

**UNIVERSIDADE DE CAXIAS DO SUL  
ÁREA DO CONHECIMENTO DE CIÊNCIAS EXATAS E ENGENHARIAS**

**IVAN LUIZ BERTONI JUNIOR**

**ANÁLISE DE DESEMPENHO E EMISSÕES DE UM MOTOR CICLO DIESEL  
OPERANDO COM FUMIGAÇÃO DE ÁGUA E ETANOL SUPER-HIDRATADO**

**CAXIAS DO SUL  
2020**

**IVAN LUIZ BERTONI JUNIOR**

**ANÁLISE DE DESEMPENHO E EMISSÕES DE UM MOTOR CICLO DIESEL  
OPERANDO COM FUMIGAÇÃO DE ÁGUA E ETANOL SUPER-HIDRATADO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado  
como requisito parcial para a conclusão do  
Curso de Engenharia Mecânica Universidade  
de Caxias do Sul.

Área de concentração: Engenharia Térmica.

Orientador: Prof. Dr. Carlos Roberto Altafini.

**CAXIAS DO SUL  
2020**

**IVAN LUIZ BERTONI JUNIOR**

**ANÁLISE DE DESEMPENHO DE UM MOTOR CICLO DIESEL OPERANDO COM  
FUMIGAÇÃO DE ÁGUA E SUPER-HIDRATADO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado  
como requisito parcial para conclusão do Curso  
de Engenharia Mecânica Universidade de  
Caxias do Sul.

Área de concentração: Engenharia Térmica.

**Aprovado em**

**Banca examinadora**

---

Prof. Dr. Carlos Roberto Altafini

Universidade de Caxias do Sul - UCS

---

Prof. Me. Adelair Lino Colombo

Universidade de Caxias do Sul - UCS

---

Eng. Me. Giovani Dambros Telli

Universidade Federal do Rio Grande do Sul - UFRGS

Aos meus pais, Ivan e Vera, minha esposa, Juliana, que sempre me apoiaram incondicionalmente, amigos, professores e colegas, que contribuem imensamente ao meu crescimento pessoal e profissional

“But remember this, Japanese boy. Airplanes are not tools for war. They are not for making money. Airplanes are beautiful dreams. Engineers turn dreams into reality. ”

**Hayao Miyazaki, The Wind Rises**

## RESUMO

Neste trabalho é investigado experimentalmente o comportamento termomecânico e as respectivas emissões de um motor de ignição por compressão monocilíndrico, operando em condição original, com fumigação de água na admissão e, em modo bicomcombustível, operando com fumigação de etanol super-hidratado. Os ensaios foram realizados variando a rotação do motor de 1800 a 2800 rpm. Os combustíveis utilizados foram caracterizados quanto às suas propriedades físicas e energéticas. O sistema de fumigação desenvolvido foi instalado no sistema de admissão do motor, utilizando controle eletrônico para a injeção. Quanto ao desempenho do motor, foram realizados ensaios conforme a norma NBR ISO 1585, em um dinamômetro elétrico do tipo corrente de Foucault nas configurações propostas, obtendo-se dados de torque, potência, consumo e eficiência térmica. Foi observado uma variação no torque de -3% a 9% em relação à condição original. Paralelamente aos ensaios dinamométricos, avaliou-se as emissões de gases e temperaturas de exaustão. Os experimentos resultaram em uma redução na emissão de NO<sub>x</sub> de até 38%. Em compensação houve um aumento na emissão de CO em até 236% e de até 181% da emissão de HC.

**Palavras-chave:** Motor de combustão interna. Ciclo diesel. Fumigação de água. Fumigação de etanol. Operação bicomcombustível.

## ABSTRACT

In this work, it has been investigated experimentally the thermomechanical behavior and those that affect a single cylinder ignition engine, operating in original conditions, with water fumigation at the intake manifold and, in dual fuel mode, operating with fumigation of super hydrated ethanol. The tests have been performed from 1800 to 2800 rpm of the engine speed. The fuels used have been characterized in terms of chemical and energetic properties. The fumigation system has developed and installed in the engine intake system, using the electronic control for injection. Regarding the engine performance, tests have performed according to the NBR ISO 1585 standard, in an eddy current type electric dynamometer in the application configurations, obtaining torque, power, fuel consumption and fuel conversion efficiency data. It has been observed a variation in torque of -3% to 9% in relation to the original condition. In parallel with dynamometric tests, it has been observed gases and exhaust temperatures. The experiments resulted in a reduction in NO<sub>x</sub> emission up to 38%. On the other hand, there was an increase in CO emissions up to 236% and up to 181% of HC emissions.

**Keywords:** Internal combustion engine. Diesel cycle. Water fumigation. Ethanol fumigation. Dual-fuel operation.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Ciclos de funcionamento de um motor Diesel.....	21
Figura 2 – Motor de quatro cilindros e quatro tempos.....	21
Figura 3 – Diagrama pV de um motor a combustão interna de quatro tempos.....	22
Figura 4 – Distribuição do impacto gerado pelo atrito entre os componentes .....	24
Figura 5 – Temperatura teórica de combustão de diversos combustíveis.....	28
Figura 6 – Formação de NO em relação à $\lambda$ .....	31
Figura 7 – Sistema de fumigação de água controlada eletronicamente .....	33
Figura 8 – Fluxograma com as etapas de trabalho .....	37
Figura 9 – Configuração do sistema para realização do experimento .....	38
Figura 10 – Motor Agrale M93 montado no dinamômetro.....	40
Figura 11 – Dinamômetro de correntes de Foucault.....	41
Figura 12 – Painel de controle .....	42
Figura 13 – Sistema de fumigação instalado no motor.....	42
Figura 14 – Injeção programável FuelTech Race Pro .....	43
Figura 15 – Analisador de gases AVL DiCOM 4000.....	44
Figura 16 – Medidor de índice de fumaça AVL Smoke Meter 409D2 .....	45
Figura 17 – Balança gravimétrica AVL 7030 .....	45
Figura 18 – Miniestação meteorológica Kestrel 4000 .....	46
Figura 19 – Vidrarias .....	47
Figura 20 – Consumo volumétrico de OD e FF (L/h) .....	52
Figura 21 – Consumo mássico de OD e ESH (g/s).....	52
Figura 22 – Consumo mássico de OD e água (g/s).....	52
Figura 23 – Torque do motor (N·m) com fumigação de ESH .....	53
Figura 24 – Torque do motor (N·m) com fumigação de água .....	54
Figura 25 – Potência observada (kW) com fumigação de ESH .....	55
Figura 26 – Potência observada (kW) com fumigação de água .....	56
Figura 27 – Consumo específico de OD (g/kWh) com fumigação de ESH.....	57
Figura 28 – PCI das misturas (MJ/kg) dos ensaios com fumigação de ESH.....	58
Figura 29 – Eficiência de conversão (%) dos combustíveis com fumigação de ESH .....	58
Figura 30 – Eficiência de conversão (%) dos combustíveis com fumigação de água .....	59
Figura 31 – Temperatura de escapamento (°C) com fumigação de ESH .....	60
Figura 32 – Temperatura de escapamento (°C) com fumigação de água .....	61



Figura 33 – Emissão de monóxido de carbono (% em volume) com fumigação de ESH.....	62
Figura 34 – Emissão de monóxido de carbono (% em volume) com fumigação de água.....	63
Figura 35 – Emissão de dióxido de carbono (% em volume) com fumigação de ESH.....	64
Figura 36 – Emissão de dióxido de carbono (% em volume) com fumigação de água.....	65
Figura 37 – Emissão de hidrocarbonetos (ppm) com fumigação de ESH.....	66
Figura 38 – Emissão de hidrocarbonetos (ppm) com fumigação de água.....	66
Figura 39 – Emissão de óxidos de nitrogênio (ppm) com fumigação de ESH.....	67
Figura 40 – Emissão de óxidos de nitrogênio (ppm) com fumigação de água.....	68
Figura 41 – Índice de fumaça (UB) com fumigação de ESH.....	69
Figura 42 – Índice de fumaça (UB) com fumigação de água.....	69

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Óxidos de Nitrogênio.....	30
Quadro 2 – Nomenclatura dos ensaios.....	48

## **LISTRA DE TABELAS**

Tabela 1 – Composição e poder calorífico inferior dos combustíveis .....	26
Tabela 2 – Especificações dos ODs no Brasil .....	26
Tabela 3 – Percentuais de biodiesel no OD comercializado no Brasil .....	27
Tabela 4 – Comparativo de algumas propriedades da Gasolina A e do Etanol .....	28
Tabela 5 – Especificações técnicas do motor Agrale M93 .....	40
Tabela 6 – Especificações do analisador de gases AVL DiCom 4000 .....	44
Tabela 7 – Poder calorífico inferior dos combustíveis .....	51
Tabela 8 – Síntese dos resultados .....	70

## LISTA DE SIGLAS

AC	Relação ar-combustível
MCI	Motor de combustão interna
HC	Hidrocarbonetos
NO <sub>x</sub>	Óxidos de nitrogênio
OD	Óleo diesel
ETH	Etanol hidratado
ESH	Etanol super-hidratado
ICO	Ignição por compressão
ICE	Ignição por centelha
MP	Material particulado
PCI	Poder calorífico inferior
PCS	Poder calorífico superior
PMS	Ponto morto superior
PMI	Ponto motor inferior
FF	Fluido de fumigação

## LISTA DE SIMBOLOS

$\alpha$	Fator de correção	[-]
$D$	Diametro	m <sup>2</sup>
$dV$	Varição infinitesimal de volume	m <sup>3</sup>
$f_a$	Fator atmosférico	[-]
$f_m$	Fator do motor	[-]
$g$	Aceleração da gravidade	m/s <sup>2</sup>
$m$	Massa	kg
$\dot{m}_c$	Vazão mássica	kg/s
$n$	Rotação do motor	rpm
$\eta_m$	Rendimento mecânico	1
$p$	Pressão	Pa
$P$	Força peso	N
$P_e$	Potência efetiva	W
$P_i$	Potência indicada	W
$P_{mi}$	Pressão média indicada	Pa
$P_p$	Potência absorvidas pelas resistências passivas	W
$P_{ref}$	Potência de referência	kW
$P_y$	Potência observada no ensaio	kW
$PCI$	Poder calorífico inferior	kJ/kg
$PCI_m$	Poder calorífico inferior da mistura	kJ/kg
$PCI_{ESH}$	Poder calorífico inferior do etanol super-hidratado	kJ/kg
$PCI_{OD}$	Poder calorífico inferior do óleo diesel	kJ/kg
$S$	Deslocamento	m
$t$	Tempo	s
$T$	Torque	N.m
$\omega$	Velocidade angular	rad/s
$W_i$	Trabalho indicado	N.m
$y_{ESH}$	Fração mássica de etanol super-hidratado	-
$y_{OD}$	Fração mássica de óleo diesel	-

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	<b>16</b>
1.1	CONTEXTUALIZAÇÃO .....	16
1.2	JUSTIFICATIVA.....	17
1.3	OBJETIVOS .....	18
1.3.1	<b>Objetivos geral.....</b>	<b>18</b>
1.3.2	<b>Objetivos específicos.....</b>	<b>18</b>
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	<b>19</b>
2.1	PERSPECTIVA DE FUNCIONAMENTO DOS MCI.....	19
2.2	PROPRIEDADES DOS MOTORES .....	22
2.2.1	<b>Potência indicada.....</b>	<b>22</b>
2.2.2	<b>Potência efetiva.....</b>	<b>23</b>
2.2.3	<b>Potência absorvida pelas resistências passivas .....</b>	<b>23</b>
2.2.4	<b>Rendimento mecânico .....</b>	<b>24</b>
2.3	COMBUSTÍVEIS .....	24
2.3.1	<b>Propriedades dos combustíveis .....</b>	<b>25</b>
2.3.2	<b>Óleo diesel.....</b>	<b>26</b>
2.3.3	<b>Biodiesel.....</b>	<b>27</b>
2.3.4	<b>Etanol.....</b>	<b>27</b>
2.4	EMISSÕES .....	29
2.4.1	<b>Monóxido de carbono - CO.....</b>	<b>29</b>
2.4.2	<b>Dióxido de carbono – CO<sub>2</sub>.....</b>	<b>29</b>
2.4.3	<b>Óxidos de Nitrogênio – NO<sub>x</sub>.....</b>	<b>30</b>
2.4.4	<b>Compostos de Enxofre – SO<sub>2</sub> e H<sub>2</sub>S .....</b>	<b>31</b>
2.4.5	<b>Hidrocarbonetos e materiais particulados .....</b>	<b>32</b>
2.5	FUMIGAÇÃO .....	32

2.6	ESTUDOS NA ÁREA .....	33
<b>3</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS .....</b>	<b>37</b>
3.1	PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS .....	38
3.2	EQUIPAMENTOS .....	39
<b>3.2.1</b>	<b>Motor .....</b>	<b>40</b>
<b>3.2.2</b>	<b>Dinamômetro .....</b>	<b>41</b>
<b>3.2.3</b>	<b>Sistema de fumigação .....</b>	<b>42</b>
<b>3.2.4</b>	<b>Analizador de gases .....</b>	<b>44</b>
<b>3.2.5</b>	<b>Medidor do índice de fumaça.....</b>	<b>44</b>
<b>3.2.6</b>	<b>Medidor de consumo de combustível.....</b>	<b>45</b>
<b>3.2.7</b>	<b>Miniestação meteorológica.....</b>	<b>46</b>
<b>3.2.8</b>	<b>Sensor de temperatura .....</b>	<b>47</b>
<b>3.2.9</b>	<b>Vidrarias.....</b>	<b>47</b>
3.3	NOMENCLATURA DE IDENTIFICAÇÃO DOS TESTES .....	48
3.4	CORREÇÃO DOS DADOS DE POTÊNCIA CONFORME NORMA NBR ISO 1585 .....	48
3.5	CÁLCULO DO PODER CALORÍFICO INFERIOR.....	49
3.6	CÁLCULO DE EFICIENCIA DE CONVERSÃO DOS COMBUSTÍVEIS.....	50
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>51</b>
4.1	PODER CALORÍFICO INFERIOR DOS COMBUSTÍVEIS .....	51
4.2	CONSUMO MÉDIO DE OD E FF.....	51
4.3	ANÁLISE DE DESEMPENHO .....	53
<b>4.3.1</b>	<b>Torque.....</b>	<b>53</b>
<b>4.3.2</b>	<b>Potência observada.....</b>	<b>54</b>
<b>4.3.3</b>	<b>Consumo específico de combustíveis .....</b>	<b>56</b>
<b>4.3.4</b>	<b>Eficiência de conversão dos combustíveis.....</b>	<b>57</b>
<b>4.3.5</b>	<b>Temperatura dos gases de escapamento.....</b>	<b>60</b>

4.4	ANÁLISE DAS EMISSÕES .....	61
4.4.1	Monóxido de carbono.....	62
4.4.2	Dióxido de carbono.....	63
4.4.3	Hidrocarbonetos .....	65
4.4.4	Óxidos de nitrogênio.....	67
4.4.5	Índice de fumaça .....	68
4.5	SÍNTESE DOS RESULTADOS.....	70
<b>5</b>	<b>CONCLUSÃO .....</b>	<b>71</b>
5.1	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....	73
	<b>REFÊRENCIAS.....</b>	<b>74</b>
	<b>ANEXO A – LAUDO TÉCNICO DO ÓLEO DIESEL .....</b>	<b>77</b>
	<b>ANEXO B – LAUDO TÉCNICO DO ETANOL .....</b>	<b>78</b>
	<b>APÊNDICE A – DADOS COLETADOS .....</b>	<b>79</b>
	<b>APÊNDICE B – DADOS CALCULADOS.....</b>	<b>82</b>



# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO

A história da humanidade tem estreitos laços com o uso de ferramentas e máquinas que sempre tiveram papel fundamental no desenvolvimento da sociedade. Isso aconteceu desde os tempos mais remotos até o desenvolvimento acelerado de máquinas no século XIX com o início da revolução industrial.

Em 1867 Nikolaus Otto cria o primeiro motor a combustão interna (MCI) de ignição por centelha, denominado ciclo Otto, operando de maneira eficiente e confiável. Anos mais tarde, em 1892, Rudolf Diesel desenvolve o primeiro MCI de ignição por compressão, denominado ciclo Diesel. Ambos tipos de motores, operam até hoje de maneira muito semelhante aos seus precursores há mais de cem anos atrás (HEYWOOD, 1988).

