

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

ESTUDO EXPERIMENTAL DA UTILIZAÇÃO DO GÁS HHO COMO COMBUSTÍVEL
AUXILIAR EM MOTORES DE COMBUSTÃO INTERNA

por

Thiago Gonçalves Fernandes

Dissertação para obtenção do Título de
Mestre em Engenharia

Porto Alegre, Maio de 2018

ESTUDO EXPERIMENTAL DA UTILIZAÇÃO DO GÁS HHO COMO COMBUSTÍVEL
AUXILIAR EM MOTORES DE COMBUSTÃO INTERNA

por

Thiago Gonçalves Fernandes

Engenheiro Mecânico

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos necessários para a obtenção do Título de

Mestre em Engenharia

Área de Concentração: Energia

Orientador: Prof. Dr. Pedro Barbosa Mello

Aprovada por:

Prof. Dr. Adriane Prisco Petry..... PROMEC/UFRGS

Prof. Dr. Charles Rech.....DEMEC/UNILASALLE

Prof. Dr. Flavio Vanderlei Zancanaro Júnior.....DEPTO. INTERDIC./UFRGS

Prof. Dr. Jakson M Vassoler

Coordenador do PROMEC

Porto Alegre, 30 de Maio de 2018

*À Núbia, minha esposa, e aos nossos filhos Nicolás e Thales,
presentes em todos os momentos do meu trabalho.*

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao Engenheiro Júlio Gaudioso, por ter colaborado na execução dos experimentos, no Laboratório de Motores da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

RESUMO

Este trabalho contém um estudo experimental para a obtenção e a validação de um combustível à base de água, obtido através da eletrolise desta e denominado de HHO (Gás de Brown), a ser utilizado como auxiliar na queima de hidrocarbonetos dos demais combustíveis fósseis e de fontes renováveis como o álcool hidratado (etanol). Para a realização deste trabalho foi utilizado um eletrolisador composto por placas de aço inox 316L e eletrólito à base de hidróxido de potássio, conjunto este de eletrólito em sua concentração ideal, material de construção do eletrolisador determinado através de estudo prévio em bibliografia. Posto o sistema em funcionamento, realizado a análise exergética da composição e do gás gerado, onde se verificou a existência de energia disponível para gerar trabalho útil e que o maior desperdício se encontrava na potência elétrica utilizada para a produção do gás. Após esta validação o gás foi submetido a testes em dinamômetro de desempenho e emissões com motores de combustão interna com deslocamento de 1,6 litros, porém com configurações diferentes de alimentação. Para que os dados refletissem a utilização de maior demanda de combustível, como no trânsito urbano, foram escolhidas as rotações de 1500rpm, 2500rpm e 3500rpm, com aberturas de borboleta em dois estágios, total 100% e abertura parcial a 40%. As variáveis controladas foram a potência, o torque, o consumo instantâneo de combustível, o fator lambda (λ) e a emissão dos gases CO, CO₂ e HC. Em ambos os testes, aberturas total e parcial, com suas respectivas particularidades de no sistema de alimentação, foram apresentadas tendências de melhora em desempenho e reduções de emissões, devido aos valores obtidos estarem dentro das incertezas de medição no caso do sistema de alimentação por carburador e combustível principal o álcool hidratado, contudo no caso do sistema de alimentação por injeção eletrônica programável à gasolina comercial, com injeção de gás individualizada os resultados apresentados ficaram moderadamente acima das incertezas de medição. Entretanto, o sistema utilizado no experimento com gasolina + HHO e injeção programável, apresentou uma redução de emissões de CO em 26,4% (abertura parcial) e 18,6% (abertura total), reduzindo as emissões de HC em 16% (abertura parcial) e 14,5% (abertura total) e, por sua vez, o consumo de combustível reduziu em 29,6%.

Palavras-chave: Gás HHO; Eletrolise; Emissões; Combustível Auxiliar; Exergia.

ABSTRACT

This work contains an experimental study to obtain and validate a water-based fuel obtained through the electrolysis of this one and denominated HHO (Brown Gas), to be used as an auxiliary in the hydrocarbon burning of other fossil fuels and renewable sources such as hydrated alcohol (ethanol). For this work, an electrolyzer composed of 316L stainless steel plates and electrolyte based on potassium hydroxide was used, this electrolyte assembly in its ideal concentration, electrolyte construction material determined through a previous bibliography study. After the system was in operation, the exergy analysis of the composition and generated gas was performed, where the existence of available energy to generate useful work was verified and that the greatest waste was in the electric power used for the production. After this validation the gas was submitted to dynamometer tests of performance and emissions with engines of internal combustion with displacement of 1.6 liters, but with different feeding configurations. For the data to reflect the use of higher fuel demand, such as in urban traffic, the revolutions of 1500rpm, 2500rpm and 3500rpm were chosen, with two-stage butterfly apertures, total 100% and partial opening at 40%. The variables controlled were power, torque, instantaneous fuel consumption, lambda factor (λ) and emission of CO, CO₂ and HC gases. In both tests, total and partial openings, with their respective peculiarities of the feed system, presented trends of improvement in performance and emission reductions, due to the values obtained being within the uncertainties of measurement in the case of the carburetor feed system and the main fuel is the hydrated alcohol, however in the case of the commercial gasoline programmable electronic fuel injection system with individualized gas injection the presented results were moderately above the measurement uncertainties. However, the system used in the experiment with gasoline + HHO and programmable injection showed a reduction of CO emissions by 26.4% (partial opening) and 18.6% (total opening), reducing HC emissions by 16% (partial opening) and 14.5% (total opening) and, in turn, fuel consumption decreased by 29.6%.

Keywords: HHO, Electrolysis, Emissions, Auxiliary Fuel, Exergy.

ÍNDICE

1	INTRODUÇÃO1
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA3
3	BASES TEÓRICAS.....	..6
3.1	Motores de Combustão Interna6
3.1.1	Breve Histórico6
3.1.2	Motores 4 Tempos6
3.1.3	Motores 2 Tempos8
3.1.4	Geometria dos Motores Alternativos9
3.1.5	Parâmetros Dinamométricos	11
3.1.6	Eficiência de Motores de Combustão Interna	13
3.1.7	Eficiência Volumétrica	14
3.1.8	Relação Ar Combustível e seus Efeitos	15
3.1.9	Gases de Exaustão.....	17
3.1.10	Combustíveis.....	19
3.2	Propriedades do Gás HHO – Gás de Brown	28
3.3	Eletrólise.....	29
3.3.1	Meio Condutor	30
3.3.2	Fluxo do Processo de Eletrólise	31
3.4	Análise Exergética.....	31
3.4.1	Tipos de Exergia	32
4	MATERIAIS E METODOS	34
4.1	Experimento 1	36

4.2	Experimento 2	38
4.2.1	Sistema GAS	39
4.2.2	Sistema de Injeção Programável	39
4.3	Equipamentos Utilizados em Ambos os Experimentos	40
4.3	Experimentos.....	41
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	43
5.1	Análise e Balanço Exergético.....	43
5.2	Resultados do Experimento 1 (Álcool + HHO)	45
5.2.1	Potência Efetiva.....	45
5.2.2	Torque	47
5.2.3	Consumo Específico	49
5.2.4	Lambda	51
5.2.5	Emissão de Monóxido de Carbono (CO).....	53
5.2.6	Emissão de Dióxido de Carbono (CO ₂)	55
5.2.7	Emissão de Hidrocarbonetos (HC)	57
5.3	Resultados do Experimento 2 (Gasolina + HHO).....	59
5.3.1	Potência Efetiva	59
5.3.2	Torque	61
5.3.3	Consumo Específico	63
5.3.4	Lambda	65
5.3.5	Emissão de Monóxido de Carbono (CO).....	66
5.3.6	Emissão de Dióxido de Carbono (CO ₂)	68
5.3.7	Emissão de Hidrocarbonetos (HC)	70
6	CONCLUSÕES.....	73

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS..... 76

ANEXO I – Análise de Erros..... 79

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1	Ciclos do motor 4 tempos. Fonte: Abekwar (2017).....	7
Figura 3.2	Motor 2 tempos. Fonte: Auto Intusiastas (2017)	9
Figura 3.3	Geometria do cilindro, êmbolo, biela e árvore de manivelas. Fonte: Heywood (1988).....	11
Figura 3.4	Esquema de funcionamento de um dinamômetro. Fonte: Heywood (1988).....	12
Figura 3.5	Curva de Hook -Consumo de combustível em motor de ciclo Otto. Fonte: Plint e Martyr (1997).....	16
Figura 3.6	Calor específico à pressão constante de gases queimados em equilíbrio em função da composição da mistura combustível/ar (ϕ) para o combustível isooctano. Fonte: Heywood (1988)	17
Figura 3.7	Composição dos gases de escape em relação a ϕ . Fonte: Heywood (1988)	18
Figura 3.8	Frota veicular brasileira X Combustível utilizado. Fonte: DENATRAN (2018)	20
Figura 3.9	Relação entre o consumo específico de combustível à rotação e à pressão média efetiva. Fonte: Giacosa (1986)	25
Figura 3.10	Fluxo do processo de obtenção do gás <i>HHO</i>	31
Figura 4.1	Vista lateral do eletrolisador	35
Figura 4.3	Esquema geral do ensaio, onde: Aparelho de eletrólise (1), motor (2), dinamômetro (3), reservatório de combustível (4), central de controle (5) e analisador de gases (6) (Adaptado de El-Kassaby et al., 2016).	36
Figura 4.4	Bancada de controle dos ensaios e Motor VW instalado na bancada de testes e acoplado ao dinamômetro. Fonte: Blanco (2017)	37
Figura 4.5	Motor Fiat instalado na bancada de testes e acoplado ao dinamômetro	39
Figura 4.6	Sistema Landirengo de injeção GNV. Fonte: Landirengo (2017).....	39
Figura 4.7	Sistema de injeção FuelTech FT500 e condicionadores de sinal. Fonte: FuelTech (2017)	40
Figura 4.8	Analisador de gases NAPRO. Fonte: NAPRO Eletrônica Industrial (2017).....	40
Figura 5.1	Potência efetiva calculada com borboleta aberta 100%, incerteza de 0,9%	46
Figura 5.2	Potência efetiva calculada com borboleta aberta 40%, incerteza de $\pm 0,9\%$	47
Figura 5.3	Ganho de potência: Abertura Total X Abertura Parcial.....	47

Figura 5.4	Torque com borboleta aberta 100%, incerteza de $\pm 0,7\%$	48
Figura 5.5	Torque com borboleta aberta 40%, incerteza de $\pm 0,7\%$	49
Figura 5.6	Ganho de torque: Abertura Total X Abertura Parcial	49
Figura 5.7	Consumo Específico de combustível abertura borboleta 100%, incerteza $\pm 1,5\%$	50
Figura 5.8	Consumo específico de combustível abertura de borboleta 40%, incerteza $\pm 1,5\%$	51
Figura 5.9	Redução no consumo de combustível. Abertura total X Abertura parcial.....	51
Figura 5.10	Lambda abertura borboleta 100%, incerteza $\pm 0,01$	52
Figura 5.11	Lambda abertura borboleta 40%, incerteza $\pm 0,01$	53
Figura 5.12	Emissões de Monóxido de Carbono para borboleta aberta 100%, incerteza $\pm 0,06$	54
Figura 5.13	Emissões de Monóxido de Carbono para borboleta aberta 40%, incerteza $\pm 0,06$	54
Figura 5.14	Redução de CO: Abertura Total X Abertura Parcial	55
Figura 5.15	Emissões de Dióxido de Carbono para borboleta aberta 100%, incerteza $\pm 0,6$	56
Figura 5.16	Emissões de Dióxido de Carbono para borboleta aberta 40%, incerteza $\pm 0,6$	56
Figura 5.17	Aumento de CO ₂ : Abertura Total X Abertura Parcial	57
Figura 5.18	Emissões de Hidrocarbonetos para borboleta aberta 100%, incerteza $\pm 3,5\text{PPM}$	58
Figura 5.19	Emissões de Hidrocarbonetos para borboleta aberta 40%, incerteza $\pm 3,5\text{PPM}$	58
Figura 5.20	Redução de HC: Abertura Total X Abertura Parcial	59
Figura 5.21	Potência efetiva calculada com borboleta aberta 100%, incerteza $\pm 0,9\%$	60
Figura 5.22	Potência efetiva calculada com borboleta aberta 40%, incerteza $\pm 0,9\%$	60
Figura 5.23	Ganho de potência: Abertura Total X Abertura Parcial.....	61
Figura 5.24	Torque calculado com borboleta aberta 100%, incerteza $\pm 0,7\%$	62
Figura 5.25	Torque calculado com borboleta aberta 40%, incerteza $\pm 0,7\%$	62
Figura 5.26	Ganho de torque: Abertura Total X Abertura Parcial	63

Figura 5.27	Consumo Específico de combustível abertura borboleta 100%, incerteza $\pm 1,5\%$	64
Figura 5.28	Consumo específico de combustível abertura borboleta 40%, incerteza $\pm 1,5\%$	64
Figura 5.29	Redução no consumo de combustível: Abertura total X Abertura parcial.....	65
Figura 5.30	Lambda abertura borboleta 100%, incerteza $\pm 0,01$	66
Figura 5.31	Lambda abertura borboleta 40%, incerteza $\pm 0,01$	66
Figura 5.32	Emissões de Monóxido de Carbono para borboleta aberta 100%, incerteza $\pm 0,06$	67
Figura 5.33	Emissões de Monóxido de Carbono para borboleta aberta 40%, incerteza $\pm 0,06$	68
Figura 5.34	Redução de CO: Abertura Total X Abertura Parcial	68
Figura 5.35	Emissões de Dióxido de Carbono para borboleta aberta 100%, incerteza $\pm 0,6$	69
Figura 5.36	Emissões de Dióxido de Carbono para borboleta aberta 40%, incerteza $\pm 0,6$	70
Figura 5.37	Aumento de CO ₂ : Abertura Total X Abertura Parcial	70
Figura 5.38	Emissões de Hidrocarbonetos para borboleta aberta 100%, incerteza $\pm 3,5\text{PPM}$	71
Figura 5.39	Emissões de Hidrocarbonetos para borboleta aberta 40%, incerteza $\pm 3,5\text{PPM}$	72
Figura 5.40	Redução de HC: Abertura Total X Abertura Parcial	72

LISTA DE TABELAS

Tabela 1.1	Os efeitos da poluição do ar na saúde humana	2
Tabela 3.1	Valores típicos para fabricação de motores	11
Tabela 3.2	Classificação de Combustíveis com relação ao estado físico	21
Tabela 3.3	Características de algumas famílias de hidrocarbonetos.....	21
Tabela 3.4	Parâmetros dos testes RON e MON para octanagem	24
Tabela 3.5	Detonação e pré-ignição.....	27
Tabela 3.6	Reação química da eletrólise.....	30
Tabela 4.1	Parâmetros de operação do eletrolisador	34
Tabela 4.2	Características motor AP 1.6l álcool.....	37
Tabela 4.3	Dados dinamômetro Motor Power MP600	37
Tabela 4.4	Características motor Fiat 1.6l 16v Corsa Lunga.....	38
Tabela 4.5	Dados técnicos célula de carga Z-250.....	38
Tabela 4.6	Dados técnicos PC-MULTIGÁS NAPRO	41
Tabela 4.7	Dados e valores de referência para correção potência líquida	41
Tabela 5.1	Exergia dos Insumos	44

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

16v	16 válvulas
BP	British Petroleum
COP21	21ª Conferência das partes
CFR	Cooperative Fuel Research
DENATRAN	Departamento Nacional de Trânsito
HHO	Hidroxy (hidrogênio – hidrogênio – oxigênio)
GLP	Gás Liquefeito do Petróleo
GNV	Gás Natural Veicular
LPH	Litros Por Hora
MON	Motor Octane Number
MP600	Motor Power 600 hp
PA 6.6	Nylon – Poliamida
PVT	Diagrama Pressão, Volume e Temperatura
RON	Research Octane Number
VW	Volkswagen
FIAT	Fabbrica Italiana Automobili Torino

LISTA DE SÍMBOLOS

A	Massa de ar [kg]
a	Raio de giração do virabrequim [m]
A	Superfície total da câmara de combustão [m ²]
A_{ch}	Superfície da câmara compreendida pelo cabeçote [m ²]
A_p	Superfície da cabeça do pistão [m ²]
b	Comprimento do braço de alavanca do freio [m]
B	Diâmetro do cilindro [m]
$bsfc$	Consumo específico de combustível [kg/kWh]
C_e	Consumo específico de combustível [g/kWh]
CH_3OH	Metanol
CO	Monóxido de carbono
CO_2	Dióxido de carbono
$C_{p,b}$	Calor específico da substância
D	Diâmetro do cilindro [m]
ex_c	Exergia total entrada [kJ]
ex_{ph}	Exergia física [kJ]
ex_{ch}	Exergia química [kJ]
ex_{pt}	Exergia potencial [kJ]
ex_{kn}	Exergia cinética [kJ]
ex_{el}	Exergia eletricidade [kJ]
ex_{in}	Exergia insumos [kJ]
φ	Relação ar/combustível
F	Força medida no transdutor do freio [N]
h	Entalpia do sistema [J]
h_0	Entalpia estado morto [J]
HC	Hidrocarbonetos
H_2O	Molécula da água
H_2	Gás hidrogênio
l	Comprimento da biela [m]
L	Curso do pistão [m]

Λ	Relação A/F
\dot{m}_a	Fluxo de massa de ar [kg/s]
\dot{m}_f	Fluxo de massa de combustível [kg/s]
MP	Particulados
N	Rotação do motor [rad/s]
n_i	Número de mols dos reagentes [mols]
n_o	Número de mols dos produtos [mols]
η_V	Eficiência volumétrica
P_b	Potência ao freio [kW]
P_{bme}	Pressão média efetiva do freio [Pa]
r_c	Razão de compressão
R	Constante de gases ideais
R_{DL}	Razão entre diâmetro do cilindro e deslocamento êmbolo [m]
R_{la}	Razão entre comprimento da biela e comprimento manivela [m]
s	Entropia do sistema [J/K]
s_0	Entropia estado morto [J/K]
S	Distância entre centros de pino pistão e eixo manivelas [m]
\bar{S}_p	Velocidade média do êmbolo [m.rad/s]
T	Torque do motor [N.m]
T_0	Temperatura ambiente [K]
T_1	Temperatura de saída [K]
V	Volume do cilindro do motor a uma determinada posição da biela [m ³]
V_{cil}	Volume do cilindro do motor [m ³]
V_{motor}	Volume total do motor [m ³]
$W_{r,b}$	Trabalho executado por volta [J]
ω	Velocidade angular [rad/s]

1 INTRODUÇÃO

A demanda energética por combustíveis fósseis tem aumentado de forma alarmante ao longo dos anos e conseqüentemente a emissão de gases nocivos ao ambiente provenientes da queima desses combustíveis. Um dos principais motivos são a elevada produção, comercialização e utilização de veículos automotores no mundo. Só no Brasil, se forem considerados dados até o fim de 2017, a frota de veículos do país é de aproximadamente 97 milhões de automóveis. Associados a esse número, caminhões, ônibus, motocicletas e veículos comerciais leves, o mesmo passará para mais de 99,6 milhões, conforme dados do Departamento Nacional de Trânsito – DENATRAN [DENATRAN, 2017]. Se comparado ao ano anterior a frota de veículos no país teve um crescimento de 3,11%, uma vez que no ano de 2016, foi de quase 94 milhões. O aumento na circulação desses veículos demanda uma quantidade cada vez maior no consumo de combustíveis, principalmente fósseis. O Brasil, como em boa parte do mundo, possui políticas de incentivo à venda de veículos novos, mas não possui legislação, tão pouco políticas públicas, para o desenvolvimento de veículos mais verdes e eco-amigáveis, que possibilitariam uma redução neste consumo de combustíveis e conseqüente a preservação do meio ambiente.

A queima incompleta, desses combustíveis, realizada durante o processo termodinâmico de transformação da energia química, contida neste insumo, em energia mecânica nos motores de combustão interna, para movimentação desses veículos, lança quantidades consideráveis de gases nocivos ao ambiente. Figuram entre estes: gás carbônico (CO e CO_2), óxidos de nitrogênio (NO_x), hidrocarbonetos (HC), óxidos de enxofre (SO_x) e particulados (MP), que entre outros, são responsáveis por grande parte das doenças respiratórias, pelo aquecimento global e o efeito estufa. Na Tabela 1.1 são apresentados alguns dos principais poluentes do ar atmosférico, provenientes da queima de combustíveis fósseis e os danos que esses podem ocasionar à saúde humana.

Com foco na eliminação desses efeitos nocivos à saúde humana, e em busca da redução do consumo de combustíveis, principalmente os fósseis, mundialmente estão sendo adotadas políticas para mitigar o aquecimento global e reduzir o efeito estufa. O Protocolo de Quioto foi um dos primeiros acordos firmados com a finalidade de reduzir a emissão de poluentes na atmosfera. Mesmo seu prazo encerrado em 2012, serviu de base

para outras iniciativas do gênero, como a 21a Conferência das Partes - COP21 realizada em Paris em 2015. Com a participação de 197 chefes de estado, a COP21 firmou o “Acordo de Paris”, o qual tem como base a redução das emissões dos gases do efeito estufa, entrando em vigor a partir de 2020, para que o aquecimento global seja reduzido e a temperatura média do planeta não aumente mais do que 2°C até 2100.

Tabela 1.1 - Os efeitos da poluição do ar na saúde humana

POLUENTES	EFEITOS NA SAÚDE
Monóxido de Carbono (<i>CO</i>)	# Causa tonturas e vertigens; alterações no sistema nervoso central, podendo ser fatal em elevadas doses; # Doentes cardíacos são considerados os mais suscetíveis aos efeitos do <i>CO</i> .
Dióxido de Enxofre (<i>SO₂</i>)	# Provoca coriza, catarro e danos irreversíveis aos pulmões; # Em doses altas pode ser fatal;
Óxidos de Nitrogênio (<i>NO_x</i> ; <i>NO₂</i>)	# Pode provocar desconforto respiratório, diminuição da resistência a afecções e alterações celulares.
Material Particulado (poeiras; fumaça; fuligem)	# Agrava quadros alérgicos; de asma, bronquites e pode ser cancerígeno;

Fonte: MACEDO, 2013

Diante do exposto, torna-se evidente a necessidade de tomada de ações e o desenvolvimento de novas tecnologias que propiciem a redução da emissão de gases poluentes, por exemplo, através da queima de combustíveis fosseis de forma mais eficiente e limpa. Para tanto, o presente trabalho tem por objetivo o desenvolvimento e validação de um combustível complementar, através da análise exergética do processo de obtenção desse e sua posterior utilização em motores de combustão interna. Sendo o referido combustível o gás HHO (gás de Brown), originário da quebra da molécula da água (H₂O) através do processo conhecido como eletrólise.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A respeito do tema pode-se destacar Costa, 2016, que em seu trabalho sobre a análise exérgica, descreveu que a equação do balanço de exergia pode ser escrita expressando o trabalho útil para um processo geral, como dependente do trabalho útil para o processo reversível correspondente e o termo de destruição de exergia, desde que os termos desta equação (exceto o termo de destruição de exergia) na equação do balanço de exergia para o processo geral levem ao mesmo resultado que os termos da equação do saldo de exergia para o processo reversível correspondente. Costa, 2016, considerou ainda, a importância destes resultados para: (i) Expressar o trabalho útil para um processo geral conforme o trabalho útil para o processo reversível correspondente e a destruição de exergia; (ii) análise de Exergia; e (iii) o processo de ensino/aprendizagem de análise de exergia e exergia, e uma melhor compreensão e aplicação da equação do saldo de exergia. Concluindo por fim a necessidade de se ter cuidado ao escrever/usar a equação do equilíbrio de exergia para expressar o trabalho útil para um processo geral (em termos de reversibilidade), dependendo do trabalho útil para o processo reversível correspondente e do termo de destruição de exergia, salientando que esta forma da equação do balanço de exergia é correta se todas as interações de energia forem as mesmas para o processo real, arbitrarias em termos de reversibilidade e para o processo reversível (limite) correspondente, mas é difícil ter, na prática, condições para que esta condição seja verificada. Para relacionar o processo de limite reversível com o processo real, arbitrário em termos de reversibilidade, ele precisa ser considerado um processo reversível adicional que suceda o processo real, levando o sistema das condições no final do processo real às mesmas condições que no final do processo reversível correspondente.

Neto, 2007, em sua pesquisa, constatou que o hidrogênio tem a mais alta energia por unidade de peso comparativamente com qualquer combustível, sendo este o elemento mais leve e não conta os pesados átomos de carbono. Razão pela qual, o hidrogênio tem sido usado intensamente nos programas espaciais onde o peso é crucial. A quantidade de energia liberada durante a queima do hidrogênio é cerca de 2,5 vezes a dos hidrocarbonetos tais como a gasolina. Ainda, segundo o autor, a utilização do hidrogênio como combustível térmico não é comum, exceto quando constitui parte do gás produzido

em gaseificadores ou reformadores. E constatou que, quando o hidrogênio é gerado através de um eletrolisador que apresente uma eficiência alta, o mesmo se torna muito viável economicamente para aplicações que requeiram elevadas temperaturas (fundição, corte, etc), uma vez que quando queimado com oxigênio puro produz uma temperatura adiabática de chama da ordem de 4727°C. Comparando, por exemplo com o gás oxi-acetileno que também é utilizado em aplicações semelhantes, o hidrogênio produzido dessa forma apresenta uma relação custo por energia quase 4 vezes menor (111R\$/GJ do H₂ contra 443R\$/GJ do oxi-acetileno).

Com relação à produção do gás HHO, Subramanian e Ismail, 2018, verificaram que a taxa de produção deste por eletrólise depende de muitos fatores, como material do eletrodo, parâmetros geométricos, tipo e concentração do eletrólito, quantidade de corrente passada, etc. Destacaram ainda, a necessidade de novas investigações sobre a natureza e propriedades do gás HHO, a eficiência dos geradores de gás, bem como os aspectos de segurança para tornar a utilização em grande escala do gás HHO uma realidade.

Por sua vez, Omasa, 2005, estudou o uso de eletrodos porosos, recomendando o uso de dióxido de chumbo, magnetita, ferrita, grafite, etc., para ânodo e ródio, níquel, níquel ligas e ligas de titânio para cátodo. Os eletrodos foram mantidos à distância de 20 a 400 mm para evitar curtos-circuitos. Para aumentar a eficiência da produção de gás no sistema que é introduzido com um conjunto de lâminas metálicas ou plásticas vibrando em frequências de 10 a 500 Hz. Esta vibração impede a acumulação de H₂ e O₂ nos eletrodos e aumenta a taxa de eletrólise. Bem como, Yilmaz et al., 2010, compararam vários projetos de eletrodos e escolheu eletrodos de placa feitos de aço 316L SS por causa de sua alta resistência à corrosão. Ainda, testou diferentes eletrólitos, selecionando NaOH aquoso, com base em uma comparação de soluções de NaOH, KOH e NaCl. Seu experimento utilizou um recipiente de plexiglás com capacidade de 8,5 l, nível da água controlado por um sistema flutuante, e parâmetros de voltagem e corrente para velocidades inferiores (≤ 1750 rpm) e superiores (≥ 1750 rpm) de 7,3 V e 5,9 A e 12 V e 10 A, respectivamente. Enquanto a geração de gás foi elevada aumentando a fração em massa do catalisador, a concentração do *NaOH* estava limitada a 1% em massa como a resistência elétrica da solução.

