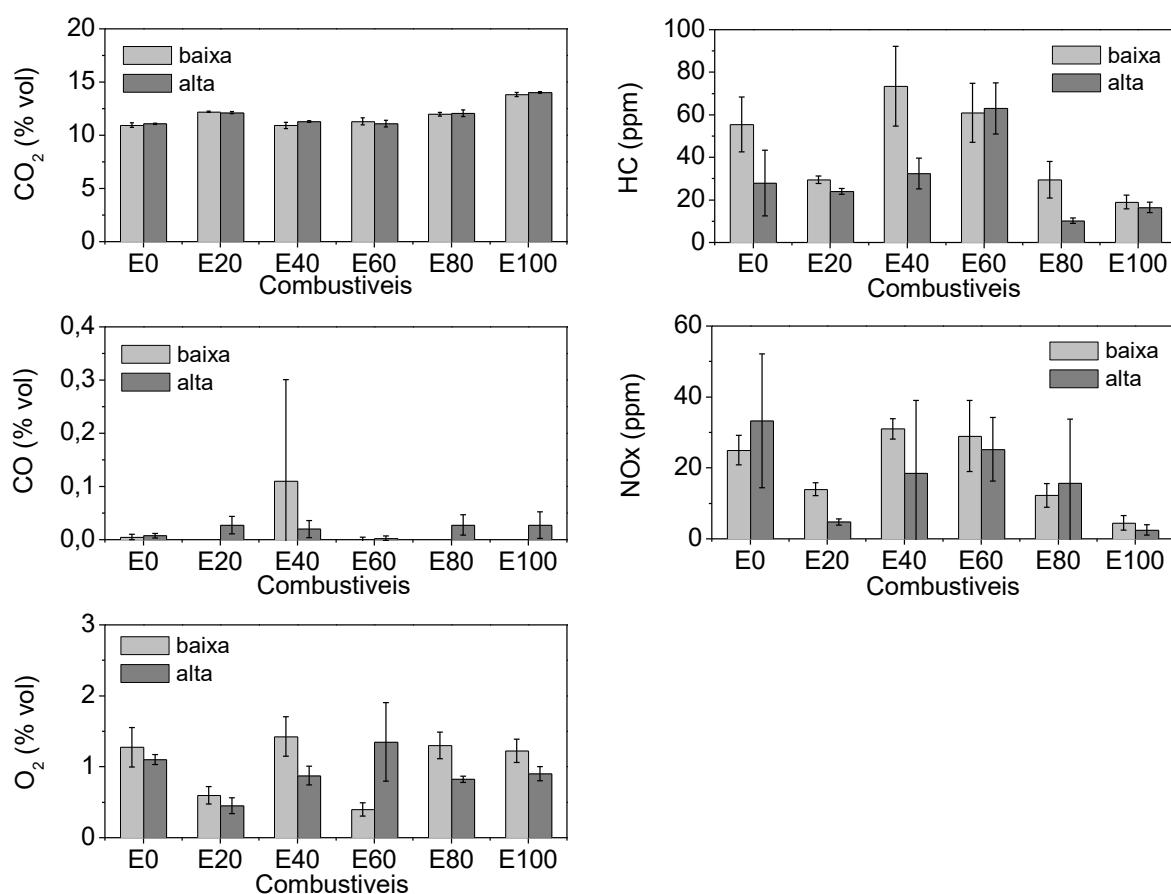
Os ensaios foram executados com o motor em condição estacionária para 6 diferentes combustíveis: E0 (% GNV), misturas de etanol-GNV (E20, E40, E60 e E80) e E100 (100% etanol). Foram executados 12 testes sem carga, sendo 6 em baixa rotação (marcha lenta, ~1000 RPM) e 6 testes em alta rotação (~2500 RPM). Para cada teste foram feitos 4 registros das emissões a cada 5 min, após o motor entrar em regime. Como os resultados são representados graficamente, os valores numéricos obtidos nesta etapa são disponibilizados no Apêndice C.

Estes testes foram executados com o objetivo de avaliar as emissões do veículo, simulando-se a condição de trânsito congestionado, ou seja, veículo em marcha lenta. De forma a comparar as emissões em alta rotação, reproduziram-se estes testes a 2500 RPM.

Na Figura 11 são mostrados os resultados do comportamento das emissões para os testes em condição estacionária. Observa-se a concentração de CO₂ para as misturas de etanol-GNV, a qual apresenta um comportamento similar tanto em baixa e alta rotação, sendo que a sua concentração ficou entre valores obtidos para o etanol e GNV respectivamente. A mistura E20 exibiu um aumento na concentração de CO₂. Esse aumento é uma resposta ao aumento do número de carbonos por contribuição do etanol. No entanto para as misturas E40

e E60 observa-se uma redução de CO_2 atingindo valores similares à obtida pelo GNV e segue um aumento de CO_2 para mistura E80. Como resultado pode-se deduzir que o grau de sinergia entre as misturas está intimamente relacionado com o desempenho térmico da câmara de combustão. O princípio de sinergia de campo oferece uma maneira eficaz de explicar a melhoria do desempenho térmico. Para a mistura E20 observa-se o melhor desempenho e eficiência da combustão entre todas as misturas analisadas.

Figura 11: Concentrações das emissões de CO_2 , CO, O_2 , NO_x e HC em baixas e altas rotações para os ensaios em condição estacionária.



Fonte: Autoria própria.

Com relação ao comportamento da concentração de CO, observa-se que para as misturas etanol-GNV, na condição de baixa rotação, os valores para a concentração de CO são muito próximos de zero, entretanto, a mistura E40 apresentou o maior valor de concentração de CO superando os valores obtidos para o etanol e GNV. Em alta rotação, a concentração de CO possui uma tendência irregular conforme aumenta a fração de etanol na

mistura. A concentração mais baixa de CO foi registrada para a mistura E60. A partir dos resultados da emissão de CO em alta rotação para os combustíveis E20, E40, E60, E80 e E100 não há uma tendência para a redução da concentração de CO em relação a E0. No entanto estes valores são muito abaixo do estabelecido pelo CONAMA, na Resolução nº 418, de 25 de novembro de 2009 (Tabela 1). A concentração de O₂ é mais baixa para a combustão da mistura com E20. Pode-se concluir que esta mistura proporciona a melhor miscibilidade do etanol e do GNV na câmara de combustão. A concentração de HC mostra um comportamento irregular em baixa rotação, onde todas as misturas apresentaram valores de HC superiores à concentração mais baixa correspondendo ao etanol. A mistura E20 apresentou a emissão mais baixa de HC em baixa rotação. As misturas E40 e E60 atingiram os valores máximos de HC em baixa rotação, no entanto em alta rotação observou-se uma redução considerável da concentração deste gás. A maior concentração foi verificada na mistura E40 e a mais baixa foi na mistura E80, cujo resultado seguiu a tendência do etanol hidratado (E100). Assim, o comportamento da combustão seria o resultado muito próximo ou igual à combustão do etanol. A mistura E20 resulta na menor concentração de HC entre todas as misturas, atingindo valores semelhantes ao obtido para o etanol. Os resultados mostram valores abaixo do máximo permitido pelo CONAMA, na da Resolução nº 418, de 25 de nov. de 2009 (Tabela 1).

A emissão de NO_x também apresenta um comportamento irregular em ambas velocidades angulares. Em baixa rotação todas as misturas apresentam valores superiores à menor concentração de NO_x tendo como linha de base o etanol. Esse comportamento está relacionado à presença de GNV, que promove uma combustão em uma maior temperatura, gerando a formação de NO_x térmico. Em baixa rotação, as misturas contendo E40 e E60 apresentam as maiores concentrações de NO_x, no entanto, as misturas E20 e E80 resultam em menores concentrações de NO_x. Em alta rotação, a concentração de NO_x tende a diminuir. Isto pode ser devido ao resfriamento da câmara de combustão pelo excesso de ar. No entanto a mistura E60 obteve a maior concentração de NO_x. A mistura E80 apresenta uma concentração similar à obtida em baixa rotação, porém ainda superior à atingida para o etanol.

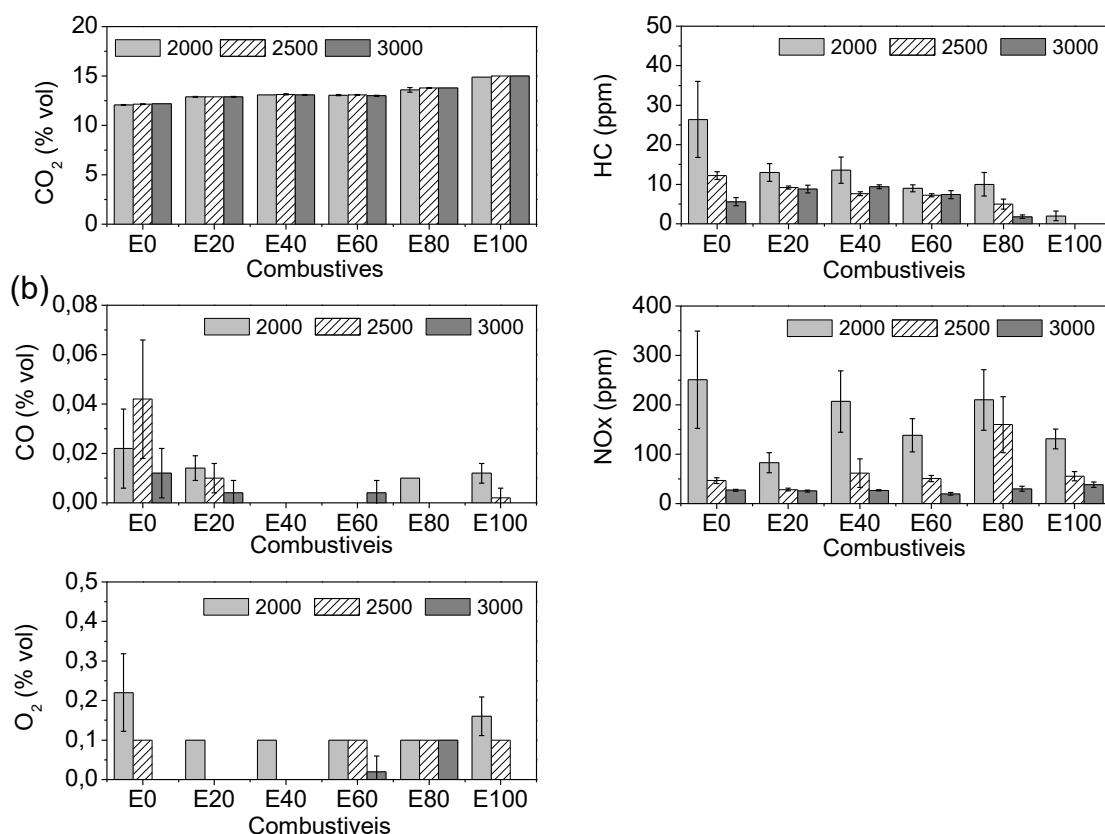
4.1.2 Ensaios para misturas de etanol-GNV utilizando-se o dinamômetro ativo

Os ensaios foram executados com o motor no dinamômetro, ou seja, com o objetivo de simular o veículo em movimento. Nesta condição foram utilizados 6 diferentes

combustíveis: E0 (% GNV), misturas de etanol-GNV (E20, E40, E60 e E80) e E100 (100% etanol). Foram executados 18 testes com carga de 25% (25% da abertura da válvula borboleta), em 3 diferentes velocidades angulares, sendo 6 testes para cada rotação (2000, 2500 e 3000 RPM). Para cada teste foram feitos 5 registros das emissões a cada 3 min, após o motor entrar em regime. Além disso, foram também registados 1 medida por teste dos valores de potência, vazão de ar e massa dos combustíveis utilizados. Uma vez que os resultados de emissões em condição estacionária são representados graficamente, os valores numéricos são disponibilizados no Apêndice D.