O uso em larga escala de motores à combustão começou a levantar questões sobre os impactos ambientais, quando em 1992, a União Europeia propõe um ambicioso projeto que visou regulamentar e impor restrições às emissões. Desde então, as emissões de gases poluentes caíram drasticamente. Conforme a *European Environment Agency* (EEA) (2018), entre 1990 e 2016, os níveis de emissões de monóxido de carbono (CO) e hidrocarbonetos (HC) reduziram 86%, e óxidos de nitrogênio (NO<sub>x</sub>) reduziram 41%.

Devido ao seu princípio de funcionamento, os motores de combustão de ignição por compressão (MCI-ICO) operam com altas temperaturas de combustão, o que provoca uma produção em números significativos de emissões de NO<sub>x</sub>. Conforme Martins e Ferreira (2010) a formação do NO<sub>x</sub> é significativa em combustão em altas temperaturas. Os MCI de combustão de ignição por centelha (MCI-ICE), por disporem de um controle mais preciso do momento da combustão, podem atuar no instante que essa ocorrer, reduzindo consideravelmente as emissões de NO<sub>x</sub> apenas com o controle eletrônico do ponto de ignição e explosão. Diferentemente disso, os MCI-ICO dependem das altas temperaturas geradas pela compressão dos gases, para que o combustível entre em combustão, o que acarreta em emissões de NO<sub>x</sub> mais constantes e difíceis de serem controladas apenas com o uso da eletrônica no gerenciamento do motor.

No Brasil, o Conselho Nacional do Meio Ambiente (Conama), criou o Programa de Controle da Poluição do Ar por Veículos Automotores (PROCONVE) que visa regulamentar os níveis de emissões de gases poluentes emitidos pelos veículos leves e comerciais. Atualmente o programa está na sua fase 7 para veículos pesados, exige uma emissão de NO<sub>x</sub> de no máximo 2 g/kWh, o que obrigou os fabricantes a desenvolver sistemas de injeção de um

agente redutor catalítico no escapamento do veículo, conhecido como ARLA32. Esse produto reduz quimicamente o  $\text{NO}_x$  em gás nitrogênio e vapor de água, através do processo de oxirredução. Entretanto, este sistema onera os proprietários que além dos custos referentes ao abastecimento de combustível, devem também sempre manter um reservatório secundário de ARLA32. Além disso, esses sistemas elevam o custo do veículo ao consumidor final.

Uma alternativa para o uso de sistemas de redução catalítica, é o controle da temperatura de combustão do veículo, o qual minimiza as condições para a formação do  $\text{NO}_x$ . Por conseguinte, diversos estudos vêm sendo conduzidos visando reduzir a temperatura de combustão sem que haja impactos consideráveis nas eficiências termodinâmicas e demais emissões inerentes à combustão. Uma das alternativas para isso é a adição de um componente inerte à combustão, a água, a qual absorve parte da energia térmica, refrigerando quase que instantaneamente a combustão. Ao absorver esta energia, a água líquida é convertida para o estado gasoso, o qual ajuda no processo de expansão do motor, compensando assim parcialmente a relativa perda de eficiência térmica devido a temperatura de combustão inferior. A água pode ser adicionada à combustão por diversos métodos, sendo os mais utilizados o processo de fumigação na admissão, injeção direta na câmara de combustão, ou por meio de emulsificação no próprio combustível, conforme estudos conduzidos por Murayama et al. (1979).

Além da fumigação de água líquida na admissão do motor, há estudos na área de fumigação de misturas de etanol anidro e água líquida, em proporções acima de 5% de água, denominada etanol super-hidratado. Segundo a Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP), denomina-se etanol hidratado as composições que contenham até 5% de água em sua mistura. Isso visa a compensar a perda de eficiência térmica, adicionando o etanol hidratado (ETH), que é um biocombustível que possui características interessantes para ser utilizado em conjunto com o óleo diesel (OD).

## 1.2 JUSTIFICATIVA

Apesar de ser um combustível não renovável e o rápido avanço das tecnologias de propulsão elétrica, o uso de OD possui uma considerável perspectiva de participação no mercado nas próximas décadas, principalmente no ramo de veículos comerciais, equipamentos de geração de energia e demais aplicações. Sendo assim, estudos direcionados à novas tecnologias desenvolvidas a fim de promover a eficiência dos MCI de ignição por compressão

devem ser mantidas, uma vez que a legislação constantemente impõe restrições e desafios a fim de reduzir ao máximo o impacto ambiental dos MCI.

### 1.3 OBJETIVOS

A seguir são delineados os objetivos relacionados a esse trabalho.

#### 1.3.1 Objetivos geral

Este trabalho propõe como objetivo geral avaliar experimentalmente a eficiência termomecânica e emissões de um MCI de ignição por compressão, monocilíndrico, operando com fumigação de água líquida na admissão, e fumigação de etanol super-hidratado (ESH) e comparar os resultados com os dados obtidos do mesmo motor em funcionamento com OD.

#### 1.3.2 Objetivos específicos

Com o propósito de cumprir o objetivo geral, este trabalho também se dispõe a atender os objetivos específicos listados abaixo:

- a) levantar o estado da arte dos motores de combustão por compressão operando com fumigação de água líquida e etanol super-hidratado na admissão;
- b) caracterizar cada um dos combustíveis, OD e ETH a serem utilizados no experimento, apresentando suas principais características;
- c) avaliar o desempenho termomecânico do motor com e sem a fumigação, obtendo as curvas de potência, torque e respectiva eficiência e dados de consumo;
- d) analisar as emissões geradas em cada configuração proposta quanto à opacidade e temperatura;
- e) comparar os resultados obtidos e definir a viabilidade técnica da fumigação de água líquida e/ou da fumigação de ESH.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A revisão aqui apresentada mostra inicialmente uma contextualização do funcionamento dos motores de combustão interna. Trata, posteriormente, das principais propriedades dos motores, seguido das especificidades dos combustíveis e suas principais propriedades. O capítulo encerra com a descrição de alguns estudos envolvidos na área.

### 2.1 PERSPECTIVA DE FUNCIONAMENTO DOS MCI

A função global de um motor de combustão é produzir energia mecânica a partir da energia potencial química de um determinado combustível (HEYWOOD, 1988). O primeiro registro de um motor de combustão é datado em 1680, idealizado por Christian Huygens, e distintivamente dos MCI convencionais que utilizam como combustível derivados do petróleo como OD ou gasolina ou álcoois como ETH ou metanol, utilizava como combustível a pólvora (WIMPERIS, 1922).

O MCI gera energia mecânica através da conversão de energia química contida em um determinado combustível. A conversão é realizada através da combustão do combustível a qual provoca uma rápida expansão dos gases gerando assim o trabalho. A principal aplicação dos MCI é a indústria automobilística como fonte primária de potência. (BOSCH AUTOMOTIVE HANDBOOK, 2002).

Segundo Brunetti (2012), os MCI basicamente podem ser categorizados quanto ao princípio de obtenção de trabalho mecânico, sendo eles:

- a) motores alternativos, cujo modelo clássico é o de pistão que realiza movimentos lineares do ponto morto superior (PMS) até o ponto morto inferior (PMI), transformados em rotativos através de um sistema biela-manivela, conforme Figura 1;
- b) motores rotativos, nos quais não há necessidade de transformação de movimento, já que o trabalho é obtido diretamente por movimentos de rotação, como em turbinas à gás e motores Wankel;
- c) motores de impulso, nos quais o trabalho é gerado através da rápida expansão de gases provocados pela combustão, comumente utilizado em motores à jato e foguetes.

Existem dois tipos básicos e mais usuais de MCI, aqueles ignição centelha (ICE) e aqueles ignição por compressão (ICO). OS MCI-ICE necessitam de uma fonte de calor, normalmente produzida por uma centelha, para que a mistura ar-combustível inicie o processo

de explosão. Os MCI-ICO por sua vez, comprimem somente o ar elevando significativamente sua pressão e temperatura, a ponto que a combustão possa ocorrer espontaneamente. Os MCI-ICE usualmente são denominados de motores à gasolina ou álcool, e operam através do chamado ciclo Otto. Já os MCI-ICO, são comumente denominados motores à diesel, e operam através do que se chama de ciclo Diesel (STONE, 1992). Brunetti (2012) ainda define como diferenças básicas entre os motores ICO e ICE por meio da introdução do combustível. Nos motores ICE a mistura ar-combustível (AC) é admitida devidamente homogeneizada e dosada, exceto por motores dotados de injeção direta de combustível. Os MCI-ICO por sua vez, devem obrigatoriamente realizar a injeção de combustível diretamente na câmara de combustão quando o pistão estiver muito próximo do PMS, onde a temperatura e pressão do ar são favoráveis à combustão. Este fato faz com que este tipo de motor trabalhe com sistemas de injeção de combustível de alta pressão. Usualmente os MCI-ICO operam em rotações inferiores aos MCI-ICE, devido as características de combustão mais lenta do OD.

Tillmann (2013) classifica os motores quanto à utilização em estacionários, industriais, veiculares e marítimos. O autor ainda classifica os motores quanto às fases dos ciclos de trabalho em motores de dois e de quatro tempos e, finalmente, quanto ao número e também a disposição dos cilindros.

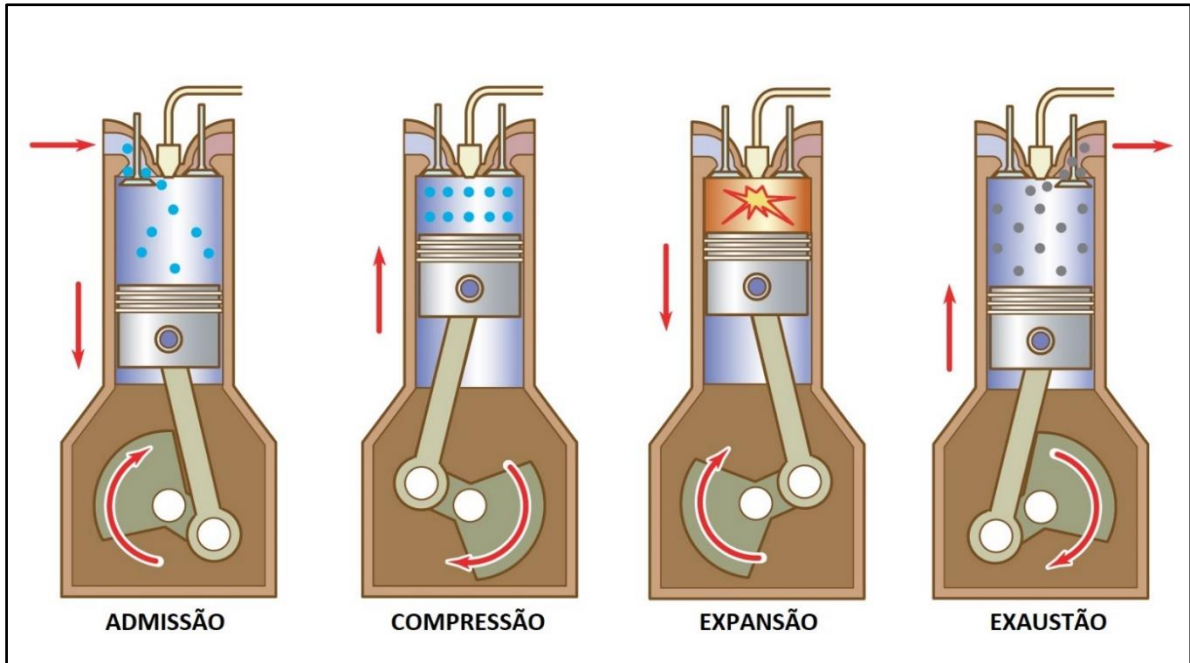
Conforme Giacosa (2000), os motores são classificados como quatro tempos, quando a árvore de manivelas necessita realizar duas voltas completas para cada ciclo completo. Brunetti (2012), define que os quatro tempos são divididos em admissão, compressão, combustão ou expansão e exaustão, conforme demonstrado na Figura 1.

No ciclo de admissão, o pistão realiza um movimento descendente, do PMS até o PMI, causando um rápido aumento do volume do cilindro, conseqüentemente uma região de baixa pressão, que promove a sucção do ar através da válvula de admissão que se encontra aberta.

O próximo ciclo, o de compressão, irá comprimir a mistura AC nos MCI-ICE ou somente ar nos MCI-ICO, deslocando o pistão em movimento ascendente do PMI até o PMS, atingindo a pressão e temperatura ideais para combustão conforme a configuração do motor e combustível utilizado.

Posteriormente a compressão, ocorrerá a expansão devido a combustão, onde efetivamente há a geração de trabalho. Nos MCI-ICE a combustão é iniciada através de uma centelha, e nos MCI-ICO o combustível é injetado encontrando o ar quente pressurizado, iniciando um processo de combustão espontânea. A expansão ocorre do PMS até o PMI.

Figura 1 – Ciclos de funcionamento de um motor Diesel



Fonte: Adaptado de Encyclopædia Britannica (1999)

O ciclo de exaustão é responsável por remover os gases gerados pela combustão, onde o pistão realiza novamente movimento ascendente do PMI até o PMS, empurrando através da abertura da válvula de escape estes gases, para que um novo ciclo de admissão ocorra. A Figura 2 demonstra o diagrama de ciclos para um motor de quatro cilindros, com configuração de ignição 1-3-4-2.

Figura 2 – Motor de quatro cilindros e quatro tempos

	0°	180°	360°	540°	720°	$\alpha$
1	Expansão	Exaustão	Admissão	Compressão		
2	Exaustão	Admissão	Compressão	Expansão		
3	Compressão	Expansão	Exaustão	Admissão		
4	Admissão	Compressão	Expansão	Exaustão		
	Tempos do motor					

Fonte: Adaptado de Brunetti (2012)

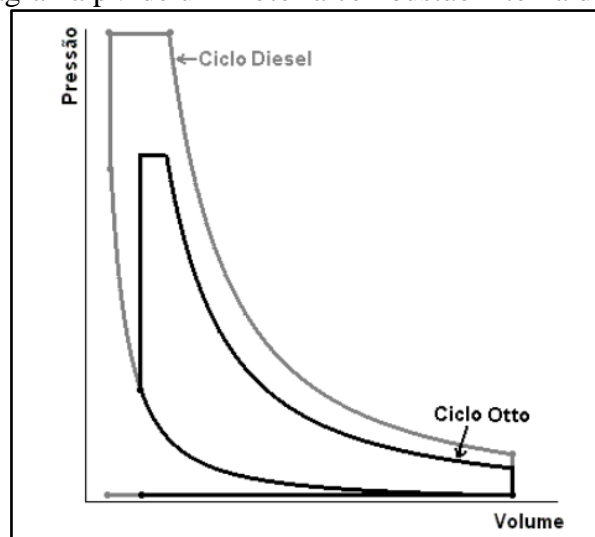
## 2.2 PROPRIEDADES DOS MOTORES

Giacosa (2000) define que há três potências diferentes envolvidas no processo de combustão, que podem ser determinadas de forma analíticas ou práticas, sendo elas a potência indicada, a potência efetiva e a potência absorvida pelas resistências passivas.

### 2.2.1 Potência indicada

Segundo Brunetti (2012), a potência indicada é a produzida pelo ciclo termodinâmico do fluido ativo, portanto, é obtida por meio do trabalho realizado pelo pistão. Este trabalho pode ser representado através do diagrama pV demonstrado na Figura 3.

Figura 3 – Diagrama pV de um motor a combustão interna de quatro tempos



Fonte: Adaptado de SILVEIRA, F. L (2001)

O trabalho pode ser calculado através da Equação (1).

$$W_i = \oint p \, dV \quad (1)$$

onde,  $W_i$  é o trabalho indicado [J],  $p$  é a pressão [Pa] e  $dV$  é a variação do volume [m<sup>3</sup>].