Ainda, Gootblatt, 2012, utilizou um dispositivo eletrolítico que produzia *HHO* para substituir gasolina em um motor de combustão interna. O dispositivo consistiu-se de quatro

células que forneceram gás *HHO* de maneira independente a cada êmbolo. Este sistema também empregou uma unidade de borbulhamento para reduzir a possibilidade de explosão devido ao fogo contrário (BackFire).

Em relação à pesquisa de Milind et al., 2011, pode-se destacar que utilizaram dois projetos diferentes para gerar gás *HHO*. O primeiro projeto consistiu em um recipiente de plástico e eletrodos feitos de placas de aço inoxidável 216 separados com arruelas de teflon. As placas foram suportadas com uma haste de carbono na parte superior e outra na parte inferior. O melhor intervalo entre os eletrodos encontrado foi de 1,6 mm. Para distâncias maiores, a taxa de eletrólise foi menor, enquanto o risco de curto circuito aumentou após a redução da distância. O segundo projeto tinha o recipiente e o ânodo de aço inox 304, tendo o próprio corpo do recipiente atuando como o cátodo. Em ambos os projetos foi utilizado *KOH* como o eletrólito. O Aço inox 304 adotado tem maior resistência à corrosão em comparação com aço inox 216, usado anteriormente. Este design teve uma maior taxa de geração de gás devido ao aumento da área de superfície do cátodo. O risco de explosão de oxi-hidrogênio também foi mais baixo. Os autores também usaram o primeiro projeto para gerar oxi-hidrogênio, sujeitando a água à ressonância em sua frequência natural (42 MHz), que quebra as ligações oxigênio-hidrogênio. Para este efeito, eles usaram nove tubos concêntricos.

Diante do exposto, uma das principais razões para se realizar uma análise exérgica em um sistema é a possibilidade de identificar, precisamente, os componentes onde ocorrem as maiores perdas e desperdícios. A exergia, de acordo com a Segunda Lei da Termodinâmica pode ser definida, de forma bastante simplificada, como sendo a qualidade da energia. Segundo Szargut et al., 1988, exergia é a quantidade de trabalho obtida quando algum material é trazido a um estado de equilíbrio termodinâmico com os componentes comuns do ambiente por meio de processos reversíveis. O gás *HHO*, escolhido neste trabalho como combustível complementar, será utilizado como auxiliar na queima de hidrocarbonetos, em dois experimentos, buscando melhorar o processo de combustão, proporcionando o aumento na potência de motores de combustão interna, assim como reduzindo os gases poluentes emitidos durante este processo.

3 BASES TEÓRICAS

3.1 Motores de Combustão Interna

Por definição, segundo Heywood, 1988, o objetivo dos motores de combustão interna é a produção de energia mecânica a partir da energia química contida no combustível.

3.1.1 Breve Histórico

Em 1876, Nicolaus A. Otto (1832-1891), desenvolveu o protótipo de um motor com o ciclo de quatro movimentos do pistão, sendo eles: um de admissão, um de compressão, um de expansão e um de escape. Esse motor ficou mundialmente conhecido como motor de ciclo de 4 tempos OTTO. Na década de 1880, Dugald Clerk (1854-1913) e James Robson (1833-1913) na Inglaterra e Karl Benz (1844-1929), na Alemanha desenvolveram com sucesso motores de combustão interna de dois tempos onde ocorrem os processos de escape e de admissão durante o fim do curso de força e o início do curso de compressão, conhecido atualmente como ciclo Clerk. James Atkinson (1846-1914) na Inglaterra fez um motor de 4 tempos com uma expansão mais longa do que o curso de compressão, chamado de ciclo Atkinson, que teve uma alta eficiência para os tempos, mas deficiências mecânicas. Em 1892, o engenheiro alemão Rudolf Diesel (1858-1913) delineou em sua patente uma nova forma de motor de combustão interna, o ciclo Diesel, utilizando o princípio da ignição por compressão, a qual aquecia o ar no interior da câmara de combustão e o combustível era assim injetado [Heywood, 1988].

3.1.2 Motores 4 Tempos

Os motores de 4 tempos tem seu ciclo iniciado no ponto morto superior do êmbolo, o ciclo é composto de 4 cursos consecutivos desse e duas voltas completas da árvore de manivelas. Na Figura 1.1 são apresentados os 4 tempos que compõem esses motores, sendo:

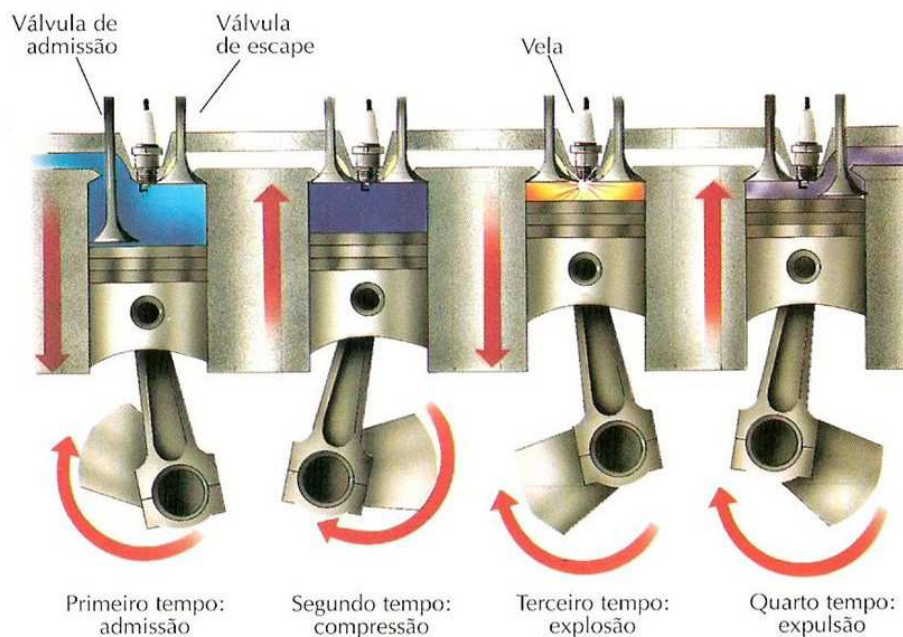


Figura 3.1 - Ciclos do motor 4 tempos. Fonte: Abekwar [2017]

1º Tempo: ADMISSÃO - O êmbolo se desloca do ponto morto superior (PMS) ao ponto morto inferior (PMI), gerando uma depressão que aspira a mistura ar combustível para dentro da câmara de combustão, através da válvula de admissão que permanece aberta durante todo o ciclo, fazendo com que o eixo de manivelas complete a primeira meia volta (180°).

2º Tempo: COMPRESSÃO – O êmbolo se desloca do PMI para o PMS, a válvula de admissão e escape está fechada, a mistura previamente admitida no ciclo anterior sofre uma compressão significativa. O eixo de manivelas completou a 1ª volta completa (360°).

3º Tempo: EXPANSÃO - Ocorre à ignição da mistura comprimida pouco antes do final do 2º tempo, a temperatura e a pressão aumentam de maneira abrupta forçando o êmbolo a se deslocar de PMS para PMI. O eixo de manivelas completa uma volta e meia (540°). Este é o único dos tempos que gera trabalho útil no eixo.

4º Tempo: EXAUSTÃO – Pouco antes do final do terceiro tempo e do êmbolo atingir o PMI, a válvula de exaustão se abre permitindo a saída dos gases resultantes da queima da mistura ar combustível previamente admitida, comprimida e ignizada. O êmbolo se desloca de PMI para PMS e o eixo de manivelas completa a 2ª volta (720°).

Alguns graus antes do final deste tempo a válvula de admissão é aberta, permanecendo junto com a de exaustão até que o êmbolo atinja o PMS e então a válvula de exaustão se fecha dando início a um novo ciclo através do 1º tempo novamente.

3.1.3 Motores 2 Tempos

Com o êmbolo em PMS tem se início deste ciclo, composto por dois cursos consecutivos deste e uma volta completa do eixo de manivelas. Cada tempo executa duas funções simultâneas. No modelo apresentado na Figura 3.2 não existem válvulas da admissão ou exaustão, as operações correspondentes são executadas por janelas, sendo o próprio êmbolo responsável pelo abre e fecha destas.

1º Tempo: EXPANSÃO E EXAUSTÃO – Tendo início com o êmbolo em PMS e as janelas de admissão e escape fechadas, ocorre a ignição da mistura ar, combustível e lubrificante, gerando um aumento abrupto de temperatura e pressão que impulsiona o êmbolo em direção ao PMI. No instante em que o êmbolo “abre” a janela de escape, a parte inferior do mesmo força a mistura fresca previamente admitida no cárter por uma passagem no bloco até a câmara de combustão, forçando a saída dos gases gerados na queima ocorrendo o processo que chamamos de lavagem do cilindro.

2º Tempo: COMPRESSÃO E ADMISSÃO – O êmbolo se desloca de PMI para PMS, fechando a janela de exaustão e abrindo a janela de admissão. Ao mesmo tempo em que a mistura contida da câmara de combustão é comprimida, ocorre a admissão para o cárter da mistura fresca de ar, combustível e lubrificante que será utilizado para extrair calor e lubrificar as partes móveis do motor.

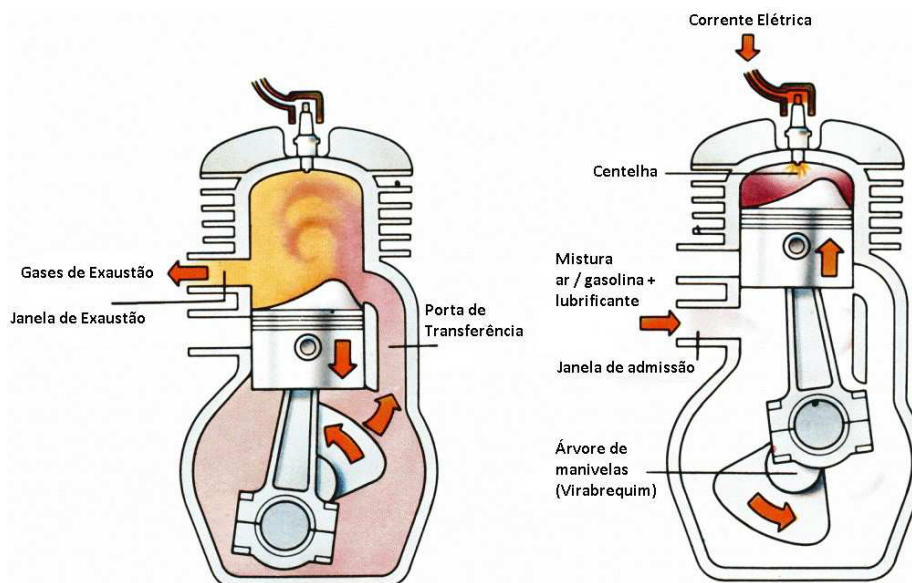


Figura 3.2 - Motor 2 tempos. Fonte: Auto Intusiastas [2017]

3.1.4 Geometria dos Motores Alternativos

O volume total do cilindro (V_{cil}) é definido pela soma do volume deslocado pelo êmbolo (V_d) e o volume da câmara de combustão (V_c). O volume total deslocado pelo motor (V_{motor}) é dado pela multiplicação do volume total do cilindro pelo número de cilindros existentes (N_{cil}).

$$V_{cil} = V_d + V_c \quad (3.1a)$$

$$V_{motor} = (V_d + V_c) * N_{cil} \quad (3.1b)$$

A razão de compressão (r_c) é definida pela razão entre o volume total do cilindro (V_{cil}) e o volume da câmara de combustão (V_c).

$$r_c = \frac{V_d + V_c}{V_c} \quad (3.2)$$

A razão entre o diâmetro do cilindro (D) e o deslocamento do êmbolo (L) é dada por

$$R_{DL} = \frac{D}{L} \quad (3.3)$$

entretanto a razão entre o comprimento da biela (l) e o comprimento da manivela (a) é definida por

$$R_{la} = \frac{l}{a} \quad (3.4)$$

sendo desta forma, a relação entre o deslocamento do êmbolo (L) e o comprimento da manivela (a) expressa por

$$L = 2a \quad (3.5)$$

O volume do cilindro (V) a uma determinada posição (θ) do eixo de manivelas é definido como

$$V = V_c + \frac{\pi D^2}{4} (l + a - s) \quad (3.6)$$

onde s é a distância entre o centro do eixo de manivelas e o centro do pino do pistão, sendo configurada por

$$s = a \cos \theta + (l^2 - a^2 \sin^2 \theta)^{1/2} \quad (3.7)$$

A velocidade média do êmbolo é então definida como

$$\overline{S_p} = 2LN \quad (3.8)$$

onde N é a velocidade angular da árvore de manivelas. Durante a análise comportamental do motor em relação à sua velocidade, a velocidade média do êmbolo torna-se o parâmetro mais adequado em relação à velocidade angular da árvore de manivelas. Na Figura 3.3, são apresentadas as referências geométricas descritas anteriormente.

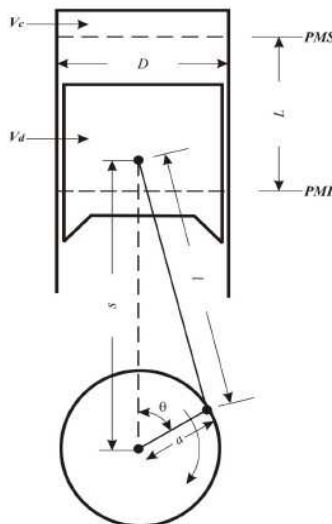


Figura 3.3 - Geometria do cilindro, êmbolo, biela e árvore de manivelas. Fonte: Heywood [1988]

De acordo com Heywood, 1988, existem alguns valores típicos para a construção dos motores alternativos, conforme as geometrias e razões descritas anteriormente, as quais são detalhadas na Tabela 3.1, levando-se em consideração o ciclo utilizado.

Tabela 3.1 - Valores típicos para fabricação de motores

Ciclo	r_c	R_{DL}	$R_{I\alpha}$
OTTO (centelha)	8 a 12	0,8 a 1,2	3 a 4
DIESEL(compressão)	16 a 24	0,5	5 a 9

Fonte: Heywood [1988]

3.1.5 Parâmetros Dinamométricos

Os parâmetros descritos a seguir configuram os dados obtidos em banco de testes como sendo de desempenho do motor ao freio (dinamômetro).

A rotação do motor N (rev/s) é a velocidade de rotação da árvore de manivelas em revoluções por segundo, sendo este valor medido diretamente no eixo do dinamômetro por métodos mecânicos, elétricos ou magnéticos, e expressada por

$$N = \frac{\text{RPM}}{60} \quad (3.9)$$

Outra forma de descrever a rotação do motor é a sua frequência ω (rad/s), sendo expressa por

$$\omega = 2\pi N \quad (3.10)$$

A capacidade do motor de realizar trabalho é chamada de Torque T (Nm), podendo ser definida como

$$T = Fb \quad (3.11)$$

sendo F (Newton-N) a carga aplicada no motor e lida como uma força exercida através de uma célula de carga acoplada ao dinamômetro durante o freio e b o braço de alavanca entre o centro da árvore de manivelas e a célula de carga utilizada (Figura 3.4).

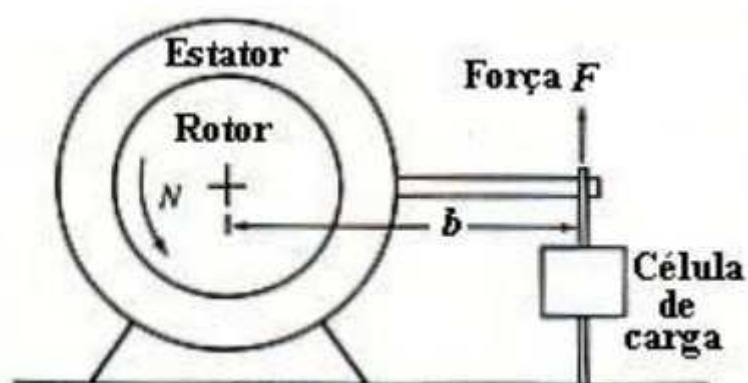


Figura 3.4 - Esquema de funcionamento de um dinamômetro. Fonte: Heywood [1988]

A potência ao freio P_b , também definida como potência efetiva, retrata a variação de trabalho na unidade de tempo, sendo representada pelo produto do torque pela velocidade angular do motor.

$$P_b = NT \quad (3.12)$$

O trabalho executado pelo motor a cada volta (360°) é denominado trabalho do freio por revolução $W_{r,b}$ (J), sendo expressa como

$$W_{r,b} = 2\pi T \quad (3.13)$$

A pressão média efetiva do freio P_{bme} (Pa) é o trabalho do freio dividido pelo volume total deslocado por cilindro e por ciclo V_{cil} , sendo representada da seguinte forma

$$P_{bme} = \frac{W_{r,b}nr}{V_{cil}} = \frac{F_b nr}{NV_{cil}} \quad (3.14)$$

Onde nr é o número de revoluções da árvore de manivelas para cada ciclo, sendo para motores a 2 tempos $nr=1$ e para motores a 4 tempos $nr=2$. Esta definição para nr é devido ao motor de 4 tempos possuir dois processos, expansão e compressão, para cada volume admitido, enquanto que no motor de 2 tempos existe apenas um processo de compressão e um processo de expansão para cada volume admitido.

A pressão média efetiva ao freio torna-se o parâmetro mais indicado para caracterizar e comparar a capacidade de diferentes motores de produzir trabalho, levando em consideração a força exercida sobre a área.

3.1.6 Eficiência de Motores de Combustão Interna

Segundo Heywood, 1988, a eficiência dos motores de combustão interna está relacionada, através de sua concepção, de alguns critérios, tais como: compressão, comportamento da combustão e a mistura ar-combustível. Com relação à compressão,

quanto maior for a razão de compressão, maior será a eficiência térmica do motor de combustão e conseqüentemente será melhor o aproveitamento do combustível utilizado. O limitador de crescimento da razão de compressão passa a ser o limite de detonação. Por sua vez, a detonação é considerada uma combustão irregular da mistura ar-combustível, provocada por auto-ignição, o que acarreta sobrecarga e danos irreversíveis ao motor. No que tange a mistura ar-combustível, quando a mesma é homogênea e ocorre o aproveitamento dos efeitos dos fluxos nos dutos de admissão, o limite de detonação pode ser elevado, possibilitando assim, uma razão de compressão maior. Na questão relativa ao comportamento da combustão, a qualidade da mesma está diretamente ligada à perfeição da mistura da massa de ar com o combustível. Outro quesito importante é a propagação uniforme da frente de chama no interior do cilindro, tanto no tempo quanto na velocidade, bem como o local onde se dá o início da queima. A mistura ar-combustível está ligada diretamente ao consumo específico de um motor de combustão interna, sendo assim, o regime de trabalho destes motores é na sua grande maioria em cargas parciais e, para tal sua concepção é voltada para um baixo consumo específico nesta faixa de utilização. Nos demais regimes de funcionamento, marcha lenta e plena carga, sua projeção é de trabalhar com misturas mais ricas.

3.1.7 Eficiência Volumétrica

Um dos parâmetros mais importantes para quantificar a potência e o desempenho do motor é a sua eficiência volumétrica, pois determina a quantidade máxima de ar admitido em cada ciclo e conseqüentemente a quantidade de combustível a ser utilizada nesta queima, pois mais ar admitido significa que mais combustível poderá ser queimado e maior será a energia convertida no eixo de saída. O ideal seria a admissão de uma massa de ar com seu valor igual ao da densidade do ar atmosférico vezes o volume deslocado pelo êmbolo durante cada ciclo, porém devido ao tempo de cada ciclo ser curto e o fluxo de ar admitido apresentar algumas restrições no filtro de ar, carburador ou corpo de borboleta, coletor de admissão e na válvula de admissão, o enchimento do cilindro torna-se menor que o ideal. Sendo assim, a eficiência volumétrica é definida pela Equação 3.15:

$$\eta_V = \frac{2\dot{m}_a}{\rho_{a,i} V_d N} \quad (3.15)$$

Onde η_v é a eficiência volumétrica, \dot{m}_a é o fluxo mássico de ar que entra no motor (kg/s), $\rho_{a,i}$ é a densidade do ar admitido (kg/m³), V_d é o volume deslocado pelo êmbolo (m³) e N é a velocidade do motor (rpm).

3.1.8 Relação Ar Combustível e seus Efeitos

A energia responsável pela movimentação dos êmbolos do motor é oriunda da combustão dos hidrocarbonetos contidos nos combustíveis, através da adição do oxigênio contido no ar atmosférico em conjunto com o método de ignição utilizado pelo ciclo em questão, seja a centelha ou a compressão/temperatura. A relação entre o ar e o combustível é utilizada para descrever a razão de mistura entre estes. A relação ar/combustível ideal, denominada estequiométrica para a gasolina pura é de 14,7:1, a gasolina tipo “C” com 27% de álcool anidro (E27) é de 13,2:1, o álcool hidratado é 9:1 e o Diesel é de 15,2:1. Sendo estes valores em base mássica, utilizando o valor da gasolina pura, temos 14,7 kg de ar para 1 kg de combustível.

Segundo Pulkrabek, 1997, motores de combustão interna podem trabalhar com relações ar/combustível de 6:1 até 19:1, indo respectivamente de misturas muito ricas a misturas muito pobres, passando pelas misturas estequiométricas conforme descrito anteriormente. A relação entre a potência e o consumo específico de combustível pode ser medida variando as razões da mistura ar/combustível com a borboleta de aceleração aberta e a rotação constante.

Os resultados podem ser apresentados na forma da *Curva de Hook*, que apresenta a relação entre o consumo específico (*bsfc*) e a pressão média efetiva (*bmep*), conforme Figura 3.5, onde:

- O ponto *a* corresponde à mistura pobre, na qual o motor está operando. Neste ponto, a potência é bastante reduzida, e o consumo específico pode chegar a duas vezes mais do que o consumo específico de melhor eficiência;
- O ponto *b* corresponde ao melhor desempenho do motor (maior eficiência térmica);
- O ponto *c* corresponde à razão estequiométrica da mistura;

- O ponto d corresponde à máxima potência, mas o consumo específico é cerca de 10% maior do que o consumo específico do ponto de máxima eficiência térmica (ponto b);
- O ponto e corresponde ao máximo valor de mistura rica em que o motor pode operar.

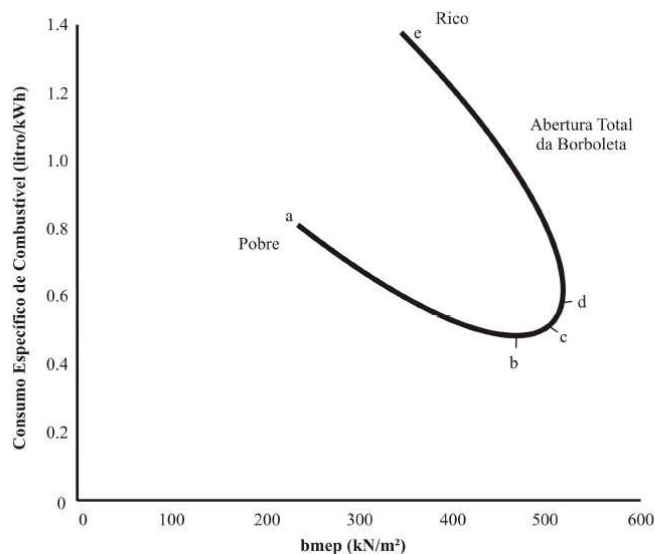


Figura 3.5 - Curva de Hook -Consumo de combustível em motor de ciclo Otto. Fonte: Plint e Martyr [1997]

Cabe ainda ressaltar algumas características importantes relacionadas à razão ar/combustível, tais como:

- Para misturas ricas a partir da zona de máxima potência em direção à mistura estequiométrica, tem-se uma combustão rápida e de chama azul, que cessa rapidamente no ciclo de expansão.
- Tornando a mistura mais pobre ainda, esta se propagará durante o ciclo de expansão, ocasionando retorno de explosões no coletor de admissão;
- Por outro lado, tornando a mistura mais rica que a máxima potência, ocorrerá formação de chama amarela devido a partículas

incandescentes de carbono que se propagam até a abertura da válvula de escape, podendo ocasionar explosões no sistema de exaustão.

A Figura 3.6 mostra como o calor específico da mistura queimada à pressão constante ($C_{p,b}$) varia em relação à composição da mistura não queimada (ϕ) para as temperaturas de 1750K, 2250K e 2750K a 30 atm. Verifica-se que o máximo valor do calor específico à pressão constante ocorre próximo da região estequiométrica ($\phi=1$), onde se tem também a máxima energia térmica disponibilizada. Estas curvas foram calculadas a partir das funções polinomiais com seus respectivos coeficientes, conforme descrito por Heywood [1988].

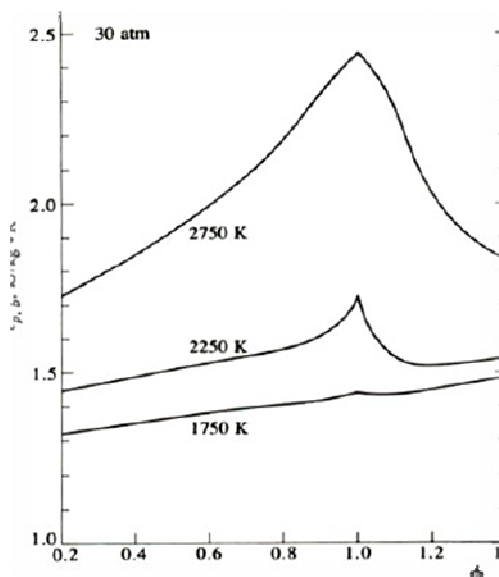


Figura 3.6 - Calor específico à pressão constante de gases queimados em equilíbrio em função da composição da mistura combustível/ar (ϕ) para o combustível isooctano. Fonte: Heywood [1988]

3.1.9 Gases de Exaustão

Os motores ciclo Otto e ciclo Diesel são as maiores fontes de poluição urbana, conforme descrito por Heywood, 1988. A Figura 3.7 mostra a composição dos gases de exaustão em relação à mistura combustível/ar de um isooctano em motores de ciclo Otto. A composição dos gases apresenta diferenças entre as partes, rica e pobre, da mistura. Na

mistura pobre, à medida que diminui o ϕ , há um decréscimo da concentração de CO_2 , um aumento da concentração de oxigênio e os níveis de CO aproximam-se de zero (~0,2 a 0,3 %). Entretanto, na mistura rica, as concentrações de CO e H_2 aumentam, a concentração de CO_2 diminui e os níveis de O_2 aproximam-se de zero (~0,2 a 0,3%). Na composição estequiométrica da mistura tem-se, tipicamente, 0,5 % de oxigênio e 0,75% de CO. Na partida do motor, enquanto está frio, a vaporização do combustível é baixa e, por essa razão, faz-se necessário o enriquecimento da mistura até que atinja a condição de temperatura ideal. Nessa condição, de mistura rica, a emissão de CO e são altas. A formação de óxidos de nitrogênio (NO_x) ocorre nas altas temperaturas dos gases queimados, por meio de reações químicas, envolvendo moléculas e átomos de nitrogênio e de oxigênio.