Na Figura 12 apresentam-se os resultados obtidos para as diferentes condições experimentais testadas.

Figura 12: Concentrações das emissões de CO₂, CO, O₂, NO_x e HC nos ensaios com motor Flex adaptado para misturas de etanol-GNV utilizando-se o dinamômetro ativo.



Fonte: Autoria própria.

Observa-se na Figura 12 que a concentração de CO₂, a partir do GNV, é aumentada progressivamente com a adição do etanol na mistura etanol-GNV. Isto pode ser justificado

pelo número de carbono por mol do combustível, no qual o etanol possui maior quantidade. A mistura E20 apresentou a menor concentração, sendo que a maior foi observada na mistura E80. As misturas E40 e E60 apresentaram valores de CO₂ muito similares. Observou-se também, que a variação na rotação não teve influência na concentração deste gás, possivelmente pelo fato que a combustão chegou ao seu limite de emissão de CO₂. No entanto, em estudos experimentais realizados por (BALKI; SAYIN; CANAKCI, 2014) em motor de combustão interna utilizando gasolina aditivada com etanol, observaram que a rotação que a rotação influenciou na concentração de CO₂ nos gases de exaustão. Com relação à concentração de CO, observou-se que a adição do etanol ao GNV levou à diminuição na emissão deste gás. A maior concentração de CO observada para o GNV é devido a sua resistência à detonação, a qual exige de maior temperatura e taxa de compressão do motor para completar a queima. Os valores ao adicionar o etanol ao GNV, entretanto, não seguem uma tendência, o que pode ser explicado pela baixa emissão de CO medida, considerando o erro do equipamento utilizado, cuja resolução é de 0,01% (Tabela 7). O CO é uma emissão importante dos motores de combustão interna uma vez que operam frequentemente perto da região estequiométrica em carga parcial e com mistura rica em combustível a plena carga. O nível de emissão de CO no escape de um motor de combustão interna varia em consequência da relação de equivalência de combustível/ar (λ). Para misturas ricas em combustível, a concentração de CO nos gases de escape aumenta com o aumento da razão de equivalência.

As condições de combustão foi com $\lambda=1$ (estequiométrica) e o resultado de CO é indicativo de uma combustão completa, uma vez que a combustão incompleta, é formado principalmente sob condição de mistura rica, com quantidade insuficiente de oxigênio para transformar o monóxido de carbono em dióxido de carbono (ERAN SHER, 1998). Khan; Yasmin; Shakoore, (2015) observaram comportamento similar ao analisarem a combustão e a eficiência de um motor retroalimentado com gasolina e GNV. Melo et al.(2012) investigaram a combustão e as emissões de um motor Flex com diferentes misturas de etanol e gasolina em várias condições de operação. Verificaram que a adição de etanol reduz as emissões de CO e aumenta a emissão de CO₂. Canakci et al.(2013) e Elfasakhany, (2015) observaram que o aumento de etanol à gasolina levou à diminuição das emissões de CO. Assim podemos inferir que a diminuição do CO quando da combustão concomitante do etanol e GNV é atribuída ao O₂ contido nas moléculas do etanol, que favorece a combustão. Este resultado também pode ser atribuído à maior velocidade de chama e menor temperatura de ignição do etanol, o qual assume a função de acelerador da combustão, fornecendo o calor necessário para completar a

queima do GNV.

A concentração de O_2 é muito baixa, demonstrando uma combustão com comportamento próximo do ideal. A concentração de O_2 nos gases de exaustão tem relação com a rotação do motor, sendo que o aumento na rotação leva à diminuição na concentração deste gás. A emissão de O_2 é utilizada como um parâmetro da eficiência da combustão. O GNV apresentou a maior concentração de O_2 , possivelmente devido às suas características de queima, sendo necessário maior taxa de compressão e maior temperatura na sua combustão. Considerando-se somente a baixa rotação (2000 RPM), que foi observado para todos os combustíveis, observa-se os maiores valores para o GNV, seguido pelo etanol. Para as misturas foram verificados os menores valores, indicando um efeito sinérgico.

O aumento na concentração de HC no escape de um motor de combustão interna tem diferentes causas, tais como a combustão incompleta, a qualidade do óleo lubrificante ou avarias no motor. Quanto mais completa for a combustão, menor é a concentração deste gás. As variáveis mais importantes que afetam as emissões de HC nos gases de escape são λ , a temperatura de vaporização do combustível e a temperatura do motor no momento da combustão. Durante o aquecimento do motor as emissões de HC são maiores. Em condições de carga parcial e quente, o motor produz emissões de HC mais baixas. No motor aquecido a combustão ocorre em condições favoráveis. As emissões de HC estão associadas à combustão incompleta, que podem ocorrer devido à velocidade de chama e também pela camada de óleo que fica nas paredes da câmara de combustão (ERAN SHER, 1998).

Observa-se também na Figura 12 que, de modo geral, a adição de etanol ao GNV leva à diminuição na concentração do HC. As maiores emissões de HC são referentes à combustão do GNV e as menores para o etanol, fato pelo qual o etanol exige menor temperatura para entrar em ignição (363°C) do que o GNV (482 a 632°C). Além disso, em sua composição o etanol conta com 34% de O_2 , o que contribui para uma melhor combustão. Balki; Sayin; Canakci, (2014) e Elfasakhany, (2015) observaram que gasolina aditivada com álcoois provoca uma redução das emissões de HC.

O efeito da rotação do motor foi mais evidente nas emissões de NO_x nos gases de exaustão, mostrando que a concentração de NO_x tem forte relação com a rotação do motor. Para todos os combustíveis, observa-se que a emissão de NO_x é maior para a menor rotação (2000 RPM) e decai quando se utilizou 2500 RPM, seguida por 3000 RPM. A diminuição da

emissão de NO_x em rotações mais elevadas pode ser um efeito da maior troca de calor da câmara de combustão com o ar de admissão. Não foi observada uma tendência de diminuição do NO_x com a adição de etanol. Para a menor rotação, a emissão de NO_x foi a maior para o GNV e a menor para a mistura E20. Na menor rotação observou-se valores similares para todos os combustíveis. Os NO_x são formados pela oxidação do nitrogênio do ar atmosférico no processo da combustão e tem a ver com a temperatura da combustão. Quanto maior a temperatura da combustão, maior será a emissão de NO_x (CANAKCI et al. 2013). A combustão do GNV ocorre em temperatura maior do que da combustão do etanol. Eran Sher, (1998) considera que as emissões de NO_x são principalmente compostas por moléculas de NO e uma pequena parcela de NO₂, numa taxa de 1/100. NO é um produto da reação química envolvendo átomos de nitrogênio e oxigênio que ocorre a altas temperaturas nos gases da combustão (2300 K). A variação do valor da concentração do NO_x é produto da instabilidade do gás na combustão, especificamente para as misturas de combustíveis, onde a queima é mais complexa. Atualmente no Brasil, não existe restrição para a emissão de NO_x. Neste trabalho, em função das medidas realizadas, pode-se propor que um veículo com motor Flex adaptado para GNV, regulado, deverá emitir uma concentração de NO_x em torno de 250 ppm. Entretanto, mais estudos deverão ser realizados para comprovar este resultado.

Considerando-se as médias das emissões medidas para 2000, 2500 e 3000 RPM, observou-se que a melhor mistura de etanol-GNV, utilizando o motor Flex adaptado, foi a E20. Em relação ao GNV puro, para esta mistura observou-se um aumento de 5,81% para o CO₂ e a diminuição de 68,77%, 21%, 29,86% e 57,41% para as emissões de O₂, CO, HC e NO_x, respectivamente. Os resultados indicaram que a combustão do GNV melhora com a adição do etanol. Isto pode ser atribuído à maior velocidade de chama laminar e da fração de O₂ (34%) na composição do etanol.

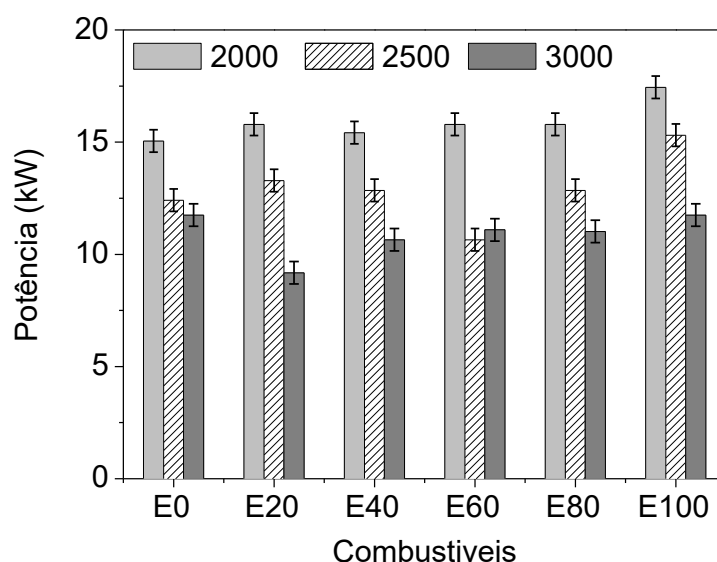
4.2 ANÁLISE DE DESEMPENHO DO MOTOR FLEX ADAPTADO

Para a análise de desempenho, foram utilizados os mesmos ensaios descritos no item 4.1.2, os quais foram realizados no dinamômetro ativo. Como os resultados são representados graficamente, os valores numéricos são disponibilizados no Apêndice E.