A Equação (1) pode ser analiticamente simplificada para a Equação (2), onde multiplicando-se a área do pistão,  $\pi \cdot D^2/4$  [m<sup>2</sup>], pelo deslocamento  $S$  [m] realizado durante o ciclo e pela pressão média indica,  $P_{mi}$  [Pa], também obtém-se o trabalho  $W_i$  [N·m]

$$W_i = \frac{\pi \cdot D^2}{4} \cdot P_{mi} \cdot S \quad (2)$$

Como a potência é a taxa de trabalho realizada em um determinado tempo, multiplicando o trabalho obtido através da Equação (2) pela periodicidade em que este trabalho ocorre, obtém-se assim a potência indicada gerada, conforme exposto na Equação 3.

$$P_i = W_i \cdot \frac{\omega}{x} \cdot z \quad (3)$$

onde  $P_i$  [W] é a potência indicada,  $\omega$  é a velocidade angular do motor [rad/s],  $x$  é a constante referente ao tipo do motor ( $x=1$  para 2 tempos e  $x=2$  para motores 4 tempos) e  $z$  é a quantidade de cilindros.

### 2.2.2 Potência efetiva

A potência efetiva é a de maior interesse uma vez que esta é a disponível para uso, e medida diretamente no eixo do motor, através de um banco dinamométrico (GIACOSA, 2000). Também chamada de potência de freio, ou *brake power*, é a potência disponível para uso em cargas, neste caso o “freio” (HEYWOOD, 1988). A Equação (4) define a potência efetiva.

$$P_e = \omega \cdot T = 2\pi \cdot n \cdot T \quad (4)$$

onde  $P_e$  [W] é a potência efetiva,  $\omega$  é a velocidade angular do motor [rad/s],  $T$  é o torque do motor [N.m] e  $n$  a rotação do motor [rpm].

### 2.2.3 Potência absorvida pelas resistências passivas

A potência produzida pela combustão no interior do cilindro do MCI não é disponibilizada integralmente para a árvore de manivelas (GIACOSA, 2000). Parte desta energia é consumida pelo próprio MCI, para que realize os ciclos de admissão, compressão e exaustão, além da energia dissipada pelo atrito dos componentes internos (HEYWOOD, 1988). Giacosa (2000) define essa potência como potência absorvida pelas resistências passivas.

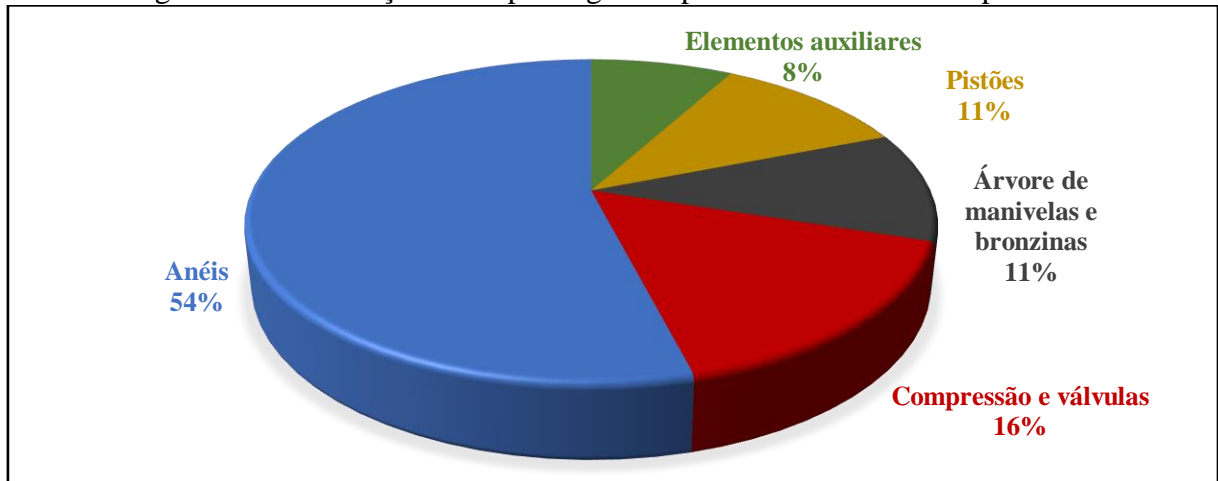
Esta potência pode ser definida pela Equação (5), na qual  $P_p$  é a pressão absorvida pelas resistências passivas,  $P_i$  é a potência indicada e  $P_e$  é a potência efetiva.

$$P_p = P_i - P_e \quad (5)$$



O impacto do atrito das partes móveis do motor é demonstrado na Figura 4, havendo variações conforme as características e especificações de cada MCI.

Figura 4 – Distribuição do impacto gerado pelo atrito entre os componentes



Fonte: Adaptado de Brunetti (2012)

#### 2.2.4 Rendimento mecânico

Conhecendo as potências efetiva e indicada, é possível relacioná-las a fim de obter-se um importante parâmetro para mensurar a eficiência do motor. Conforme a Equação (6), o rendimento mecânico é calculado através da razão entre as potências efetiva e indicada.

$$\eta_m = \frac{P_e}{P_i} \quad (6)$$

### 2.3 COMBUSTÍVEIS

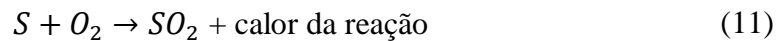
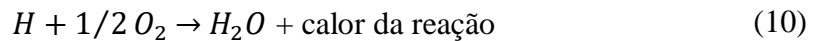
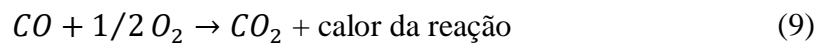
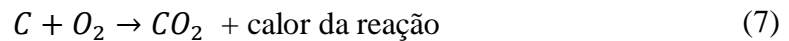
Para Kross (2016), o combustível é o elemento o qual possui energia potencial que ao reagir quimicamente com um oxidante provoca um processo chamado de combustão, resultando na liberação de energia e subprodutos da combustão. O oxidante amplamente utilizado é o oxigênio contido no ar atmosférico.

Os combustíveis podem no geral serem classificados em três categorias: carvão, hidrocarbonetos líquidos e hidrocarbonetos gasosos (SONNTAG, 1998).

A maior parte dos MCI utilizam como fonte primária de energia os combustíveis líquidos derivados do petróleo, como a gasolina e o óleo diesel, e mais recentemente os combustíveis gasosos vem ganhando espaço, como o gás natural veículos (GNV) e o gás de petróleo

liquefeito (GLP). No Brasil, e em países dependentes da importação de petróleo, é utilizado combustíveis não derivados do petróleo, como o álcool etílico ( $C_2H_5OH$ ) e óleos vegetais. Por questões econômicas e técnicas, o etanol industrial contém aproximadamente 4% de água em sua composição e pequenas quantidades de éter (VLASSOV, 2001).

Segundo Garcia (2013) e Vlassov (2001), as reações básicas da combustão são definidas conforme as Equações 7 a 12:



### 2.3.1 Propriedades dos combustíveis

Para que seja possível um maior entendimento dos fenômenos e resultados da combustão, é de extrema importância ter o domínio das características dos combustíveis utilizados, como suas propriedades, sendo as mais importantes descritas nesta seção.

Um dos parâmetros mais importantes de um combustível é o poder calorífico inferior (PCI) que basicamente mensura a energia química potencial armazenada em um combustível. Este parâmetro é obtido (medido ou calculado) a partir da quantidade de calor extraída na combustão. A água, um dos produtos da combustão, pode estar presente tanto no estado gasoso ou líquido. Quando a água contida no produto da combustão é apresentada na forma líquida, denomina-se de poder calorífico superior (PCS), e quando apresentada na forma de vapor, denomina-se de poder calorífico inferior (PCI) (MARTINS, 2010). Segundo Brunetti (2012), como as temperaturas de exaustão em MCI são altas, é recomendado e comumente utilizado apenas o PCI.

Os MCI-ICE por definição, são motores onde a combustão é controlada, portanto é desejável que a combustão jamais ocorra de maneira espontânea. Para medir a resistência à autoignição, utiliza-se como grandeza a octanagem, também conhecida como número de octanas. Em contrapartida, os MCI-ICO dependem da autoignição para um perfeito funcionamento. Caso a temperatura da mistura AC for alta suficiente, ocorrerá a combustão sem que haja a necessidade de uma fonte de calor para iniciar o processo, como uma centelha

em motores ICE. A propriedade que mensura a qualidade da combustão do OD é o número de cetano (BRUNETTI, 2012).

Tabela 1 – Composição e poder calorífico inferior dos combustíveis

Combustível	Porcentagem em massa de elementos			Massa molecular $\mu$ (kg/kmol)	PCI (MJ/kg)
	C	H	O		
Gasolina A	85,5	14,5	-	110 - 120	43,93
Gasolina C	77,9	13,1	9	-	38,2
Óleo diesel	87	12,6	0,4	180 - 220	42,44
Etanol hidratado	50,05	13,05	36,9	43,37	25,078

Fonte: Vlassov (2001)

### 2.3.2 Óleo diesel

Segundo a ANP (2019), o óleo diesel é um combustível líquido, derivado do petróleo, e possui em sua composição cadeias de hidrocarbonetos de oito a dezesseis carbonos, e possui também pequenas quantidades de nitrogênio, enxofre e oxigênio.

O óleo diesel é o combustível mais utilizado no Brasil, devido à matriz de transportes do país ser majoritariamente rodoviária, setor responsável por aproximadamente 80% do consumo desse combustível (BRUNETTI, 2012). Conforme o Balanço Energético Nacional de (2018), o OD representa 18,1% do consumo de energia do país, sendo mais utilizado no setor de transportes, representando 44% do consumo de combustíveis no país.

No Brasil, há disponível atualmente para comercialização como OD rodoviário três tipos, classificados conforme seu teor de enxofre, sendo eles o S10, S50, S500. Até 2014 havia também a classificação S1800, substituída em todo território nacional pelo S500. O OD pode ser classificado ainda em tipo A, OD puro, e tipo B, com adição de biodiesel. As principais diferenças entre os ODs disponíveis e extinto no Brasil estão descritas na Tabela 2.

Tabela 2 – Especificações dos ODs no Brasil

Característica	S1800	S500	S50	S10
Número de Cetano	42	42	46	48
Enxofre total (mg/kg)	1800	500	50	10
Viscosidade a 40 °C (mm <sup>2</sup> /s)	2,0 a 5,0	2,0 a 5,0	2,0 a 5,0	2,0 a 4,5
Massa específica a 20 °C (kg/m <sup>3</sup> )	820 a 880	820 a 865	820 a 850	820 a 850
Ponto de fulgor (°C)	38,0	38,0	38,0	38,0

Fonte: Adaptado de Garcia (2013)

### 2.3.3 Biodiesel

O biodiesel é um biocombustível produzido a partir de fontes renováveis, como óleos de origem vegetal, e de origem animal. Fatores locais, como geografia, clima e economia determinam qual a origem principal para sua produção. No Brasil e nos Estados Unidos, é amplamente utilizado como fonte principal o óleo de soja para a produção de biodiesel. Na Europa por sua vez, o óleo de canola é preferencialmente utilizado. O biodiesel é miscível com o OD padrão em qualquer proporção. Devido a esta característica, diversos países adotam misturas binárias de OD e biodiesel, sendo classificadas por acrônimos BXX representando o percentual de biodiesel na mistura (KNOTHE et al., 2006).

A Tabela 3 demonstra os percentuais de biodiesel no OD, conforme a Resolução nº 16 de outubro de 2018 do Conselho Nacional de Política Energética, publicado no Diário Oficial da União de 08 de novembro de 2018.

Tabela 3 – Percentuais de biodiesel no OD comercializado no Brasil

<b>Datas de início do incremento</b>	<b>1º/6/2019</b>	<b>1º/3/2020</b>	<b>1º/3/2021</b>	<b>1º/3/2022</b>	<b>1º/3/2023</b>
Percentuais de adição de biodiesel.	11%	12%	13%	14%	15%

Fonte: Adaptado de Diário Oficial da União (2018)

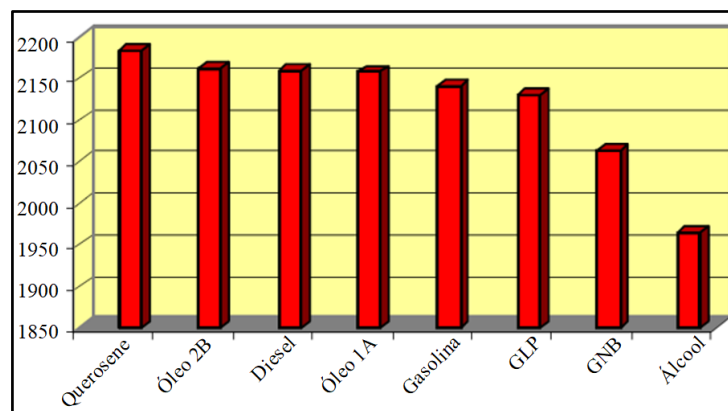
### 2.3.4 Etanol

A ANP (2019) define o etanol como biocombustível líquido, de forma molecular  $C_2H_5OH$  produzido a partir da fermentação de açúcares, utilizado principalmente em MCI-ICE. Pode ser produzido na forma de etanol anidro utilizado na composição da gasolina C, e como etanol hidratado, como combustível final. Segundo Brunetti (2012), a consolidação do etanol no mercado nacional ocorreu em 2002 com a implementação dos primeiros veículos bicomcombustíveis, ou popularmente conhecidos como carros Flex, que aceitam diferentes percentuais de misturas de gasolina e etanol. O etanol anidro pode possuir em sua composição no máximo 0,4% do volume, enquanto o etanol hidratado permite até 4,9%. Segundo o Balanço Energético Nacional de (2018), no Brasil do uso de combustíveis no setor de transportes, o etanol anidro representa 8,1% do consumo, enquanto o etanol hidratado 9,3%. Em estudo realizado pela Confederação da Agricultura e Pecuária do Brasil (CNA) (2016), o etanol anidro possui um custo mais elevado de produção, uma vez que 73,4 litros de etanol anidro para cada tonelada de cana de açúcar, contra 76,5 litros de etanol hidratado para cada tonelada de cana de

açúcar. Lora e Venturini (2012) define que para obtenção do etanol anidro, é necessário ainda um processo adicional, denominado desidratação, o que aumenta seu custo de produção.

Estudos realizados por Soares et al. (2009) demonstram que o uso do etanol gera uma significativa redução das emissões de CO<sub>2</sub> se comparado com combustíveis como o OD, gasolina E0 e gasolina E23 (atualmente E25). Conforme apresentado na Tabela 1, o etanol apresenta um PCI inferior aos demais, o que se traduz em uma temperatura de combustão inferior, conforme demonstrado na Figura 5.

Figura 5 – Temperatura teórica de combustão de diversos combustíveis



Fonte: Adaptado de Vlassov (2001)

O etanol apesar do menor poder calorífico, a razão ar-combustível estequiométrica do etanol é menor que o da gasolina, o qual permite uma menor quantidade de ar para uma mesma quantidade de combustível. Além disso, possui maior resistência a autoignição (octanagem) possibilitando maiores taxas de compressão no motor. O alto calor latente de vaporização contribui para o resfriamento do ar admitido, reduzindo sua massa específica, promovendo uma quantidade de massa específica AC maior na câmara de combustão (BRUNETTI, 2012). Todos estes fatores garantem um bom desempenho do etanol. A Tabela 4 apresenta um comparativo dos dados acima citados.

Tabela 4 – Comparativo de algumas propriedades da Gasolina A e do Etanol

Propriedades	Gasolina A	Etanol
Fórmula química	C <sub>6,47</sub> H <sub>14,28</sub> (média)	CH <sub>3</sub> OH
Calor de vaporização (kJ/kg)	377	937
Razão ar-combustível estequiométrica (kg/kg)	14,7	8,99
PCI (kJ/kg)	44.430 - 44.510	26.805
Octanagem MON	Mínimo 82	90
Octanagem RON	Mínimo 93	106

Fonte: Adaptado de Brunetti (2012)

## 2.4 EMISSÕES

Segundo Brunetti (2012), o termo emissões é adotado para todo produto da combustão que são nocivos à saúde humana e ao meio ambiente. Uma combustão ideal e estequiométrica, produz  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$  e  $\text{N}_2$ . Já em uma combustão real, estes produtos constituem aproximadamente 98% dos gases, e do restante 1% é constituído de  $\text{O}_2$ ,  $\text{H}_2$  e gases inertes presentes na atmosfera, e 1% de gases nocivos. A análise das emissões permite compreender melhor o comportamento do motor, e a eficiência da combustão, através das concentrações de gases como  $\text{CO}$ ,  $\text{CO}_2$ .