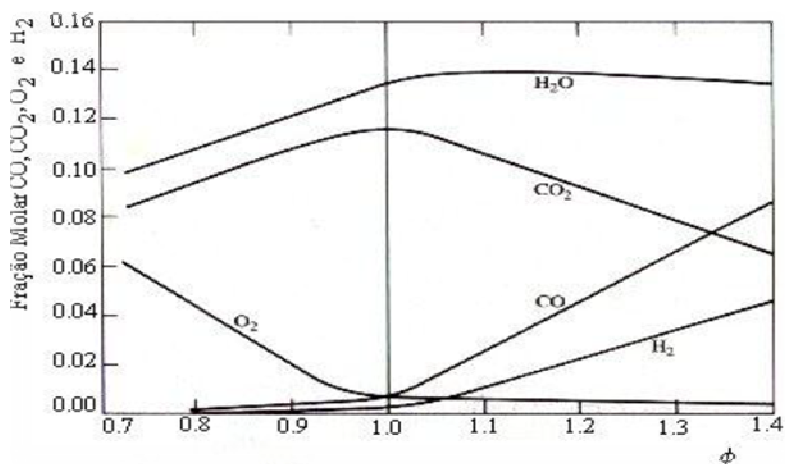


Figura 3.7 - Composição dos gases de escape em relação a ϕ . Fonte: Heywood [1988]

Os níveis de emissões, conforme descrito por Vilanova, 1998, são medidos em partes por milhão (PPM), partes por cem ou percentual de volume; porém é comum indicá-los em emissão específica, que relaciona o fluxo de gases poluentes com a potência efetiva medida. Costuma-se utilizar os níveis de emissões como parâmetro de avaliação ou de comparação dos motores. A emissão de poluentes mais importantes são a do óxido de nitrogênio (NO_x), a do monóxido de carbono (CO) e a dos hidrocarbonetos não queimados (HC).

3.1.10 Combustíveis

Por definição, combustível é a matéria cuja combustão gera energia térmica e luminosa. Os combustíveis mais conhecidos e utilizados são a lenha, o carvão, o álcool anidro, o petróleo e seus derivados (gás natural veicular - GNV, gás liquefeito do petróleo - GLP, Gasolina e Diesel). Podendo também compreender como combustível a reação química entre o ácido nítrico e a hidrazina, utilizado na propulsão de foguetes e a fissão nuclear do urânio usado em seu respectivo reator.

Desde a descoberta do fogo, no período neolítico, o calor e a luz representam a mola impulsora do desenvolvimento humano. De início servia para aquecer, cozinhar e proteger o ser e seus descendentes. Com a chegada da era moderna e o avanço da tecnologia, a luz e o calor são inerentes aos processos de fabricação, de transporte, iluminação e a manutenção vital do ser humano. Todo este desenvolvimento requer cada vez mais velocidade e potência para tal, justificando assim a permanente busca por novos e mais eficientes processos e por consequência novas substâncias combustíveis. Entretanto, o petróleo, considerado o principal combustível do mundo moderno, é um recurso natural não renovável. Segundo a empresa britânica BP (British Petroleum, 2013), a qual faz parte do grupo das maiores empresas de petróleo do mundo, composto por Shell, BP, Esso, Mobil, Texaco, Chevron e GulfOil, e também conhecido como as sete irmãs, o petróleo irá acabar em 2067 se não forem descobertas novas reservas. Sendo as reservas da Rússia e da Venezuela as últimas a se esgotarem.

Os combustíveis se caracterizam pela capacidade de liberar calor, a qual é diretamente dependente da quantidade dos elementos termo gênicos essenciais, carbono e hidrogênio. Essa capacidade é denominada de poder calorífico. O enxofre, o fósforo, o oxigênio e o nitrogênio caracterizam o tipo de combustão gerada, definindo a cor da chama, a velocidade da queima e os vapores produzidos durante e após a queima. A capacidade de geração de vapor e a presença de impurezas são duas características principais para o combustível de utilização industrial, além do poder calorífico.

De acordo com o DENATRAN, 2018, o Brasil possui uma frota de 99.868.159 veículos. Destes, 47% são movidos a gasolina, 36% são flex (gasolina/álcool/mistura desses), outros 7,5% são movidos a diesel, enquanto 4,5% são movidos exclusivamente a álcool, perfazendo um total de 95% da frota circulante. Os demais combustíveis como:

alcool/GNV, gasolina/GNV, flex/GNV, diesel/GNV, GNV, gasogênio, híbridos e elétricos representam 5% da frota veicular, conforme apresentado na Figura 3.8.

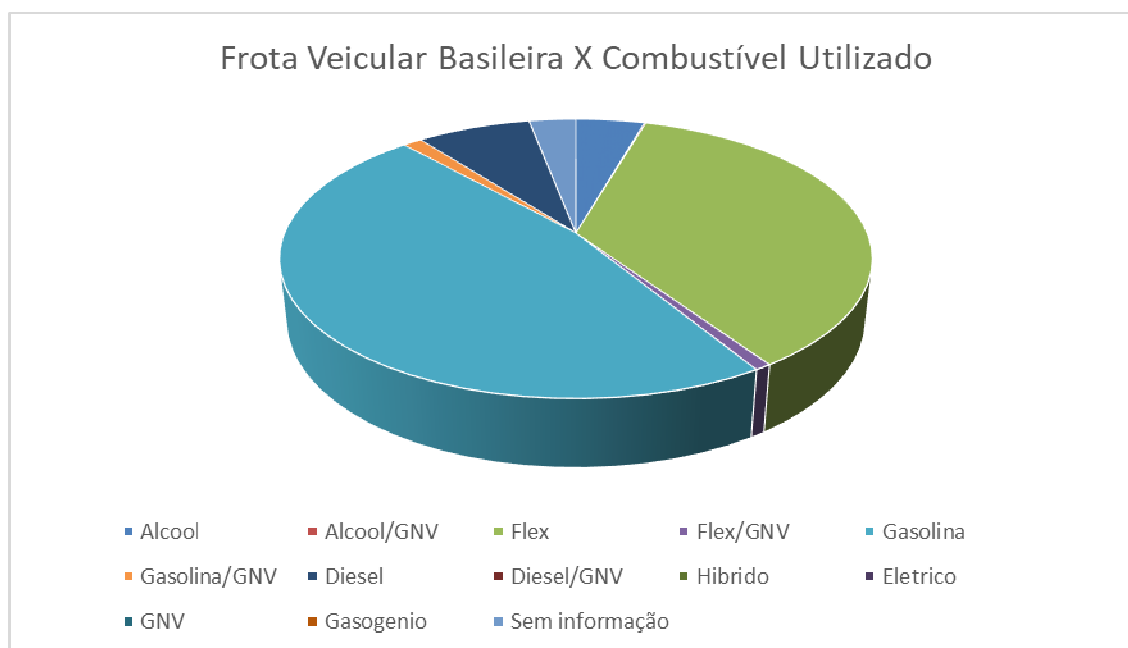


Figura 3.8 - Frota veicular brasileira X Combustível utilizado. Fonte: DENATRAN [2018]

3.1.10.1 Tipos de Combustíveis

Os combustíveis podem ser classificados de diversas formas, uma delas é pelo seu estado físico, conforme apresentado Tabela 3.2 Os combustíveis líquidos e gasosos em sua maioria, possuem como principal matéria-prima o petróleo, composto de diversos hidrocarbonetos. A matéria hidrocarbonada tem sua proporção variando de 50% a 98%, embora isso não implique uma mudança fundamental nas propriedades do petróleo bruto. Esses hidrocarbonetos estão quimicamente presentes no petróleo em famílias de parafinas, naftenos e compostos aromáticos (cíclicos). O refino, procedimento pelo qual se extraem os combustíveis gasosos (propano e butano), sólidos (parafinas) e líquidos (diesel, gasolina e querosene), é condicionado pela presença em diferentes proporções destes compostos aromáticos, naftenos e parafinas.

Tabela 3.2 - Classificação de Combustíveis com relação ao estado físico

Estado Físico	Sólido	Líquido	Gasoso
Combustível	✓ Madeira	✓ Diesel	✓ Gás natural
	✓ Carvão	✓ Querosene	✓ Propano
	Vegetal	✓ Gasolina	✓ Butano
	✓ Hulha	✓ Álcool	✓ Metano

Fonte: Autor [2017]

A maioria dos combustíveis hidrocarbonados, líquidos e gasosos são uma mistura de muitos hidrocarbonetos diferentes. Por exemplo, a gasolina, é constituída por cerca de 40 hidrocarbonetos principais com a presença de outros muitos em quantidades mínimas [Wylen e Sonntag, 1993]. Na Tabela 3.3, de acordo com Heywood, 1988, são apresentadas as famílias mais importantes de hidrocarbonetos e suas características.

Tabela 3.3 - Características de algumas famílias de hidrocarbonetos

Família	Fórmula	Estrutura	Saturado
Parafina	C_nH_{2n+2}	Cadeia	Sim
Olefina	C_nH_{2n}	Cadeia	Não
Diolfina	C_nH_{2n-2}	Cadeia	Não
Naftaleno	C_nH_{2n}	Cíclica	Sim
Aromático Benzeno	C_nH_{2n-6}	Cíclica	Não
Aromático Naftaleno	C_nH_{2n-12}	Cíclica	Não

Fonte: Heywood [1988]

Os termos utilizados na definição de combustíveis a base de petróleo são referentes à estrutura da molécula (podendo ser cíclica ou em cadeia, e hidrocarbonetos saturados e não-saturados), e aos hidrocarbonetos com mesmo número de átomos de carbono e hidrogênio, mas com estruturas diferentes. Os hidrocarbonetos não-saturados possuem um ou dois átomos adjacentes unidos por uma valência dupla ou tripla, enquanto que, nos hidrocarbonetos saturados, todos os átomos de carbono são unidos por uma valência simples.

O álcool de baixo peso molecular, principalmente o etanol, fabricado a partir da destilação de vegetais, torna-se uma ótima opção de combustível ao alcance das regiões ricas em biomassa. Uma característica importante da família dos alcoóis é que um dos átomos de hidrogênio é substituído por um radical OH. Desta maneira, o metanol ou álcool metílico tem sua fórmula CH_3OH . Através do Programa Nacional do Álcool – Proálcool,

em 1975, o Brasil se tornou pioneiro na produção de álcool combustível para automóveis, após a crise do petróleo de 1973 e durante toda a década de 1970. No início da década de 1990, 60% da frota brasileira de veículos era movida a álcool destilado da cana-de-açúcar [Francisco, 2018].

Os combustíveis gasosos são os que apresentam um rendimento e economia na combustão mais próximos do máximo, por se tratarem de um produto limpo, sem impurezas ou cinzas, sem odor o que resulta em alto poder calorífico. As jazidas petrolíferas são a origem, em grande parte, destes gases combustíveis. Frequentemente são encontrados em bolsões ou jazidas subterrâneas fluindo para a superfície associados ao petróleo, sendo assim reinjetados nos poços para aumentar a vazão do petróleo bruto, ou separados para consumo.

a) Família dos Parafínicos

Possui estrutura em cadeia aberta, com ligações simples nos carbonos saturados com átomos de hidrogênio, sua nomenclatura caracterizasse pelo sufixo “ano” (ex. metano, etano, propano). A maioria das moléculas é em linha e com ramificações. As isoparafinas são hidrocarbonetos isômeros das parafinas, como o isooctano e o isobutano, que apresentam cadeia ramificada com características antidetonantes.

b) Família dos Oleofínicos

Apresentam estrutura em cadeia aberta, não saturada, podendo haver ligações duplas e triplas entre os átomos de carbono, sua nomenclatura caracterizasse pelo sufixo “eno” (ex. octeno e propeno). Aparecem em diversos isômeros, tendo como partida o buteno, dependendo da localização da localização da ligação dupla na cadeia base de carbono. Devido as suas ligações duplas, possuem maior atividade química. Podem formar parafinas ou naftalenos ao se ligarem facilmente com o hidrogênio, também formam uma goma indesejável ao se ligarem com o oxigênio.

c) Família dos Naftalenos

Apresentam a mesma fórmula química dos oleofínicos, porém uma estrutura cíclica ao invés de uma estrutura em cadeia, possuindo nomenclatura com o prefixo “ciclo” (ex. ciclopentano). Cada átomo de carbono possui duas valências simples com outros dois

átomos de carbono e outras duas ligações simples com o hidrogênio, carbono ou simultaneamente com ambos.

d) Família dos Aromáticos

Estão inclusos as séries do benzeno (C_nH_{2n-6}), caracterizada por conter um único anel aromático, e a série do naftaleno (C_nH_{2n-12}), caracterizada por conter anel cíclico duplo. A família dos aromáticos apresenta a possibilidade da adição de grupos de CH_2 nas cadeias laterais, sem a expansão dos anéis (ex. tolueno C_7H_8 e xileno C_8H_{10}). A série do benzeno possui estrutura cíclica não saturada, grande estabilidade química e resistência à ignição espontânea.

e) Alcoóis

Podem ser obtidos a partir da oxidação parcial do petróleo ou da destilação de vegetais ricos em carboidratos, constituídos exclusivamente de carbono, hidrogênio e oxigênio. Possuem uma estrutura em cadeia em que um átomo de hidrogênio é substituído por uma hidroxila (OH), sendo compostos saturados.

3.1.10.2 Octanagem

Octanagem é a propriedade que confere a resistência anti-detonante ao combustível. Logo quanto maior for este índice, maior será sua resistência à detonação. Determinando assim, se o motor a ser utilizado com determinado combustível ou mistura deste e outros, irá detonar durante seu funcionamento. A variação deste índice se deve ao grande número de compostos contendo hidrocarbonetos, proveniente de todas as classes, gerando assim uma porção de octanas diferentes para cada mistura.

A determinação das octanas em um combustível utiliza uma escala padrão baseada em dois hidrocarbonetos. Sendo atribuído por definição o valor zero octano, para o normal heptano ($n - C_7H_{16}$), e o valor de 100 octanos, para o isooctano (C_8H_{18} : 2,2,4 – trimetilpentano). A razão pela qual estes hidrocarbonetos terem sido escolhidos é devida a grande diferença na habilidade de resistir à detonação, onde o isooctano tem a maior resistência à detonação de todos os combustíveis, disponíveis à época de criação da escala de octanagem. As misturas destes dois hidrocarbonetos em volume definem a resistência à detonação de amostras de referência em números de octanas intermediários, onde o número de octanas será a proporção de mistura existente do isooctano e do n-hepteno. O

número de octanas está diretamente relacionado com a resistência antidetonante do combustível, ou octanagem.

Os principais métodos para a determinação da octanagem são o método motor (MON – Moto Octane Number) e o método Pesquisa (RON – Research Octane Number), estes extraídos em motores monocilíndricos definidos em norma específica e conhecidos como Cooperative Fuel Research (CFR). Podendo ainda, a octanagem, ser expressa através do IAD – Índice Anti Detonante (definido como a média aritmética entre MON e RON). Os motores do tipo CFR, apresentam uma relação de compressão variável, proporcionando ajustes que provocam a detonação, mantido sob controle e monitoramento. Queimando o combustível sob análise e misturas padrões conhecidas, compostas de uma mistura de n-heptano e isooctano em níveis de detonação padronizados e monitorados por um sensor eletrodinâmico, permitindo assim, por interpolação, definir o número de octanas da amostra. Os parâmetros dos métodos são apresentados na Tabela 3.4.

Tabela 3.4 - Parâmetros dos testes RON e MON para octanagem

	<i>Pesquisa - RON</i>	<i>Motor - MON</i>
Temperatura do ar	52°C	149°C
Pressão do ar de admissão	Atmosférica	Atmosférica
Umidade		0,0036 – 0,0072 kg/kg de ar seco
Temperatura do líquido de arrefecimento		100°C
Rotação do motor	600 RPM	900 RPM
Avanço da centelha	13° APMS	19°-26° APMS (varia em função da relação de compressão)
Razão ar/combustível		Ajustada para a máxima detonação

Fonte: ASTM [1964]

Dentre os testes, o método *motor*, apresenta condições mais severas. As quais favorecem a detonação, devido à temperatura da mistura ser mais elevada. Desta forma, o MON (Motor Octane Number) de um determinado combustível será sempre menor que seu RON (Research Octane Number), sendo a diferença entre estes a sensibilidade do combustível.

3.1.10.3 Consumo específico de combustível

Sendo definido como a taxa em que o motor converte a energia presente no combustível em trabalho, é avaliado pela divisão da taxa de combustível utilizada pela potência medida pelo dinamômetro, conforme Equação 3.16.

$$C_e = \frac{\dot{m}}{P} \quad (3.16)$$

Onde C_e é o consumo específico de combustível, em g/kW.h, \dot{m} é a vazão mássica de consumo de combustível em g/s e P a potência medida em kW.

O consumo específico é inversamente proporcional à carga aplicada no motor e a abertura da borboleta altera a quantidade da mistura de ar e combustível admitida no motor, por consequência a pressão média efetiva sofre alterações de acordo com a Figura 3.9.

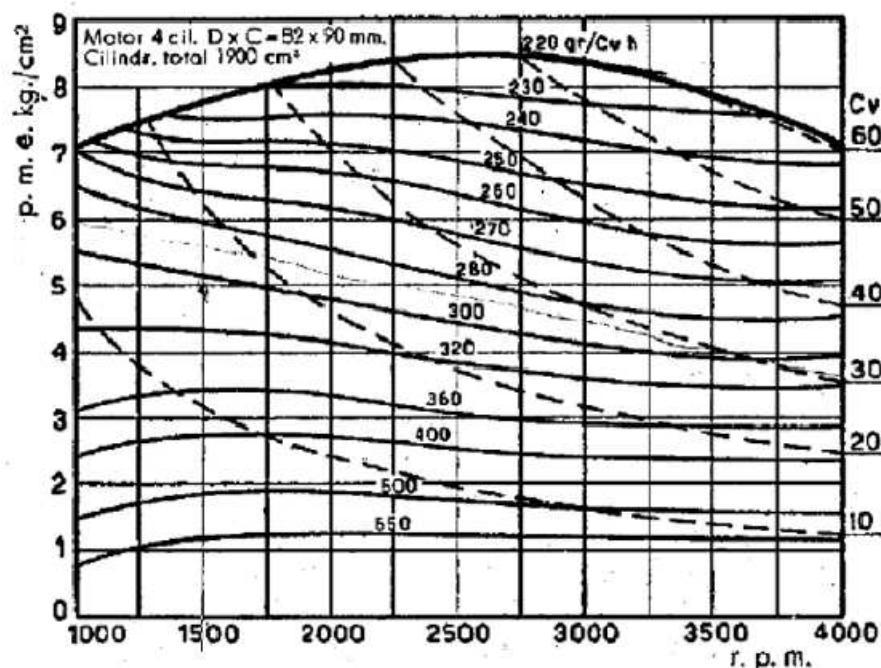


Figura 3.9 - Relação entre o consumo específico de combustível à rotação e à pressão média efetiva. Fonte: Giacosa [1986]

3.1.10.4 Combustão

A reação rápida de oxidação de uma determinada substância denomina-se combustão, frequentemente acompanhada pela geração de calor e luz em forma de chama. Tendo início quando o sistema atinge a temperatura de ignição, prosseguindo de maneira espontânea e cessando quando o equilíbrio entre a energia calorífica total dos reagentes e a dos produtos é atingido.

a) Termoquímica da Combustão

As características da propagação relativa da chama proveniente da combustão dependem em grande parte da mistura ar/combustível não queimada. A existência de movimento da chama implica em uma reação limitada a uma zona pequena em volume comparada às dimensões de todo o conjunto, que no caso específico de um motor alternativo, é a própria a câmara de combustão. A forma de propagação espacial da frente de chama resulta do equilíbrio de forças entre a reação química, o processo de transporte de massa e o balanço entre a geração de calor e espécies ativas que aceleram a reação química, com o resfriamento dos reagentes governados pela velocidade de convecção [Heywood, 1988].

A velocidade de propagação da chama nos motores ciclo Otto é influenciada, principalmente, pela rotação do motor, pressão de admissão, tamanho e curso do êmbolo, relação entre as pressões de admissão e descarga, número de Reynolds, forma da câmara de combustão e pela posição da vela. Temperatura de admissão, umidade atmosférica e temperatura de operação do motor têm pequeno efeito sobre a velocidade de chama [Taylor, 1962].

Os tipos de chamas são usualmente classificados de três maneiras: pela composição do reagente quando entra na zona de reação, que pode ser pré-misturado ou homogeneizado pelo processo de difusão; pelo fluxo dos gases laminar ou turbulento na zona de reação; e pelo regime estacionário ou transiente da chama. O ciclo Otto é caracterizado por pré-misturado, regime transiente devido ao ciclo de operação, escoamento turbulento e propagação no estado gasoso. O ciclo diesel caracteriza-se por difusão, regime transiente, turbulência, e o combustível inicialmente no estado líquido [Heywood, 1988].

A combustão normal num motor Ciclo Otto é aquela que produz uma queima controlada da mistura ar/combustível, e que gasta de 1 a 4 milésimos de segundo do início ao término da mesma. Imediatamente após a mistura ser ignizada pela centelha da vela, a frente da chama propaga-se a partir do ponto de ignição, na forma de círculos sempre crescentes, com velocidade de até 80 km/h. Como a mistura queima numa velocidade controlada, os gases são aquecidos e a sua temperatura pode alcançar valores de 1.100°C até 1.600°C. Junto com esse acréscimo de temperatura existirá, conseqüentemente, um aumento da pressão no cilindro. Qualquer outra combustão que não se processe dessa forma e considerada combustão anormal, tais como: detonação e pré-ignição [Mahle, 2003].

b) Combustão Anormal

Definida combustão anormal toda aquela que não cumprir com o tempo, velocidade de propagação e temperatura descrita no parágrafo anterior, ocasionando vibrações, ruídos e diminuindo substancialmente a vida útil do motor. Quando a detonação ou a pré-ignição ocorrem, há um fornecimento grande de energia química contida no combustível utilizado, porém fora do esperado e em tempo errado, causando pressões locais elevadas que se propagam por toda a câmara de combustão, mas tornando-se inútil à geração de trabalho e potencialmente destrutiva para o motor. A Tabela 3.5 descreve as diferenças entre a detonação e a pré-ignição.

Tabela 3.5 - Detonação e pré-ignição

	Detonação	Ignição superficial
Tempo de ignição mistura	> 4 milésimos segundo	< 1 milésimo segundo
Velocidade propagação chama	Subsônica	Supersônica
Temperatura combustão	1800°C - 2000°C	> 2200°C
Pressão atingida	800 psi	1200 psi
Danos causados	# Batidas no motor. # Erosão no topo do êmbolo. # Quebra dos anéis de segmento.	# Derretimento do êmbolo. # Furos no topo do êmbolo. # Destruição do motor em minutos.
Principais causas	# Combustível inadequado com baixo índice de octanas;	# Depósitos de carvão que permanecem incandescentes;

	# Razão de compressão muito alta; #Má regulagem da mistura ar/combustível; # Ignição muito avançada; # Carga excessiva do motor; # Depósitos de carvão nos êmbolos ou no cabeçote.	# Velas de tipo excessivamente quente para o motor; # Detonação e suas causas; # Combustível inadequado; # Pontos quentes nas câmaras de combustão; # Cabos de vela fora da ordem de ignição.
--	--	---

Fonte: MAHLE [2003]

3.2 Propriedades do Gás HHO – Gás de Brown

Segundo Shinnar, 2003, países da Europa, bem como Estados Unidos e Japão, tem se esforçado em realizar pesquisas voltadas para o desenvolvimento de uma "economia do hidrogênio". Na qual, o hidrogênio substituiria o petróleo e o gás natural na maioria dos usos, incluindo o combustível para o transporte.

Para tanto, um dos gases utilizados como combustível é o Gás HHO, também chamado de Gás de Brown ou gás hidróxi. Este gás é formado por H_2 e O_2 separados por moléculas distintas, em seu estado mono atômico (um único átomo por molécula) gerado pelo processo de eletrólise da água, normalmente com eletrólitos como Hidróxido de Sódio (NaOH), Hidróxido de Potássio (KOH) ou aditivos como o Cloreto de Sódio (NaCl) [Yilmaz; Uludamar; Aydin, 2010]. Sua mistura estequiométrica é equivalente à da água. O gás HHO foi desenvolvido e patenteado pelo professor Yull Brown em 1977, com a finalidade de demonstrar a possibilidade de produzir aquecimento através do gás proveniente da água [Alrousan, 2010].

De acordo com Santilli, 2006, o gás HHO quando observado seus aspectos físicos, apresenta-se inodoro, incolor e mais leve quanto o ar. O autor ainda destaca 5 características importantes. A primeira característica notável é a eficiência da eletrólise para a produção do gás, definida como a relação entre o volume de gás HHO produzido e o número de Watts necessários para sua produção.

A segunda característica importante é que o gás HHO não requer oxigênio para combustão, uma vez que contém no seu interior todo o oxigênio necessário para esse processo. Ressalta-se que outros combustíveis, tais como o próprio gás hidrogênio,

necessitam de oxigênio atmosférico para sua combustão. Essa redução da concentração de oxigênio dissolvido no ar atmosférico causa grave problema ambiental, conhecido como depleção de oxigênio. Logo, essa capacidade de combustão sem redução de oxigênio, associado ao baixo custo de produção do gás, torna-o eco-amigável.

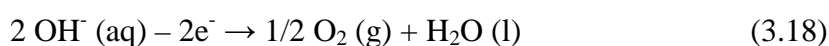
Uma terceira característica do gás, destaca que o mesmo não segue o diagrama de Pressão-Volume-Temperatura (Diagrama PVT) de gases com estrutura molecular convencional, uma vez que o gás reage ao estado da água líquida a uma pressão da ordem de 150 psi, enquanto os gases convencionais adquirem o estado líquido em pressões dramaticamente maiores. Esta característica sugere que o gás aqui considerado não possui uma estrutura molecular convencional, ou seja, uma estrutura na qual a ligação é de tipo de valência inteira.

O gás apresenta como quarta característica, a adesão anômala (adsorção) a gases, líquidos e sólidos, tornando sua aplicação eficaz como aditivo para melhorar a qualidade ambiental de outros combustíveis, entre outras aplicações. Esta característica não é observada em outros gases convencionais, confirmando novamente uma nova estrutura química para gás HHO.

Por fim, a quinta característica do gás destaca seu elevado coeficiente térmico, amplamente variável, que ao ar livre gera aproximadamente 150°C, podendo liberar grande energia térmica, gerando cerca de 9000 °C, ao sublimar Tungstênio.

3.3 Eletrólise

A eletrólise é o processo utilizado para obtenção do gás HHO. Este processo é desenvolvido em um sistema eletroquímico onde reações são desencadeadas a partir da aplicação de uma força eletromotriz por uma fonte externa de energia. O fornecimento de tensão e corrente é feito através de eletrodos, entre os quais existe um meio condutor iônico que pode ser líquido ou sólido. As semireações no cátodo (redução) e ânodo (oxidação), e a reação global, estão representadas respectivamente pelas Equações 3.17, 3.18, e 3.19.





3.3.1 Meio Condutor

O meio condutor (eletrólito) tem por finalidade garantir a transferência de elétrons, permitindo a realização da eletrólise. O principal eletrólito utilizado é Potassa Cáustica ou Hidróxido de Potássio (KOH), dissolvido em água destilada, formando uma solução de água e sal, representada na Equação 3.20.