4.2.1 Determinação da potência

Na Figura 13 apresentam-se o comportamento dos valores de potência de saída, obtidos pela Equação [4], para o etanol, GNV e suas misturas. Pode-se observar que o motor Flex adaptado tem menor potência com o GNV comparado ao etanol, para as 3 velocidades angulares, sendo que os maiores valores foram obtidos para o etanol. Para as misturas, em baixa rotação (2000 RPM), observou-se também uma tendência no aumento dos valores de potência com o aumento na adição de etanol. Considerando-se o efeito da rotação, observa-se que a potência diminui com o aumento da rotação, sendo que este comportamento também foi observado por Jahirul et al. (2010). As misturas E20, E40, E60 e E80 a 3000 RPM apresentam perda considerável de potência de saída ao se comparar com E0. Isto comprova que misturas etanol-GNV em altas rotações não oferecem condições favoráveis para a retomada da potência de saída da condição E0 para E100. A média das potências de saída da mistura E20 apresenta uma perda de 2,45% em relação a E0.

Figura 13: Potências de saída do motor Flex adaptado em função da rotação do motor e da adição do etanol ao GNV.



Fonte: Autoria própria.

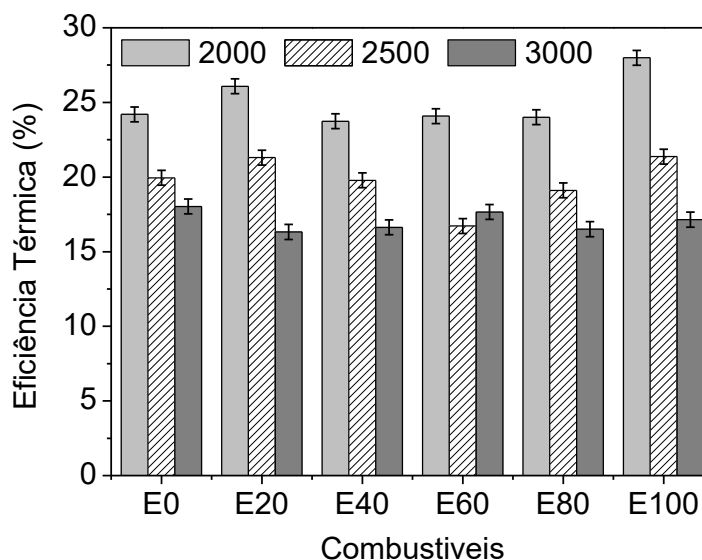
De acordo com (THOMAS et al., 2016), o índice de octanagem do GNV é alto, variando de 120 a 130, levando a uma maior resistência à “batidas de pino” comparado à gasolina, permitindo a aplicação de maior taxa de compressão e, portanto, maior eficiência do

motor. Para que um motor seja dedicado a operar com o GNV, seria necessária uma taxa de compressão entre 15:1 a 16:1 (LARANJA, 2010). Embora isso fosse ideal para o GNV, os motores veiculares do ciclo Otto não são fabricados com essa característica, principalmente pela falta do amplo suprimento do GNV, o que obrigaria o condutor a abastecer com etanol ou gasolina. Esta limitação técnica, referente à baixa taxa de compressão, é suficiente para que o motor Flex ao funcionar com o GNV perca potência. Essa perda fica entre 10 e 20% em relação ao etanol e à gasolina. Um comportamento similar foi observado por (JAHIRUL et al, 2010). (ASLAM et al, 2006) em estudo experimental realizado com motor a gasolina que foi convertido para o uso do GNV, os resultados apresentaram uma perda de potência variando entre 15 e 20% em relação à gasolina. (MOHD et al, 2015) observaram que o motor alimentado com GNV teve uma perda de potência de 18,5% em relação à gasolina e que algumas melhorias devem ser feitas para o uso do GNV. Khan et al, (2016) atribuem a perda de potência ao alto índice de octanas do gás natural, variando de 120 a 130 e à menor velocidade laminar da chama. A eficiência do motor alimentado com GNV é dependente do projeto.

4.2.2 Análise da eficiência térmica

O tipo de combustível influi no desempenho do motor, principalmente na eficiência térmica. A eficiência térmica dos motores de ignição por faísca varia entre 25 e 30% (YUNES A. ÇENGEL AND MICHAEL A. BOLES, 2015). Os valores de eficiência térmica obtidos pela Equação [4], para o motor Flex operando com E0, E100 e as misturas E20, E40, E60 e E80 são apresentados na Figura 14.

Figura 14: Eficiência térmica do motor Flex adaptado em função da rotação do motor e da adição do etanol ao GNV.



Fonte: Autoria própria.

Quando alimentado com GNV, o motor Flex perde eficiência térmica com o aumento da rotação, no entanto observa-se uma redução desta perda acima de 2500 RPM. No caso do etanol, observa-se uma redução significativa de eficiência térmica. Mesmo não sendo a taxa de compressão ideal para o funcionamento do motor Flex com E0, a perda da eficiência térmica é menor quando comparado ao funcionar com E100. Isto pode ser em detrimento do maior poder calorífico e da resistência à detonação do GNV.

Verificou-se que na rotação de 2000 RPM, o motor abastecido com E0 perde 13,54% de eficiência térmica em relação ao E100. No entanto para o regime de 2500 RPM com E0, a perda da eficiência térmica foi de 6,64% em relação a E100 e a 3000 RPM a perda ficou em 4,88% em relação ao E100. Goet et al. (2009) desenvolveram um estudo experimental com motor a gasolina adaptado para o GNV e encontraram uma eficiência térmica 13% maior para o GNV comparada com a gasolina. Do mesmo modo, Jahirul et al. (2010) encontraram uma eficiência térmica para o motor alimentado com o GNV maior em 1,6% do que quando foi alimentado com gasolina.

Na análise das misturas, obtiveram-se os melhores resultados a 2000 RPM, principalmente para a mistura E20. Percebe-se que o motor Flex perde eficiência térmica com aumento da rotação. A 2000 RPM observa-se um ganho de eficiência térmica para a mistura E20. Depois, nas outras misturas, observa-se uma redução na mistura E40 e se mantém estável para as misturas seguintes. A 2500 RPM também se observa um ganho para a mistura

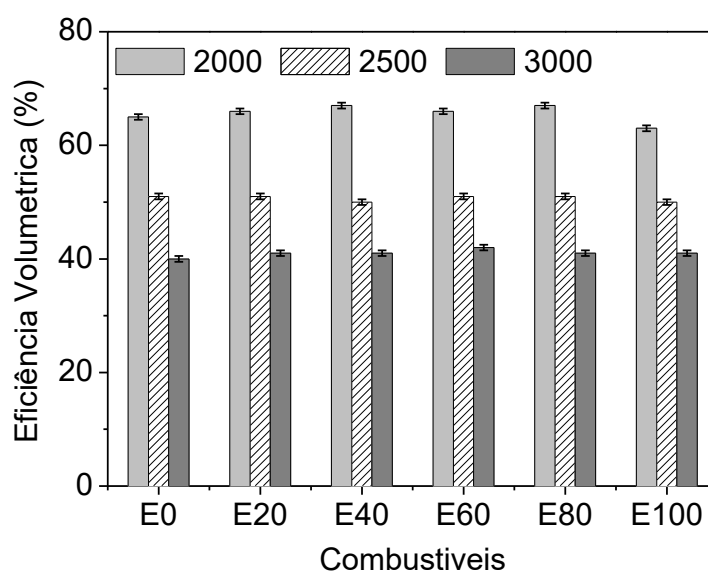
E20, no entanto, as misturas seguintes (E40 e E60) apresentam uma perda significativa de eficiência térmica. Na mistura E80 a eficiência térmica aumenta num valor próximo da mistura E40. A 3000 RPM observa-se que as misturas apresentam em média uma eficiência térmica similar.

A mistura E20 apresentou a melhor eficiência térmica a 2000 e 2500 RPM. Entretanto, a 3000 RPM, a mistura E60 mostra eficiência térmica superior a E100. Um comportamento similar foi reportado por Momeni Movahed; Basirat Tabrizi; Mirsalim, (2014), sendo observado que a injeção concomitante gasolina/GNV melhora a eficiência térmica em relação ao modo gasolina. A média das eficiências térmicas da mistura E20 apresenta um aumento de 2,35% em relação a E0.

4.2.3 Análise da eficiência volumétrica

Na Figura 15 mostra-se o comportamento da eficiência volumétrica (η_v) do motor Flex, determinado pela Equação [6], quando é alimentado com os combustíveis avaliados. Os testes demonstraram que o motor Flex ao ser alimentado com E0 não apresenta perda de eficiência volumétrica em relação à mistura E100.

Figura 15: Eficiência volumétrica do motor Flex adaptado em função da rotação do motor e da adição do etanol ao GNV.



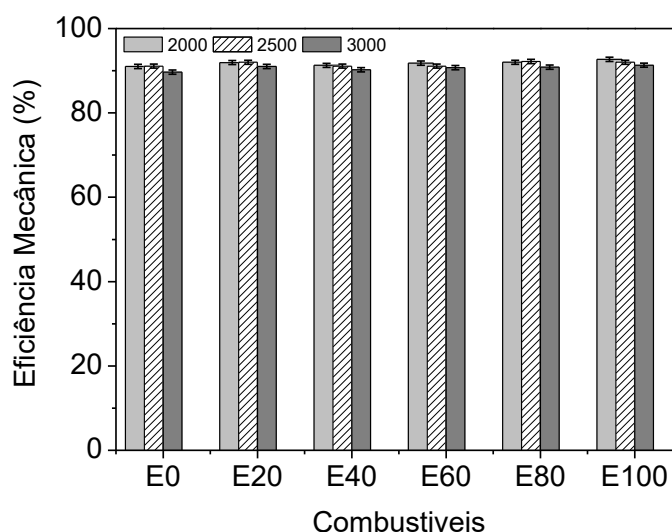
Fonte: Autoria própria.

Outros autores realizaram estudos experimentais com motores a gasolina alimentados com GNV. Mohd et al. (2015) observaram uma perda de 18,5% da eficiência volumétrica no modo GNV em relação ao modo gasolina; Khan et al, (2016) observaram uma perda de eficiência volumétrica em 10% no GNV quando comparado com a gasolina. Atribuíram essa perda à propagação da chama e à baixa densidade energética do GNV. No entanto, a 2000 RPM, o motor Flex apresentou 3% a mais de eficiência volumétrica no GNV do que no etanol. Este comportamento pode ser devido ao projeto do motor Flex em relação ao do motor a gasolina. A diferença básica pode ser o volume da câmara de explosão, menor no motor Flex. Por outro lado, percebe-se que a eficiência volumétrica do motor Flex diminuiu com o aumento da rotação mantendo o mesmo comportamento e valores para os combustíveis puros e as misturas. A melhor eficiência volumétrica foi observada para a mistura E80, superando o etanol e o GNV. A média das eficiências volumétricas da mistura E20 apresenta um aumento de 1,25% em relação a E0.