### 2.4.1 Monóxido de carbono - $\text{CO}$

O monóxido de carbono é um gás altamente tóxico, que ao ser inalado, reage com a hemoglobina no sangue, reduzindo a capacidade de transporte de oxigênio. Em um ambiente fechado a concentração de 400 ppm provoca dores de cabeça após um período de 1 a 2 horas. Concentrações mais altas, como de 1600 ppm, causa náuseas após 20 minutos de contato, e em aproximadamente 1 hora pode levar um indivíduo à óbito. Sua periculosidade se dá ao fato de ser inodoro, portanto, imperceptível aos humanos (Brunetti, 2012).

Sua formação em MCI ocorre devido à combustão incompleta, portanto, é altamente indesejável sua presença como produto da combustão, uma vez que é um indicador de perda de eficiência da combustão. Em virtude disso, é comum que os MCI operem com excesso de ar na mistura (Vlassov, 2001). Para Brunetti (2012), os MCI-ICE tendem a formar maiores níveis de  $\text{CO}$  em condições muito próximas da estequiometria ideal, já os MCI-ICO por essência de funcionamento operam com excessos de ar e, portanto, emitem pouco  $\text{CO}$  (em geral, 300 ppm a plena carga).

### 2.4.2 Dióxido de carbono – $\text{CO}_2$

O dióxido de carbono é um gás incolor e inodoro. Em uma combustão de hidrocarbonetos, o  $\text{CO}_2$  é um dos produtos primários. Para a saúde humana e vegetação em geral, não há impactos diretos, porém, a grande quantidade deste gás na atmosfera pode influenciar no efeito estufa (Brunetti, 2012). Martins (2006) diz que os combustíveis baseados em hidrocarbonetos, quando apresentados na forma líquida tendem a emitir mais  $\text{CO}_2$  em relação aos combustíveis gasosos, pois estes possuem menores relações H/C. Portanto, uma

possível solução para redução do dióxido de carbono é a diminuição do uso de combustíveis fósseis.

### 2.4.3 Óxidos de Nitrogênio – NO<sub>x</sub>

De acordo com a *Environmental Protection Agency* (EPA), o nitrogênio diatômico (N<sub>2</sub>) é o gás inerte, inofensivo e o mais abundante na atmosfera terrestre, podendo atingir até 80% da composição do ar atmosférico. Entretanto, é reativo ao oxigênio, onde pode formar até sete outros compostos químicos, conforme demonstrado no Quadro 1.

Quadro 1 – Óxidos de Nitrogênio

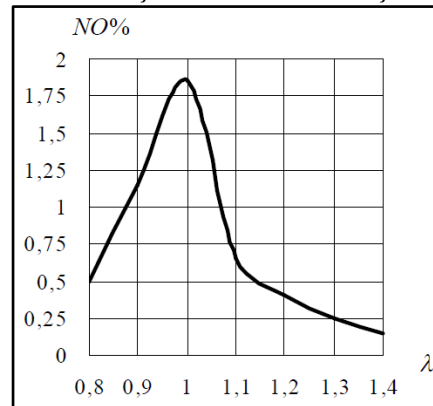
Óxido	Nome	Propriedades
N <sub>2</sub> O	Óxido Nítrico	Gás incolor, solúvel em água
NO	Óxido Nítrico	Gás incolor, ligeiramente solúvel em água
N <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	Dióxido de Dinitrogênio	Gás incolor, ligeiramente solúvel em água
N <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Trióxido de Dinitrogênio	Sólido preto, solúvel em água
NO <sub>2</sub>	Dióxido de Nitrogênio	Gás marrom avermelhado, muito solúvel em água
N <sub>2</sub> O <sub>4</sub>	Tetróxido de Dinitrogênio	Gás marrom avermelhado, muito solúvel em água
N <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Pentóxido de Dinitrogênio	Sólido branco, muito solúvel em água

Fonte: Adaptado de EPA

Brunetti (2012) diz que em emissões dos MCIs, considera-se o NO<sub>x</sub> uma composição de 90% de NO e 10% de NO<sub>2</sub>. Os gases NO<sub>x</sub> ao entrar em contato com o vapor de água presente na atmosfera formam o ácido nítrico, um dos componentes das chuvas ácidas. A ação dos raios ultravioletas no gás NO<sub>2</sub> faz com que haja a formação de ozônio (O<sub>3</sub>). Apesar do ozônio ser benéfico na estratosfera, agindo como filtro para raios UV, em altitudes inferiores causa complicações respiratórias, além de afetar as propriedades mecânicas de borrachas e polímeros.

Segundo Vlassov (2001) os índices de NO<sub>x</sub> são os principais gases tóxicos emitidos pelos MCI, principalmente operados pelo ciclo Diesel. São produzidos pela oxidação do gás nitrogênio presente na atmosfera e admitido pelo MCI, devido às condições severas da câmara de combustão, onde há altas pressões e temperaturas. As reações envolvendo a formação do NO<sub>x</sub> são endotérmicas, portanto, há uma relação direta com a temperatura envolvida no processo. Um aumento da temperatura de combustão de 1500 K para 2000 K pode aumentar a produção de NO em até 38 vezes.

A Figura 6 mostra que há uma clara correlação entre o coeficiente de excesso de ar ( $\lambda$ ) e a formação de óxido nítrico. Com o aumento de  $\lambda$  há uma diminuição da temperatura de combustão, e conseqüentemente menor formação de NO<sub>x</sub>.

Figura 6 – Formação de NO em relação à  $\lambda$ 

Fonte: Vlassov (2001)

Conforme Martins e Ferreira (2010) a formação do  $\text{NO}_x$  ocorre principalmente através de quatro mecanismos, que são o  $\text{NO}_x$  formado no processo térmico ou de Zeldovich,  $\text{NO}_x$  imediato,  $\text{NO}_x$  via  $\text{N}_2\text{O}$  e -  $\text{NO}_x$  via combustível. O mecanismo térmico (mecanismo Zeldovich), onde a temperatura é responsável direta pela formação, devido a oxidação do nitrogênio em altas temperaturas. O mecanismo imediato, como o nome sugere, é muito mais rápido que o mecanismo térmico e está associado a estequiometria da combustão. O mecanismo  $\text{N}_2\text{O}$  que ocorre quando há excesso de ar, altas pressões e a presença de um terceiro corpo de qualquer composto que possa equilibrar energeticamente o processo de combinação do oxigênio com o nitrogênio. E por fim o mecanismo *fuel*, devido a presença de nitrogênio no combustível.

A literatura em geral (Brunetti, 2012; Vlassov, 2001 e *Environmental Protection Agency*) converge à ideia de que a solução para redução da emissão dos  $\text{NO}_x$  se baseia em duas frentes principais, sendo elas a redução da temperatura de combustão e o tratamento dos gases com redutores catalíticos seletivos (SCR).

Dentre as possíveis soluções para redução da temperatura de combustão a EPA lista como alternativas viáveis a injeção de combustível refrigerado e a injeção de água e/ou vapor de água. Ambas soluções podem ser aplicadas através do método de fumigação que é explorado no decorrer deste trabalho.

#### 2.4.4 Compostos de Enxofre – $\text{SO}_2$ e $\text{H}_2\text{S}$

A presença de enxofre na composição do combustível resulta na produção de dióxido de enxofre ( $\text{SO}_2$ ) e sulfeto de hidrogênio ( $\text{H}_2\text{S}$ ). Ambos elementos são naturalmente tóxicos, e



em contato com o vapor de água presente na atmosfera, formam o ácido sulfúrico ( $H_2SO_4$ ) composto altamente corrosivo (Brunetti, 2012).

#### **2.4.5 Hidrocarbonetos e materiais particulados**

Tanto os materiais particulados (MP) quanto os hidrocarbonetos (HC) são provenientes de uma combustão incompleta, portanto altamente indesejáveis, uma vez que sua presença indicam uma perda da eficiência da combustão. Os HC são formados por cadeias de menor peso molecular como metano, acetileno, etano, aldeídos, tolueno, propileno entre outros. A partir dos HC ocorrem a formação de HC aromáticos e policíclicos, que atuam como elementos de propagação de partículas maiores, dando origem à fuligem. Nos MCI-ICO ao lado do  $NO_x$ , os MP são as principais emissões. Tanto os HC quanto os MP são constituídos de centenas de substâncias químicas, sendo várias cancerígenas (Brunetti, 2012).

### **2.5 FUMIGAÇÃO**

A fumigação é uma técnica de suplementação de combustível em um MCI, podendo ser introduzida através de carburação ou injeção, onde o combustível auxiliar é atomizado no ar de admissão. Este sistema requer a adição de um carburador ou injetor de combustível na linha de admissão de ar, além de um sistema de alimentação independente, incluindo tanque de combustível separado, linhas e controladores (ABUS-QUDAIS; HADDAD; QUDAISAT, 2001).

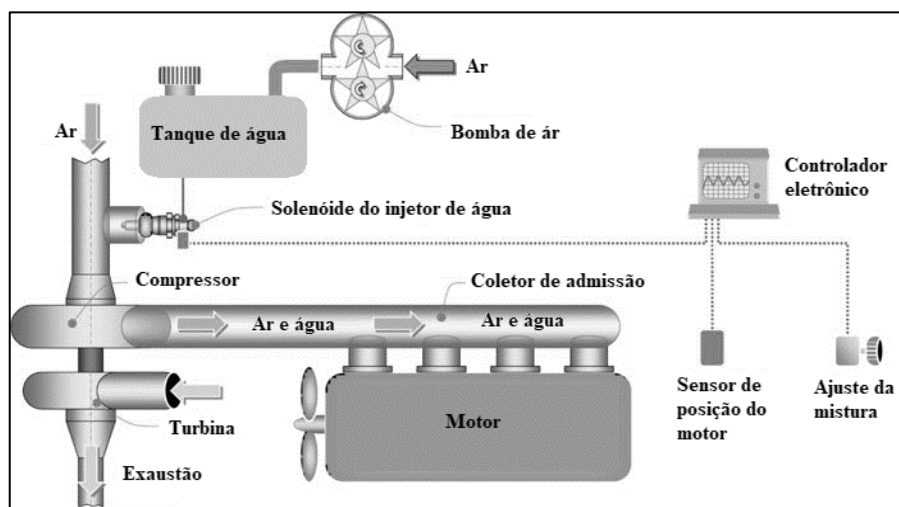
Abus-Qudais, Haddad e Qudaisat (2001) destacam algumas as vantagens da fumigação de ETH em um MCI-ICO:

- a) mínimas alterações nas características originais do motor e como o injetor é posicionado no sistema de admissão de ar, são necessários apenas alguns ajustes de injeção de combustível;
- b) flexibilidade de operação, pois como o sistema de fumigação é suplementar, esse pode ser desabilitado permitindo que o motor opere apenas em condição original;
- c) fumigação de ETH tende a redução do índice de fumaça no motor;
- d) possibilidade de substituição parcial de OD por ETH, onde até 50% da energia de combustível é entregue pelo ETH fumigado.

Nos últimos anos, vários estudos têm sido conduzidos avaliando a adição de água na combustão em MCI-ICO, sendo ela antes ou após do OD, visando a redução dos níveis de emissões de  $\text{NO}_x$ . O acréscimo de água pode ser realizado através da emulsão de água no OD, onde é necessário o uso de agitadores, injeção direta na câmara de combustão. Nesse caso pode-se utilizar bicos injetores especiais que injetam tanto o OD quanto a água, e pelo método de fumigação na admissão (KEGL; KEGL; PEHAN, 2012).

Segundo Kegl, Kegl e Pehan (2012), dos métodos conhecidos para atuar na redução de níveis de  $\text{NO}_x$ , a fumigação de água na admissão é uma alternativa de bom custo-benefício devido sua simplicidade de instalação ou adaptação, uma vez que um motor já em operação pode ser convertido para que possa atuar com o sistema em paralelo a condição original do motor. A Figura 7 mostra um sistema de fumigação de água controlado eletronicamente, onde a mistura pode ser ajustada através de um potenciômetro. Neste sistema, há a injeção de água atomizada em ar pressurizado, entretanto é perfeitamente possível que ocorra somente a injeção de água, sem que haja a necessidade de atomizá-la em outro meio para posterior injeção.

Figura 7 – Sistema de fumigação de água controlada eletronicamente



Fonte: Adaptado de Kegl, Kegl e Pehan (2012)

## 2.6 ESTUDOS NA ÁREA

Telli (2018) avaliou experimentalmente o desempenho de um MCI-ICO monocilíndrico operando em regime bicomcombustível através da fumigação de etanol. Os dados do comportamento do motor à plena carga foram coletados com o auxílio de um dinamômetro, variando a rotação de 1800 a 3000 rpm. A fumigação de ETH na admissão do motor representou uma substituição de energia de 11,5 a 52,3%. Sem alterações significativas nas curvas de torque

e potência do motor, observou um aumento da eficiência térmica em até 26,2% e eficiência exérgica em até 22,9%, e redução de máxima do índice de fumaça em 69%. Além disso houve reduções notáveis nas emissões de CO e CO<sub>2</sub> e na temperatura de escape. Por outro lado, houve aumento do consumo específico e emissões de HC. A amostra com substituição energética de 51,3% apresentou os melhores resultados de desempenho, eficiência, e redução de emissões de CO e CO<sub>2</sub>.

Machado (2018) analisou o desempenho e emissões de um gerador monocilíndrico quatro tempos a diesel, modelo Agrale M93, com potência nominal (NBR ISO 1585) de 10,8 kW comparando os resultados obtidos operando em condição original, e com fumigação de etanol na admissão. O controle e injeção do etanol foram através de equipamento de injeção programável, o qual variou o tempo de abertura do bico injetor de 1,5 a 4,5 ms, representando vazões de 0,1108 a 0,4102 g/s. A substituição de combustível variou de 17,02 a 56,16% à plena carga. A maior temperatura de escapamento registrada foi na condição original operando apenas com OD, registrando 378 °C, e a menor 331 °C, em plena carga e 56,16% de substituição. Nesta mesma condição também foi observada a menor emissão de NO<sub>x</sub>, ou seja, de 228 ppm, representando uma redução de 31,74% em relação à condição original. Entretanto, houve um aumento de 263% na emissão de CO.

Feitosa (2003) realizou em sua tese de doutorado o desenvolvimento de sistema de alimentação mista para MCI-ICO de quatro cilindros e quatro tempos, turboalimentado, que consiste no sistema de injeção de OD original do motor, e um sistema de fumigação de ETH na admissão do motor. Neste estudo foi realizada a substituição de até 55% da massa de OD por ETH. Os resultados obtidos foram a redução nas emissões de NO<sub>x</sub> (até 83%), MP (até 81%), CO<sub>2</sub> (até 18%), e um acréscimo de até 25,6% do rendimento térmico em plena carga. Assim como os estudos desenvolvidos por Telli (2018) e Machado (2018), o autor observou também o aumento do consumo específico, que neste estudo foi de em média 8,9% e das emissões de CO, sendo em média 2,5 vezes superior.

Tesfa et al. (2011) realizaram estudos em um MCI-ICO de quatro cilindros e quatro tempos, turboalimentado, deslocamento volumétrico de 4,4 litros, potência nominal de 74,2 kW, operando com e sem fumigação de água líquida na admissão e alimentado com biodiesel. Nesta avaliação a rotação do motor variou de 900 a 1800 rotações por minuto, com cargas de 105 a 315 Nm, e outro teste com 420 Nm de carga com rotações variando de 800 a 1600 rpm. Duas condições de fumigação foram avaliadas, sendo elas com taxa mássica de 1,8 kg/h e 3 kg/h. Os autores observaram uma redução de 30% nas emissões de NO<sub>x</sub> com fumigação de água de 1,8 kg/h, e de 50% com 3 kg/h. Em relação à eficiência térmica do motor, houve

redução de até 4% em baixas cargas (105 e 210 Nm), porém, em plena carga (420 Nm) houve ganho na eficiência de até 3% em todos os testes executados. Quanto às emissões de CO, todos levantamentos de dados com fumigação de 3 kg/h apresentou um aumento significativo dos níveis de até 60% em baixas cargas e rotações. Entretanto, operando com taxa de 1,8 kg/h, houve aumentos de 45% em baixas cargas e rotações, porém em cargas médias (315 Nm) houve um aumento de 25% em baixas rotações e redução da emissão de até 15% em altas rotações. Os autores não observaram variações significativas nas pressões internas do cilindro. O consumo específico não sofreu alterações em altas e médias cargas, havendo um pequeno aumento (até 4%) em baixas cargas. O estudo conclui que a aplicação de fumigação de água em MCI-ICO pode ser viável sem impactos significativos na potência e consumos específicos.