A utilização de KOH se justifica ao menor efeito corrosivo nos eletrodos, se comparado a outros eletrólitos menos utilizados como Hidróxido de Sódio ou Soda Cáustica (NaOH), por exemplo [Tolmasquim, 2003]. A Tabela 3.6 apresenta a eletrólise e suas semireações com a utilização da solução da Equação 3.20. Durante a reação química é verificada a formação de borbulhas no entorno dos eletrodos, o que identifica a geração de gás HHO, enquanto os elementos restantes do eletrólito se unirão e formarão moléculas de Hidróxido de Potássio KOH.

Tabela 3.6 - Reação química da eletrólise

	Cátodo	Ânodo
Migração de íons	$\text{K}^+ \text{ e } \text{H}^+$	$\text{OH}^- \text{ da água e } \text{OH}^- \text{ da base}$
Facilidade de descarga	$\text{H}^+ > \text{K}^+$	OH^-
Semireação	$4\text{H}_2\text{O}_{(l)} + 4\text{e}^- = 2\text{H}_{2(g)} + \text{K}^+$	$4\text{OH}^-_{(aq)} = 2\text{H}_2\text{O}_{(l)} + \text{O}_{2(g)} + 4\text{e}^-$
Permaneça na solução	K^+	OH^-

Fonte: Sardella [1999]

3.3.2 Fluxo do Processo de Eletrólise

Para obtenção do gás, que será utilizado como combustível complementar, são necessários: o eletrolisador, o eletrólito (solução de KOH 1%), e eletricidade, os quais combinados, conforme Figura 3.10, geram gás HHO (Hidrogênio+Oxigênio) a uma vazão de 1052ml/min, elevando a temperatura do equipamento e da solução em aproximadamente 23°C.

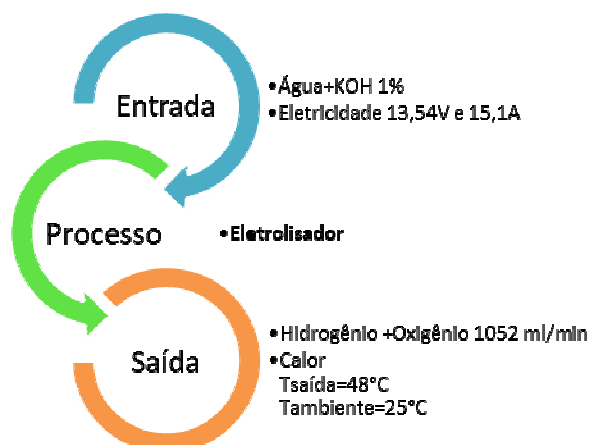


Figura 3.10 - Fluxo do processo de obtenção do gás *HHO*

3.4 Análise Exergética

A exergia pode ser definida como sendo o máximo trabalho útil que pode ser obtido a partir de uma forma de energia em relação ao meio, ou seja, utilizando como referência os parâmetros ambientais (temperatura, pressão, entre outros). De acordo com Szargut, 1988, exergia é a quantidade de trabalho obtida quando alguma matéria é levada para um estado de equilíbrio termodinâmico com os componentes comuns do ambiente natural por meio de processo reversível, envolvendo interação somente com os componentes naturais deste meio. Nesta mesma linha, para Moran & Shapiro, 2006, a exergia pode ser definida como sendo o trabalho teórico máximo possível de ser obtido da interação de um sistema de interesse com o meio de referência até o equilíbrio. Podendo também, a exergia, ser entendida como o módulo do valor teórico mínimo de fornecimento de trabalho necessário para levar o sistema do estado morto para um determinado estado. Não podendo apresentar valores negativos. Em complemento, Kotas, 1985, afirma que exergia pode ser considerada como padrão adequado à avaliação da qualidade da energia na análise de sistemas

térmicos. O autor ainda relata que o balanço exergético diferencia-se do balanço energético pelo princípio que os rege, ou seja, enquanto o balanço de energia baseia-se na Lei de Conservação de Energia, o balanço exergético estabelece suas bases na perda irreparável de exergia.

3.4.1 Tipos de Exergia

A exergia total de entrada (ex_e) pode ser dividida em quatro componentes básicos: exergia física (ex_{ph}), exergia química (ex_{ch}), exergia potencial (ex_{pt}) e exergia cinética (ex_{kn}), somadas a essas a exergia de eletricidade (ex_{el}) e de exergia de insumos (ex_{in}), sendo definida pela Equação 3.21:

$$ex_e = ex_{ph} + ex_{kn} + ex_{pt} + ex_{ch} + ex_{el} + ex_{in} \quad (3.21)$$

A exergia física pode ser definida, na Equação 3.22, como sendo o máximo trabalho obtido quando o sistema passa de seu estado inicial (T e P) para o estado morto restrito (T_0 e P_0), ou seja, ao atingir o estado morto o sistema não tem mais capacidade de gerar trabalho.

$$ex_{ph} = (h - h_0) - T_0 (S - S_0) \quad (3.22)$$

Onde:

h = Entalpia do sistema para dado estado

s = Entropia do sistema para o dado estado

h_0 = Entalpia para o estado morto restrito

s_0 = Entropia para o estado morto restrito

Segundo Szargut et al., 1988, a definição de exergia química é semelhante à definição de exergia física, sendo definida como o trabalho máximo que pode ser obtido quando o sistema em questão reage com substâncias de referência presentes no ambiente. A exergia química é definida pela Equação 3.23, e leva em conta a composição do combustível assim como a composição do ar ambiente. Sendo o segundo termo da soma referente aos gases ideais.

$$ex_{CH} = ex_Q + RT_0 \ln\left(\frac{F_1}{F_0}\right) \quad (3.23)$$

Onde:

ex_D = Exergia da substância conforme tabela

R = Constante dos gases

T_0 = Temperatura ambiente

P_1 = Pressão saída

P_0 = Pressão ambiente

Por sua vez, as exergias cinética e potencial foram consideradas nulas para esse trabalho, devido aos testes terem sido realizados em bancada e de forma estática. A exergia de insumos foi calculada utilizando dados tabelados de exergia do material, multiplicadas pela massa do componente. Enquanto, a Exergia da eletricidade foi definida pela potência empregada para gerar 1052 ml/min, utilizando a densidade do gás HHO.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

O presente trabalho se divide em duas etapas, sendo a primeira a pesquisa sobre o combustível a ser utilizado como complemento na queima de hidrocarbonetos, o gás HHO, a obtenção do referido gás e sua validação através da análise exergética do processo de fabricação. A segunda etapa é a utilização do gás HHO em dois motores de combustão interna com mesma cilindrada, porém com construções, sistemas de alimentação e combustíveis principais diferentes (EXPERIMENTOS 1 E 2), para o estudo sobre o ganho de potência, torque, a redução do consumo de combustível e conseqüentemente a redução das emissões dos gases nocivos ao ambiente. Para a geração do gás HHO, foi utilizado um eletrolisador do tipo seco, onde a eletrólise ocorre internamente no equipamento, sendo este composto de:

- 2 placas externas de fechamento de Poliamida (PA 6.6), com diâmetro de 28mm e espessura de 13mm;
- 7 placas internas condutoras de aço inox 316L, com diâmetro de 22mm e espessura de 2mm;
- 8 parafusos de aço 8.8 M10, com 85mm de comprimento;
- 2 conexões de cobre rosca ½” e espiga para mangueira;
- 1 joelho de cobre rosca ½”;
- 2 metros de mangueira de silicone transparente, com bitola de ½”.

Os parâmetros utilizados para os testes de bancada estão detalhados na Tabela 4.1, apresentando concentração utilizada, consumo de energia para extração do gás, oriunda de fonte externa ao sistema devido norma de ensaio dos motores, volume gerado, entre outros.

Tabela 4.1 - Parâmetros de operação do eletrolisador

Eletrólito utilizado	KOH
Concentração	1% Vol. = 25 g/l
Produção de gás HHO	1052 ± 0,8 ml/min.
Produtividade	5,14 ± 0,003 ml/W.min.
Corrente de operação	15,1 ± 0,5 A
Tensão média	13,54 ± 0,12 V
Potência elétrica exigida	204,45 ± 7 W

Temperatura de operação	$48 \pm 2^{\circ}\text{C}$
Temperatura ambiente	$25 \pm 2^{\circ}\text{C}$

As Figuras 4.1 e 4.2 apresentam, respectivamente, a vista lateral e frontal do eletrolisador empregado.

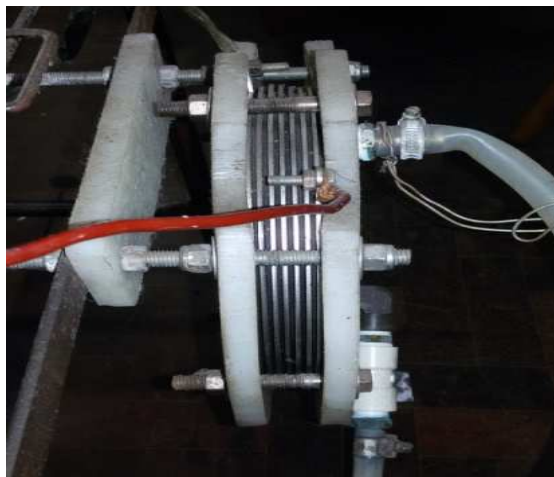


Figura 4.1 - Vista lateral do eletrolisador



Figura 4.2 - Vista frontal do eletrolisador

Sendo assim, a eficiência energética do eletrolisador pode ser determinada dividindo-se o total de energia consumida pela quantidade de gás HHO produzido, ou seja, $204,45\text{W}/63,12\text{LPH} = 3,23\text{W/LPH}$. Para uma eletrólise com 100% de eficiência, segundo a Lei de Faraday, a relação entre a potência consumida e produção de gás é de $1,48\text{V}/0,685 = 2,16\text{W/LPH}$. Logo, o eletrolisador testado tem uma eficiência de 67%. Em

termos energéticos, tem-se: - Poder Calorífico Inferior do Hidrogênio: 119,6kJ/g [Wyllen, 1993] - Densidade do Hidrogênio: 0,083kg/m³ - Produção de 63,12l/h de oxi-hidrogênio: 21 litros de O₂ e 42 litros de H₂ Logo a energia produzida é de 119,6kJ/g x 0,083g/l x 42l/h = 417kJ/h = 116W.

Para a segunda etapa foram utilizados os motores VW AP 1.6 litros álcool, refrigerado à água, alimentado através do carburador Weber 450 Mini Progressivo, com sua configuração original de fábrica (Experimento 1). E o motor FIAT corsa longa 1.6 litros gasolina, refrigerado à água, alimentado através da injeção de combustível programável FuelTech FT500 + Sistema de Gás Landirengo para ministrar o HHO (Experimento 2), conforme Figura 13.

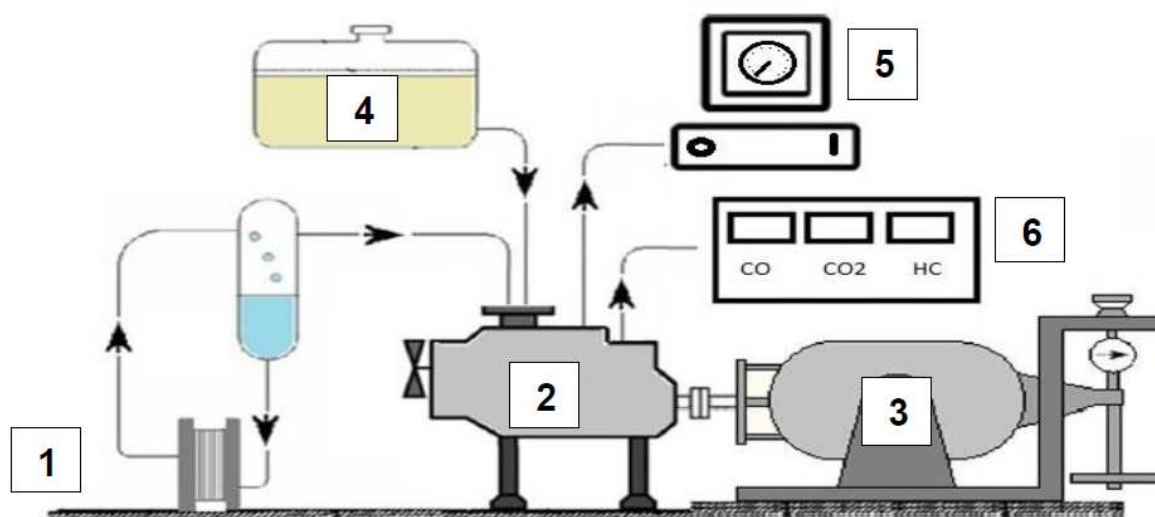


Figura 4.2 - Esquema geral do ensaio, onde: Aparelho de eletrólise (1), motor (2), dinamômetro (3), reservatório de combustível (4), central de controle (5) e analisador de gases (6) (Adaptado de El-Kassaby et al., 2016).

4.1 Experimento 1

As características do motor VW AP 1.6 litros álcool, utilizado no experimento 1 são apresentadas na Tabela 4.2 O motor escolhido possui carburador, sendo considerado atualmente com tecnologia defasada, porém ainda equipa boa parte da frota nacional.

O dinamômetro utilizado foi do tipo hidráulico, marca Motor Power, modelo MP600. O torque é medido através de um transdutor hidráulico acoplado ao estator do

dinamômetro por um braço de comprimento conhecido, conforme apresentado na Tabela 4.3.

Tabela 4.2 - Características motor AP 1.6l álcool

Quantidade e disposição de cilindros	4 em linha.
Quantidade de válvulas	8
Diâmetro do cilindro	81 mm
Curso do êmbolo	77,4 mm
Cilindrada total	1596 cm ³
Relação de compressão	12,3:1
Potência (NBR 1585)	90kW à 5600 rpm
Torque (NBR 1585)	128Nm à 2600 rpm
Ordem de ignição	1-3-4-2
Alimentação de combustível	Carburador Weber 450 mini progressivo

Fonte: VW do Brasil [2017]

Tabela 4.3 - Dados dinamômetro Motor Power MP600

Leitura	Escala	Incerteza
Rotação	0 – 9000 rpm	± 0,5%
Torque	0 – 413,84 N.m	± 0,7%

Fonte: Manual MP600

A Figura 4.4 apresenta a bancada de controle do ensaio, onde foram realizadas as leituras de torque e rotação, e o motor montado na bancada de testes para o Experimento 1.

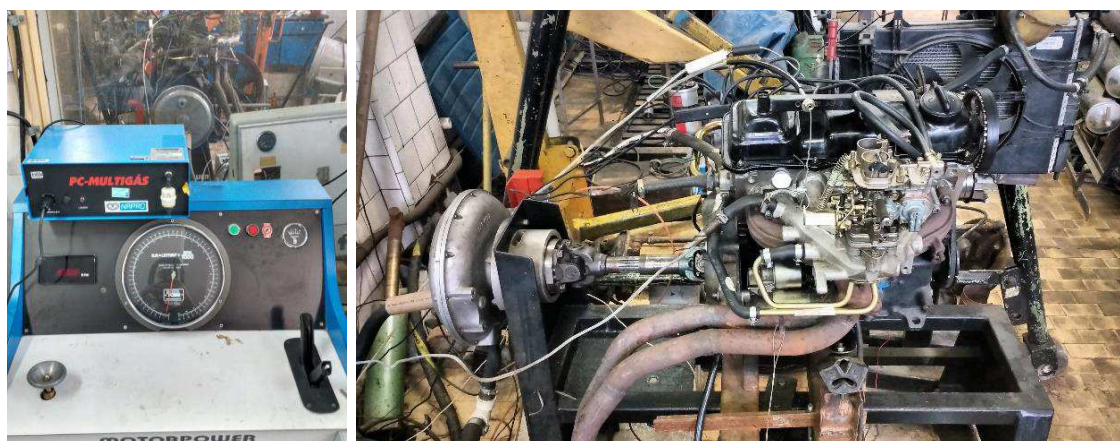


Figura 4.3 - Bancada de controle dos ensaios e Motor VW instalado na bancada de testes e acoplado ao dinamômetro. Fonte: Blanco (2017)

4.2 Experimento 2

As características do motor FIAT corsa lunga 1.6 litros gasolina, utilizado no experimento 2 são apresentadas na Tabela 4.4.

Tabela 4.4 - Características motor Fiat 1.6l 16v Corsa Lunga

Quantidade e disposição de cilindros	4 em linha.
Quantidade de válvulas	16
Diâmetro do cilindro	80,5 mm
Curso do êmbolo	78,4 mm
Cilindrada total	1596 cm ³
Relação de compressão	9,5:1
Potência (NBR 1585)	78kW à 5500 rpm
Torque (NBR 1585)	151,1Nm à 4500 rpm
Ordem de ignição	1-3-4-2
Alimentação de combustível	Fuel Tech FT500 + Gás Landirengo

Fonte: Fiat do Brasil [2017]

O dinamômetro utilizado foi o de corrente de Foucalt, da marca ZÖLLNEER D-500, com potência nominal de frenagem de 200kW. O torque é medido através de uma célula de carga, Z-250 fabricada pela Alfa Instrumentos, acoplada ao estator do dinamômetro por um braço de comprimento conhecido. A Tabela 4.5 descreve os dados técnicos da célula de carga Z-250.

Tabela 4.5 - Dados técnicos célula de carga Z-250

Capacidade nominal	250kg
Capacidade de força	2500N
Erro combinado	<0,03% saída nominal
Máxima sobrecarga sem alterações	150% capacidade nominal
Sobrecarga de ruptura	300% capacidade nominal
Excitação VCC ou VCA	Máxima:15 Recomendada:10

Fonte: Alfa Instrumentos [2017]

A Figura 4.5 apresenta a bancada de fixação do motor e o dinamômetro para o Experimento 2.

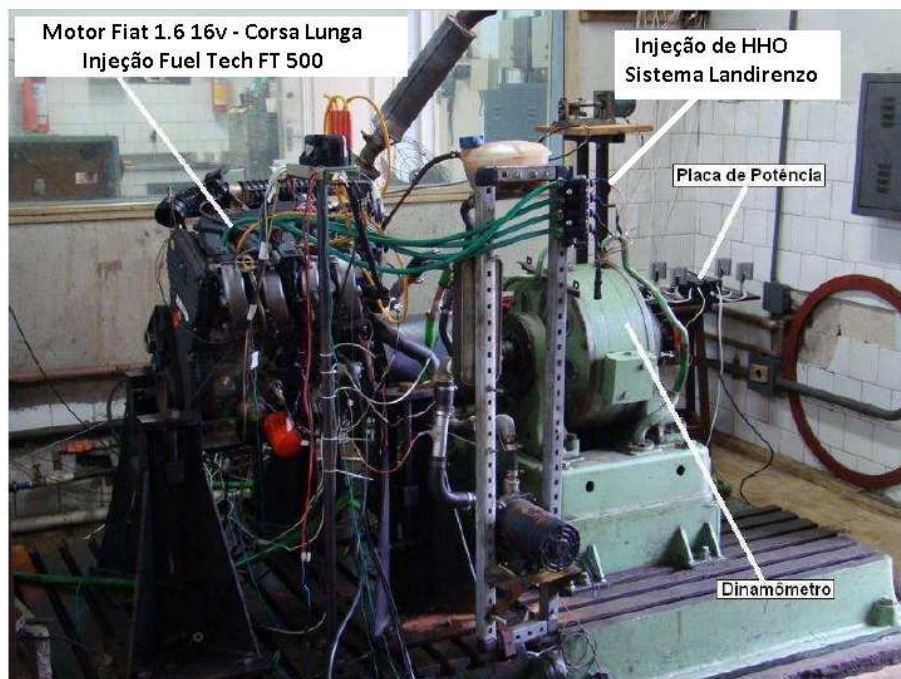


Figura 4.4 - Motor Fiat instalado na bancada de testes e acoplado ao dinamômetro

4.2.1 Sistema GAS

Para subministrar o gás *HHO* ao motor, foi utilizado um Kit de Gás GNV da marca Landirengo, modelo OMEGAS DIRECT, composto por central eletrônica e bicos injetores de gás, conforme mostrado na Figura 16.



Figura 4.5 - Sistema Landirengo de injeção GNV. Fonte: Landirengo [2017].

4.2.2 Sistema de Injeção Programável

Para gerenciar o sistema de combustível líquido e a ignição do motor, foi utilizada a injeção programável FUEL TECH FT500 (Figura 4.7) e os condicionadores de sinal para

sonda de banda larga WideBandO2 DataLogger e para ignição em bobinas estáticas o SparkPro2.



Figura 4.6 - Sistema de injeção FuelTech FT500 e condicionadores de sinal. Fonte: FuelTech

Para validar os experimentos e analisar os gases provenientes da queima dos combustíveis, utilizou-se o analisador de gases PC-MULTIGÁS da NAPRO (Figura 18), em ambos os experimentos. As características do equipamento são descritas na Tabela 4.6.



Figura 4.7 - Analisador de gases NAPRO. Fonte: NAPRO Eletrônica Industrial [2017]

Para medição do consumo de combustível utilizou-se a célula de carga Reaccion, modelo BCDL-10, acoplada a um conversor analógico digital de 24bits, que, ligado a um controlador digital da marca ATMEL modelo ATMEGA328, para o controle do consumo de combustível através do peso no reservatório durante os testes. De posse destas medições efetuaram-se os cálculos do consumo específico em cada ensaio. A incerteza de medição do consumo de combustível obtida foi de $\pm 1,5\%$, calculado conforme Equação 30.

Tabela 4.6 - Dados técnicos PC-MULTIGÁS NAPRO

Leitura	Escala	Incerteza
CO	0 – 15%	± 0,06% absoluto
CO2	0 – 20%	± 0,6% absoluto
HC	0 – 20000 ppm	± 3,5 ppm
O2	0 – 25%	± 0,03% absoluto
NOX	0 – 5000 ppm	± 0,9 ppm
Lambda	0 – 9.99	± 0,01% absoluto
AFR	0 – 99.99	± 0,1% absoluto

Fonte: NAPRO Eletrônica Industrial [2017]

4.3 Experimentos

Os ensaios foram realizados no LABMOT (Laboratório de motores) – UFRGS, regidos pela norma NBR ISO 1585 de 1996, com o devido aquecimento à rotação de 3000rpm e carga parcial dos motores às temperaturas de 100°C para o óleo lubrificante e 80°C para o líquido de arrefecimento. Em ambos os experimentos foram realizados dois tipos de ensaios, um com abertura parcial da borboleta (40%) e outro com abertura total da borboleta (100%). Em todos os ensaios foram mantidas constantes as aberturas das borboletas e somente as cargas foram alteradas de modo que fossem obtidas as rotações de 1500, 2500 e 3500 rotações por minuto, sendo estas rotações eleitas devido a contemplarem as faixas mais utilizadas no trânsito urbano pelos condutores em seus veículos. Os testes se iniciaram com os combustíveis líquidos em todas as posições já descritas, e posteriormente o gás HHO é inserido repetindo novamente o ensaio. No experimento 1, iniciou-se com o álcool etílico hidratado e posteriormente se repetiu com a adição do gás HHO ao combustível líquido. No experimento 2 iniciou-se com a gasolina comercial comum e posteriormente foi adicionado o gás HHO ao combustível líquido. Todos os testes foram repetidos 5 vezes.

Para a correção dos valores de potência líquida efetiva foram utilizados os valores referenciados na norma, demonstrados na Tabela 4.7.

Tabela 4.7 Dados e valores de referência para correção potência líquida

Temperatura de bulbo seco	298 K
Pressão atmosférica total	100 kPa
Pressão de ar seco	99 kPa
Pressão de vapor	1 kPa

Fonte: Norma ISO 1585 [1996]

O fator de ajuste da potência líquida efetiva é demandado pela Equação 4.24

$$\alpha_a = \left(\frac{p_a}{p_a}\right)^{1,2} \left(\frac{TBS}{298}\right)^{0,6} \quad (4.24)$$

Onde α_a é o fator utilizado para corrigir a potência obtida nos ensaios, p_a é a pressão atmosférica seca, obtida da subtração da pressão de vapor de água pela pressão barométrica total e o TBS é a temperatura de bulbo seco.

A potência líquida efetiva é obtida através da Equação 4.25, onde P é a potência líquida efetiva, P_m é a potência medida e α_a é o fator de correção:

$$P = P_m \alpha_a \quad (4.25)$$

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste item serão descritos os resultados obtidos através da análise da geração do gás através da eletrólise, levando em consideração a confecção do eletrolisador. Por conseguinte, tem-se a aplicação deste gás a dois motores de combustão interna e seus respectivos resultados dessa interação, apresentados através do Experimento 1 e Experimento 2.

Por se tratar de um trabalho experimental, devem ser levados em conta os erros inerentes às medições realizadas, figurando entre estes a incerteza do instrumento utilizado durante a medição, a metodologia empregada e demais erros aleatórios. Com o intuito de amenizar os efeitos dos erros aleatórios, foi utilizado a repetibilidade e posteriormente tratamentos estatísticos durante a medição de algumas grandezas.

Quando o instrumento utilizado apresentou a incerteza descrita por seu fabricante, a mesma foi calculada e transcrita direto para os resultados. Os demais valores das grandezas obtidas durante os demais processos de medição, foram submetidos ao método de Klein e McClintock, conforme a Equações 1, 2 e 3 detalhadas no Anexo I.

5.1 Análise e Balanço Exergético

Após a realização dos testes de bancada, associados a dados bibliográficos, obteve-se os valores das exergias, que somadas definiram o valor da Exergia total de entrada (ex_s). Em seguida, foi calculado a Exergia de saída do sistema (ex_g), para posterior balanço exergético. Para todos os cálculos foi adotada a temperatura ambiente (T_0) de 25°C e pressão ambiente (P_0) e de saída (P_1) igual a 101,325 kPa.

Para o cálculo de Exergia Física, Equação 3.22, foram utilizados os dados de entrada como entalpia ($s_0 = 0,367$ kJ/Kg.K) e entropia ($h_0 = 104,86$ kJ/Kg) definidos em tabelas termodinâmicas, utilizando como base a temperatura T_0 e pressão P_0 . Para o estado de saída, onde a temperatura medida foi de 48°C, sendo utilizado 50°C para fins de consulta em tabelas termodinâmicas, obteve-se entalpia ($s = 0,703$ kJ/Kg.K) e entropia ($h = 209,31$ kJ/Kg). Por fim, obteve-se o valor de Exergia Física ($ex_{ph} = 4,322$ kJ/kg).

A Exergia Química (ex_{ch}), calculada através da Equação 3.23, por sua vez foi igual a da água, visto que a pressão do Sistema se manteve inalterada ($P_0 = P_1$), sendo de valor igual a 50 kJ/kg.

A Exergia da Eletricidade (ex_e), foi considerada com rendimento de 100%, com um consumo de 204,45W e uma produção de 1052 ml/min e através das densidades do gás de saída, chega-se a Exergia elétrica de 7,71kJ/kg.

Os valores de Exergia dos Insumos (ex_{in}), utilizados como referências para os cálculos nesse trabalho, são descritos no apêndice de Szargut [1988], e são apresentados na Tabela 5.1, bem como o valor final de exergia para cada cálculo e representação.