4.2.4 Análise da eficiência mecânica

Na Figura 16 apresenta-se o comportamento da eficiência mecânica (η_m) do motor Flex, determinada pela Equação [5], quando abastecido com o etanol, GNV e as suas misturas. Os resultados dos testes mostraram que a eficiência mecânica diminui com o aumento da rotação do motor. Esta redução da eficiência mecânica é devida principalmente ao atrito gerado nos mancais, deslocamento dos pistões, engrenagens, carga da bateria e pela energia dissipada através do sistema de arrefecimento, que aumenta com o aumento da rotação. A eficiência mecânica está fortemente relacionada ao comportamento do poder de atrito. Segundo Kamil; Rahman (2015), seguindo as tendências do poder de atrito, a eficiência mecânica de um motor diminui com um aumento da rotação, ficando aproximadamente em 90% a baixa velocidade e cerca de 70% a 5000 RPM. A média das eficiências mecânicas da mistura E20 apresenta um aumento de 1,41% em relação a E0, que é o melhor valor.

Figura 16: Eficiência mecânica (η_m) do motor Flex adaptado em função da rotação do motor e da adição do etanol ao GNV.



Fonte: Autoria própria.

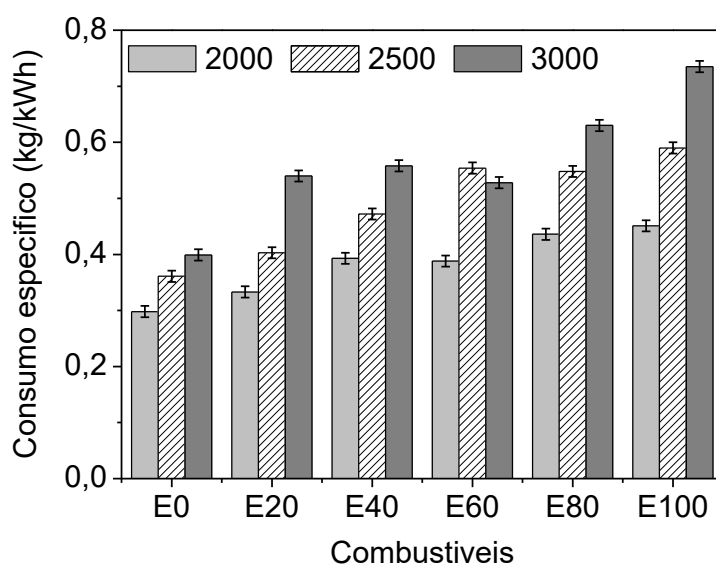
4.2.5 Análise do consumo específico de combustível

Na Figura 17 estão representadas as curvas de consumo específico de combustível (CE), calculado pela Equação [8], para o etanol, GNV e suas misturas.

Comparando os combustíveis comerciais (E0 e E100), o GNV apresenta o menor consumo específico. O consumo específico exibe um comportamento crescente em função da mistura. Pode-se observar que o motor Flex apresenta menor consumo específico de combustível a 2000 RPM.

Considerando as misturas, a E20 exibe o menor valor a 2000 e 2500 RPM. No entanto a 3000 RPM, as misturas E20, E40 e E60 exibiram valores similares. De todas as misturas pode-se inferir que a E20 exibe o menor consumo específico. Resultado semelhante foi observado por Jahirul et al., (2010) ao comparar o consumo específico de combustível de um motor a gasolina convertido para o GNV. Isto pode ser atribuído ao PCI do GNV (50 MJ/kg) comparado ao do etanol (28,5 MJ/kg). Assim, com o aumento do etanol na mistura, aumenta o consumo específico de combustível. A média do consumo específico de combustível da mistura E20 apresenta um aumento de 16,94% em relação a E0, cujos combustíveis são os de menores valores para o consumo específico.

Figura 17: Consumo específico de combustível (CE) do motor Flex adaptado em função da rotação do motor e da adição do etanol ao GNV.



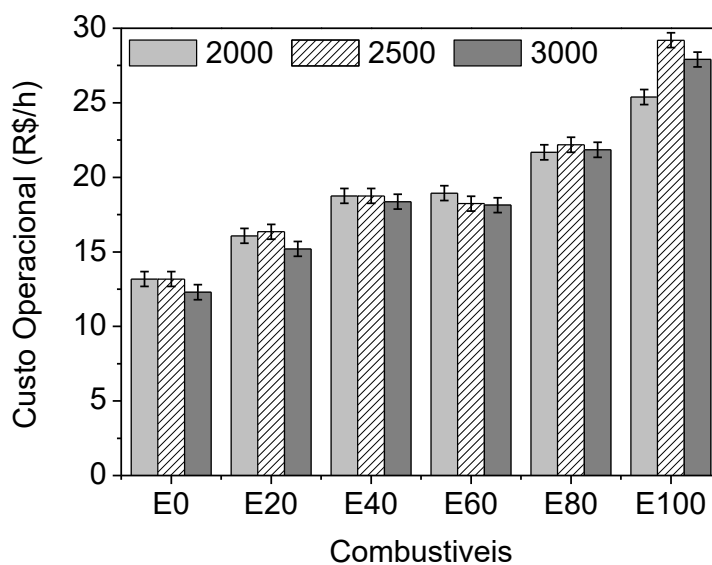
Fonte: Autoria própria.

4.3 ANÁLISE DO CUSTO OPERACIONAL

Um dos benefícios do uso do GNV é a economia. Enquanto, mundialmente, utilizam-se combustíveis mais caros e mais poluentes de forma contínua, a substituição por GNV ou etanol poderia ser uma opção mais favorável. Além do aspecto ambiental, o custo do GNV é mandatório quando se faz um comparativo entre o etanol e a gasolina, no entanto o etanol tem a vantagem de ser um combustível renovável. As desvantagens quanto ao uso do GNV podem ser elencadas como o aumento do peso do veículo, menor densidade energética do combustível, espaço tomado pelo cilindro no porta-malas. A grande vantagem é o apelo econômico.

Na Figura 18 é possível visualizar os custos operacionais de E0, E100 e das misturas E20, E40, E60 e E80.

Figura 18: Custo operacional utilizando-se o motor Flex adaptado em função da rotação do motor e da adição do etanol ao GNV.



Fonte: Autoria própria.

No cálculo do custo operacional (COp) dos combustíveis comerciais (E0 e E100) e suas misturas (E20 a E80) foram utilizadas as Equações [10] e [11], respectivamente. Para expressar o custo operacional utilizou-se a somatória dos custos do consumo de E100 e do E0 no tempo de (180 s) em que o motor foi submetido à carga de 25%. Transformou-se o custo de cada teste em R\$/hora. Para o cálculo foi considerado o preço médio de E100 a R\$ 2,60 o litro e do E0 R\$ 2,10 o metro cúbico em 25 de maio de 2017, na cidade de São Paulo. Os valores numéricos obtidos são disponibilizados no Apêndice F.

Da análise do custo operacional observa-se que a mistura de menor custo é E20 para os três regimes de funcionamento, 2000, 2500 e 3000 RPM. A média do custo operacional para a mistura E20 apresenta um aumento de 18,85% em relação a E0, cujo combustível é o de menor valor entre as misturas.

5 CONCLUSÕES

Neste trabalho investigou-se o desempenho e as emissões de um motor Flex adaptado com um sistema de injeção concomitante de etanol e GNV.

O uso de misturas etanol-GNV por injeção concomitante em um motor Flex mostrou-se tecnicamente fatível.

Na avaliação do desempenho do motor Flex modificado com os combustíveis avaliados, verificou-se que, como esperado, a potência diminui com o aumento da rotação, sendo que foi observada uma tendência de menores valores para o GNV e que a eficiência térmica com GNV foi menor em relação ao etanol.

As análises das emissões demonstraram que as misturas etanol-GNV contribuem para uma redução das concentrações de CO, O₂, HC, NO_x e aumento da concentração de CO₂ em relação ao GNV.

A mistura E20 se mostrou mais favorável em termos da menor emissão de CO, HC, NO_x, O₂ emissões, eficiência térmica, consumo específico de combustível e custo operacional.

Do ponto de vista ambiental, o uso de misturas etanol-GNV é uma opção que poderia contribuir com uma redução dos gases poluentes causados pelo grande e crescente número de automóveis circulando nos grandes centros urbanos.

Do ponto de vista econômico, o uso de misturas etanol-GNV em motores Flex pode ser uma opção, uma vez que apresentaram menor custo de operação em relação ao etanol. O uso de misturas etanol-GNV promoveria geração de emprego na indústria de produção, distribuição, abastecimento de GNV.

5.1 SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS

1. Pesquisar a viabilidade da injeção concomitante de etanol-GNV em motores Flex turbinados;
2. Pesquisar e avaliar a influência do GNV na combustão do óleo diesel em motores do ciclo Diesel turbinados levando em consideração os aspectos técnicos, econômicos e ambientais.

REFERÊNCIAS

- ASLAM, M. U. et al. An experimental investigation of CNG as an alternative fuel for a retrofitted gasoline vehicle. **Fuel**, v. 85, p. 717–724, 2006.
- BAE, C.; KIM, J. Alternative fuels for internal combustion engines. **Proceedings of the Combustion Institute**, v. 36, p. 3389–3413, 2017.
- BALKI, M. K.; SAYIN, C. The effect of compression ratio on the performance, emissions and combustion of an SI (spark ignition) engine fueled with pure ethanol, methanol and unleaded gasoline. **Energy**, v. 71, p. 194–201, 2014.
- BALKI, M. K.; SAYIN, C.; CANAKCI, M. The effect of different alcohol fuels on the performance, emission and combustion characteristics of a gasoline engine. **Fuel**, v. 115, p. 901–906, 2014a.
- BALKI, M. K.; SAYIN, C.; CANAKCI, M. The effect of different alcohol fuels on the performance, emission and combustion characteristics of a gasoline engine. **Fuel**, v. 115, p. 901–906, jan. 2014b.
- BALOO, M. et al. Effect of iso-octane/methane blend on laminar burning velocity and flame instability. **Fuel**, v. 144, p. 264–273, 2015.
- BIELACZYK, P. et al. The Impact of Alternative Fuels on Fuel Consumption and Exhaust Emissions of Greenhouse Gases from Vehicles Featuring SI Engines. **Energy Procedia**, v. 66, p. 21–24, 2015.
- BRACMORT, K.; SISSINE, F. **Energy Efficiency and Renewable Energy (EERE): Appropriations and the FY2016 Budget Request**. Disponível em: www.crs.gov em agosto de 2016.
- BRAGA, G. T. **Uma contribuição ao controle de motores de combustão interna de ignição por centelha na condição de marcha lenta**. 2007. 144 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Centro e Pesquisa e Desenvolvimento em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Minas Gerais, 2007.
- CANAKCI, M. et al. Impact of alcohol-gasoline fuel blends on the exhaust emission of an SI engine. **Renewable Energy**, v. 52, p. 111–117, 2013.
- CARLOS, L.; QUIROGA, R. **Avaliação da relação entre a Energia de Ativação e a Energia Útil para Diferentes Misturas de Etanol e Gasolina Aplicados a Motores de**

Ignição por Centelha Tese. 2016. 134 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá - Universidade Estadual Paulista, 2016.