Tauzia, Maiboom e Shah (2010) realizaram um estudo em um MCI-ICO com deslocamento volumétrico de 2000 cm<sup>3</sup>, equipado com turbocompressor de geometria variável, intercooler, dois catalisadores e filtro de material particulado, e sistema de recirculação de gases (EGR – *Exhaust gas recirculation*), tecnologias as quais permite a este motor atender à norma Euro IV. O estudo avaliou o desempenho do motor operando com sistema de fumigação de ar/água em baixas, médias e altas cargas (45, 114, 140 e 200 Nm), comparando a eficiência do sistema de fumigação em relação ao sistema EGR. O sistema de fumigação operou à pressão de 8 bar. A quantidade de ar injetada neste método representou taxas inferiores à 2% da quantidade mássica total de ar admitido pelo motor. Foi constatada uma redução de até 50% das emissões de NO<sub>x</sub> com injeções água de 60 a 65% em relação a massa de combustível injetado. Em baixas cargas o sistema EGR apresenta excelente resultado não necessitando do sistema de fumigação para reduzir estes índices. Em altas cargas, o sistema de fumigação é capaz de reduzir a emissão de NO<sub>x</sub> sem um aumento significativo de emissão de MP, situação não possível com o uso do EGR. Em contrapartida houve aumento diretamente proporcional das emissões de CO em relação à variação da quantidade de água fumigada.

Prasad, Vijay e Gonsalvis (2018) avaliaram o comportamento de um MCI-ICO operando com injeção de água na câmara de combustão, variando o ponto de injeção da água. Os pontos de injeção avaliados foram de -24° a +16° em relação ao PMS, com intervalos de 8°, variando a taxa mássica de água injetada em função da taxa mássica de OD em razões de 1:1, 1:2, 1:3 e 1:4 (OD/água). O estudo verificou uma redução de até 85% das emissões de NO<sub>x</sub> operando com razão de 1:4 (quatro partes de água para uma parte de OD). A potência do motor diminuiu em função do aumento da taxa de água fumigada, atingindo uma redução máxima de 1,7%. O consumo específico aumentou de 12 a 20% em função do aumento da quantidade de água fumigada, variando de acordo com as condições de tempo de injeção e quantidade de água

injetada. Foi observada também uma redução da eficiência de 7 a 15%. As emissões de HC para proporções de 1:1 foi reduzida em todas tempos de injeção exceto à 0°, em proporções de 1:2 e 1:3, todos tempos de injeção reduziram as emissões de HC, exceto em +8° do PMS. Em contrapartida, quando a taxa de água injetada era de 4 vezes a taxa de OD, houve aumento das emissões de HC em todos testes realizados nesta condição. Quanto as emissões de CO, em todos testes avaliados houve aumento da emissão, porém, foi observado que há uma tendência de redução da emissão de CO quanto maior for o atraso da injeção de água, ou seja, na condição de maior atraso da injeção, em +16° em relação ao PMS, houve o menor aumento das emissões de CO, embora, ainda significativo.

Morsy (2015) avaliou experimentalmente o comportamento de um motor ciclo diesel operando em modo bicomustível através da fumigação de mistura de água e etanol. As taxas volumétricas de mistura água-ETH foram variadas de OD 25%-ETH 75%, OD 50%-ETH 50%, OD 75%-ETH 25% e 100% ETH. Para efeitos de análise foram coletados dados da temperatura dos gases de escape, e emissões como NO<sub>x</sub>, CO e HC. Para este estudo o autor utilizou um MCI-ICO monocilíndrico, com potência máxima de 6 kW. A substituição energética da mistura foi até 67%. A redução máxima de emissão de NO<sub>x</sub> verificada foi de 56%, utilizando a mistura 50%-50%. Em relação a emissão de CO, houve um aumento de 13 a 122%, onde a máxima ocorreu utilizando mistura 25%-75% e a mínima com fumigação de 100% ETH. Houve aumento da eficiência térmica na maioria dos dados coletados, atingindo um aumento máximo de 2,78%, onde apenas a mistura de 25%-75% houve perda da eficiência à 600 rpm. As emissões de HC aumentaram conforme havia maior quantidade de água na mistura, chegando à 43,13%, e operando com 100% o aumento máximo da emissão de HC foi de 10,4%. Morsy constatou que a implementação de sistemas de redução catalítica e filtros de materiais particulados podem trazer resultados positivos, tornando viável tecnicamente o uso de fumigação de misturas de água/etanol.

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

Este trabalho propôs a análise do desempenho e das respectivas emissões de um motor ciclo Diesel operando com fumigação de água líquida na admissão do motor, e em modo bicomcombustível operando com fumigação de etanol super-hidratado. Ambas configurações foram comparadas com a condição original de funcionamento do motor, respeitando todos parâmetros e ajustes homologados pelo fabricante do motor. A análise de desempenho foi baseada na aquisição de dados experimentais obtidos através de um dinamômetro ao qual o motor estava acoplado. Paralelamente aos ensaios de desempenho, foram adquiridos dados referentes as emissões geradas pelo motor. Os ensaios foram realizados no Laboratório de Motores da empresa Agrale S.A., sediada em Caxias do Sul – RS.

O fluxograma da Figura 8 apresenta de forma sucinta as etapas realizadas para atingir os objetivos gerais e específico deste trabalho.

Figura 8 – Fluxograma com as etapas de trabalho



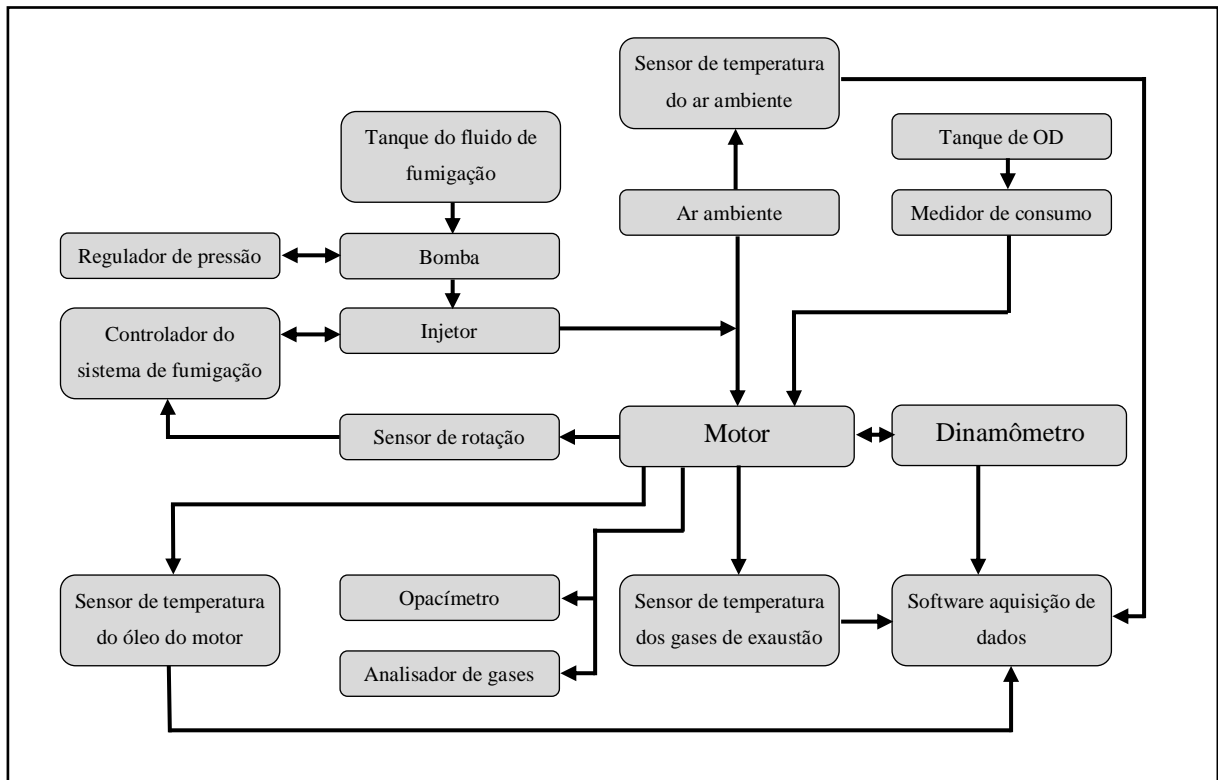
Fonte: o autor (2020)

A etapa inicial foi focada nos combustíveis utilizados para execução dos ensaios. O OD utilizado foi o S10 comercial, que contém em sua composição 11% de biodiesel. Para o sistema de fumigação foi utilizado o etanol hidratado comercial, a fim de garantir a proporção etanol-água para o ESH, adquirido em postos de abastecimento de combustíveis. Neste momento foram determinadas a proporção de água e etanol para formulação do ESH a ser utilizado nos testes.

Antes que fossem efetuados os ensaios dinamométricos, foi desenvolvido e implementado o sistema de fumigação, que foi montado imediatamente antes do coletor de admissão do motor e posterior ao sistema de captação do ar.

Com os combustíveis caracterizados e o sistema de fumigação funcional, foi iniciado a etapa dos ensaios experimentais conforme norma NBR ISO 1585, onde foram coletados todos os dados de desempenho do motor, como torque e potência desenvolvidos, consumo de OD, e dados da emissão do motor, como níveis de CO, CO<sub>2</sub>, HC, NO<sub>x</sub> e índice de fumaça além da temperatura dos gases de escapamento. Os dados obtidos foram corrigidos conforme a norma NBR ISO 1585. A Figura 9 demonstra graficamente como foi configurado todo o sistema para realização dos ensaios.

Figura 9 – Configuração do sistema para realização do experimento



Fonte: o autor (2020)

### 3.1 PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS

Todos os testes executados neste trabalho seguiram os mesmos parâmetros experimentais, bem como as características originais do motor, como taxa de compressão e ponto de injeção. As análises foram efetuadas conforme a norma NBR ISO 1585, afim de possibilitar a comparação dos resultados obtidos com e sem o uso do sistema de fumigação.

Os testes dinamométricos foram realizados conforme descritos a seguir:

- a) Inicialmente o motor operou no dinamômetro em condição original, ou seja, somente utilizando OD como combustível, e com o sistema de fumigação desativado. O motor foi submetido a rotação de torque máximo a plena carga, com o intuito que fossem atingidas a estabilização das temperaturas de operação do motor.
- b) Foi realizado o ensaio testemunha, com o motor operando somente com OD e com o sistema de fumigação desativado. O motor operou a plena carga, ou seja, a alavanca de aceleração estava fixada na condição de aceleração máxima. O dinamômetro foi configurado para uma rotação alvo, onde o próprio dinamômetro aplicou a carga necessária para que esta rotação alvo fosse atingida. Neste momento foi aguardado um tempo necessário até que o motor operasse em regime estável para que iniciasse a aquisição dos dados relevantes às análises, como torque, potência, temperatura do motor, índice de fumaça, emissões de poluentes e consumo.
- c) Para otimização do tempo para ensaios, foi adotado que as rotações avaliadas ocorressem sempre da maior rotação de teste até a menor rotação.
- d) Os ensaios com o sistema de fumigação, tanto para fumigação somente de água, quanto para a fumigação do ESH, foram conduzidos de maneira semelhante aos descritos no item b, com exceção de que o sistema de fumigação permanecia desativado até a estabilização do motor à rotação alvo desejada. Foram realizados quatro ensaios com quatro diferentes vazões volumétricas, sendo elas correspondentes à 10%, 15%, 20% e 25% da vazão volumétrica de OD, referente ao dado obtido no item b.
- e) As avaliações foram conduzidas no intervalo de rotação de 1800 a 2800 rpm, com intervalos de 200 rpm. O motor avaliado apresentou rotação máxima livre de 3050 rpm, tornando instável e não confiável os dados à 3000 rpm. Foram realizados dezoito ensaios, com nove configurações diferentes de operação do motor, sendo que cada configuração foi realizada dois ensaios

### 3.2 EQUIPAMENTOS

Nesta seção são descritos os equipamentos a serem utilizados para a realização das análises experimentais.



### 3.2.1 Motor

O motor utilizado nos ensaios foi um motor monocilíndrico marca Agrale, modelo M93 e destinado principalmente a aplicações de geração de energia, moto bomba, e como motorização em pequenos veículos agrícolas. O motor era novo e foi configurado para atendimento da curva F, que se destina à aplicação automotiva agrícola. As especificações do motor estão apresentadas na Tabela 5 e a Figura 10 mostra o mesmo montado no dinamômetro de testes.

Tabela 5 – Especificações técnicas do motor Agrale M93

Característica	Especificação
Arrefecimento	A ar
Potência máxima (NBR ISO 1585)	10,8 kW à 2750 rpm
Torque máximo (NBR ISO 1585)	39 N·m à 2750 rpm
Ciclo	4 tempos
Número de cilindros	1
Deslocamento volumétrico	668 cm <sup>3</sup>
Taxa de compressão	20:1
Consumo de combustível	240 g/kWh
Sistema de injeção	Mecânica direta

Fonte: Adaptado de Lintec (2020)

Figura 10 – Motor Agrale M93 montado no dinamômetro



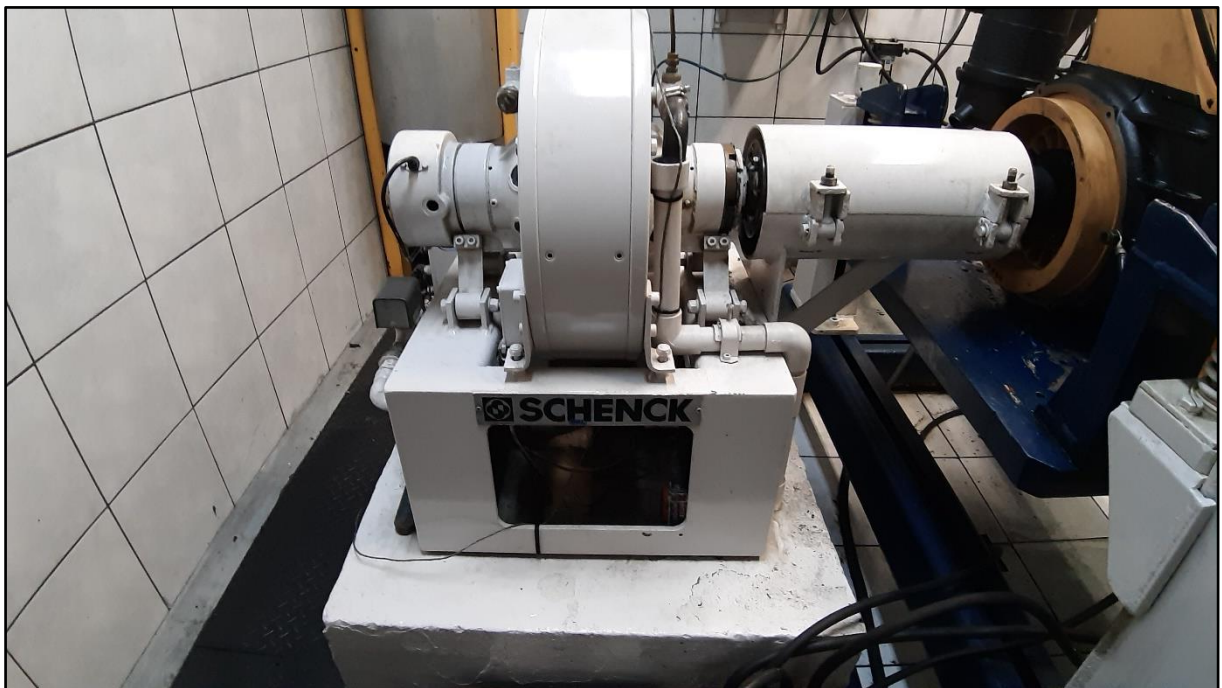
Fonte: o autor (2020)

### 3.2.2 Dinamômetro

Os ensaios dinamométricos foram realizados nas dependências da empresa Agrale S.A., a qual dispõe de um dinamômetro elétrico do tipo correntes de Foucault da marca Schenck, modelo W130 -130 kW, conforme Figura 11. Este equipamento opera com incertezas de rotação de  $\pm 10$  rpm, e força de atuação para aplicação de carga de  $< 0,2\%$ .