Tabela 5.1 - Exergia dos Insumos

Insumo	Valores de referência	Exergia
Aço inox 316L	Exergia Aço = 7100 kJ/kg Massa = 42,5g = 0,04256kg	7100x0,04256 = 302 kJ
Poliamida 6.6	Exergia Poliamida = 48500 kJ/kg Massa = 18,24g = 0,01824kg	48500x0,01824 = 884,64 kJ
Cobre	Exergia Cobre = 2110 kJ/kg Massa = 12g = 0,01203kg	2110x0,01203 = 25,35 kJ
KOH	Exergia KOH = 1917,7 kJ/kg Massa utilizada = 50g = 0,05kg	0,05x1917,7 = 95,88 kJ
Total da Exergia dos Insumos (calculados + estimados*)		$ex_{in} = 1350$ kJ

*Exergia dos demais constituintes do eletrolisador

Para cálculo da Exergia total de entrada (ex_e) aplica-se a Equação 3.21, que fornece um valor total de 1412,03 kJ.

Por fim, foi calculada a Exergia total de saída (ex_s), representada pela Exergia Química dos constituintes do gás HHO. A exergia identificada para cada elemento em tabela termodinâmica foi multiplicada pela quantidade de átomos ($H_2 + \frac{1}{2} O_2$), de acordo com a Equação 5.26, chegando ao valor de 118112,03 kJ/kg.

$$\begin{aligned}
 ex_{H_2} &= 118050 \text{ kJ/kg} \\
 ex_{O_2} &= 1/2 \times 124,06 \text{ kJ/kg} = 62,03 \text{ kJ/kg} \\
 ex_s &= ex_{H_2} + ex_{O_2} = 118112,03 \text{ kJ/kg}
 \end{aligned}
 \tag{5.26}$$

Com relação ao balanço da exergia, as quantidades entrantes no sistema devem de ser transformadas dentro das possibilidades do experimento em exergia de saída, sendo a corrente de saída o objetivo do referido sistema. As perdas e irreversibilidades do processo são explicadas pela diferença entre os valores de exergia de entrada e saída (balanço). Parte dessa diferença é devida a causas internas do sistema (exergia destruída), bem como as perdas que saem através de correntes que não constituem produto para o qual o sistema foi concebido, se conhece como perdas de exergia (KOTAS, 1985). O balanço exergético deste trabalho é referenciado na Equação 5.27.

$$\begin{aligned}
 ex &= ex_s - ex_e \\
 ex &= 116700 \text{ kJ/kg}
 \end{aligned}
 \tag{5.27}$$

Sendo que o valor de Exergia (**ex**) expressa o máximo trabalho útil obtido no processo de eletrólise da água sob as condições descritas anteriormente.

5.2 Resultados do Experimento 1 (Álcool + HHO)

Os resultados deste experimento estão representados em gráficos para melhor compreensão, representando a abertura total da borboleta (100%) “Wide Open Throttle - WOT”, e a abertura parcial da borboleta (40%), respectivamente para cada item avaliado. Conforme descrito anteriormente foram utilizadas rotações intermediárias, pois estão diretamente ligadas ao regime de utilização dos motores de combustão interna no trânsito urbano diário.

5.2.1 Potência Efetiva

A potência efetiva calculada a partir da Equação 4.25, para uma aceleração total e 1500 rpm, foi de 15,44 kW apenas utilizando álcool hidratado combustível e de 16 kW adicionando HHO ao combustível líquido, o que gerou um aumento efetivo de 3,36% na potência. Na rotação de 2500 rpm e abertura total da borboleta de aceleração foram

encontrados 30,2 kW para álcool hidratado e 30,76 kW para álcool e HHO, gerando um ganho de 1,85% de potência. Em 3500 rpm e 100% de abertura da borboleta foram encontrados 40,45 kW e 40,99 kW utilizando apenas álcool hidratado e com a adição de HHO respectivamente, obtendo um aumento de 1,35% de potência. Durante o teste com a abertura parcial da borboleta em 40%, em 1500 rpm encontrou-se 15,1 kW de potência utilizando álcool e 15,66 kW com a adição de HHO ao sistema, proporcionando um ganho de 3,71% em potência efetiva. Com 2500 rpm e abertura de 40% e utilizando álcool, o sistema alcançou uma potência de 27,03 kW, com a adição de HHO obteve-se 27,78 kW, o que proporcionou um ganho efetivo de 2,77% de potência. Em 3500 rpm e abertura de 40%, foram obtidos 36,02 kW e 36,54 kW para álcool e álcool com HHO, gerando um aumento de 1,44% de potência efetiva, conforme demonstrados nas Figuras 19, 20 e 21.

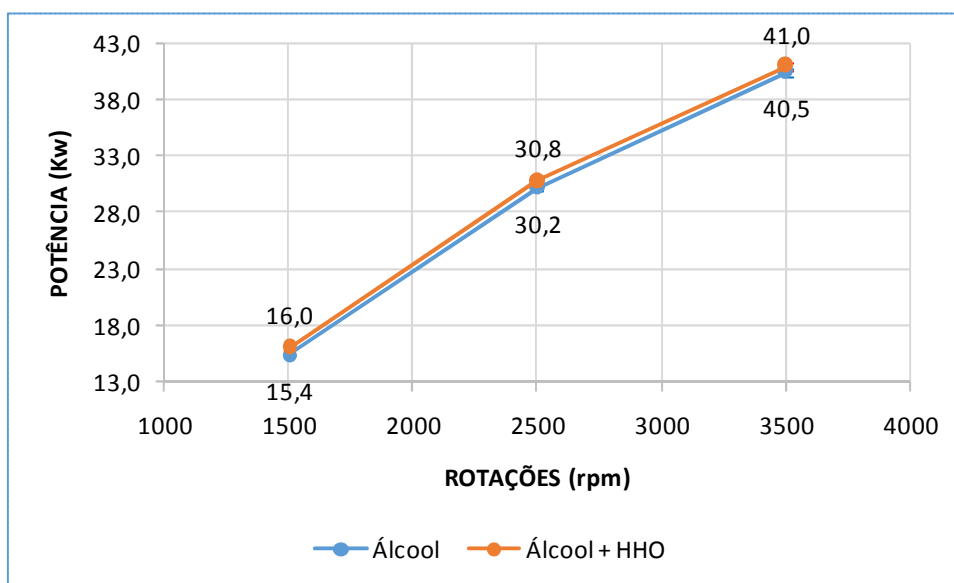


Figura 5.1 - Potência efetiva calculada com borboleta aberta 100%, incerteza de $\pm 0,9\%$

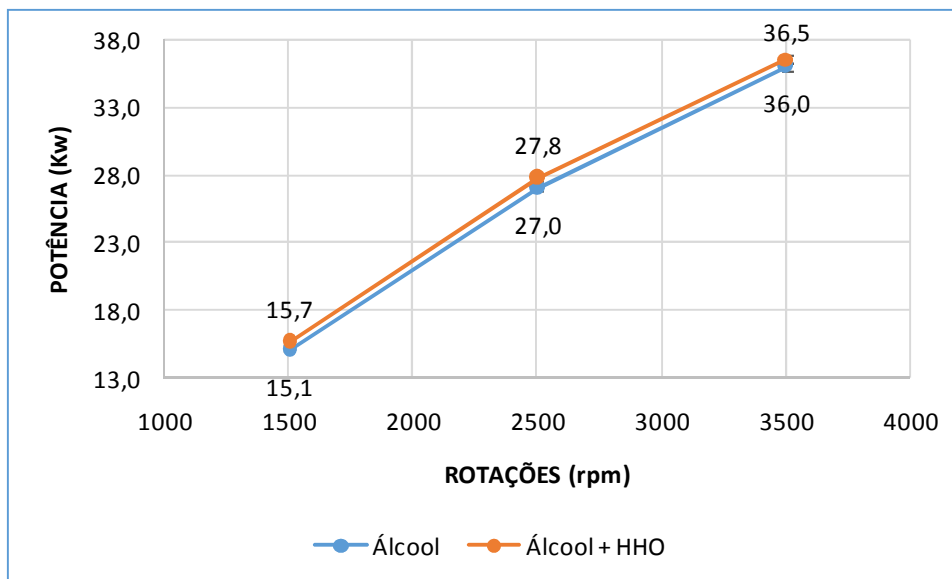


Figura 5.2 - Potência efetiva calculada com borboleta aberta 40%, incerteza de $\pm 0,9\%$.

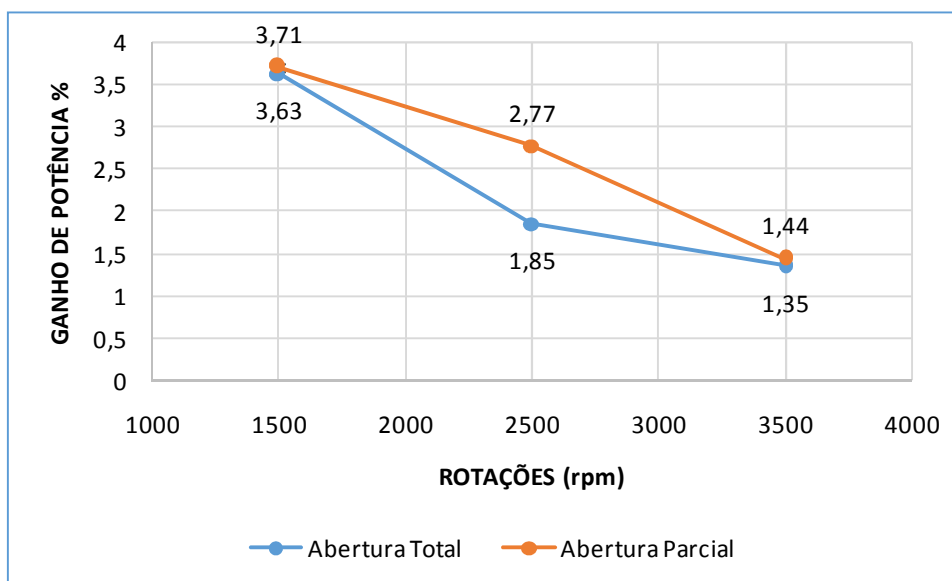


Figura 5.3 - Ganho de potência: Abertura Total X Abertura Parcial

5.2.2 Torque

Responsável por colocar o veículo em marcha, retirando-o da inércia, o torque foi lido diretamente no painel de controle do dinamômetro hidráulico, apresentando, a 1500 rpm e abertura total da borboleta, valores na magnitude de 98,26 N.m utilizando álcool e

101,82 N.m com a adição de HHO, gerando assim um ganho de 3,62% de torque. Em 2500 rpm e abertura total, obtiveram-se 115,35N.m e 117,49N.m para álcool e álcool com HHO respectivamente, produzindo um ganho de 1,86% no torque. Com 3500 rpm e abertura total, foram encontrados 110,37 N.m para álcool e 111,79 N.m com a adição de HHO, proporcionando um aumento de 1,29% em torque. Nos testes com abertura parcial da borboleta e a rotação de 1500 rpm, foram encontrados 96,13N.m para álcool e 99,69N.m com a adição de HHO, gerando um aumento de 3,7% no torque. Com 2500 rpm e abertura parcial da borboleta, 103,25N.m e 106,1N.m forma encontrados para a utilização de álcool e álcool com a adição de HHO, apresentando um aumento de 2,76% no torque. Em 3500 rpm e abertura parcial da borboleta, o sistema apresentou 98,26N.m no álcool e 99,69N.m, propiciando um ganho de 1,46% em torque, conforme demonstrado nas Figuras 5.4, 5.5 e 5.6.

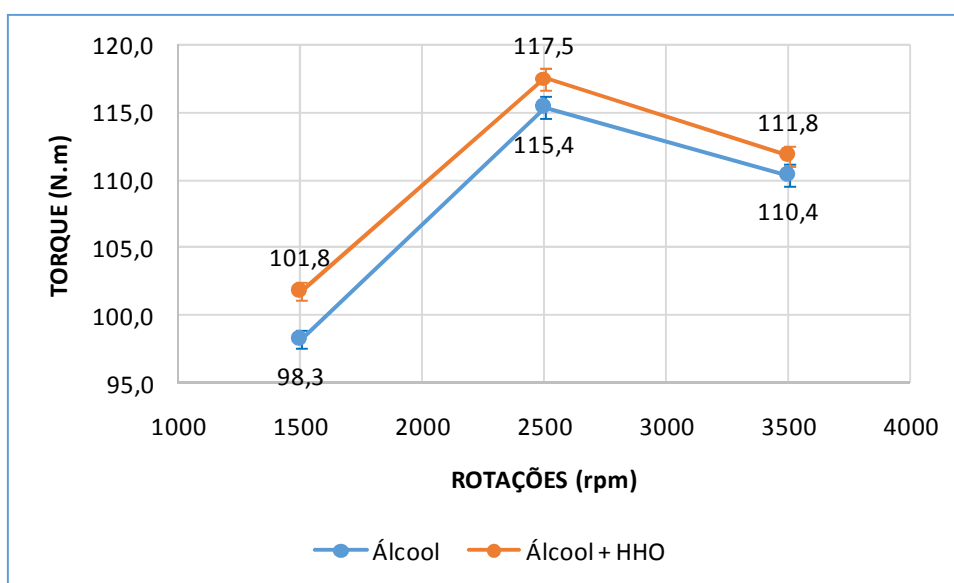


Figura 5.4 - Torque com borboleta aberta 100%, incerteza de $\pm 0,7\%$

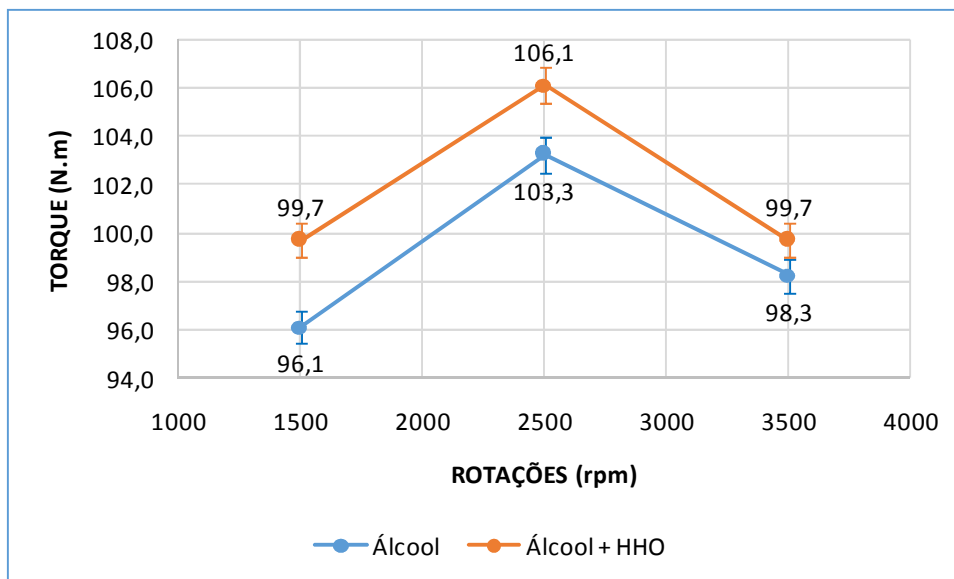


Figura 5.5 - Torque com borboleta aberta 40%, incerteza de $\pm 0,7\%$

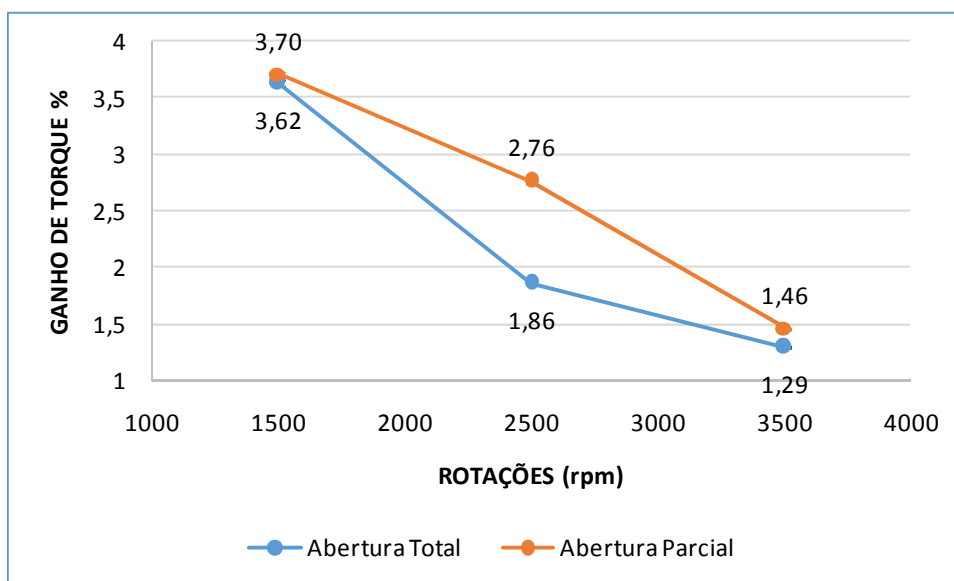


Figura 5.6 - Ganho de torque: Abertura Total X Abertura Parcial

5.2.3 Consumo Específico

Relacionado diretamente à viabilidade econômica da utilização comercial deste sistema, com abertura total e rotação de 1500 rpm apresenta um consumo específico de 540 g/kW.h com álcool e 510 g/kW.h quando adicionado de HHO, propiciando uma redução de 5,56% no consumo. Na rotação de 2500 rpm e abertura total, utilizando álcool

foi encontrado 520 g/kW.h e 510 g/kW.h com a adição de HHO, o que resultou em 2,27% de economia. Ainda com a abertura total, mas na rotação de 3500 rpm, o sistema apresentou um consumo específico de 490 g/kW.h e 480 g/kW.h, originando 2,04% de redução no consumo, utilizando álcool e com a adição de HHO respectivamente. Para a abertura parcial da borboleta em 40%, na rotação de 1500 rpm e utilizando álcool foi encontrado 490 g/kW.h e 470 g/kW.h utilizando álcool com a adição de HHO, acarretando em 4,08% de redução no consumo. Em 2500 rpm e abertura parcial da borboleta, foram encontrados consumos específicos de 440 g/kW.h para álcool e 430 g/kW.h com a adição de HHO no álcool, produzindo uma redução de 2,27%. Com 3500 rpm e abertura parcial os consumos apresentados foram de 420 g/kW.h com álcool e 410 g/kW.h adicionando-se o HHO, o que representa uma redução no consumo de 2,38%. Demonstrado nas Figuras 5.7, 5.8 e 5.9.

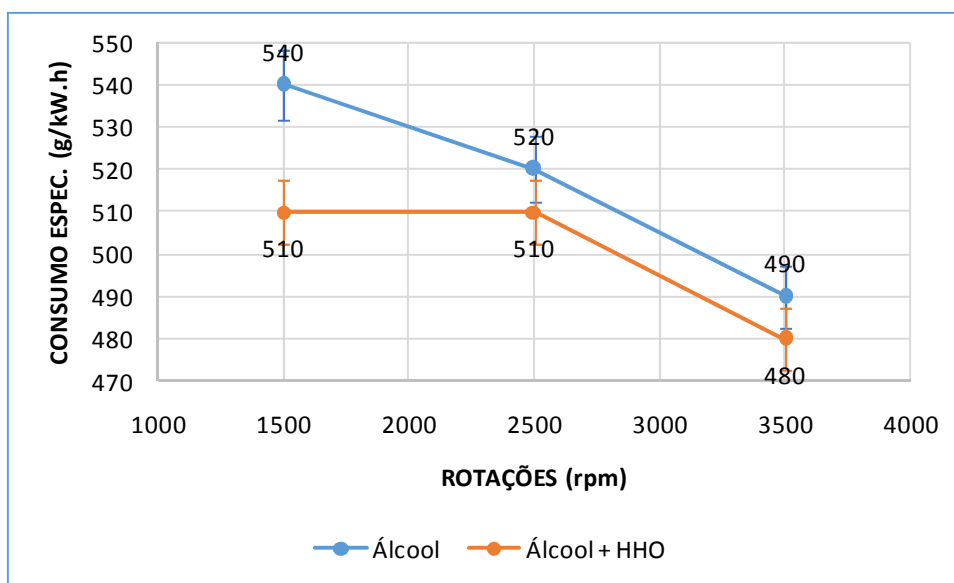


Figura 5.7 - Consumo Específico de combustível abertura borboleta 100%, incerteza $\pm 1,5\%$

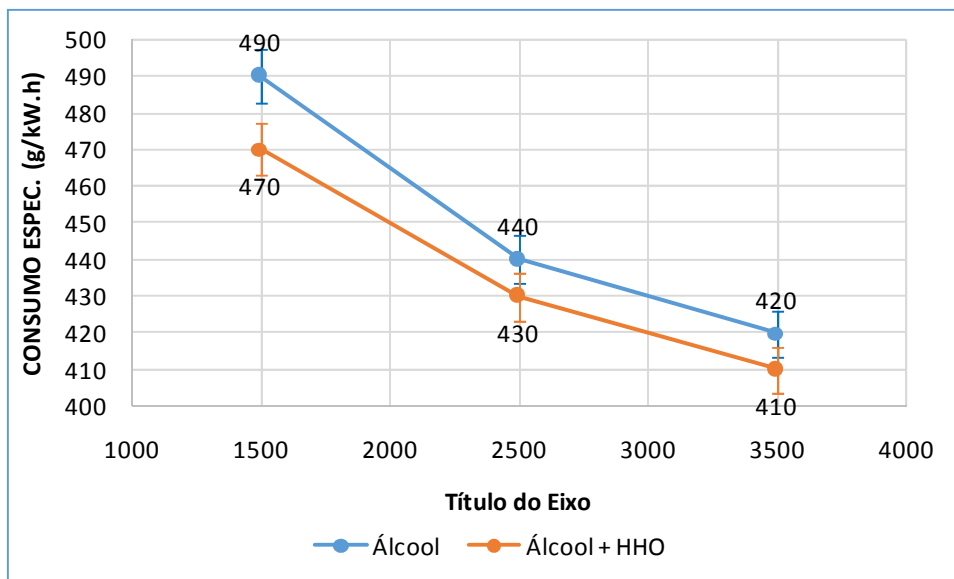


Figura 5.8 - Consumo específico de combustível abertura de borboleta 40%, incerteza $\pm 1,5\%$

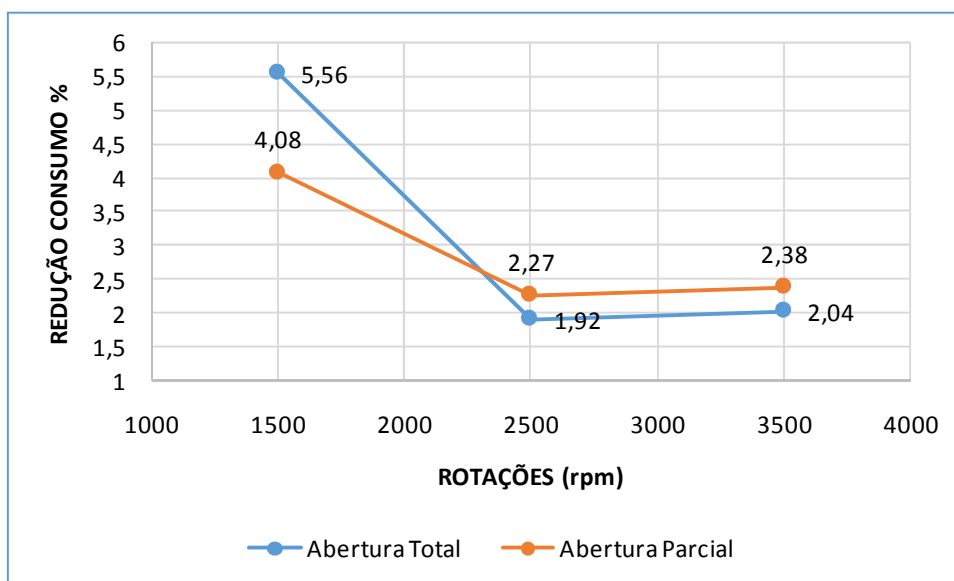


Figura 5.9 - Redução no consumo de combustível. Abertura total X Abertura parcial

5.2.4 Lambda

O fator lambda neste experimento serviu como um dos indicadores de que estava entrando uma maior quantidade de oxigênio na mistura ar/combustível, devido ao seu aumento ao longo das medições, demonstrado nas Figuras 5.10 e 5.11. Com a abertura

total da borboleta e 1500 rpm obtive-se um lambda de 0,8, ao adicionarmos o HHO o mesmo se apresentou como 0,81. Em 2500 rpm e abertura total os lambdas foram de 0,82 para álcool e 0,83 para álcool com HHO. Com 3500 rpm e abertura total os lambdas foram de 0,87 para ambos os combustíveis. A alteração do lambda devido à inserção do HHO se tornou mais evidente com abertura parcial da borboleta. Em 1500 rpm e abertura parcial da borboleta os lambdas foram de 0,97 para o álcool e 1,01 para álcool com HHO. Com 2500 rpm e abertura parcial da borboleta, os valores de lambda ficaram em 0,99 apenas álcool e 1,02 com a adição de HHO. Ainda com a abertura parcial, mas em 3500 rpm os lambdas foram de 1,01 no álcool e 1,03 com HHO.