CARVALHO, M. A. S. DE. **Avaliação de um motor de combustão interna ciclo otto utilizando diferentes tipos de combustíveis.** 2011. 147 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Industrial - Escola Politécnica. Universidade Federal da Bahia, 2011.

CHAVES, R. T. **Estudo do uso de misturas de etanol hidratado e gasolinas automotivas em um motor ASTM-DFR.** Rio de Janeiro: UFRJ, 2013.

CHUGH, S. et al. ScienceDirect Modeling & simulation study to assess the effect of CO₂ on performance and emissions characteristics of 18 % HCNG blend on a light duty SI engine. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 41, n. 14, p. 6155–6161, 2015.

CONAMA. **Resolução N° 418 de 25 de novembro de 2009BRASIL.**Disponível em: <http://www.mma.gov.br/port/conama/res/res09/res41809.pdf>.

DENG, J. et al. Experimental study on combustion and emission characteristics of a hydrogen-enriched compressed natural gas engine under idling condition. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 36, n. 20, p. 13150–13157, 2011.

DRUMM, F. C. et al. Poluição atmosférica proveniente da queima de combustíveis derivados do petróleo em veículos automotores. **Revista do Centro do Ciências Naturais e Exatas**, - v. 18 n. 1, p. 66-78, 2014.

ELFASAKHANY, A. Engineering Science and Technology , an International Journal Investigations on the effects of ethanol e methanol e gasoline blends in a spark-ignition engine : Performance and emissions analysis. **Engineering Science and Technology, an International Journal**, v. 18, n. 4, p. 713–719, 2015.

ELFASAKHANY, A. Experimental study of dual n-butanol and iso-butanol additives on spark-ignition engine performance and emissions. **Fuel**, v. 163, p. 166–174, 2016.

Empresa de Pesquisa Energética (EPE). **Energia renovável: hidráulica, biomassa, eólica, solar, oceânica.** 452p. EPE: Rio de Janeiro, 2016.

ERAN SHER. **Handbook of Air Pollution from Internal Combustion Engines**;1998.

EYIDOGAN, M. et al. Impact of alcohol-gasoline fuel blends on the performance and combustion characteristics of an SI engine. **Fuel**, v. 89, p. 2713–2720, 2010.

GENCHI, G.; PIPITONE, E. **Preliminary experimental study on double fuel HCCI**

combustion. Energy Procedia. **Anais...Italia**: 2015

GREENWOOD, J. B. et al. Experimental results of hydrogen enrichment of ethanol in an ultra-lean internal combustion engine. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 39, n. 24, p. 12980–12990, 2014.

HEYWOOD J.B. **Internal Combustion Engine**. Massachusetts; 1988.

JAHIRUL, M. I. et al. Comparative engine performance and emission analysis of CNG and gasoline in a retrofitted car engine. **Applied Thermal Engineering**, v. 30, n. 14–15, p. 2219–2226, 2010.

CARVALHO JUNIOR, J. A.; LACAVA, P. T. **Emissões em processo de combustão**. São Paulo: Editora Unesp, 2003. 135 p.

KACEM, S. H. et al. The effect of H₂ enrichment on in-cylinder flow behavior , engine performances and exhaust emissions : Case of LPG-hydrogen engine. **Applied Energy**, v. 179, p. 961–971, 2016.

KAMIL, M.; RAHMAN, M. M. Performance prediction of spark-ignition engine running on gasoline-hydrogen and methane-hydrogen blends. **Applied Energy**, v. 158, p. 556–567, 2015.

KARAVALAKIS, G. et al. Impacts of ethanol fuel level on emissions of regulated and unregulated pollutants from a fleet of gasoline light-duty vehicles. **Fuel**, v. 93, p. 549–558, 2012.

KHAN, M. I. et al. Exploring the potential of compressed natural gas as a viable fuel option to sustainable transport: A bibliography (2001-2015). **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 31, p. 785–797, 2016.

KHAN, M. I.; YASMIN, T.; SHAKOOR, A. Technical overview of compressed natural gas (CNG) as a transportation fuel. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 51, p. 785–797, 2015.

KLELL, M.; EICHLSEDER, H.; SARTORY, M. Mixtures of hydrogen and methane in the internal combustion engine - Synergies, potential and regulations. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 37, n. 15, p. 11531–11540, 2012.

LARANJA, G. C. **Desempenho de um veículo Flex em bancada dinamométrica de chassi**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2010.

LEITE, D. C. et al. Can Brazil replace 5 % of the 2025 gasoline world demand with ethanol ? v. 34, p. 655–661, 2009.

MARTINS, A. A.; ROCHA, R. A. D.; SODRÉ, J. R. Cold start and full cycle emissions from a flexible fuel vehicle operating with natural gas, ethanol and gasoline. **Journal of Natural Gas Science and Engineering**, v. 17, n. x, p. 94–98, 2014.

MASUM, B. M. et al. Effect of ethanol-gasoline blend on NO_x emission in SI engine. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 24, p. 209–222, 2013.

MELO, T. C. C. DE et al. Hydrous ethanol-gasoline blends - Combustion and emission investigations on a Flex-Fuel engine. **Fuel**, v. 97, p. 796–804, 2012.

MOHD, M. et al. Performance analysis of a spark ignition engine using compressed natural gas (CNG) as fuel. **Energy Procedia**, v. 68, p. 355–362, 2015.

MOMENI MOVAHED, M.; BASIRAT TABRIZI, H.; MIRSALEM, M. Experimental investigation of the concomitant injection of gasoline and CNG in a turbocharged spark ignition engine. **Energy Conversion and Management**, v. 80, p. 126–136, 2014.

MORENO, F. et al. Efficiency and emissions in a vehicle spark ignition engine fueled with hydrogen and methane blends. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 37, n. 15, p. 11495–11503, 2012a.

MORENO, F. et al. Combustion analysis of a spark ignition engine fueled with gaseous blends containing hydrogen. **International Journal of Hydrogen Energy**, 2012b.

NAVARRO, E.; LEO, T. J.; CORRAL, R. CO₂ emissions from a spark ignition engine operating on natural gas-hydrogen blends (HCNG). **Applied Energy**, v. 101, p. 112–120, 2013.

NIU, R. et al. Effect of hydrogen proportion on lean burn performance of a dual fuel SI engine using hydrogen direct-injection. **Fuel**, v. 186, p. 792–799, 2016.

OLANYK, L. Z. **Avaliação das emissões gasosas de um motor monocilindro ciclo otto utilizando diferentes misturas de gasolina com etanol adulterante**. [s.l.] Universidade Estadual do Centro-Oeste do Paraná, 2013.

PATEL, S. K. S. et al. Bioresource Technology Improvement in methanol production by regulating the composition of synthetic gas mixture and raw biogas. **Bioresource Technology**, v. 218, p. 202–208, 2016.

ROCHA, H. L. **Estudo experimental do uso de misturas combustíveis ternárias em um motor CFR/ASTM cetano**. Trabalho de Graduação (Graduação em Engenharia Mecânica) - Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2014.

SAKAI, S.; ROTHAMER, D. Effect of ethanol blending on particulate formation from premixed combustion in spark-ignition engines. **Fuel**, v. 196, p. 154–168, 2017.

SALVI, B. L.; SUBRAMANIAN, K. A.; PANWAR, N. L. Alternative fuels for transportation vehicles: A technical review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 25, p. 404–419, 2013.

SHIVAPUJI, A. M.; DASAPPA, S. Influence of fuel hydrogen fraction on syngas fueled SI engine : Fuel thermo-physical property analysis and in-cylinder experimental investigations. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 40, n. 32, p. 10308–10328, 2015.

SOPENA, C. et al. Conversion of a commercial gasoline vehicle to run bi-fuel. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 7, n. December 2009, p. 1781–1789, 2012.

TEIXEIRA, E. C.; FELTES, S.; SANTANA, E. R. R. DE. Estudo das emissões de fontes móveis na região metropolitana de Porto Alegre, Rio Grande do Sul. **Química Nova**, v. 31, n. 2, p. 244–248, 2008.

THOMAS, R. et al. Experimental evaluation of the effect of compression ratio on performance and emission of SI engine fuelled with gasoline and n-butanol blend at different loads. **Perspectives in Science**, v. 8, p. 743–746, 2016.

THURNHEER, T.; SOLTIC, P.; DIMOPOULOS EGGENSCHWILER, P. S.I. engine fuelled with gasoline, methane and methane/hydrogen blends: Heat release and loss analysis. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 34, p. 2494–2503, 2009.

TURKCAN, A.; OZSEZEN, A. N.; CANAKCI, M. Effects of second injection timing on combustion characteristics of a two stage direct injection gasoline – alcohol HCCI engine. **Fuel**, v. 111, p. 30–39, 2013.

WANG, S. et al. Lean burn performance of a hydrogen-blended gasoline engine at the wide open throttle condition. **Applied Energy**, v. 136, p. 43–50, 2014.

YE, S.-H. et al. **Toxicity and health effects of vehicle emissions in Shanghai**, 2000.

YUNES A. ÇENGEL AND MICHAEL A. BOLES. **Thermodynamics An Engineering Approach**. Eighth ed. New York: McGraw-Hill Education, 2015.

APÊNDICE A: Ensaios preliminares

Ensaios preliminares foram executados com o objetivo de definir a metodologia de testes e verificar o funcionamento do motor Flex adaptado para a injeção de concomitantemente de E100 e E0.

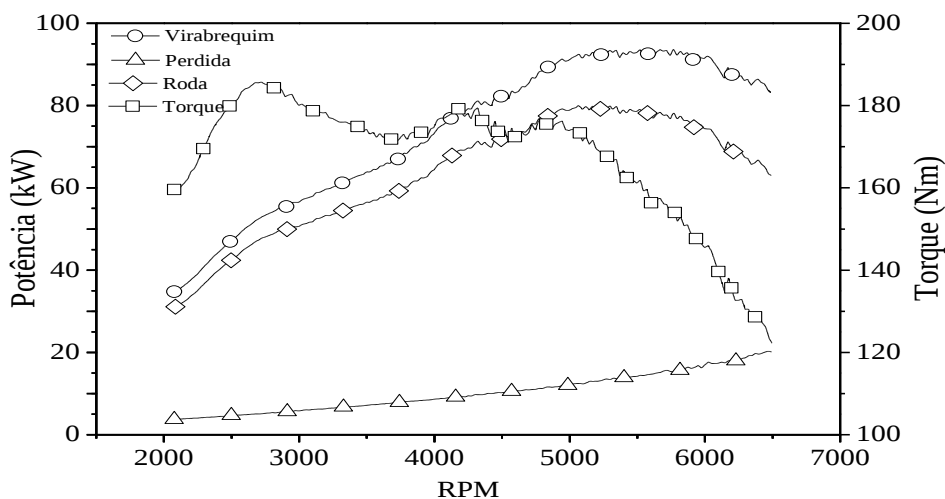
Ressalta-se, que nestes testes preliminares os ensaios foram executados com apenas um combustível (E100 ou E0), ou seja, não foram utilizadas as misturas de ambos e foram determinados o desempenho do motor e a composição dos gases de exaustão.