Dinamômetros elétricos de correntes de Foucault convertem a energia mecânica do motor em energia elétrica através de um freio magnético. O calor gerado pelo dinamômetro é dissipado por um sistema de arrefecimento à água a qual não participa da frenagem.

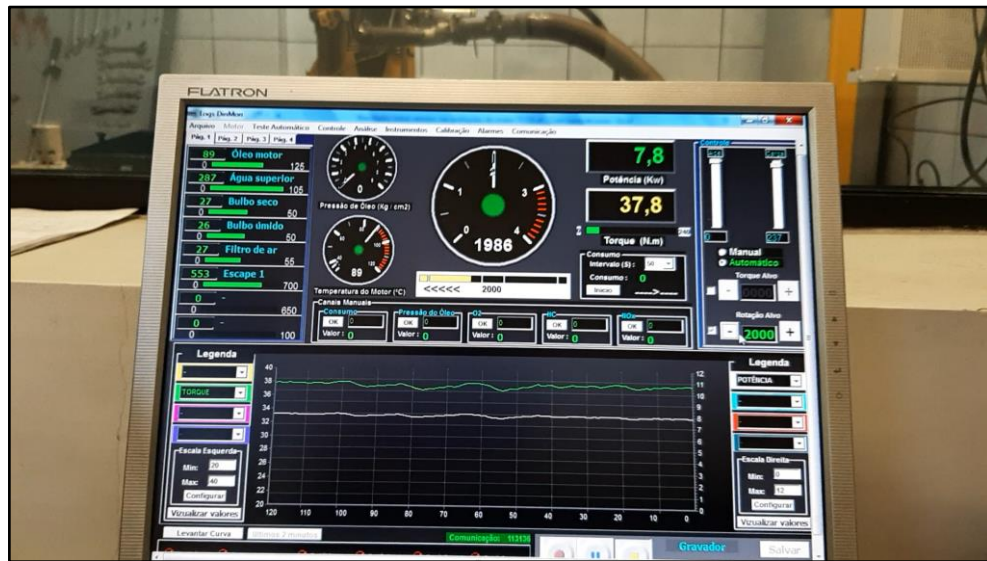
Figura 11 – Dinamômetro de correntes de Foucault



Fonte: o autor (2020)

Os dados coletados pelo dinamômetro são enviados para o painel de controle, onde também podem ser inseridas informações de demais sensores para monitoramento do funcionamento do motor. Os dados exibidos pelo painel de controle (Figura 12) durante a realização dos testes foram torque, potência, temperatura do ar de admissão, temperatura de bulbo seco do ar ambiente, temperatura de bulbo úmido do ar ambiente e temperatura de escapamento.

Figura 12 – Painel de controle

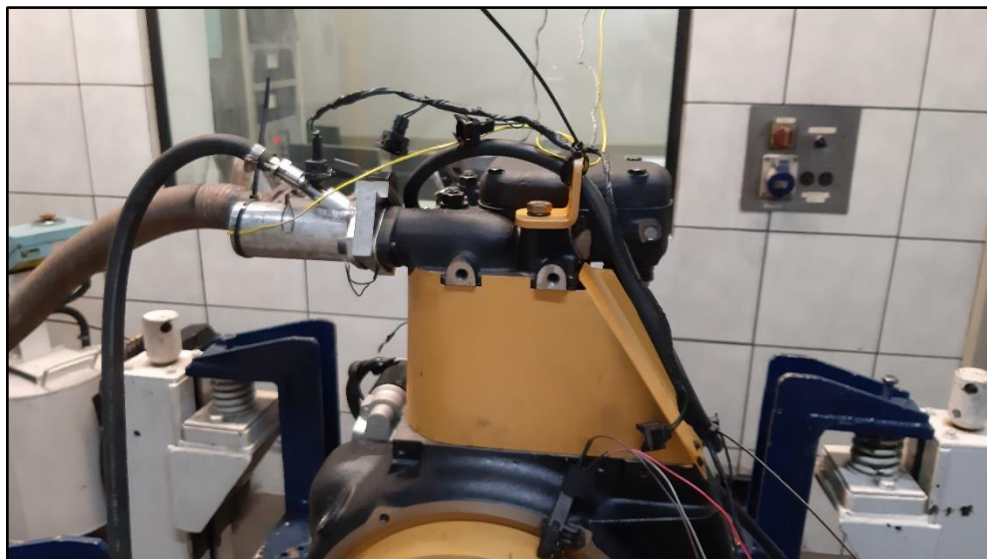


Fonte: o autor (2020)

### 3.2.3 Sistema de fumigação

O sistema de fumigação (Figura 13) foi implementado logo antes da admissão do motor o qual contará com um tanque suplementar para o fluido de fumigação, seja água ou ESH, uma bomba externa de combustível, marca Bosch, um filtro de combustível com regulador de pressão acoplado, operando à 3,5 bar, um bico injetor automotivo e um sensor de rotação do tipo Hall. O sistema de fumigação foi controlado eletronicamente a partir de um equipamento programável de injeção eletrônica, marca FuelTech, modelo Race Pro.

Figura 13 – Sistema de fumigação instalado no motor



Fonte: o autor (2020)



Para o funcionamento do sistema, inicialmente foi identificado o PMS do motor na fase de admissão, para isso, observou-se a marcação indicativa existente no volante do motor e também o ponto de acionamento da bomba injetora. Com este ponto travado, foi instalado um ímã no volante do motor, e alinhado com o sensor do tipo Hall, que fornecerá ao módulo de injeção eletrônica a referência para que ocorresse a injeção, bem como a rotação do motor.

A FuelTech Race Pro (Figura 14) permite a criação de mapas principais utilizando como referência a posição da borboleta de aceleração através do sensor TPS ou a pressão de admissão de ar através da leitura do sensor de pressão MAP, ou ainda utilizando ambos sensores para a criação de um mapa mais complexo. Com o mapa principal criado, é possível corrigir os mapas em função da rotação, temperatura do motor, temperatura do ar de admissão e tensão de bateria.

Figura 14 – Injeção programável FuelTech Race Pro



Fonte: o autor (2020)

Considerando que para a realização de testes o motor foi sempre operado à plena carga, o mapa foi criado exclusivamente em função do sinal do TPS, que ficou fixado em 100%. Os mapas foram ajustados em função da rotação do motor, uma vez que o consumo de OD varia com rotação, permitindo assim a melhor proporção possível buscando as vazões volumétricas propostas de 10% a 25% de fluido de fumigação (FF), seja água ou ESH. Os tempos de injeções utilizados foram de 2,00 ms, 2,96 ms, 4,00 ms e 4,96 ms.

### 3.2.4 Analisador de gases

Para a análise dos gases provenientes da combustão foi utilizado o equipamento da marca AVL, modelo DiCom 4000 (Figura 15), disponível no Laboratório de Motores da Agrale. Este equipamento quantifica as emissões de CO, CO<sub>2</sub>, e HC através do comprimento de onda infravermelha gerada por estas substâncias. As medições de NO<sub>x</sub> e O<sub>2</sub> são realizadas através de processos eletroquímicos. A tabela 6 mostra as especificações de operação do equipamento utilizado. A figura 15 ilustra a tela do analisador de gases usado neste trabalho.

Tabela 6 – Especificações do analisador de gases AVL DiCom 4000

Composto químico	Faixa de medição	Resolução
CO	0 a 10%	0,01 %
CO <sub>2</sub>	0 a 20%	0,1 %
HC	0 a 20.000 ppm	1 ppm
O <sub>2</sub>	0 a 4%	0,01 %
NO <sub>x</sub>	0 a 4.000 ppm	1 ppm

Fonte: o autor (2019)

Figura 15 – Analisador de gases AVL DiCOM 4000



Fonte: o autor (2020)

### 3.2.5 Medidor do índice de fumaça

O Laboratório de Motores da Agrale dispõe do equipamento da marca AVL, modelo Smoke Meter 409D2 (Figura 16), para realização da medida do índice de fumaça. Este equipamento realiza medidas na faixa 0,6 a 5,0 SZ-Bosch, com incerteza de medição de 2%, e resolução 0,1. Para

a mensuração do índice de fumaça, os gases da exaustão foram coletados pelo equipamento o qual direciona-os para um filtro de papel, que absorve parte dos gases, alterando assim sua coloração. O equipamento quantifica a fumaça através da refração de um feixe de luz emitido sobre este papel.

Figura 16 – Medidor de índice de fumaça AVL Smoke Meter 409D2



Fonte: o autor (2020)

### 3.2.6 Medidor de consumo de combustível

A medição de consumo de OD foi efetuada utilizando uma balança gravimétrica, marca AVL, modelo 7030 (Figura 17). Este equipamento realiza medições de 0,0 a 50,0 kg/h, com precisão para a massa de combustível medida de  $\pm 0,15\%$ .

Figura 17 – Balança gravimétrica AVL 7030



Fonte: o autor (2020)

Seu princípio de funcionamento é através do confinamento do combustível em uma balança de alta precisão, que realiza a pesagem da massa de combustível em um determinado período de tempo.

Para a realização da medição o equipamento deve ser configurado quanto ao tempo de medição, podendo ser ajustado entre 5 a 250 segundos. As medições foram realizadas utilizando a escala g/50s. A balança gravimétrica funciona tanto em modo automático, onde efetua as medições a cada 50 s sem interferência do operador, ou pode ser zerada antes de cada medida. Esta última metodologia foi adotada para os testes realizados neste trabalho.

### 3.2.7 Miniestação meteorológica

Para correção dos valores de potência conforme norma ISO 1585, foi utilizada uma miniestação meteorológica, marca Kestrel modelo 4000 (Figura 18). Dentre as funções do equipamento foram utilizadas medições de pressão barométrica, e umidade relativa do ar. Para medições de pressões a faixa de operação do equipamento é de 10 a 1100 mbar, resolução de 0,1 mbar e incerteza de  $\pm 1,5$  mbar. A faixa de operação de medições de umidade relativa é de 0 a 100%, com resolução de 0,1% e incerteza de  $\pm 3\%$ .

Figura 18 – Miniestação meteorológica Kestrel 4000



Fonte: o autor (2020)

### 3.2.8 Sensor de temperatura

Para a aquisição de dados quanto as temperaturas dos gases de escapamento do motor, temperatura do óleo lubrificante, temperatura de ar de admissão do motor e temperaturas ambientes (bulbo seco e bulbo úmido), foi utilizado um termopar do tipo K, com faixa de medição de  $-270\text{ }^{\circ}\text{C}$  à  $1372\text{ }^{\circ}\text{C}$ , com incerteza de medição de  $\pm 0,1\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Todos os sensores de temperatura estavam conectados ao software de aquisição de dados do banco de provas.

### 3.2.9 Vidrarias

A formulação da mistura de ESH foi realizada com o uso de uma proveta graduada marca Vidrolabor, com capacidade de 2000 ml e resolução de 20 ml. O baixo consumo de ESH, permitiu que as misturas fossem feitas com um litro de água e um litro de ETH. Para a medição da vazão do bico injetor em função do tempo de injeção configurado, utilizou-se uma pipeta volumétrica de quatro bulbos, marca Mazzochini, com escalas de 10, 15, 25 e 50 ml. As vidrarias utilizadas demonstradas na Figura 19.

Figura 19 – Vidrarias



Fonte: o autor (2020)



### 3.3 NOMENCLATURA DE IDENTIFICAÇÃO DOS TESTES

Com o intuito de padronizar, facilitando assim a identificação dos testes realizados neste trabalho, adotou-se a seguinte descrição conforme Quadro 2, salientando-se que os consumos de OD foram mantidos como nos ensaios testemunhas.

Quadro 2 – Nomenclatura dos ensaios

Nomenclatura do ensaio	Descrição do ensaio
ETH0W0	Ensaio testemunha na condição original, sem fumigação
ETH50W50_10	50% de etanol hidratado e 50% de água, 10% do volume de OD
ETH50W50_15	50% de etanol hidratado e 50% de água, 15% do volume de OD
ETH50W50_20	50% de etanol hidratado e 50% de água, 20% do volume de OD
ETH50W50_25	50% de etanol hidratado e 50% de água, 25% do volume de OD
ETH0W100_10	0% de etanol hidratado e 100% de água, 10% do volume de OD
ETH0W100_15	0% de etanol hidratado e 100% de água, 15% do volume de OD
ETH0W100_20	0% de etanol hidratado e 100% de água, 20% do volume de OD
ETH0W100_25	0% de etanol hidratado e 100% de água, 25% do volume de OD

Fonte: o autor (2020)

### 3.4 CORREÇÃO DOS DADOS DE POTÊNCIA CONFORME NORMA NBR ISO 1585

É notável que todo e qualquer teste de caráter científico as condições locais são influenciadoras diretas nos resultados obtidos. Fatores como a temperatura e pressão atmosférica podem gerar impactos significativos no desempenho de um MCI, pois tais grandezas definiram a quantidade real de massa de ar aspirada pelo motor, e conseqüentemente a potência gerada.

Como forma de balizar os ensaios dinamométricos, a norma NBR ISO 1585, não apenas define parâmetros e procedimentos para a execução dos ensaios, como também fornece uma série de equações as quais ajustam os valores de potência observada para condições de referência, permitindo assim que qualquer ensaio executado sob mesma norma possa ser comparado cientificamente. As condições de referência na norma são a temperatura do ar de 285 K e pressão atmosférica de 99 kPa.

Conforme item 6.1 da norma NBR ISO 1585, a correção da potência líquida em MCI é realizada através da Equação (13):

$$P_{ref} = \alpha \cdot P_y \quad (13)$$

onde,  $P_{ref}$  é a potência de referência, ou potência líquida corrigida [kW],  $\alpha$  é o fator de correção e  $P_y$  é a potência observada no ensaio [kW].

O fator de correção  $\alpha$  para MCI-ICO deve ser calculado através da Equação (14).

$$\alpha = (f_a)^{f_m} \quad (14)$$

onde,  $f_a$  é o fator atmosférico, obtido através da equação 14 e  $f_m$  é o fator do motor, obtido através das Equações 15 e 16.

$$f_a = \left(\frac{99}{p_d}\right) \cdot \left(\frac{T}{298}\right)^{0,7} \quad (15)$$

$$f_m = 0,036 \cdot q_c - 1,14 \quad (16)$$

onde,  $p_d$  é a pressão atmosférica seca [kPa], e  $q_c$  é definido pelas Equações (17) e (18)

$$q_c = \frac{q}{r} \quad (17)$$

$$q = \frac{z \cdot \dot{m}}{L \cdot n} \quad (18)$$

onde,  $L$  é o deslocamento do motor [L]  $\dot{m}$  é a taxa mássica de combustível [g/s] e  $r$  e  $z$  são definidos pela norma em função do tipo de motor

### 3.5 CÁLCULO DO PODER CALORÍFICO INFERIOR

O PCI foi calculado através da Equação de Mendeleev (19), sugerida em Vlassov (2001):

$$PCI = 339 \cdot \%C + 1030 \cdot \%H - 109 \cdot (\%O - \%S) - 24 \cdot \%W \quad (19)$$

onde, %C, %H, %O e %S são os percentuais em massa dos elementos (carbono, hidrogênio, oxigênio e enxofre) que compõe o combustível, e  $W$  representa o percentual de água presente.

Para calcular a eficiência de conversão, é necessário considerar o PCI dos combustíveis, portanto, se faz necessário conhecer o PCI da mistura OD e ESH. Para determinar o PCI de misturas foi utilizada a Equação (20)

$$PCI_m = PCI_{ESH} \cdot y_{ESH} + PCI_{OD} \cdot y_{OD} \quad (20)$$

onde,  $y$  representa a fração mássica presente na mistura.

### 3.6 CÁLCULO DE EFICIÊNCIA DE CONVERSÃO DOS COMBUSTÍVEIS

A eficiência de conversão dos combustíveis, foi calculada através da Equação (21)

$$\eta = \frac{P_y \cdot 3600}{(\dot{m}_{ESH} + \dot{m}_{OD}) \cdot PCI_m} \quad (21)$$

onde,  $P_y$  é a potência observada [kW],  $\dot{m}_{ESH}$  é a taxa mássica de ESH [g/h],  $\dot{m}_{OD}$  é a taxa mássica de OD e  $PCI_m$  é o PCI das misturas [MJ/kg].