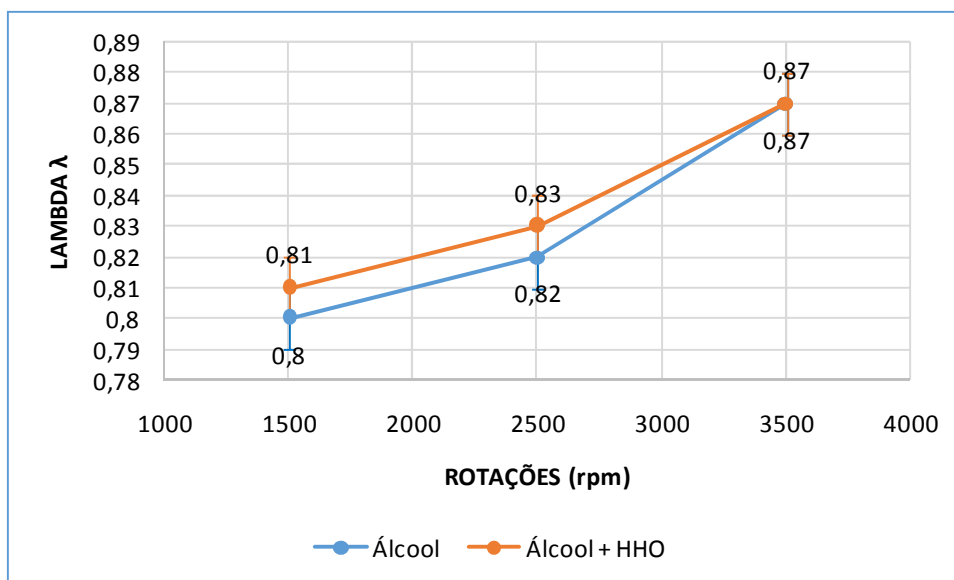


Figura 5.10 - Lambda abertura borboleta 100%, incerteza $\pm 0,01$

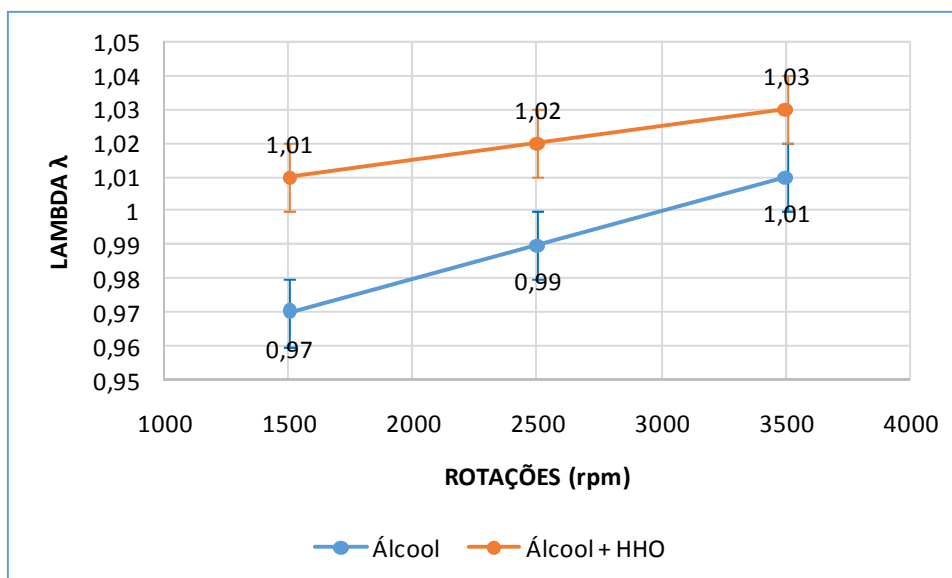


Figura 5.11 - Lambda abertura borboleta 40%, incerteza $\pm 0,01$

5.2.5 Emissão de Monóxido de Carbono (CO)

Durante os testes, ficou evidente a redução do CO emitido pelo motor após a combustão com a adição do HHO, conforme demonstrado nas Figuras 5.12, 5.13 e 5.14. No teste com abertura total da borboleta e a rotação de 1500 rpm encontrou-se 0,53% para álcool e 0,45% com a adição de HHO, gerando uma redução de 15,09% na emissão de CO. Em 2500 rpm e abertura total da borboleta o CO foi de 0,72% no álcool para 0,66% com HHO, propiciando uma redução de 8,33%. Com abertura total e 3500 rpm o CO foi de 0,93% para o álcool e 0,82% para álcool e HHO, gerando uma redução de 11,83% nas emissões de CO. A redução das emissões de CO torna-se mais acentuada durante os testes com a abertura parcial da borboleta de aceleração. Em 1500 rpm e abertura parcial o percentil de CO foi de 0,51% no álcool para 0,42% com a adição de HHO, permitindo uma redução de 17,65%. Com 2500 rpm o CO foi de 0,69% para álcool e 0,61% para álcool em HHO, gerando uma redução de 11,59%. Ainda com abertura parcial e 3500 rpm o CO encontrado foi de 0,88% para 0,74% utilizando álcool e álcool com HHO respectivamente, originando uma redução de 15,91% nas emissões de CO.

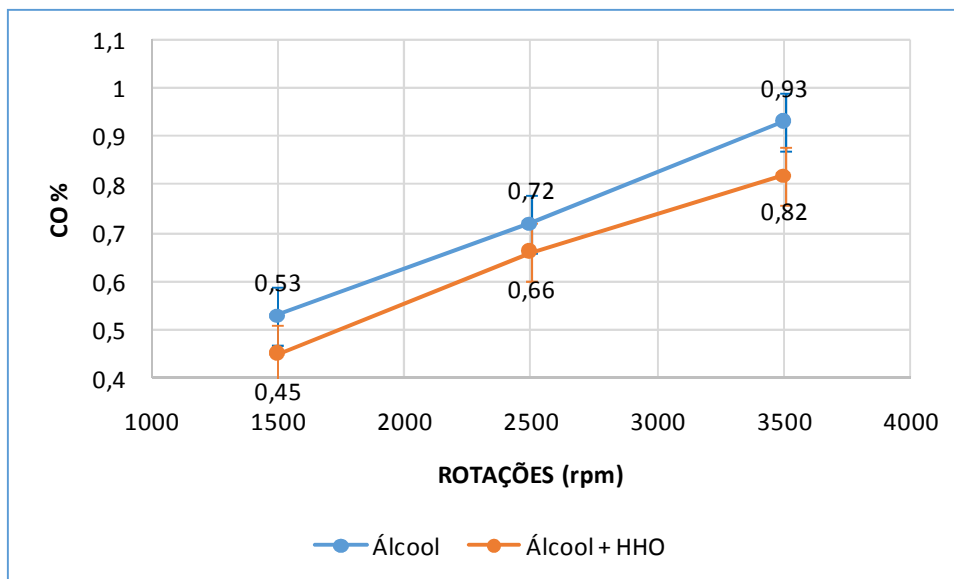


Figura 5.12 - Emissões de Monóxido de Carbono para borboleta aberta 100%, incerteza $\pm 0,06$

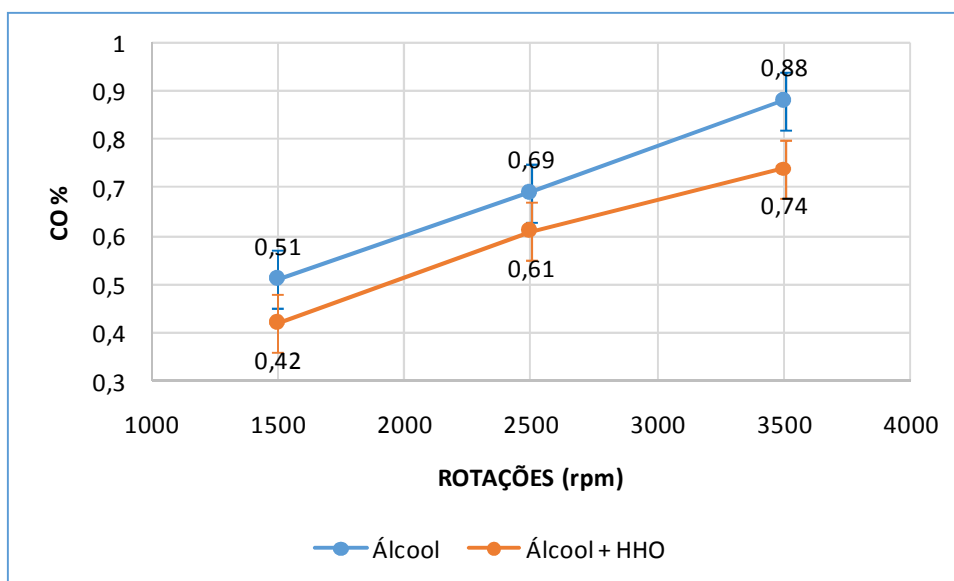


Figura 5.13 - Emissões de Monóxido de Carbono para borboleta aberta 40%, incerteza $\pm 0,06$

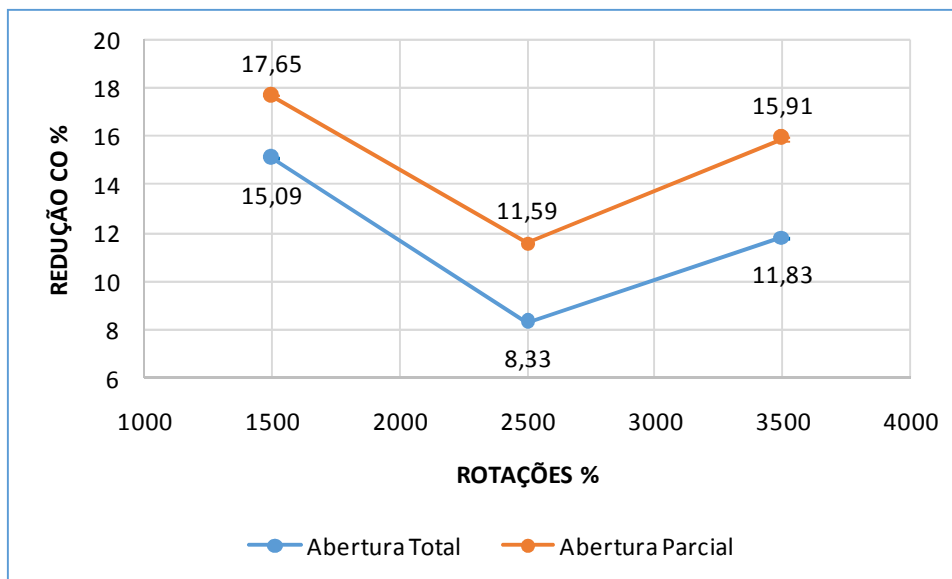


Figura 5.14 - Redução de CO : Abertura Total X Abertura Parcial

5.2.6 Emissão de Dióxido de Carbono (CO_2)

O dióxido de carbono apresentou uma elevação durante os testes, servindo também como indicativo da presença de oxigênio extra na câmara de combustão, conforme demonstrado nas Figuras 5.15, 5.16 e 5.17. Em 1500 rpm e abertura total o CO_2 foi de 13,47% no álcool para 13,66% adicionando-se o HHO, gerando um aumento de 1,41%. Com 2500 rpm e abertura total o CO_2 foi de 13,13% no álcool para 13,51% com a adição de HHO, permitindo um aumento de 2,89%. Ainda com abertura total da borboleta e 3500rpm, obteve-se um aumento de 0,31% de CO_2 , pois foi de 13,01% com álcool para 13,05% com a adição de HHO. Com abertura parcial e 1500 rpm o CO_2 foi de 14,01% no álcool para 14,07% com a adição de HHO, aumentando em 0,43% o índice. Em 2500 rpm e abertura parcial o CO_2 foi de 13,89% no álcool para 13,97% com adição de HHO, promovendo um aumento de 0,58%. Ainda com abertura parcial, mas rotação de 3500 rpm o aumento foi de 0,66% pois o índice de CO_2 foi de 13,67% no álcool para 13,76% com adição de HHO.

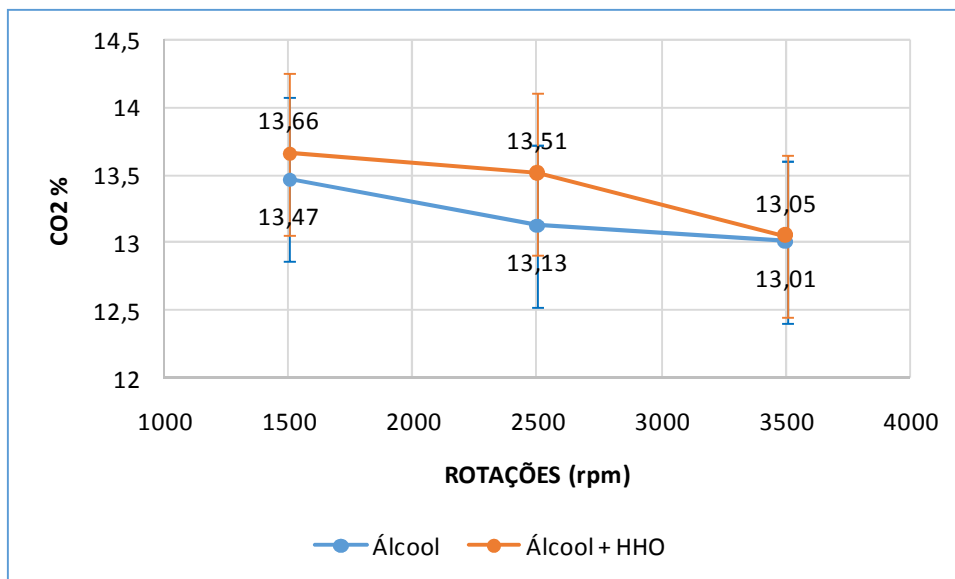


Figura 5.15 - Emissões de Dióxido de Carbono para borboleta aberta 100%, incerteza $\pm 0,6$

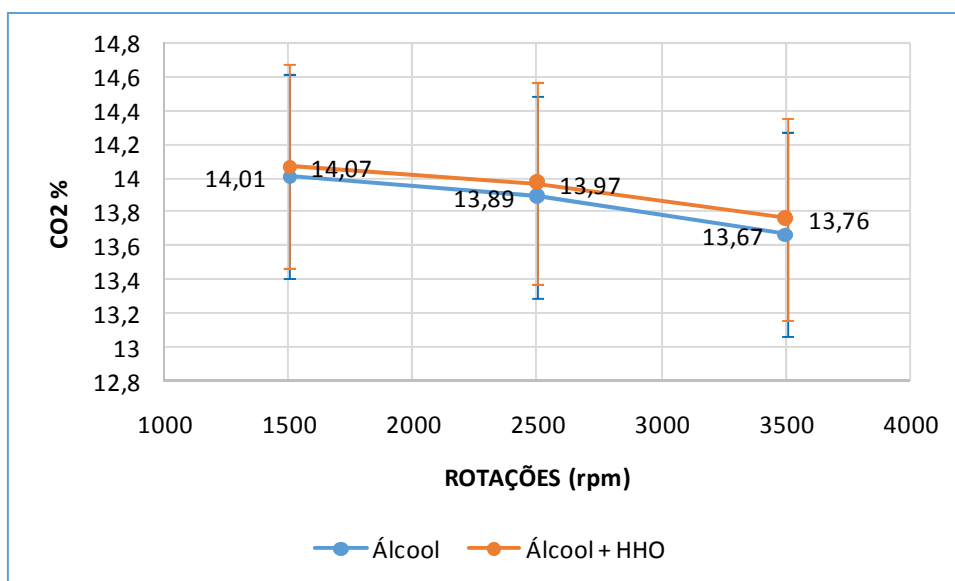


Figura 5.16 - Emissões de Dióxido de Carbono para borboleta aberta 40%, incerteza $\pm 0,6$

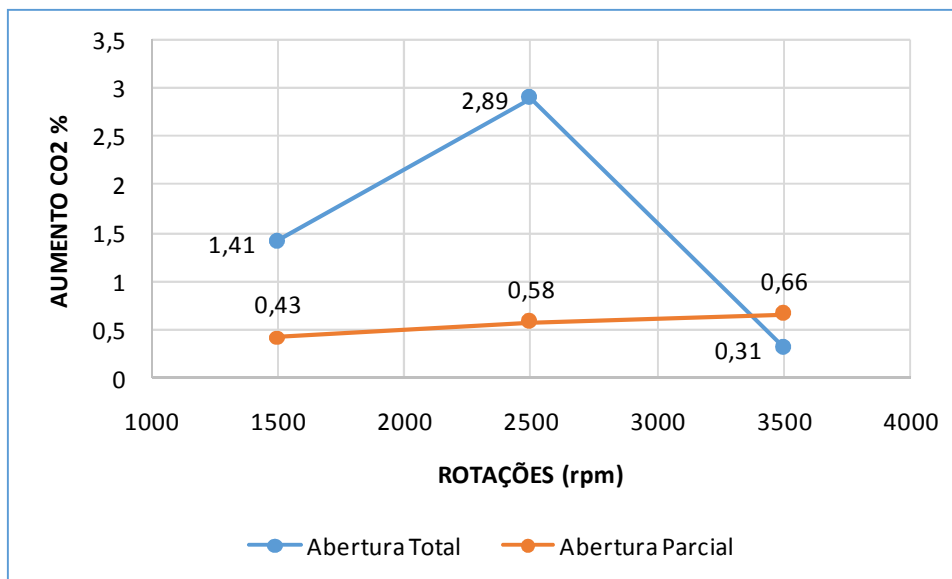


Figura 5.17 - Aumento de CO_2 : Abertura Total X Abertura Parcial

5.2.7 Emissão de Hidrocarbonetos (HC)

Os Hidrocarbonetos (HC) apresentaram uma redução após a adição do HHO, conforme demonstrado nas Figuras 5.18, 5.19 e 5.20. Com 1500 rpm e abertura total obteve-se 241 PPM utilizando apenas álcool e 189 PPM com a adição de HHO, gerando uma redução 21,58% em PPM de HC. Em 2500 rpm e abertura total encontrou-se 228 PPM com álcool e 201 PPM com a adição de HHO, proporcionando uma redução de 11,84%. Com 3500 rpm e abertura total, foi encontrada uma redução de 2,69% pois foi de 223 PPM com álcool para 217 PPM com adição de HHO. Nos testes com abertura parcial de 40% da borboleta de aceleração obteve-se uma redução contínua na faixa examinada, sendo que em 1500 rpm foi de 110 PPM para 105 PPM, em 2500 de 102 PPM para 91 PPM e em 3500 rpm de 91 PPM para 82 PPM, utilizando apenas álcool e álcool com a adição de HHO respectivamente, obtendo reduções de 4,55% (1500 rpm), 10,78% (2500 rpm) e 9,89% (3500 rpm).

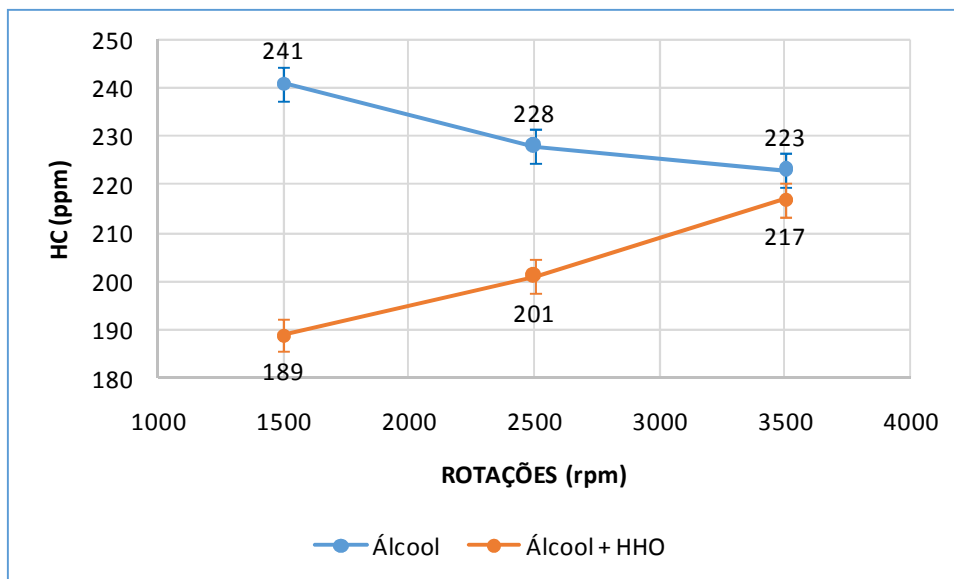


Figura 5.18 - Emissões de Hidrocarbonetos para borboleta aberta 100%, incerteza $\pm 3,5$ PPM

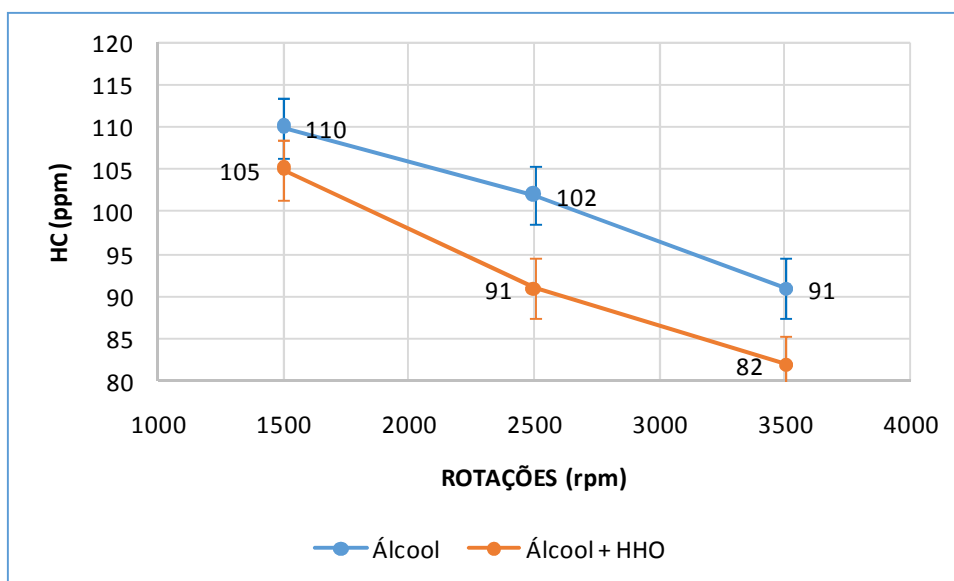


Figura 5.19 - Emissões de Hidrocarbonetos para borboleta aberta 40%, incerteza $\pm 3,5$ PPM

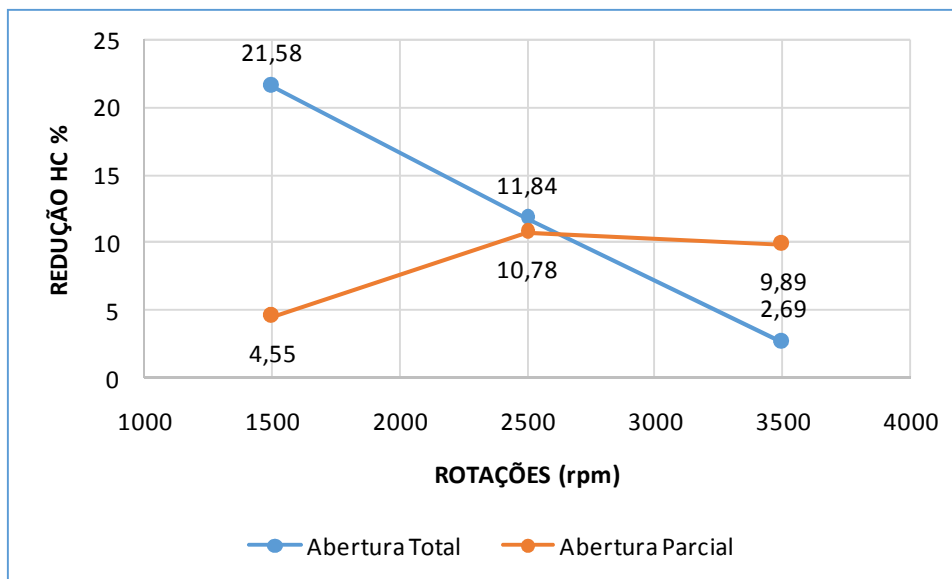


Figura 5.20 - Redução de HC: Abertura Total X Abertura Parcial

5.3 Resultados do Experimento 2 (Gasolina + HHO)

Os resultados deste experimento estão aqui representados em gráficos para sua melhor visualização, representando a abertura total da borboleta (100%) “Wide Open Throttle -WOT”, e a abertura parcial da borboleta (40%), respectivamente para cada item avaliado. Conforme descrito anteriormente foram utilizadas rotações intermediárias pois estão diretamente ligadas ao regime de utilização dos motores de combustão interna no trânsito urbano diário.

5.3.1 Potência Efetiva

A potência efetiva calculada a partir da Equação 3.25, para uma aceleração total e 1500rpm, foi de 18,41 kW apenas utilizando gasolina e de 19,59kW adicionando HHO ao combustível líquido, o que gerou um aumento efetivo de 6,41% na potência. Na rotação de 2500 rpm e abertura total da borboleta de aceleração foram encontrados 35,47 kW para gasolina e 35,65 kW para gasolina e HHO, gerando um ganho de 3,33% de potência. Em 3500 rpm e 100% de abertura da borboleta foram encontrados 49,26 kW e 50,41 kW utilizando apenas gasolina e com a adição de HHO respectivamente, obtendo um aumento de 2,33% de potência. Durante o teste com a abertura parcial da borboleta em 40%, em 1500 rpm encontrou-se 18,07 kW de potência utilizando gasolina e 19,25 kW com a adição

de HHO ao sistema, proporcionando um ganho de 6,53% em potência efetiva. Com 2500 rpm e abertura de 40% e utilizando gasolina, o sistema alcançou uma potência de 32,3 kW, com a adição de HHO obteve-se 33,67 kW, o que proporcionou um ganho efetivo de 4,24% de potência. Em 3500 rpm e abertura de 40%, foram obtidos 44,83 kW e 45,95 kW para gasolina e gasolina com HHO, gerando um aumento de 2,5% de potência efetiva, conforme demonstrados nas Figuras 5.21, 5.22 e 5.23.