ANÁLISE DO DESEMPENHO:

O desempenho do motor Flex foi analisado considerando-se a determinação das eficiências (térmica, volumétrica e mecânica), bem como o consumo específico de combustível. Pelas medições realizadas no dinamômetro inercial, potência bruta e potência de saída, é possível determinar as perdas por atrito na transmissão e pelo calor dissipado no sistema de arrefecimento.

Na Figura 19 e Figura 20 apresentam-se as potências medidas no (virabrequim, perda, roda e torque) para E100 e E0, respectivamente, dadas em função da variação da rotação do motor.

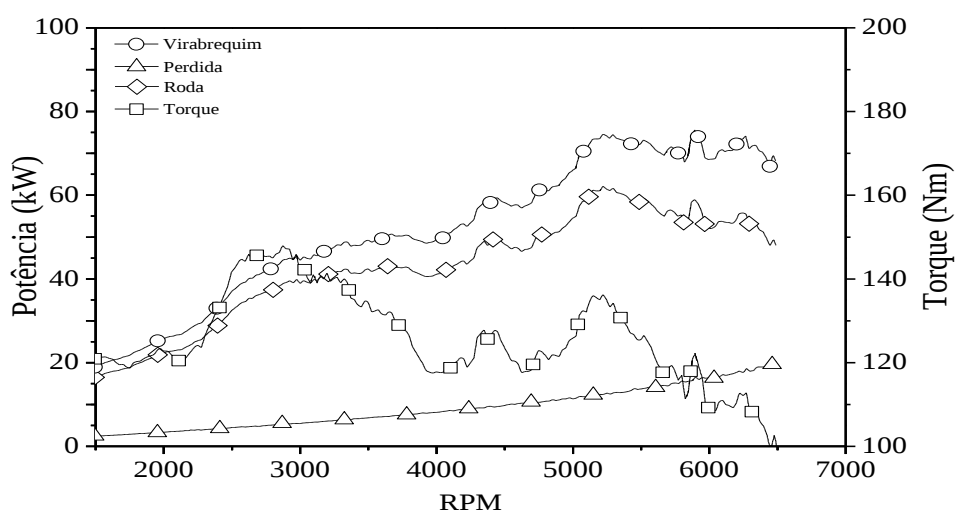
Figura 19: Comportamento das potências do motor Flex abastecido com etanol em função da variação na rotação.



Fonte: Autoria própria.

Observa-se que as potências quando o motor Flex é abastecido com etanol (Figura 19) aumentam em função do aumento da rotação. A potência líquida atinge um valor máximo numa rotação específica e, conforme aumenta a rotação, começa a cair gradualmente. Isto ocorre devido, principalmente, a limitação mássica de ar sofrida pelo sistema de admissão de ar que limita a quantidade de ar necessária para a oxidação do combustível. No caso do motor Flex observou-se esta ocorrência acima de 5700 RPM. Observa-se também o aumento das potências em função do aumento da rotação para o GNV. Entretanto, em comparação com o etanol, o comportamento é mais irregular. Além disso, a potência de roda também apresenta um valor máximo, que reduz em função do aumento da rotação.

Figura 20: Comportamento das potências do motor Flex abastecido com GNV em função da variação na rotação.



Fonte: Autoria própria.

A potência perdida apresenta um comportamento idêntico para ambos combustíveis. Comparando a potência de roda do motor Flex abastecido com etanol e GNV, pode-se observar que o motor apresenta uma redução da potência quando abastecido com GNV. Esta redução de potência pode ser explicada pela alta temperatura que o GNV necessita para entrar em ignição.

Segundo Carvalho Junior; Lacava (2003), o gás natural entra em ignição na temperatura de 540°C. Assim, uma temperatura maior de ignição precisaria também de um

aumento da taxa de compressão do motor. Os motores do ciclo Otto podem funcionar com gasolina, etanol, metanol e GNV. No entanto, não são especialmente projetados para o uso do GNV. Para melhor desempenho do motor Flex ao funcionar com o GNV, o mesmo deveria operar com uma taxa de compressão de 15:1 (CHAVES, 2013). Por outro lado, com esta taxa de compressão, teria restrição para funcionar com o etanol e não funcionaria com a gasolina. O efeito observado seria a pré-ignição, provocando as “batidas de pino”, barulho interno característico de motor danificado. A ignição estaria ocorrendo antes do tempo ideal, resultando em menor eficiência, pois a combustão completa estaria ocorrendo antes que o pistão chegasse ao ponto morto superior.

Os valores de potência máxima para etanol e GNV são apresentados na Tabela 10. Nota-se que os valores de potência foram maiores para o etanol. A potência de um motor tem relação com o tipo de combustível que utiliza e com o seu projeto. A menor potência do motor Flex no modo GNV é devido à sua elevada resistência à detonação, menor densidade energética e maior temperatura de ignição do GNV. Khan; Yasmin; Shakoore, (2015) observaram que o motor à gasolina quando abastecido com GNV perde entre 15 e 20% de potência comparado ao seu funcionamento com gasolina.

Tabela 10: Potências máxima para E100 e E0.

Combustível	Virabrequim (kWh)	Perdida (kWh)	Rodas (kWh)
E100	93,90	10,4	83,50
E0	75,71	9,17	66,54

Fonte: Autoria própria.

COMPOSIÇÃO DOS GASES DE EXAUSTÃO

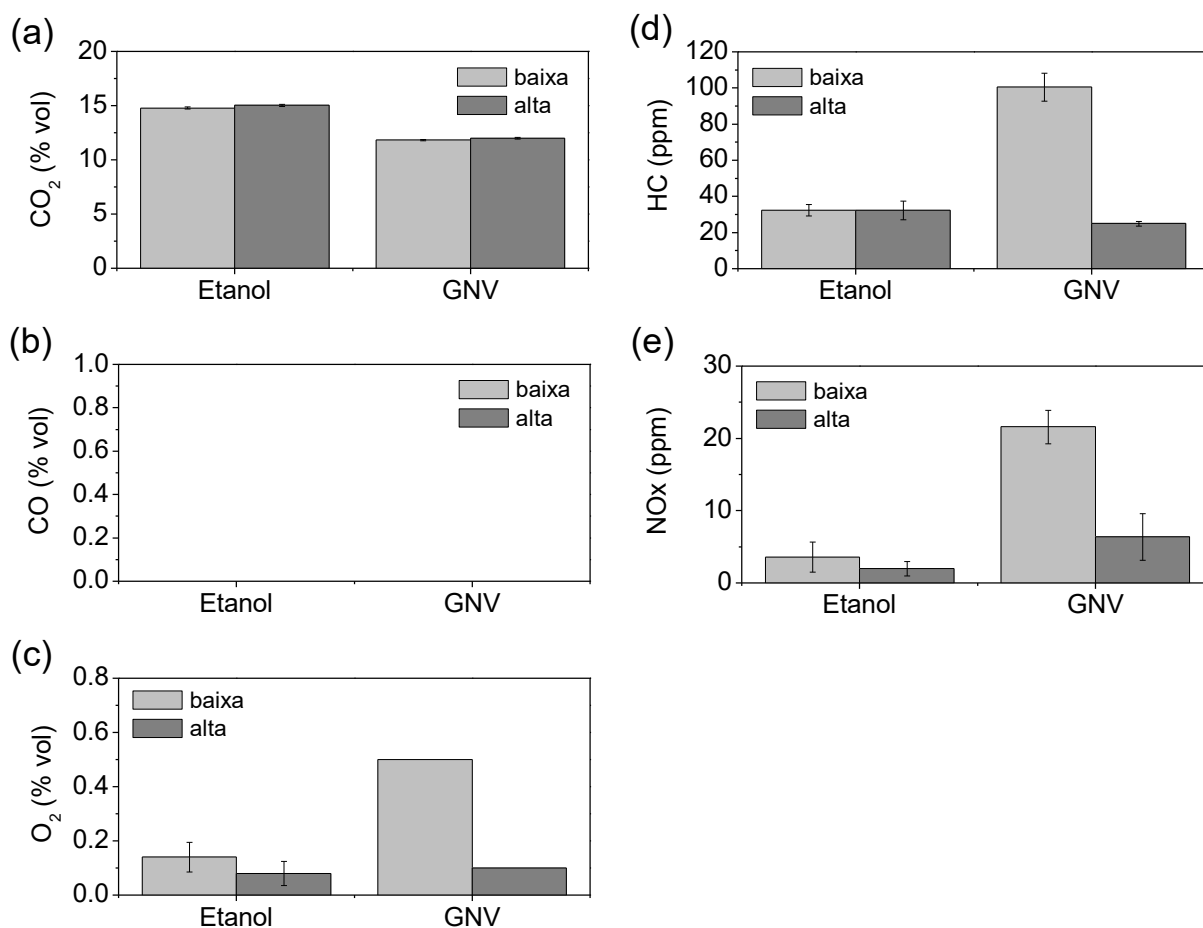
Estes ensaios foram realizados com o veículo em regime estacionário em alta e baixa rotação. Na Figura 21 apresenta-se a composição dos gases de exaustão (CO_2 , CO, HC, NO_x e O_2) gerados na combustão do motor Flex funcionando com etanol e GNV, sendo que os valores numéricos obtidos na análise dos gases de exaustão são apresentados na Tabela 11.

A combustão completa de E100 e de E0 apresenta concentrações de CO próximas de zero e atinge valores máximos para o CO_2 de 15% para o E100 e 12 % para o E0. Observou-se que em ambas velocidades angulares a concentração de CO nos gases de exaustão para ambos combustíveis apresenta valores próximo de zero ou abaixo do valor mínimo da

sensibilidade de medição do analisador de gases.

Nota-se que a concentração de CO_2 (%) nos gases de exaustão da combustão de E100 é superior à E0 em 25% considerando ambas as rotações, altas e baixas. Isto pode ser explicado considerando-se que o E100 tem maior número de moléculas de carbono por mol em relação ao E0. Individualmente, ambos os combustíveis apresentam concentrações de CO_2 similares nas velocidades angulares estudadas, sendo levemente superior em regime de alta rotação.

Figura 21: Composição dos gases de exaustão avaliados (CO_2 , CO, HC, NO_x e O_2) durante a combustão dos combustíveis comerciais (etanol e GNV) no motor operando em duas rotações (baixa e alta) em condição estacionária.



Fonte: Autoria própria.