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 PODER CALORÍFICO INFERIOR DOS COMBUSTÍVEIS

Para o OD e o ESH, o PCI foi calculado através da Equação (19) apresentada no item 3.5. A Tabela 7 apresenta os dados considerados para o cálculo e os resultados obtidos. Os dados referentes à composição química dos combustíveis avaliados foram obtidos através dos laudos técnicos disponíveis nos Anexos A e B, realizados pela Cientec.

Tabela 7 – Poder calorífico inferior dos combustíveis

<b>Característica</b>	<b>Óleo Diesel</b>	<b>Étanol super-hidratado</b>
H <sub>2</sub> O	0 %	50%
Cinzas	0%	0%
C	86,1%	24,2%
H	12,4%	6,57%
N	0,04%	0,02%
S	0,04%	0%
O	1,4%	19,09%
PCI (bs)	41.186,1 kJ/kg	25.856,0 kJ/kg
PCI (bu)	41.186,1 kJ/kg	11.678,0 kJ/kg

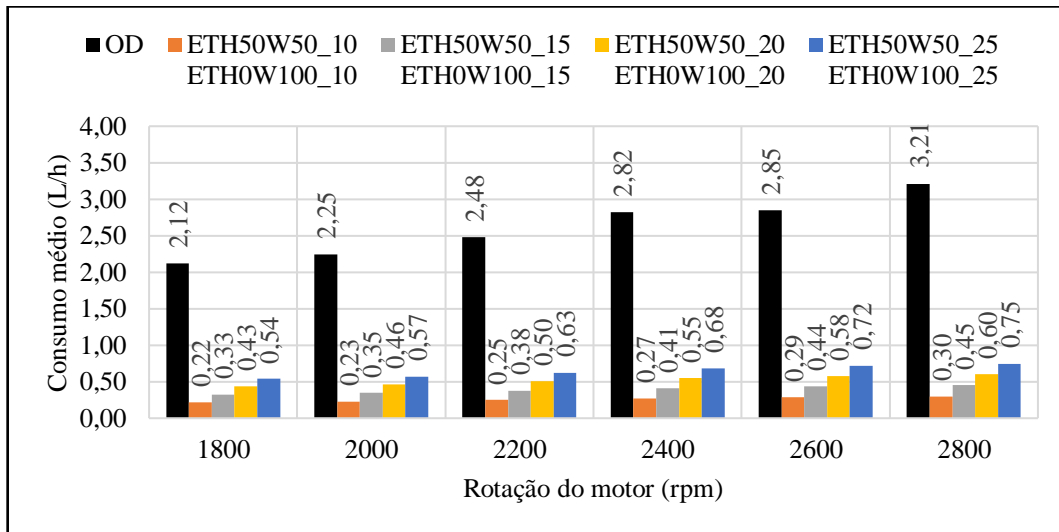
Fonte: o autor (2020)

### 4.2 CONSUMO MÉDIO DE OD E FF

Para determinação do ajuste da FuelTech, realizou-se inicialmente o ensaio testemunha, e assim foi possível determinar o melhor ajuste possível para atingir os percentuais volumétricos propostos.

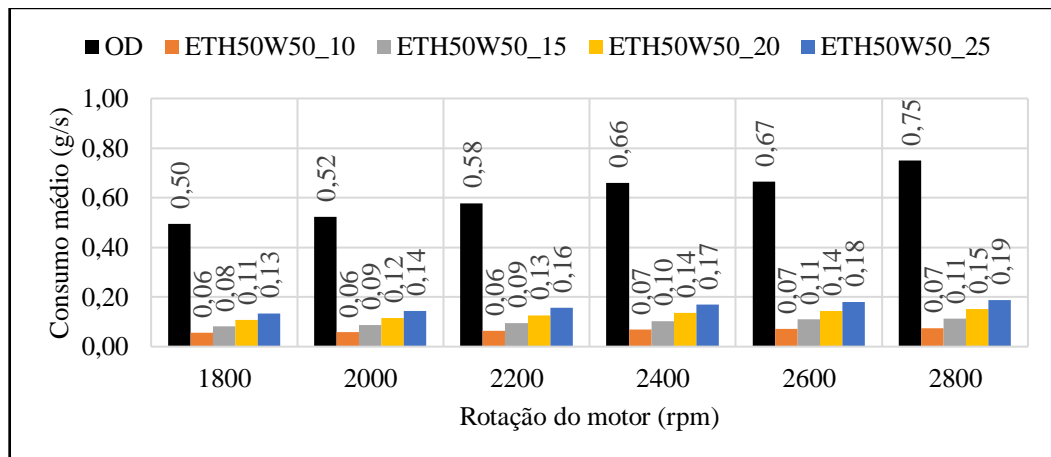
As diferenças percentuais entre os consumos medidos e propostos ocorrem por limitações técnicas do modelo de injeção utilizado. Os ajustes em função da rotação somente puderam ser corrigidos a cada 500 rpm, o que representou alguns desvios expostos nas figuras apresentadas a seguir. A Figura 20 mostra os consumos volumétricos de OD e FF para cada faixa de rotação ensaiada. As Figuras 21 e 22 mostram os consumos mássicos de OD, ESH e água para cada faixa de rotação ensaiada.

Figura 20 – Consumo volumétrico de OD e FF (L/h)



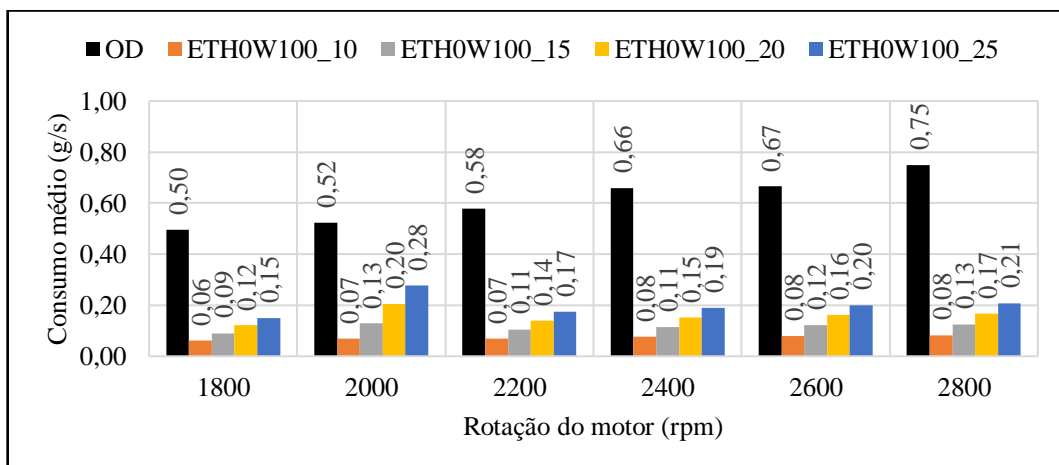
Fonte: o autor (2020)

Figura 21 – Consumo mássico de OD e ESH (g/s)



Fonte: o autor (2020)

Figura 22 – Consumo mássico de OD e água (g/s)



Fonte: o autor (2020)

### 4.3 ANÁLISE DE DESEMPENHO

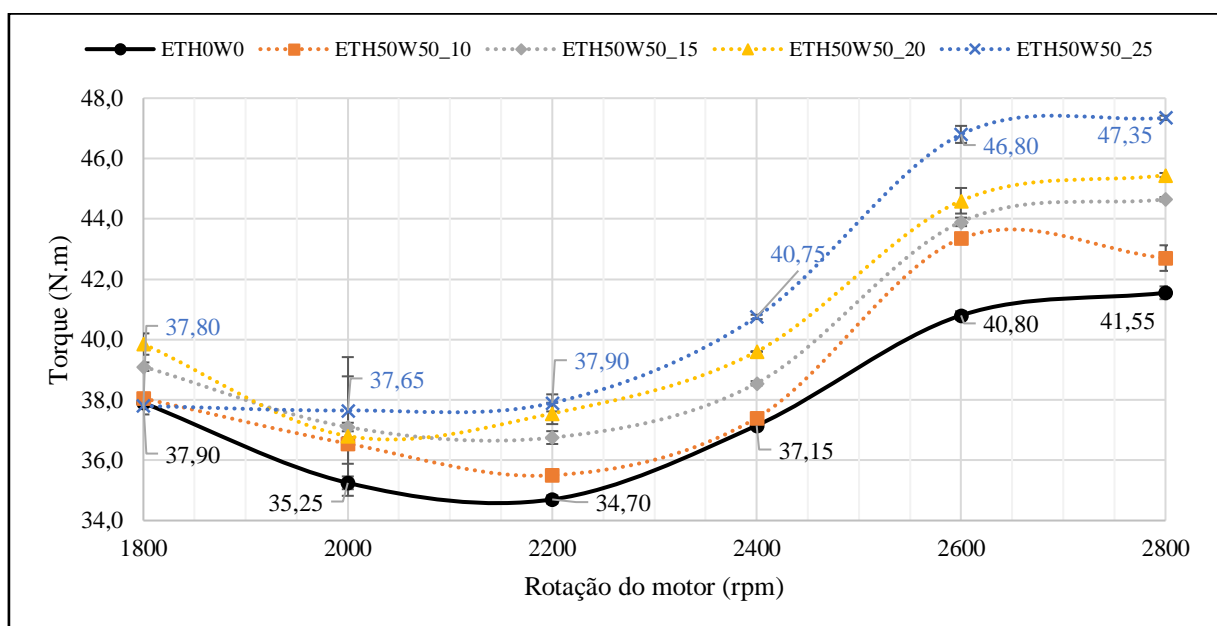
De modo geral pode-se afirmar que o desempenho do motor foi satisfatório, superando as expectativas iniciais. Nos itens a seguir são apresentados os dados observados de torque, potência, consumo, eficiência de conversão dos combustíveis, além dos fatores de correção conforme norma NBR ISO 1585 e os respectivos dados de potência corrigida. Os dados coletados durante os ensaios estão apresentados no Apêndice A. O Apêndice B apresenta os dados calculados a partir dos dados coletados.

#### 4.3.1 Torque

Todos ensaios apresentaram ganhos de torque, não sendo observado nenhuma redução significativa no torque. O ensaio ETH50W50\_25 apresentou o maior ganho médio de torque, 9%, enquanto o ensaio ETH50W50\_10 apresentou o menor ganho médio de torque na ordem de 3%.

Durante o ensaio ETH50W50\_25 não foi notado ganho de torque a 1.800 rpm, o que gerou uma diferença significativa do comportamento da curva em relação aos demais ensaios. A Figura 23 demonstra o comportamento constante similar entre 1.800 e 2.200 rpm, além de mostrar graficamente os ensaios executados com fumigação de ESH.

Figura 23 – Torque do motor (N.m) com fumigação de ESH



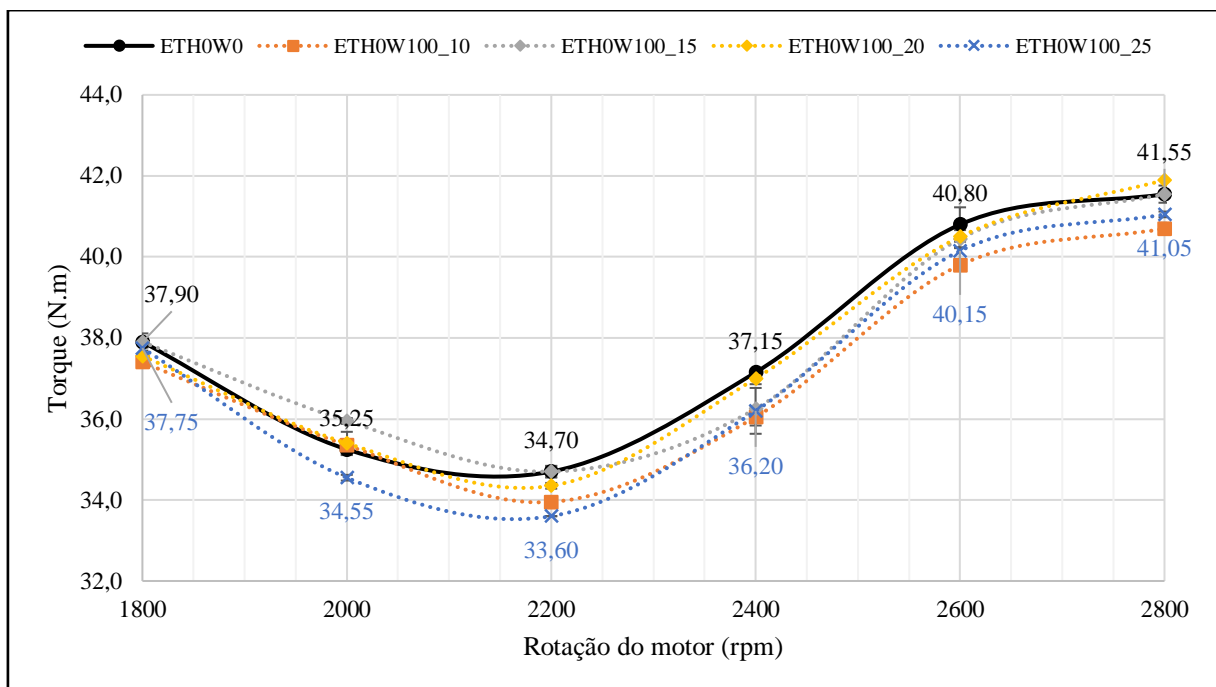
Fonte: o autor (2020)

Os ensaios com fumigação de água apresentaram um comportamento regular das curvas de torque onde não foi observado a linearidade inicial (1800, 2000 e 2200 rpm) apresentada no ensaio ETH50W50\_25. Em geral, houve redução de torque média, sendo mais representativo nos ensaios ETH0W100\_10 e ETH0W100\_25, ambos de 1,8%.

O ensaio ETH0W100\_15 apresentou ganho de torque de 2% a 2.000 rpm. Nessa mesma rotação e proporção volumétrica de fumigação, houve também ganho durante os ensaios de fumigação de ESH, e ganho de potência com fumigação de água. Isso pode indicar uma certa instabilidade da combustão nessa faixa de rotação, uma vez que o motor está em uma faixa de redução de torque e potência.

As maiores perdas de torque ocorreram nas faixas de 2.400 rpm à 2.600 rpm no ensaio ETH0W100\_25, chegando à redução de 3% do torque em relação ao ensaio testemunha. Durante o ensaio ETH0W100\_25 foi observada a maior perda de torque, 3,2% a 2.200 rpm. A Figura 24 exhibe as curvas de torques observadas durante os testes.