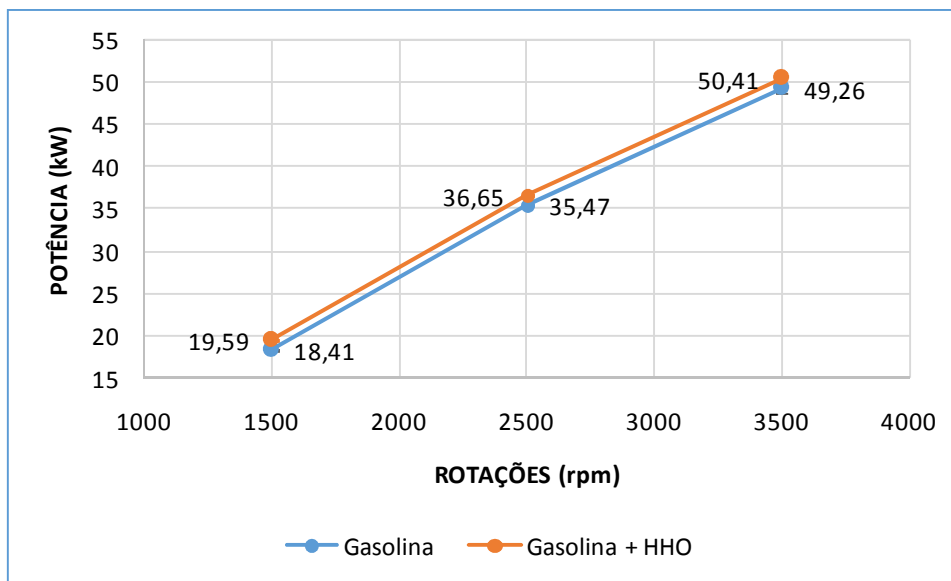


Figura 5.21 - Potência efetiva calculada com borboleta aberta 100%, incerteza $\pm 0,9\%$

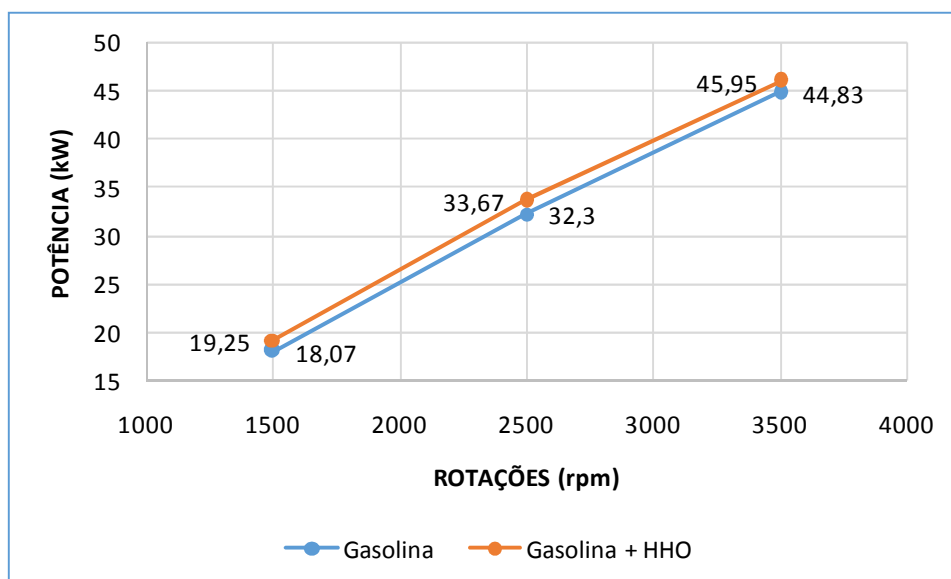


Figura 5.22 - Potência efetiva calculada com borboleta aberta 40%, incerteza $\pm 0,9\%$

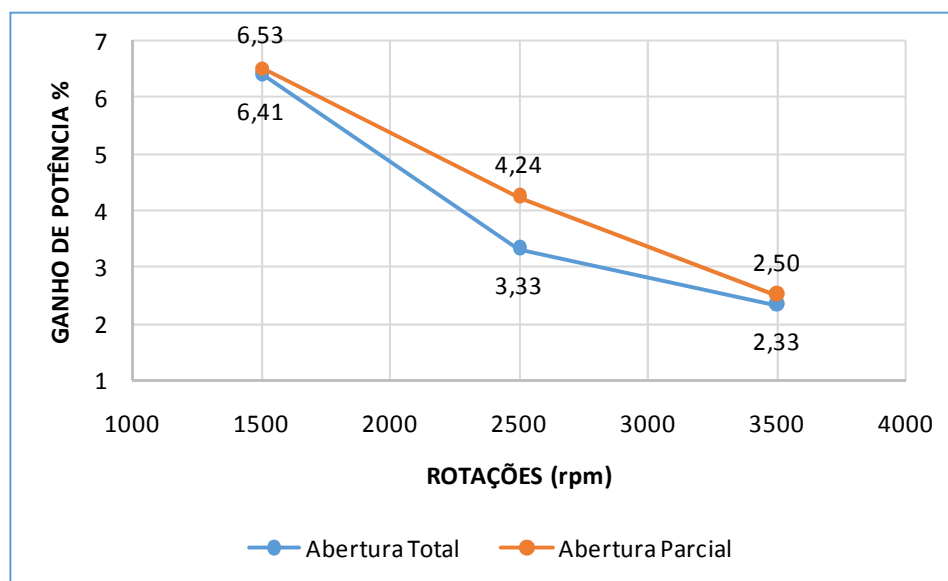


Figura 5.23 - Ganho de potência: Abertura Total X Abertura Parcial

5.3.2 Torque

Responsável por colocar o veículo em marcha, retirando-o da inércia, o torque foi lido diretamente no dial do dinamômetro hidráulico, apresentando, a 1500 rpm e abertura total da borboleta, valores na magnitude de 125,07 N.m utilizando gasolina e 130,41 N.m com a adição de HHO, gerando assim um ganho de 4,27% de torque. Em 2500 rpm e abertura total, obtiveram-se 144,85 N.m e 148,06 N.m para gasolina e gasolina com HHO respectivamente, produzindo um ganho de 2,22% no torque. Com 3500 rpm e abertura total, foram encontrados 142,90 N.m para gasolina e 145,12 N.m com a adição de HHO, proporcionando um aumento de 1,49% em torque. Nos testes com abertura parcial da borboleta e a rotação de 1500 rpm, foram encontrados 122,94 N.m para gasolina e 128,28 N.m com a adição de HHO, gerando um aumento de 4,34% no torque. Com 2500 rpm e abertura parcial da borboleta, 132,75 N.m e 136,67 N.m foram encontrados para a utilização de gasolina e gasolina com a adição de HHO, apresentando um aumento de 2,95% no torque. Em 3500 rpm e abertura parcial da borboleta, o sistema apresentou 130,88 N.m na gasolina e 133,02 N.m, propiciando um ganho de 1,64% em torque, conforme demonstrado nas Figuras 5.24, 5.25 e 5.26.

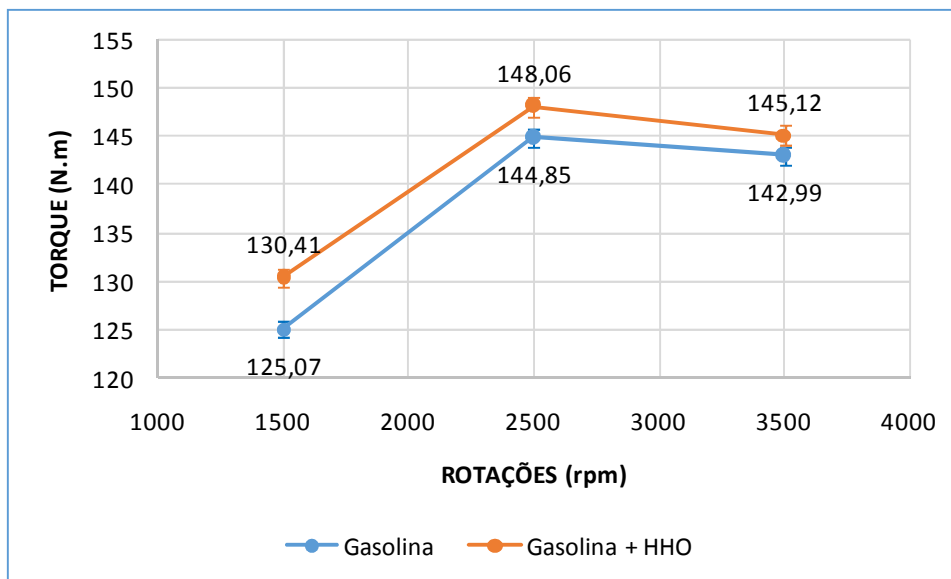


Figura 5.24 - Torque calculado com borboleta aberta 100%, incerteza $\pm 0,7\%$

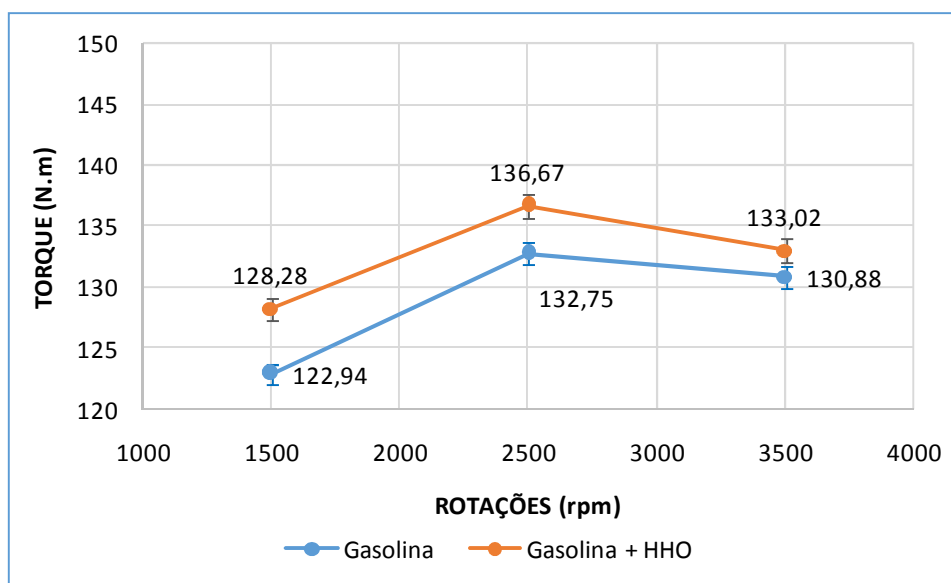


Figura 5.25 - Torque calculado com borboleta aberta 40%, incerteza $\pm 0,7\%$

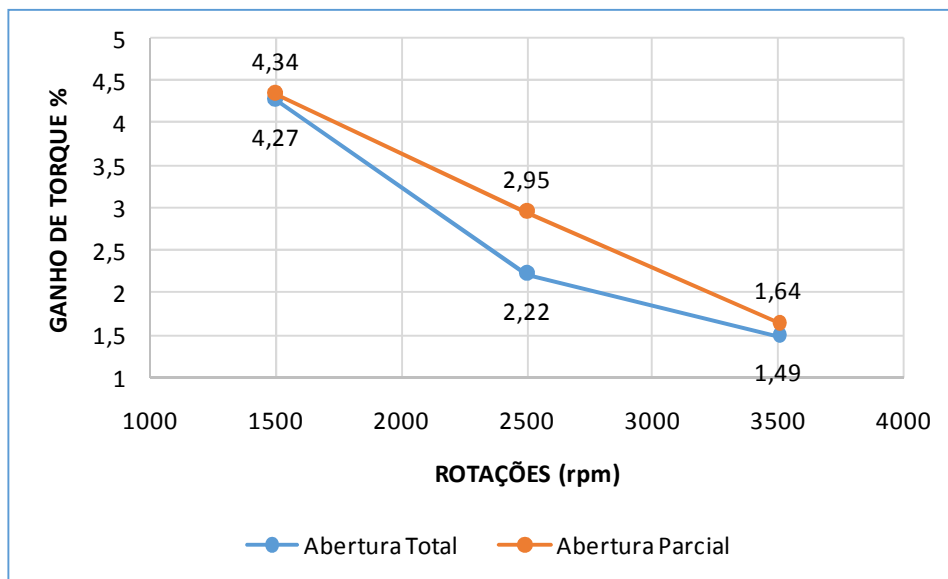


Figura 5.26 - Ganho de torque: Abertura Total X Abertura Parcial

5.3.3 Consumo Específico

Relacionado diretamente à viabilidade econômica da utilização comercial deste sistema, com abertura total e rotação de 1500 rpm apresenta um consumo específico de 320 g/kW.h com gasolina e 296 g/kW.h com HHO, propiciando uma redução de 29,5 % no consumo. Na rotação de 2500 rpm e abertura total, utilizando gasolina foi encontrado 288 g/kW.h e 275 g/kW.h com a adição de HHO, o que resultou em 27,39 % de economia. Ainda com a abertura total, mas na rotação de 3500 rpm, o sistema apresentou um consumo específico de 244 g/kW.h e 237 g/kW.h, originando 26,69 % de redução no consumo, utilizando gasolina e com a adição de HHO respectivamente. Para a abertura parcial da borboleta em 40 %, na rotação de 1500 rpm e utilizando gasolina foi encontrado 407 g/kW.h e 381 g/kW.h utilizando gasolina com a adição de HHO, acarretando em 29,58 % de redução no consumo. Em 2500 rpm e abertura parcial da borboleta, foram encontrados consumos específicos de 362 g/kW.h para gasolina e 346 g/kW.h com a adição de HHO na gasolina, produzindo uma redução de 28,03 %. Com 3500 rpm e abertura parcial os consumos apresentados foram de 316 g/kW.h com gasolina e 305 g/kW.h adicionando-se o HHO, o que representa uma redução no consumo de 26,81 %. Demonstrado nas Figuras 5.17, 5.28 e 5.29.

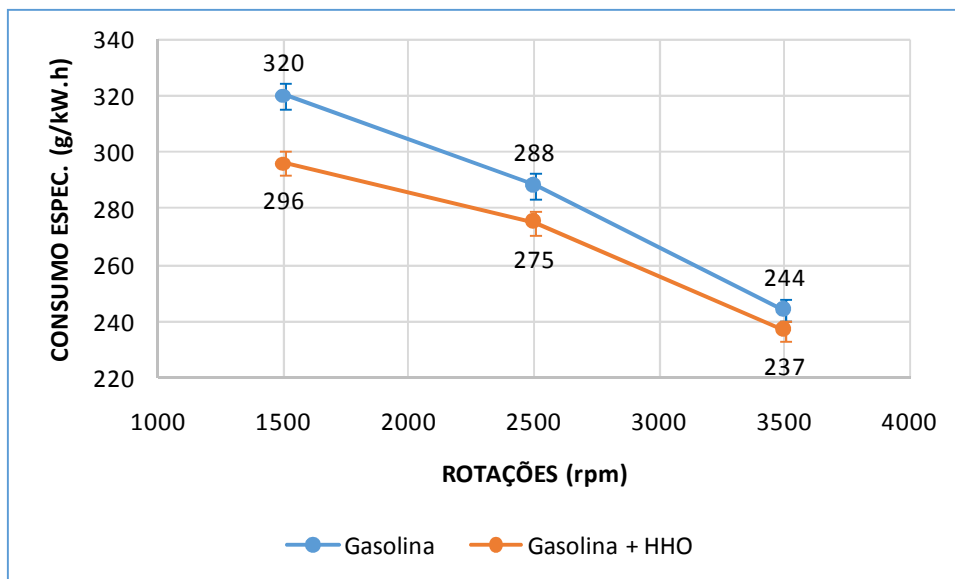


Figura 5.27 - Consumo Específico de combustível abertura borboleta 100%, incerteza $\pm 1,5\%$

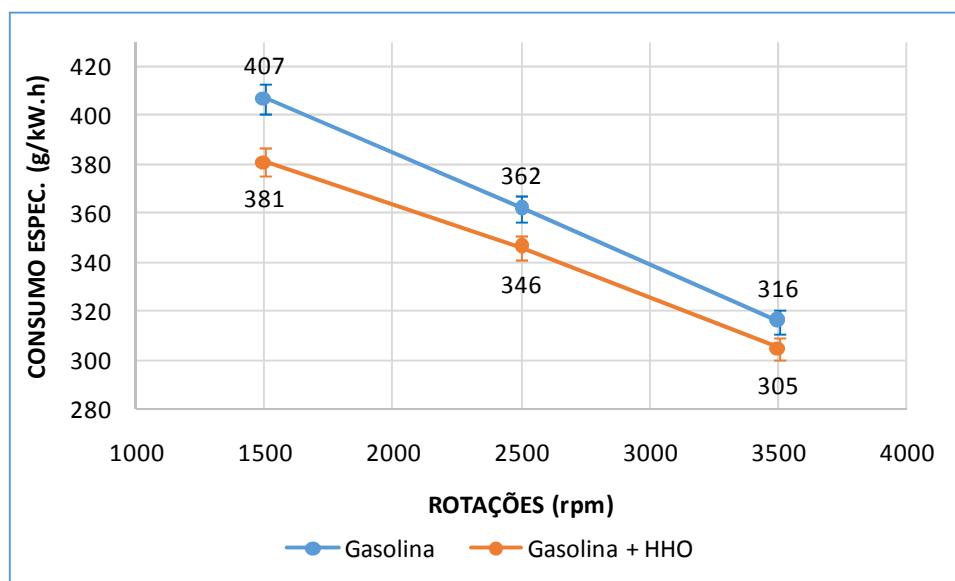


Figura 5.28 - Consumo específico de combustível abertura borboleta 40%, incerteza $\pm 1,5\%$

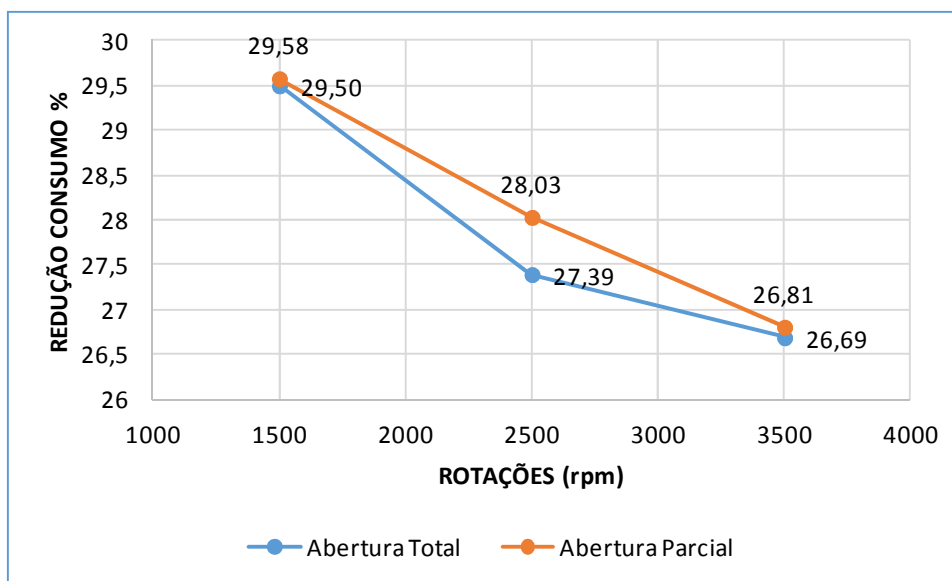


Figura 5.29 - Redução no consumo de combustível: Abertura total X Abertura parcial

5.3.4 Lambda

O fator lambda neste experimento serviu como um dos indicadores de que estava entrando uma maior quantidade de oxigênio na mistura ar/combustível, devido ao seu aumento ao longo das medições, conforme Figuras 5.30 e 5.31. Com a abertura total da borboleta e 1500 rpm obteve-se um lambda de 0,95, ao ser adicionado o *HHO* o mesmo se apresentou como 0,97. Em 2500 rpm e abertura total os lambdas foram de 0,95 para gasolina e 0,97 para gasolina com *HHO*. Com 3500 rpm e abertura total os lambdas foram de 0,94 para gasolina e 0,95 para gasolina com *HHO*. A alteração do lambda devido à inserção do *HHO* se tornou mais evidente com abertura parcial da borboleta. Em 1500 rpm e abertura parcial da borboleta os lambdas foram de 0,95 para gasolina e 0,98 com a adição de *HHO*. Com 2500 rpm e abertura parcial da borboleta, os valores de lambda ficaram em 0,95 apenas gasolina e 0,97 com a adição de *HHO*. Ainda com a abertura parcial, mas em 3500 rpm os lambdas foram de 0,96 na gasolina e 0,97 com *HHO*.

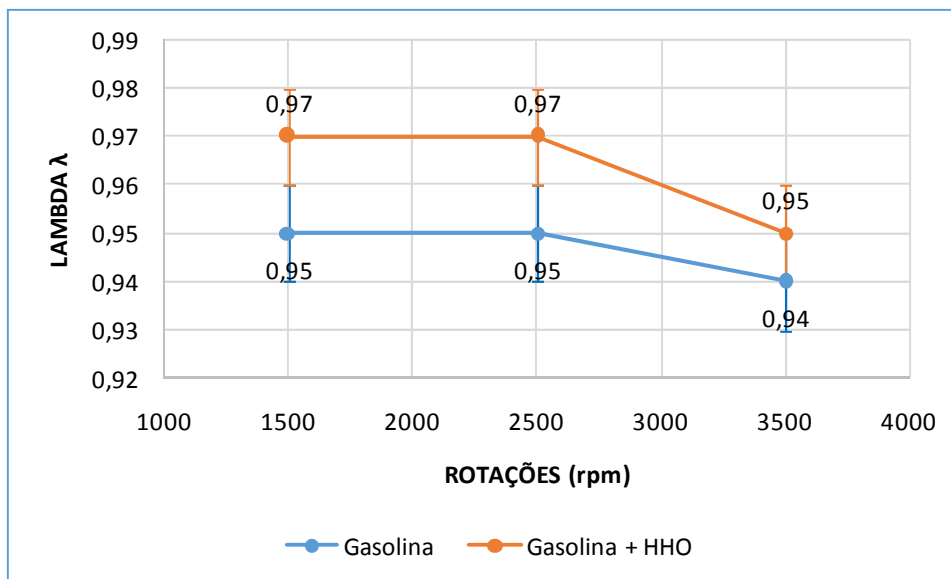


Figura 5.30 - Lambda abertura borboleta 100%, incerteza $\pm 0,01$

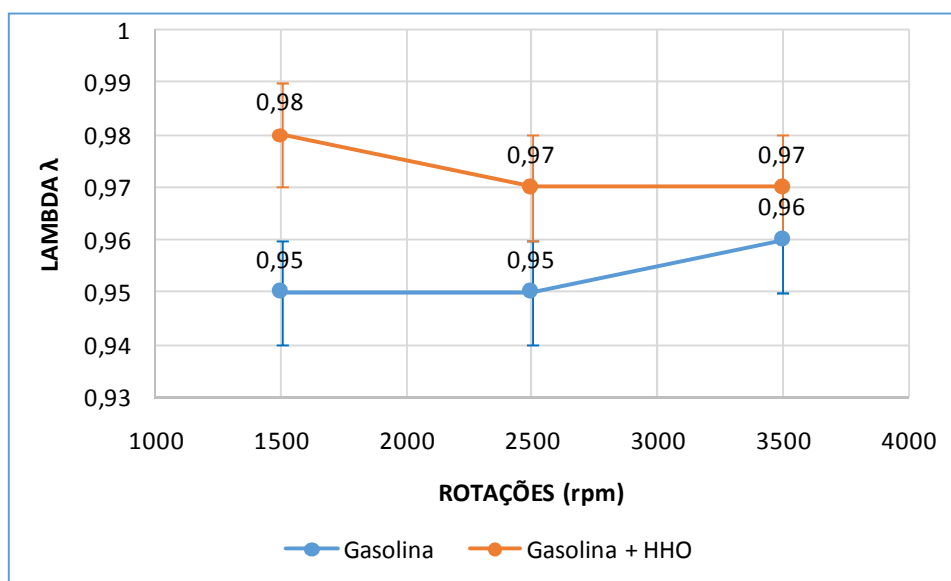


Figura 5.31 - Lambda abertura borboleta 40%, incerteza $\pm 0,01$

5.3.5 Emissão de Monóxido de Carbono (CO)

Durante os testes, ficou evidente a redução do CO emitido pelo motor após a combustão com a adição do HHO, Figuras 5.32, 5.33 e 5.34. No teste com abertura total da borboleta e a rotação de 1500 rpm encontrou-se 0,98% para gasolina e 0,82% com a adição

de HHO, gerando uma redução de 16,33% na emissão de CO. Em 2500 rpm e abertura total da borboleta o CO foi de 0,79% na gasolina para 0,66% com HHO, propiciando uma redução de 16,46%. Com abertura total e 3500 rpm o CO foi de 0,59% para a gasolina e 0,48% para gasolina e HHO, gerando uma redução de 18,64% nas emissões de CO. A redução das emissões de CO torna-se mais acentuada durante os testes com a abertura parcial da borboleta de aceleração. Em 1500 rpm e abertura parcial o percentil de CO foi de 0,88% na gasolina para 0,71% com a adição de HHO, permitindo uma redução de 19,32%. Com 2500 rpm o CO foi de 0,72% para gasolina e 0,55% para gasolina com HHO, gerando uma redução de 23,61%. Ainda com abertura parcial e 3500 rpm o CO encontrado foi de 0,53% para 0,39% utilizando gasolina e gasolina com HHO respectivamente, originando uma redução de 26,42% nas emissões de CO.

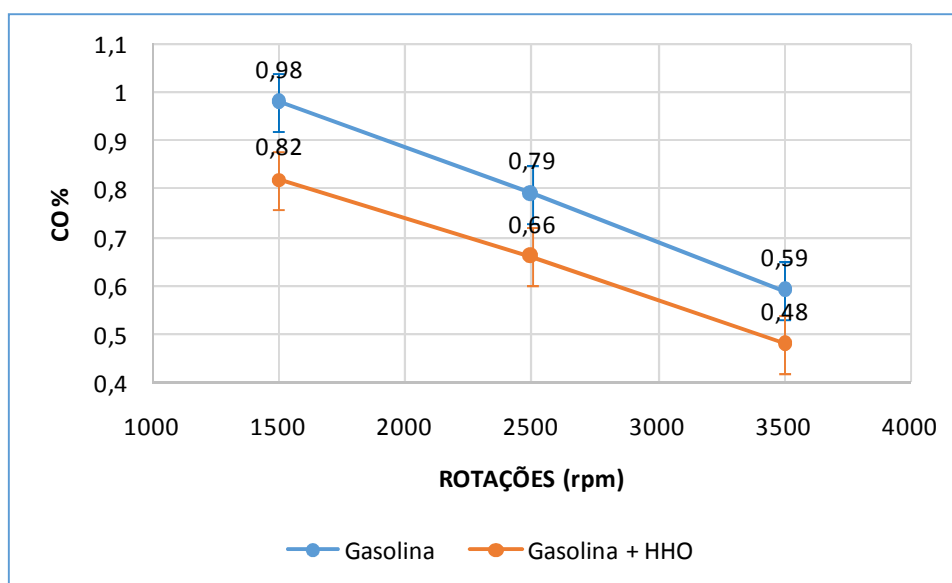


Figura 5.32 - Emissões de Monóxido de Carbono para borboleta aberta 100%, incerteza $\pm 0,06$

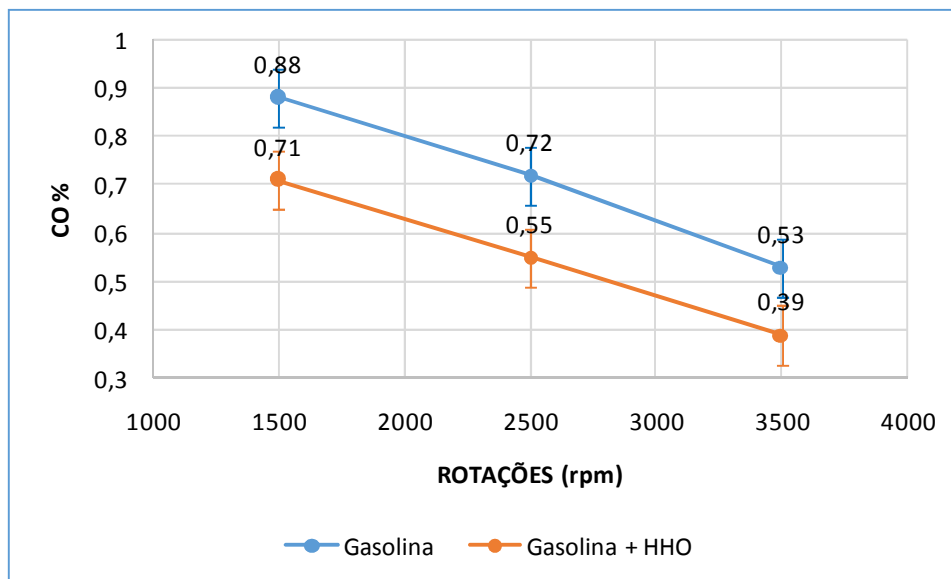


Figura 5.33 - Emissões de Monóxido de Carbono para borboleta aberta 40%, incerteza $\pm 0,06$

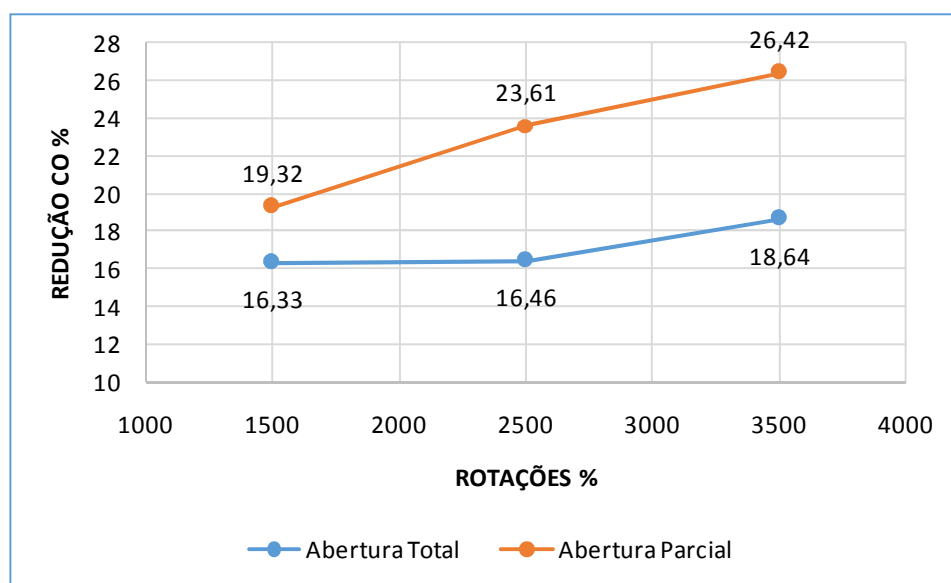


Figura 5.34 - Redução de CO: Abertura Total X Abertura Parcial

5.3.6 Emissão de Dióxido de Carbono (CO_2)

O dióxido de carbono apresentou uma elevação durante os testes, servindo também como indicativo da presença de oxigênio extra na câmara de combustão, conforme demonstrado nas Figuras 5.35, 5.36 e 5.37. Em 1500 rpm e abertura total o CO_2 foi de

17,09% na gasolina para 17,40% adicionando-se o *HHO*, gerando um aumento de 1,81%. Com 2500 rpm e abertura total o CO_2 foi de 17,28% na gasolina para 18,01% com a adição de *HHO*, tendenciando um aumento de 4,24%. Ainda com abertura total da borboleta e 3500rpm, obteve-se uma tendência no aumento de 4,12% de CO_2 , pois foi de 17,49% com gasolina para 18,21% com a adição de *HHO*. Com abertura parcial e 1500 rpm o CO_2 foi de 18,22% na gasolina para 18,65% com a adição de *HHO*, aumentando em 2,36% o índice. Em 2500 rpm e abertura parcial o CO_2 foi de 18,52% na gasolina para 18,78% com adição de *HHO*, promovendo um aumento de 1,40%. Ainda com abertura parcial, mas rotação de 3500 rpm o aumento foi de 1,77% pois o índice de CO_2 foi de 18,68% na gasolina para 19,01% com adição de *HHO*.