A concentração de HC (medida em ppm) é muito menor para o E100 em relação às concentrações de HC da combustão de E0. Além disto a concentração de HC nos gases da

combustão de E100 manteve-se constante em ambas velocidades angulares. No caso do e, a concentração de HC é muito variável, apresentando um maior valor em baixa rotação. Entretanto, um aumento na rotação provoca uma redução significativa, atingindo valores abaixo da concentração de HC de E100. A concentração de HC está associada com a capacidade de mistura entre os reagentes. Em altas rotações tem-se maior entrada de ar e a mistura dos reagentes é mais homogeneizada, proporcionando melhor combustão.

As concentrações de NOx (em ppm) apresentam um maior valor para a combustão do E0 em ambas velocidades angulares. Além disso, foram observadas maiores concentrações de NOx em baixa rotação para ambos os combustíveis, no entanto, exibindo uma redução significativa na concentração em condição de alta rotação. Em baixa rotação, pode-se observar que a concentração de NOx é muito inferior quando o motor é abastecido com E100. Nesta condição, a concentração de NOx derivada do E0 apresenta um valor 6 vezes superior à concentração de NOx derivada da combustão do E100.

As emissões de NOx em processo de combustão dependem da temperatura da combustão e do nitrogênio do ar. No caso das emissões de NOx serem maiores para o E0, pode-se considerar que a combustão do E0 ocorra em maior temperatura do que a combustão do E100.

O comportamento da concentração de O₂ (%) apresenta um maior valor para o E0 em baixa rotação, no entanto, para ambos combustíveis em alta rotação, a concentração de O₂ diminui.

Tabela 11: Composição dos gases de exaustão em condição estacionária.

RPM	Gases de Exaustão	Combustível	
		E100	E0
Baixa	CO ₂ (% vol.)	14,78	11,82
	CO (% vol.)	0,00	0,00
	O ₂ (% vol.)	0,14	0,50
	HC (ppm)	32,40	100,60
	NOx (ppm)	3,60	21,60
Alta	CO ₂ (% vol.)	15,00	12,00
	CO (% vol.)	0,00	0,00

O ₂ (% vol.)	0,08	0,10
HC (ppm)	32,40	25,00
NOx (ppm)	2,00	6,40

Fonte: Autoria própria.

APÊNDICE B: Programação dos ensaios no motor Flex adaptado

Tabela 12: Condições experimentais adotadas nos ensaios executados no motor Flex adaptado para uso de misturas de etanol-GNV.

Nr. de Testes	Combustíveis	Condição de teste	Procedimento	Equipamentos utilizados	Medições executadas
1	E0	Teste estacionário à baixa rotação (marcha lenta: ~1000 rpm), sem carga.	Espera-se o motor entrar em regime (~20 min) e, então, registra-se 4 leituras de emissões a cada ~5 min	Analisador de gases	4 medições das concentrações dos gases na exaustão (CO ₂ , CO, O ₂ , NO _x e HC)
2	E20				
3	E40				
4	E60				
5	E80				
6	E100				
7	E0	Teste estacionário à alta rotação (2500 rpm), sem carga			
8	E20				
9	E40				
10	E60				
11	E80				
12	E100				
13	E0	2000 RPM, carga de 25%	O carro foi posicionado no dinamômetro dinâmico, espera-se o motor se aquecer (~10 min) até 98oC, leva o motor à rotação desejada, espera-se o sistema entrar em regime (verificado pelas emissões) e, então, registra-se 5 leituras de emissões a cada ~3 min	Dinamômetro dinâmico, analisador de gases, balanças digitais, termooanemômetro digital	5 medições das concentrações dos gases na exaustão (CO ₂ , CO, O ₂ , NO _x e HC). 1 medição para potência, vazão de ar, massa dos combustíveis utilizados 5 medições
14	E20				
15	E40				
16	E60				
17	E80				
18	E100				
19	E0	2500 RPM, carga de 25%			
20	E20				
21	E40				
22	E60				
23	E80				
24	E100				
25	E0	3000 RPM, carga de 25%			
26	E20				
27	E40				
28	E60				
29	E80				
30	E100				

Fonte: Autoria própria.

APÊNDICE C: Ensaios em Condição Estacionária

Tabela 13: Emissões geradas nos ensaios executados no motor Flex adaptado para uso de misturas de etanol-GNV – testes em condição estacionaria em baixa rotação.

Combustível	Medidas	Emissões				
		CO ₂	CO	O ₂	HC	NO _x
E0	1	11,30	0,00	0,80	69,00	18,00
	2	10,90	0,01	1,40	66,00	26,00
	3	10,80	0,01	1,50	50,00	28,00
	4	10,80	0,00	1,40	37,00	28,00
	Média	10,95	0,01	1,28	55,50	25,00
	Desvio	0,21	0,01	0,28	12,89	4,12
E20	1	12,30	0,00	0,50	30,00	16,00
	2	12,20	0,00	0,60	27,00	11,00
	3	12,20	0,00	0,50	29,00	15,00
	4	12,10	0,00	0,80	32,00	14,00
	Média	12,20	0,00	0,60	29,50	14,00
	Desvio	0,07	0,00	0,12	1,80	1,87
E40	1	10,40	0,44	1,90	95,00	26,00
	2	11,10	0,00	1,30	82,00	32,00
	3	11,10	0,00	1,30	73,00	33,00
	4	11,10	0,00	1,20	44,00	33,00
	Média	10,93	0,11	1,43	73,50	31,00
	Desvio	0,30	0,19	0,28	18,74	2,92
E60	1	CO2	CO	O2	HC	NOX
	2	11,50	0,01	1,80	57,00	10,00
	2	10,80	0,00	1,60	83,00	29,00
	2	10,80	0,00	1,60	51,00	33,00
	Média	11,30	0,00	0,40	61,00	29,00
	Desvio	0,33	0,00	0,09	13,89	10,03
E80	1	12,30	0,00	1,60	37,00	8,00
	2	11,80	0,00	1,30	39,00	15,00
	3	11,90	0,00	1,20	23,00	16,00
	4	11,90	0,00	1,10	19,00	10,00
	Média	11,98	0,00	1,30	29,50	12,25
	Desvio	0,19	0,00	0,19	8,65	3,34
E100	1	13,50	0,00	1,50	24,00	4,00
	2	13,80	0,00	1,20	19,00	3,00
	3	14,00	0,00	1,10	15,00	3,00
	4	14,00	0,00	1,10	18,00	8,00
	Média	13,83	0,00	1,23	19,00	4,50
	Desvio	0,20	0,00	0,16	3,24	2,06

Fonte: Autoria própria.

Tabela 14: Emissões geradas nos ensaios executados no motor Flex adaptado para uso de misturas de etanol-GNV – testes em condição estacionária em alta rotação.

<i>Combustível</i>	<i>Medidas</i>	<i>Emissões</i>				
		CO ₂	CO	O ₂	HC	NO _x
E0	1	11,10	0,01	1,10	25,00	54,00
	2	11,00	0,01	1,20	54,00	50,00
	3	11,10	0,01	1,10	16,00	12,00
	4	11,10	0,00	1,00	17,00	17,00
	Média	11,08	0,01	1,10	28,00	33,25
	Desvio	0,04	0,00	0,07	15,41	18,89
E20	1	12,20	0,00	0,30	24,00	6,00
	2	12,20	0,04	0,40	24,00	4,00
	3	12,00	0,04	0,60	26,00	5,00
	4	12,10	0,03	0,50	22,00	4,00
	Média	12,13	0,03	0,45	24,00	4,75
	Desvio	0,08	0,02	0,11	1,41	0,83
E40	1	11,20	0,03	1,10	40,00	54,00
	2	11,30	0,04	0,80	39,00	7,00
	3	11,30	0,01	0,80	28,00	8,00
	4	11,40	0,00	0,80	23,00	5,00
	Média	11,30	0,02	0,88	32,50	18,50
	Desvio	0,07	0,02	0,13	7,23	20,52
E60	1	11,50	0,01	1,80	57,00	10,00
	2	10,80	0,00	1,60	83,00	29,00
	2	10,80	0,00	1,60	51,00	33,00
	2	11,30	0,00	0,40	61,00	29,00
	Média	11,10	0,00	1,35	63,00	25,25
	Desvio	0,31	0,00	0,55	12,08	8,95
E80	1	12,60	0,00	0,90	12,00	47,00
	2	11,90	0,04	0,80	11,00	6,00
	3	11,90	0,02	0,80	9,00	5,00
	4	11,90	0,05	0,80	9,00	5,00
	Média	12,08	0,03	0,83	10,25	15,75
	Desvio	0,30	0,02	0,04	1,30	18,05
E100	1	13,90	0,07	1,00	20,00	5,00
	2	14,00	0,01	1,00	17,00	2,00
	3	14,10	0,02	0,80	16,00	2,00
	4	14,10	0,01	0,80	13,00	1,00
	Média	14,03	0,03	0,90	16,50	2,50
	Desvio	0,08	0,02	0,10	2,50	1,50

Fonte: Autoria própria.

APÊNDICE D: Ensaios no Dinamômetro Ativo

Tabela 15: Emissões geradas nos ensaios executados no motor Flex adaptado para uso de misturas de etanol-GNV – testes a 2000 RPM executados no dinamômetro ativo.

Combustível	Medidas	Emissões				
		CO ₂	CO	O ₂	HC	NO _x
E0	1	12,000	0,050	0,400	42,000	401,000
	2	12,100	0,030	0,200	33,000	244,000
	3	12,100	0,010	0,200	20,000	112,000
	4	12,100	0,010	0,200	21,000	307,000
	5	12,100	0,010	0,100	16,000	191,000
	Média	12,080	0,022	0,220	26,400	251,000
	Desvio	0,040	0,016	0,098	9,646	98,596
E20	1	12,900	0,010	0,100	9,000	75,000
	2	12,900	0,020	0,100	12,000	49,000
	3	12,900	0,010	0,100	15,000	84,000
	4	12,800	0,020	0,100	15,000	100,000
	5	12,900	0,010	0,100	14,000	107,000
	Média	12,880	0,014	0,100	13,000	83,000
	Desvio	0,040	0,005	0,000	2,280	20,425
E40	1	13,100	0,000	0,100	19,000	262,000
	2	13,100	0,000	0,100	16,000	188,000
	3	13,100	0,000	0,100	11,000	125,000
	4	13,100	0,000	0,100	11,000	293,000
	5	13,100	0,000	0,100	11,000	166,000
	Média	13,100	0,000	0,100	13,600	206,800
	Desvio	0,000	0,000	0,000	3,323	61,946
E60	1	13,000	0,000	0,100	8,000	93,000
	2	13,000	0,000	0,100	8,000	170,000
	3	13,100	0,000	0,100	10,000	108,000
	4	13,100	0,000	0,100	10,000	179,000
	5	13,100	0,000	0,100	9,000	143,000
	Média	13,060	0,000	0,100	9,000	138,600
	Desvio	0,049	0,000	0,000	0,894	33,625

Continuação da Tabela 15.

Combustível	Medidas	Emissões				
		CO ₂	CO	O ₂	HC	NO _x
E80	1	13,100	0,010	0,100	7,000	157,000
	2	13,700	0,010	0,100	14,000	278,000
	3	13,700	0,010	0,100	7,000	164,000
	4	13,700	0,010	0,100	13,000	291,000
	5	13,700	0,010	0,100	9,000	159,000
	Média	13,580	0,010	0,100	10,000	209,800
	Desvio	0,240	0,000	0,000	2,966	61,173
E100	1	14,900	0,020	0,200	4,000	159,000
	2	14,900	0,010	0,200	3,000	124,000
	3	14,900	0,010	0,200	1,000	145,000
	4	14,900	0,010	0,100	1,000	126,000
	5	14,900	0,010	0,100	1,000	101,000
	Média	14,900	0,012	0,160	2,000	131,000
	Desvio	0,000	0,004	0,049	1,265	19,769

Fonte: Autoria própria.

Tabela 16: Emissões geradas nos ensaios executados no motor Flex adaptado para uso de misturas de etanol-GNV – testes a 2500 RPM executados no dinamômetro ativo.

Combustível	Medidas	Emissões				
		CO ₂	CO	O ₂	HC	NO _x
E0	1	12,100	0,060	0,100	12,000	52,000
	2	12,100	0,080	0,100	12,000	48,000
	3	12,100	0,030	0,100	14,000	50,000
	4	12,200	0,020	0,100	12,000	48,000
	5	12,200	0,020	0,100	11,000	35,000
	Média	12,140	0,042	0,100	12,200	46,600
	Desvio	0,049	0,024	0,000	0,980	5,987
E20	1	12,900	0,010	0,000	10,000	30,000
	2	12,900	0,010	0,000	9,000	33,000
	3	12,900	0,020	0,000	9,000	26,000
	4	12,900	0,000	0,000	9,000	28,000
	5	12,900	0,010	0,000	9,000	25,000
	Média	12,900	0,010	0,000	9,200	28,400
	Desvio	0,000	0,006	0,000	0,400	2,871
E40	1	13,100	0,000	0,000	8,000	50,000
	2	13,200	0,000	0,000	8,000	101,000
	3	13,100	0,000	0,000	7,000	36,000
	4	13,100	0,000	0,000	8,000	91,000
	5	13,200	0,000	0,000	7,000	30,000
	Média	13,140	0,000	0,000	7,600	61,600
	Desvio	0,049	0,000	0,000	0,490	29,001
E60	1	13,100	0,000	0,100	8,000	50,000
	2	13,100	0,000	0,100	7,000	47,000
	3	13,000	0,000	0,100	7,000	58,000
	4	13,100	0,000	0,100	7,000	41,000
	5	13,100	0,000	0,100	7,000	57,000
	Média	13,080	0,000	0,100	7,200	50,600
	Desvio	0,040	0,000	0,000	0,400	6,344
E80	1	13,700	0,000	0,100	7,000	142,000
	2	13,800	0,000	0,100	3,000	91,000
	3	13,800	0,000	0,100	5,000	220,000
	4	13,800	0,000	0,100	5,000	233,000
	5	13,800	0,000	0,100	5,000	113,000
	Média	13,780	0,000	0,100	5,000	159,800
	Desvio	0,040	0,000	0,000	1,265	56,961

Continuação da Tabela 16.

Combustível	Medidas	Emissões				
		CO ₂	CO	O ₂	HC	NO _x
E100	1	15,000	0,010	0,100	0,000	55,000
	2	15,000	0,000	0,100	0,000	44,000
	3	15,000	0,000	0,100	0,000	48,000
	4	15,000	0,000	0,100	0,000	72,000
	5	15,000	0,000	0,100	0,000	58,000
	Média	15,000	0,002	0,100	0,000	55,400
	Desvio	0,000	0,004	0,000	0,000	9,666

Fonte: Autoria própria.

Tabela 17: Emissões geradas nos ensaios executados no motor Flex adaptado para uso de misturas de etanol-GNV – testes a 3000 RPM executados no dinamômetro ativo.

Combustível	Medidas	Emissões				
		CO ₂	CO	HC	NO _x	O ₂
E0	1	12,200	0,000	7,000	30,000	0,000
	2	12,200	0,010	6,000	25,000	0,000
	3	12,200	0,030	6,000	25,000	0,000
	4	12,200	0,010	5,000	27,000	0,000
	5	12,200	0,010	4,000	28,000	0,000
	Média	12,200	0,012	5,600	27,000	0,000
	Desvio	0,000	0,010	1,020	1,897	0,000
E20	1	12,800	0,000	8,000	26,000	0,000
	2	12,900	0,000	10,000	25,000	0,000
	3	12,900	0,010	10,000	23,000	0,000
	4	12,900	0,010	8,000	29,000	0,000
	5	12,900	0,000	8,000	25,000	0,000
	Média	12,880	0,004	8,800	25,600	0,000
	Desvio	0,040	0,005	0,980	1,960	0,000
E40	1	13,100	0,000	9,000	28,000	0,000
	2	13,100	0,000	9,000	28,000	0,000
	3	13,100	0,000	10,000	27,000	0,000
	4	13,100	0,000	10,000	25,000	0,000
	5	13,000	0,000	9,000	26,000	0,000
	Média	13,080	0,000	9,400	26,800	0,000
	Desvio	0,040	0,000	0,490	1,166	0,000
E60	1	12,900	0,000	7,000	22,000	0,100
	2	13,000	0,000	7,000	24,000	0,000
	3	13,000	0,000	6,000	18,000	0,000
	4	13,000	0,010	8,000	17,000	0,000
	5	13,100	0,010	9,000	18,000	0,000
	Média	13,000	0,004	7,400	19,800	0,020
	Desvio	0,063	0,005	1,020	2,713	0,040
E80	1	13,800	0,000	2,000	40,000	0,100
	2	13,800	0,000	2,000	27,000	0,100
	3	13,800	0,000	2,000	29,000	0,100
	4	13,800	0,000	1,000	25,000	0,100
	5	13,800	0,000	2,000	29,000	0,100
	Média	13,800	0,000	1,800	30,000	0,100
	Desvio	0,000	0,000	0,400	5,215	0,000

Continuação da Tabela 17.

Combustível	Medidas	Emissões				
		CO ₂	CO	HC	NO _x	O ₂
E100	1	15,000	0,000	0,000	49,000	0,000
	2	15,000	0,000	0,000	35,000	0,000
	3	15,000	0,000	0,000	35,000	0,000
	4	15,000	0,000	0,000	34,000	0,000
	5	15,000	0,000	0,000	39,000	0,000
	Média	15,000	0,000	0,000	38,400	0,000
	Desvio	0,000	0,000	0,000	5,571	0,000

Fonte: Autoria própria.

APÊNDICE E: Análise de desempenho do motor Flex adaptado

Tabela 18: Análise de desempenho do motor Flex adaptado para uso de misturas de etanol-GNV.

Rotação (RPM)	Combustíveis					
	E0	E20	E40	E60	E80	E100
Consumo específico de combustível (kWh/kg)						
2000	0,298	0,333	0,393	0,388	0,436	0,451
2500	0,361	0,403	0,472	0,554	0,548	0,59
3000	0,399	0,558	0,558	0,528	0,63	0,735
Eficiência térmica (%)						
2000	24,2	26,08	23,74	24,08	24,01	27,99
2500	19,95	21,3	19,78	16,72	19,11	21,37
3000	18,03	16,32	16,63	17,66	16,51	17,15
3. Eficiência volumétrica (%)						
2000	65	66	67	66	67	63
2500	51	51	50	51	51	50
3000	40	41	41	42	41	41
4. Eficiência mecânica (%)						
2000	91,01	91,94	91,27	91,82	92,00	92,68
2500	91,10	92,00	91,10	91,10	92,0	92,00
3000	89,68	91,03	90,22	90,73	90,85	91,32
5. Potências (kWh)						
2000	15,05	15,79	15,42	15,79	15,79	17,44
2500	12,41	13,29	12,85	10,65	12,85	15,31
3000	11,75	9,18	10,65	11,09	11,02	11,75

Fonte: Autoria própria.

Tabela 19: Potências máximas (kWh) obtidas no motor Flex adaptado para uso de misturas de etanol-GNV.

Rotação (RPM)	Combustíveis	Potências máximas (kWh)
6000	E0	87,9
6000	E20	101
6000	E40	94
6000	E60	96,5
6000	E80	98,1
6000	E100	104,8

Fonte: Autoria própria.

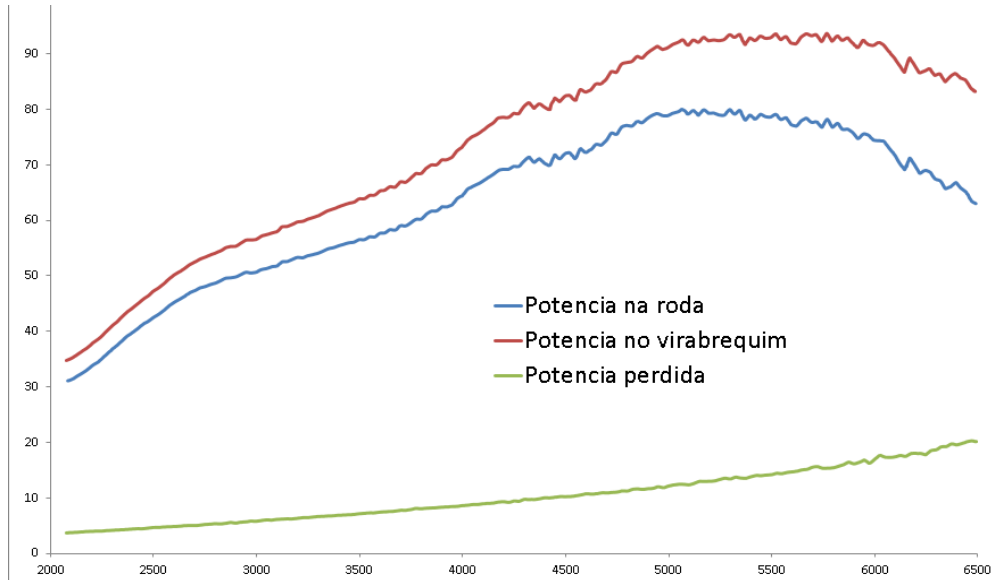
APÊNDICE F: Análise do custo operacional

Tabela 20: Análise do custo operacional (R\$/h) para o motor Flex adaptado para uso de misturas de etanol-GNV.

Custo operacional (R\$/h)						
Rotação (RPM)	Combustíveis					
	E0	E20	E40	E60	E80	E100
2000	13,176	16,077	18,753	18,941	21,678	25,386
2500	13,176	16,348	18,753	18,236	22,184	29,198
3000	12,294	15,2	18,365	18,136	21,849	27,906

ANEXO A: Laudo das Potências (kWh)

- E100



- E0