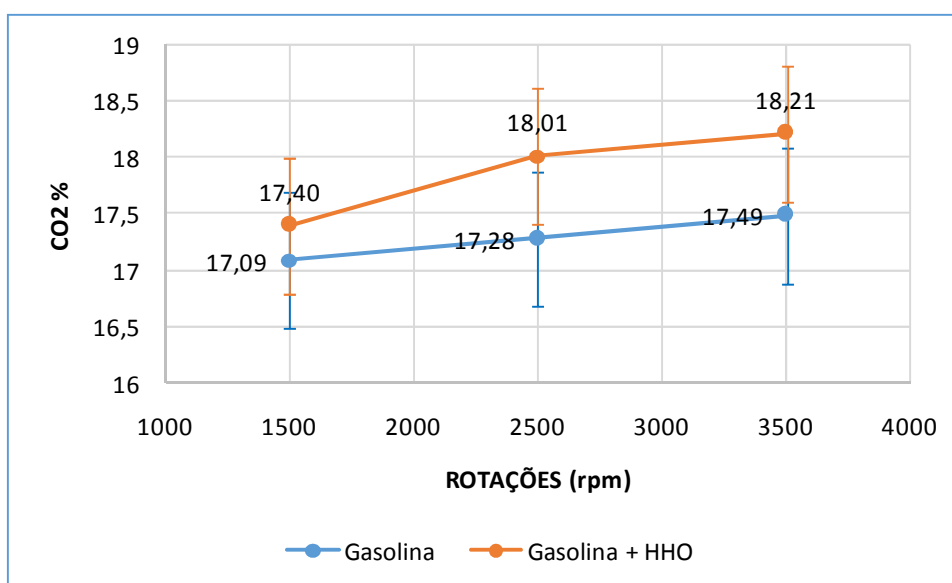


Figura 5.35 - Emissões de Dióxido de Carbono para borboleta aberta 100%, incerteza $\pm 0,6$

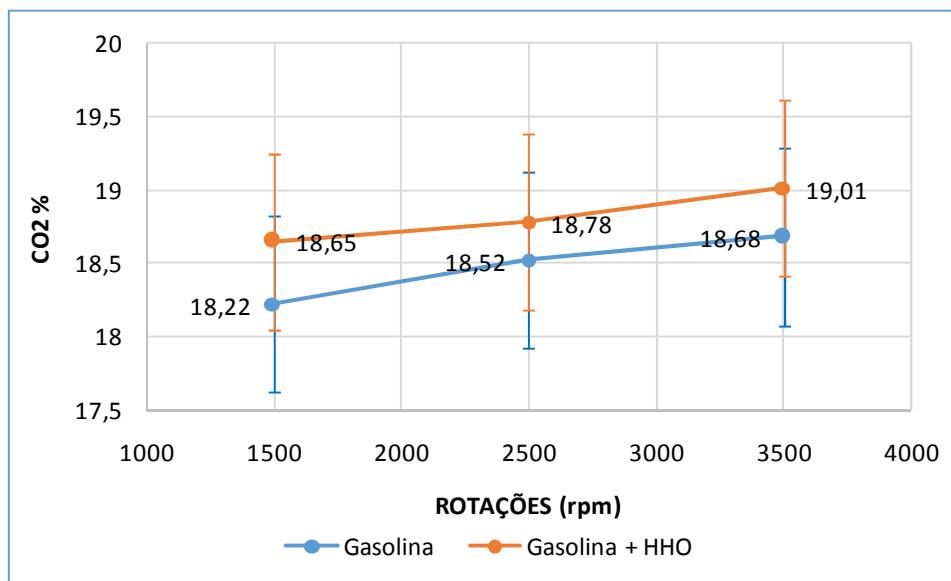


Figura 5.36 - Emissões de Dióxido de Carbono para borboleta aberta 40%, incerteza $\pm 0,6$

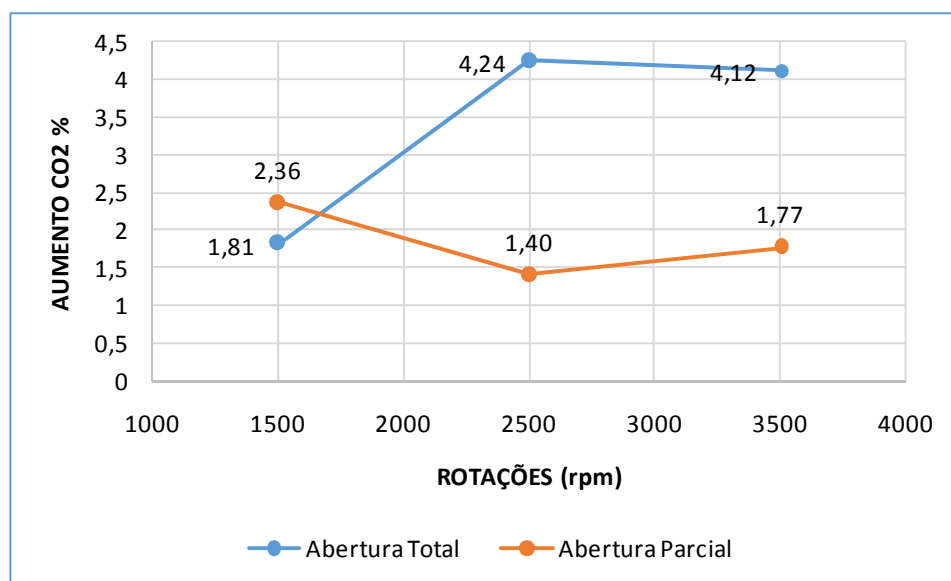


Figura 5.37 - Aumento de CO_2 : Abertura Total X Abertura Parcial

5.3.7 Emissão de Hidrocarbonetos (HC)

Os Hidrocarbonetos (HC) apresentaram uma redução após a adição do HHO, conforme demonstrado nas Figuras 5.38, 5.39 e 5.40. Com 1500 rpm e abertura total obteve-se 235 PPM utilizando apenas gasolina e 201ppm com a adição de HHO, gerando

uma redução 14,47% em PPM de *HC*. Em 2500 rpm e abertura total encontrou-se 232 PPM com gasolina e 199ppm com a adição de *HHO*, proporcionando uma redução de 14,22%. Com 3500 rpm e abertura total, foi encontrada uma redução de 13,72% pois foi de 226 PPM com gasolina para 195ppm com adição de *HHO*. Nos testes com abertura parcial de 40% da borboleta de aceleração obteve-se uma redução continua na faixa examinada, sendo que em 1500 rpm foi de 106ppm para 89 PPM, em 2500 de 101 PPM para 86ppm e em 3500 rpm de 92 PPM para 79 PPM, utilizando apenas gasolina e gasolina com a adição de *HHO* respectivamente, obtendo reduções de 16,04% (1500 rpm), 14,85% (2500 rpm) e 14,13% (3500 rpm).

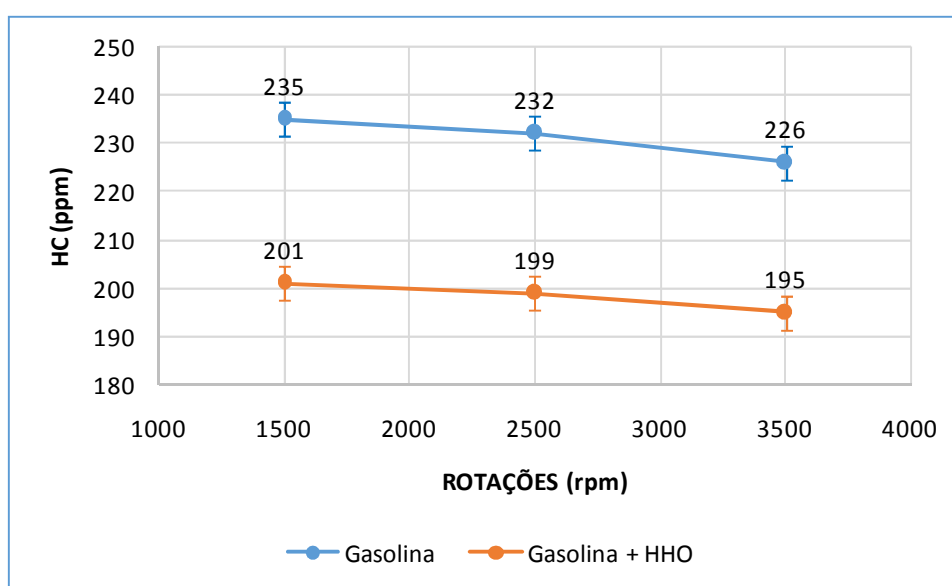


Figura 5.38 - Emissões de Hidrocarbonetos para borboleta aberta 100%, incerteza $\pm 3,5$ PPM

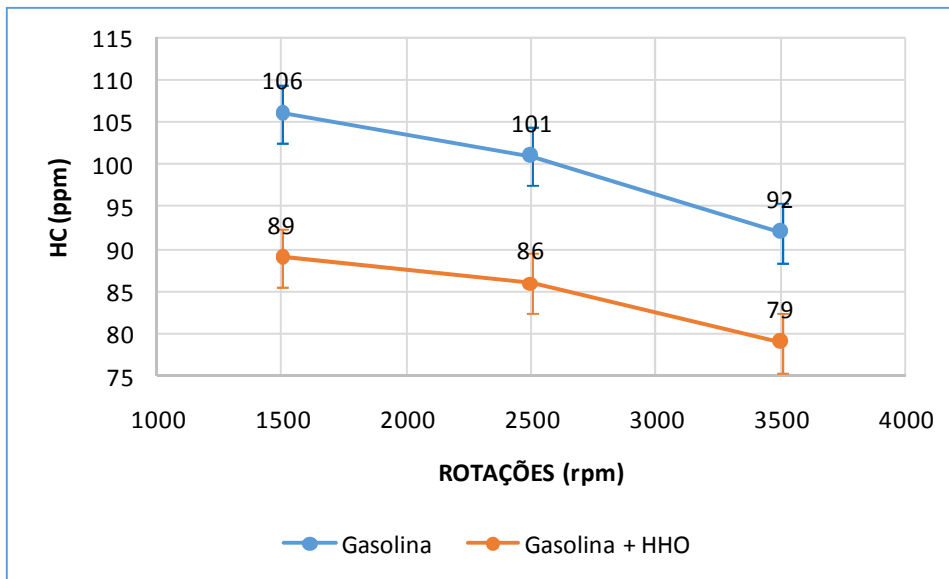


Figura 5.39 - Emissões de Hidrocarbonetos para borboleta aberta 40%, incerteza $\pm 3,5$ PPM

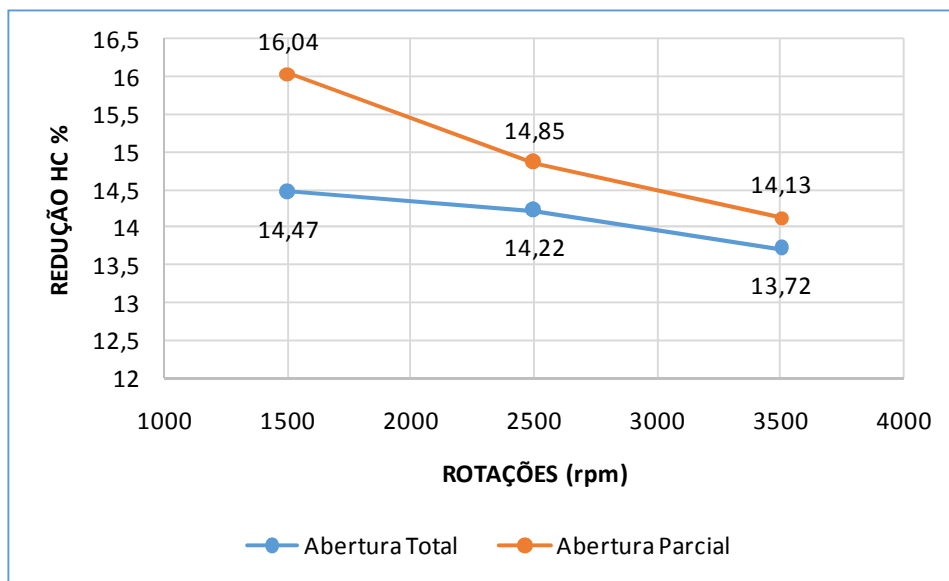


Figura 5.40 - Redução de HC: Abertura Total X Abertura Parcial

6 CONCLUSÕES

O presente trabalho propôs o estudo e validação de um combustível complementar, através da análise exergética do processo de obtenção desse e sua posterior utilização em motores de combustão interna, através de dois experimentos. O combustível complementar escolhido foi o gás HHO (gás de Brown), originário da quebra da molécula da água (H_2O) obtido no processo de eletrólise.

A partir da análise dos cálculos exergéticos da produção do Gás HHO (Gás de Brown) permitiu-se evidenciar que este gás contém um nível considerável de trabalho útil a ser entregue ao sistema que o utilizar. Visto que, o balanço exergético apresenta um excedente energético que melhora o rendimento de máquinas térmicas, tais como o motor de combustão interna. Desta forma, pode ser utilizado como um combustível auxiliar na queima de combustíveis fósseis e oriundos de fontes renováveis (Etanol). Essa nova mistura (ar, gasolina e gás HHO) proporciona maior torque mecânico, sem que ocorra a detonação. Cada êmbolo transfere mais energia durante seu ciclo de combustão, de modo que a queima se torna mais eficiente. Por consequência, uma combustão mais eficiente significa menos consumo de combustível, bem como a redução das emissões de poluentes.

Com relação ao primeiro experimento, onde se realizou o teste do gás HHO em um motor de combustão interna alimentado por carburador, sabe-se que, os veículos equipados com esta tecnologia apresentam dificuldades de atingir padrões de emissões (definidos por legislação), seja ocasionado por desgaste natural de utilização, pela mudança na composição do combustível ao longo dos anos, ou em sua grande maioria por desleixo dos proprietários ao abandonar de vez o plano de manutenções estipulado pelo fabricante. Um dos objetivos do presente estudo era a validação do gás HHO, como combustível complementar, para a redução das emissões dos gases nocivos ao ambiente, o qual foi comprovado, nesse experimento, através da redução da emissão de CO em 15% e de HC em 12%. Desta forma, possibilitará o enquadramento desses veículos em padrões de emissões, para aprovação dessa configuração de injeção e motor em uma futura inspeção técnica, sem grandes investimentos.

Contudo, o aumento na potência e a redução no consumo específico, para o experimento 1, foram pouco expressivos, sendo de 2% e 2,5% respectivamente. Outro fator

que favoreceu na redução da emissão dos gases nocivos foi o aumento do torque em 3,5N.m já em 3500 rpm, equivalente a 3,7%, pois o surgimento de torque em baixas rotações favorece a retirada do veículo da inércia quando em velocidade zero. Apesar dos resultados serem pouco expressivos, fica evidente a interação do gás HHO durante a queima do mesmo gerando valores diferentes do sistema montado em sua configuração original, revelando uma tendência no aumento do desempenho e na redução das emissões. Esta magnitude nos resultados se deve em grande parte ao sistema de injeção, que por sua natureza de construção apresenta regulagens de distribuição de combustível estática, não levando em conta condições ambientais, ou sendo retroalimentada por informações oriundas do pós queima. Resultados mais expressivos podem ser obtidos com sistemas mais aprimorados de injeção de combustível. Apesar disto, com a aplicação do gás HHO obteve-se um acréscimo de 400w em potência, descontadas as incertezas de medição, o que leva a crer em outros fatores de melhora com esta adição, pois como relatado anteriormente o hidrogênio contido neste gás origina apenas 116W, os demais 284W estão, provavelmente, por conta da velocidade da queima ser maior, o formato da curva de pressão e o melhor enchimento do cilindro.

Por sua vez, o segundo experimento foi idealizado com o intuito de otimizar o sistema de injeção e a modernização do motor para potencializar a utilização do gás HHO, como combustível, já validado em sua análise exérgica e tendência de melhora comprovada através do experimento 1, apesar de apresentar níveis muito baixos. O sistema de injeção de combustível programável permitiu um ajuste mais fino e o sistema de injeção de gás individualizado possibilitou o melhor direcionamento do volume adequado de gás a cada cilindro. Logo, a otimização planejada e executada apresentou uma sensível melhora nos índices apresentados com relação ao experimento anterior, as emissões de CO reduziram em 26,4% (abertura parcial) e 18,6% (abertura total) e as emissões de HC em 16% (abertura parcial) e 14,5% (abertura total). Por sua vez, o consumo de combustível reduziu em 29,6%. Esses resultados estão de acordo com a literatura, visto que experimento realizado, por Mohamed (2016), com um motor à gasolina de 1289 cm³ de cilindrada e injeção multiponto sequencial “OEM” (Original Equipment Manufacturer) alcançou uma redução de 34% no consumo de combustível, redução de 18% em CO e redução de 14% na emissão de HC, com seu gerador provendo 18 litros/hora de gás HHO.

Por fim, outro fator que deve ser levado em conta neste tipo de análise é o custo, considerando que o maior investimento inicial, passa a ser na aquisição e instalação do gerador de gás HHO, variando comercialmente entre R\$ 500,00 e R\$ 1.500,00 (dependendo da quantidade de gás demanda) para gerar em média 30% de economia efetiva de combustível, conforme comprovado nos experimentos realizados e em literatura técnica consultada. Contudo, conclui-se que o sistema é limitado, mas funcional nos quesitos relativos a aumento de potência e torque, reduzindo as emissões de gases poluentes na atmosfera.

Como sugestão de trabalhos futuros, recomenda-se um estudo para aperfeiçoar a geração do gás HHO, onde o sistema deverá ser aprimorado para aumentar a produção do gás, reduzindo o consumo de potência elétrica. Outro tema a ser estudado é o desenvolvido de um sistema de controle da produção do gás de maneira gradativa para acompanhar as rotações do motor, esse controle se faz necessário nos testes de rendimento e emissões, onde ficou evidente a falta do gás em rotações mais elevadas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abekwar. **Manual Técnico**. www.abekwar.wordpress.com. Acesso em: 15/12/2017.
- Alfa Instrumentos. **Data Sheet**. www.alfastrumentos.com.br. Acesso em: 20/11/2017.
- Auto Intusiastas. **Manual Técnico**. www.autoentusiastasclassic.com.br. Acesso em: 19/11/2017.
- Al-Rousan, Ammar A. Reduction of fuel consumption in gasoline engines by introducing HHO gas into in take manifold. **International Journal Of Hydrogen Energy**, Mutah, p. 12930-12935. 30 ago. 2010.
- ASTM. ASTM Manual for rating motor fuels by motor and research methods. **American Society for Testing and Materials**, Standard Test Method, 5ª edição. 1964.
- British Petroleum. **End of World Petroleum**, Annual Report 2013. Disponível em: <<https://www.bp.com/en/global/corporate/about-bp/energy-economics/statistical-review-of-world-energy/review-by-energy-type/oil/oil-reserves.html>>. Acesso em:15/12/2017.
- Costa, V.A.F. On the exergy balance equation and the exergy destruction. **Journal of Energy**, Volume 116, Part 1, Pages 824-835, Elsevier, 1 December 2016.
- DENATRAN, **Frota de Veículos**. Disponível em: <<http://www.denatran.gov.br/estatistica/237-frota-veiculos>>. Acessado em 20 de fevereiro de 2018.
- El-Kassaby, M. M., Eldrainy, Y. A., Khidr, M. E., e Khidr, K. I. "Effect of hydroxy (HHO) gas addition on gasoline engine performance and emissions." **Alexandria Engineering Journal**, v. 55, n. 1, p. 243-251, 2016.
- Fiat doBrasil. **Engine Data Sheet**. www.fiat.com.br. Acesso em 10/12/2017.
- Francisco, W. C.. **"Proálcool"; Brasil Escola**. Disponível em <<https://brasilecola.uol.com.br/brasil/proalcool.htm>>. Acessado em 12 de janeiro de 2018.
- Giacosa, D. **Motores endotérmicos**, Barcelona, Científica Médica, 3ª edición, 1986.
- Gootblatt, J. **Method for producing hydrogen gas on board and on demand for automotive use as a gasoline replacement**, United States patent (US2012/0186991A1), 2012.
- Heywood, J. B. **Internal Combustion Engine Fundamentals**, McGraw-Hill, 1988.
- Kotas, T. J. **The exergy method of thermal plants analysis**. Krieger, Melbourne, 1995.
- Landirengo. **Manual de Instalação**. www.landirengo.com.br/pt/. Acesso em: 20/11/2017.
- Macedo, L. V. **Problemas Ambientais Urbanos Causados pelo Trânsito na Região Metropolitana de São Paulo (RMSP)**. In: CUNHA, S. B; GUERRA, A. J. T. Impactos Ambientais Urbanos no Brasil. 10ª. ed. Rio de Janeiro: Bertand Brasil, 2013.
- Mahle. **Manual Técnico** – Curso Mahle Metal Leve motor de combustão interna. 2003.

Milind, S.Y., Sawant, S.M., Jasesh, A.A. e Hemant, V.C. Investigations on generation methods for oxy-hydrogen gas, its blending with conventional fuels and effect on the performance of internal combustion engine. **Journal Mechanical Engineer Research**, 3:325-332, 2011.

Moran, M. J. e Shapiro, H. N. **Princípios de termodinâmica para engenharia**. Rio de Janeiro: LTC, p. 681, 2006.

Musmar, Sa'ed A., Al-Rousan e Ammara. **Effect of HHO gas on combustion emissions in gas oline engines**. Fuel: elsevier, Mutah, p. 10016-10021. 01 jun. 2011.

Napro. **Manual Técnico**. www.napro.com.br. Acessado em 20 novembro de 2017.

Neto, R. L. **Geração e combustão do hidrogênio obtido através do processo de eletrólise da água**. TCC – USP – SP. 2007.

Omasa, R. **Hydrogen-Oxygen gas generator and hydrogen-oxygen generating method using the generator**, United States patent (US2005/0011765A1), 2005.

Pulkrabek e Willard, W. **Engineering Fundamentals of the internal combustion engine**, USA: Prentice Hall, 1997.

Plint, M. A. e Martyr, A. **Engine testing theory and practice**. Butterwhorth-Heinemann, 1997.

Rosen, M. A. Thermodynamic comparison of hydrogen production processes. **International Journal of Hydrogen Energy**, v.21, n.5, p.349-365, 1996.

Sardella, Antonio; **Curso Completo de Química**. São Paulo: Editora Ática, 2º Edição 1999.

Szargut, J. **Exergy analyses of termal, chemical and metallurgical process**. USA: Hemisphere Publishing Corporation. 1988.

Shinnar, R. **The hydrogen economy, fuel cells, and electric cars**. TechnoSoc, 25: 455e76, 2003.

Santilli, R.M. **A new gaseous and combustible form of water**. Int J Hydrogen Energ; 31:1113 e 28, 2006.

Subramanian, B. e Ismail, S. Production and use of HHO gas in IC engines, **International Journal of Hydrogen Energy**, Elsevier, 2018.

Taylor, C. F. e Taylor, E. S. **The internal-combustion engine**. Second Edition. 1962.

Vilanova, L. C., **“Contribuição das emissões veiculares na qualidade do ar atmosférico na região metropolitana de Porto Alegre”**, Dissertação – PROMEC – UFRGS, 1998.

Volkswagen do Barsil. **Engine Data Sheet** . www.vw.com.br. Acesso em: 10/12/2017.

Yilmaz, A.C., Uludamar, E. e Aydin, K. Effect of hydroxy (HHO) gas addition on performance and exhaust emissions in compression ignition engines. **International Journal Of Hydrogen Energy**: elsevier, Adana, p. 11366- 11372. 11 ago. 2010.

Wyllen, G. J. e Sonntag, R. E. **Fundamentos da Termodinâmica Clássica**. 3ª edição – Editora Edgard BlücherLtda – São Paulo, 1993.

ANEXO I - Análise de Erros

Método de Klein e McClintock, aplicado conforme Equação 1:

$$\Delta R = \left[\left(\frac{\partial R}{\partial x_1} \Delta_1 \right)^2 + \left(\frac{\partial R}{\partial x_2} \Delta_2 \right)^2 + \dots \right]^{\frac{1}{2}} \quad (1)$$

Onde ΔR é a incerteza de medição da variável R de interesse, Δ é a incerteza de medição para as variáveis independentes χ .

Os cálculos para assegurar a assertividade dos resultados baseados nas incertezas de cada aparelho são descritos nas Equações 3.2 e 3.3.

A medição da potência líquida efetiva tem a incerteza dada pelas derivadas parciais da Equação 3.12 em função das variáveis N e T, Equação 2.

$$\Delta P = \sqrt{(T\Delta N)^2 + (N\Delta T)^2} \quad (2)$$

Onde ΔP é a incerteza de medição da potência líquida efetiva em kW, $\Delta \omega$ é a incerteza de medição da rotação em rad/s, $\Delta \tau$ é a incerteza de medição do torque em N.m.

A incerteza de medição do consumo específico de combustível é dada pelas derivadas parciais da Equação 3.16 em função das variáveis P e \dot{m} , Equação 3:

$$\Delta C_e = \sqrt{\left(\frac{3,6}{P} \times \Delta \dot{m} \right)^2 + \left(\frac{3,6 \times \dot{m}}{P^2} \times \Delta P \right)^2} \quad (3)$$

Onde ΔC_e é a incerteza de medição do consumo específico de combustível em g/kW.h, P a potência medida em kW, ΔP a incerteza de medição da potência em kW, \dot{m} a vazão mássica em g/s e $\Delta \dot{m}$ a incerteza de medição da vazão mássica em g/s.