Figura 24 – Torque do motor (N·m) com fumigação de água



Fonte: o autor (2020)

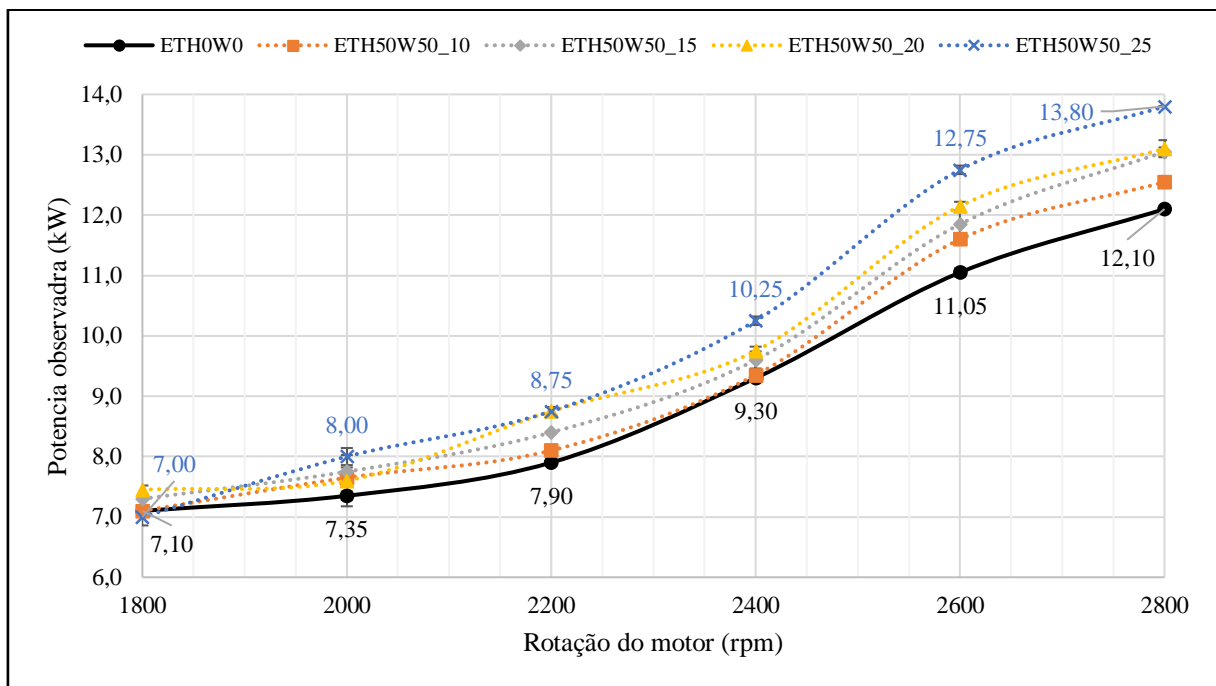
#### 4.3.2 Potência observada

De modo geral, potência observada com fumigação de ESH foi superior à amostra testemunha em todos os ensaios. O aumento da potência ocorreu em função do aumento de combustível disponível para queima, pois conforme descrito no item 3.1 não houve ajuste do

débito de combustível. Os ensaios foram realizados assim para manter a mesma metodologia nos ensaios com fumigação somente de água.

O ensaio ETH50W50\_25 apresentou o maior ganho de potência médio, 9,6% com ganho máximo de 15,4% a 2600 rpm, e a maior redução pontual de potência de 1,4%. O ensaio de ETH50W50\_15 apresentou o menor ganho de potência médio, 2,6% com ganho máximo de 5% a 2600 rpm. A Figura 25 mostra os dados de potência de cada ensaio em função da rotação.

Figura 25 – Potência observada (kW) com fumigação de ESH



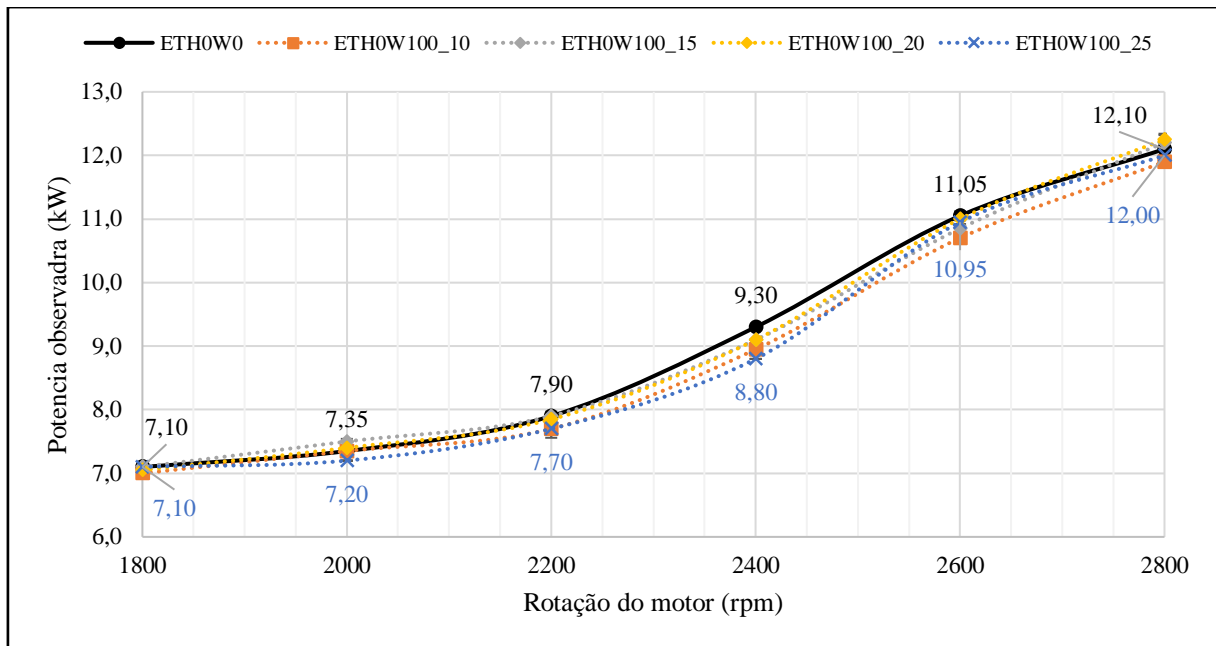
Fonte: o autor (2020)

Os ensaios de fumigação com água apresentaram de modo geral leve redução da potência. Essa redução de potência é creditada a uma possível redução da temperatura de combustão gerando impactos na qualidade da combustão.

Os ensaios ETH0W100\_10 e ETH0W100\_25 apresentaram redução média na potência na ordem de 2%, enquanto nos ensaios ETH0W100\_15 e ETH0W100\_20 não houve redução significativa na potência. A maior redução de potência observada foi de 5,4%, no ensaio ETH0W100\_25 a 2.400 rpm. Durante o ensaio ETH0100\_15 a 2.000 rpm observou-se o maior ganho de potência, 2%. A Figura 26 apresenta graficamente os dados observados.



Figura 26 – Potência observada (kW) com fumigação de água



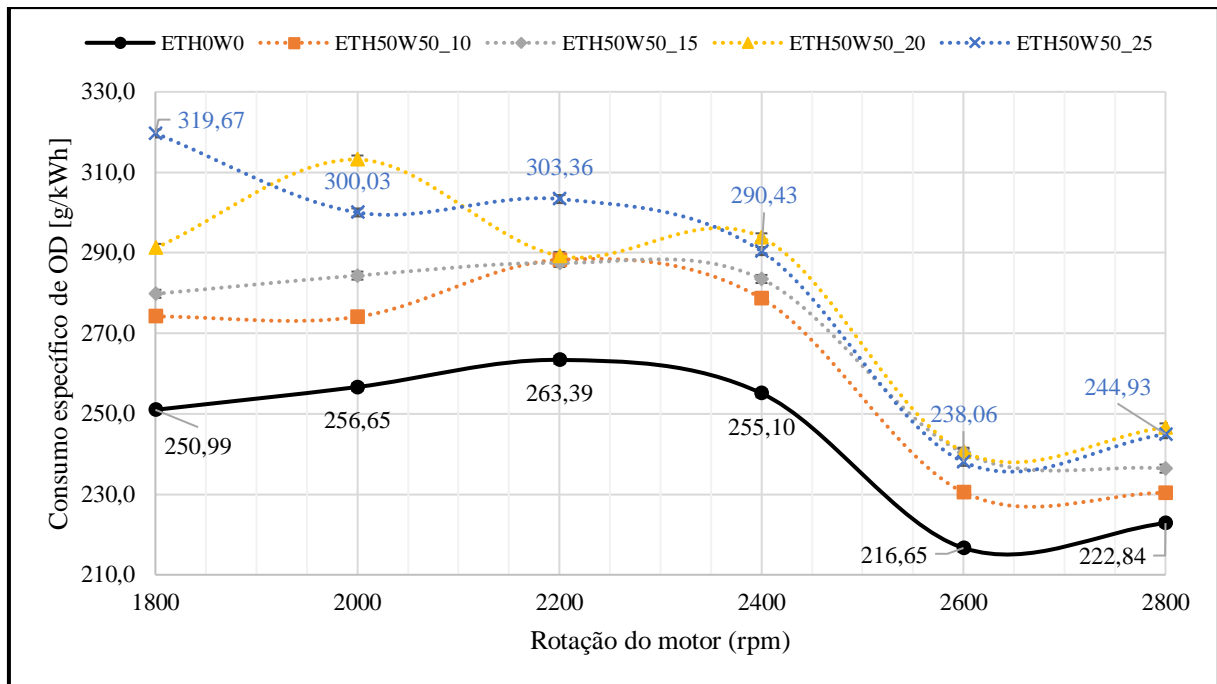
Fonte: o autor (2020)

### 4.3.3 Consumo específico de combustíveis

Conforme exposto no capítulo 3, durante os ensaios de fumigação de ESH não houve correção da injeção de OD, desta forma, o motor operou em regime de mistura menos pobre, o que antecipadamente já era previsto um aumento do consumo específico de combustível. O consumo específico apresentado durante os ensaios de fumigação de ESH não apresentaram um comportamento semelhante ao ensaio testemunha na faixa de 1.800 a 2.000 rpm, especialmente o ensaio ETH50W50\_20.

Para os ensaios com ESH, o consumo específico médio aumentou de 7,4%, 9,9%, 14,1% e 15,5% para os ensaios com fumigação de ETH50W50\_10, ETH50W50\_15, ETH50W50\_20 e ETH50W50\_25, respectivamente. O maior aumento de consumo específico observado ocorreu a 1.800 rpm no ensaio ETH50W50\_25, representando um aumento de 27,4%. O consumo do ensaio testemunha nessa rotação foi de 250,99 g/kWh, e o consumo no ensaio ETH50W50\_25 foi de 319,67 g/kWh. O ensaio ETH50W50\_10 por apresentar a menor adição de ESH à combustão, apresentou os menores acréscimos do consumo específico, com aumento máximo de 9,4% a 2.200 rpm e o menor aumento de 3,4% a 2.800 rpm. A Figura 27, apresenta graficamente as curvas de consumo específico observadas durante os testes.

Figura 27 – Consumo específico de OD (g/kWh) com fumigação de ESH



Fonte: o autor (2020)

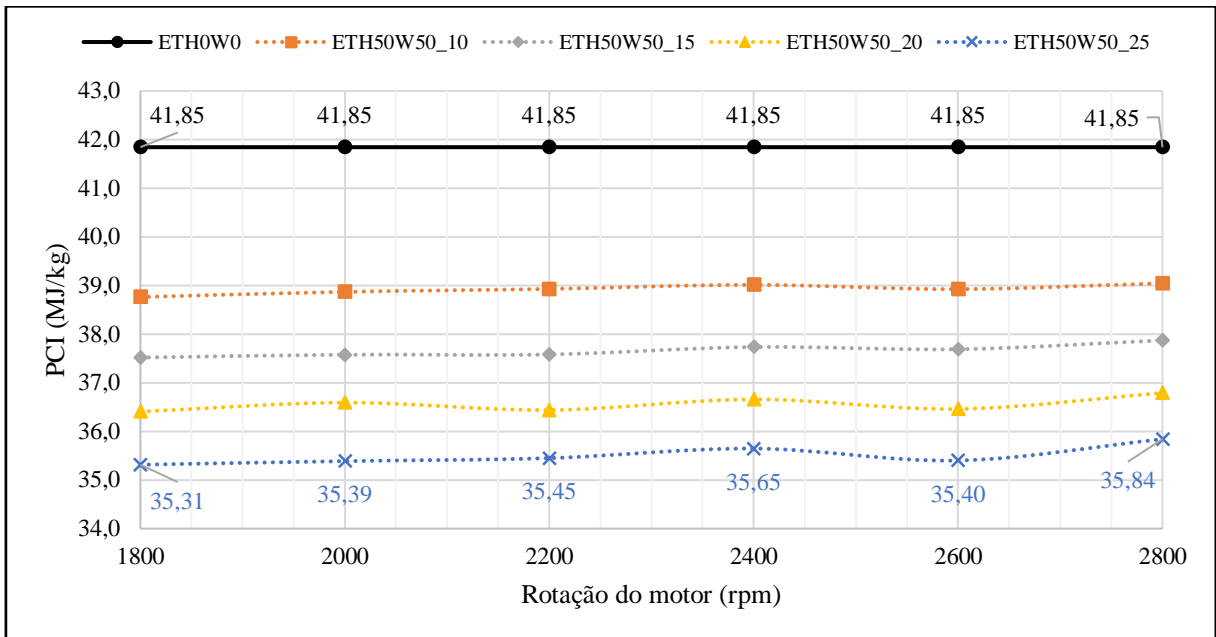
Durante os ensaios com fumigação com água, foi observado um leve aumento do consumo específico, o que em um primeiro momento não era esperado, uma vez que o motor estava operando a plena carga como no ensaio testemunha, sem correção ou ajustes no débito de OD.

#### 4.3.4 Eficiência de conversão dos combustíveis

Conforme a Equação (17), o aumento da potência observada para os ensaios de fumigação com ESH, poderia ocorrer um ganho na eficiência de conversão dos combustíveis, porém, outros dois fatores importantes que compõe este cálculo foram observados. Houve o aumento do consumo específico de OD, exposto no item anterior, e a redução do PCI da mistura dos combustíveis (OD e ESH). Esta redução do PCI está exposta na Figura 28.

A variação do PCI em função da rotação nos ensaios com fumigação de ESH é devido as limitações técnicas de ajustes da injeção programável utilizada. A correção somente pode ser configurada a cada 500 rpm, e os demais pontos a injeção programável estima através de cálculos de interpolação. Isso resultou em uma variação do volume e massa do FF em relação ao percentual desejado. No Apêndice B estão apresentados numericamente as vazões mássicas de OD e ESH de cada ensaio.

Figura 28 – PCI das misturas (MJ/kg) dos ensaios com fumigação de ESH

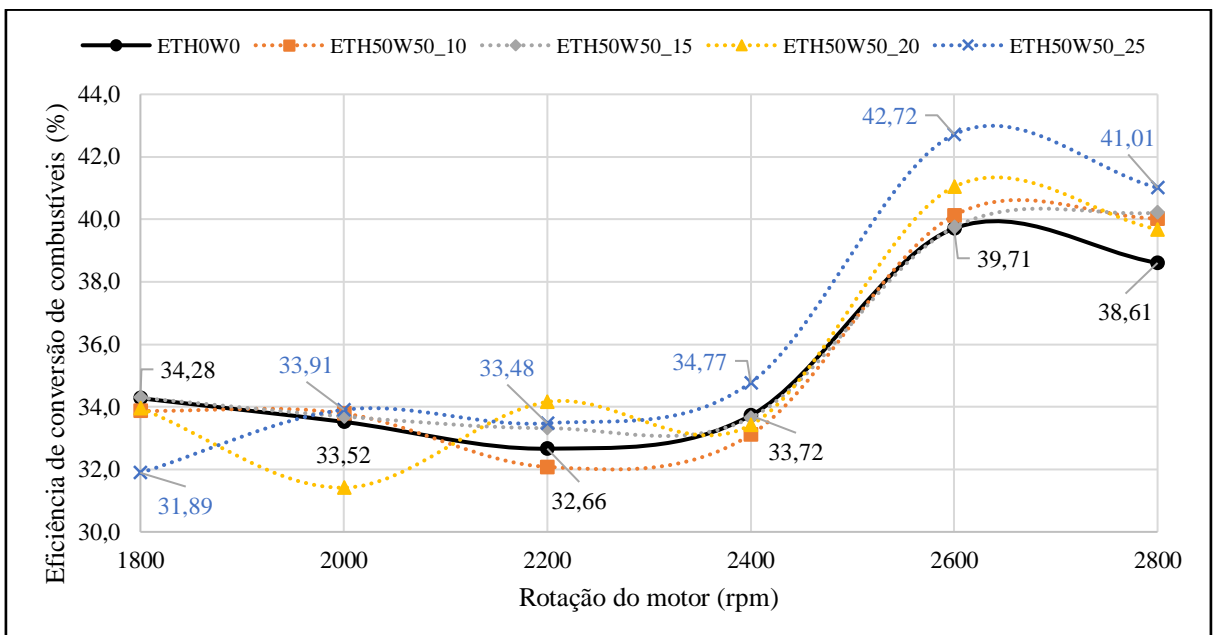


Fonte: o autor (2020)

É importante observar que o comportamento linear dos PCI dos ensaios com ESH comprovam que as correções efetuadas nos tempos de injeção foram adequadas.

Sendo assim, os três fatores que compõem o cálculo de determinação da eficiência foram alterados. A Figura 29, mostra os dados de eficiência para cada rotação ensaiada com fumigação de ESH.

Figura 29 – Eficiência de conversão (%) dos combustíveis com fumigação de ESH



Fonte: o autor (2020)

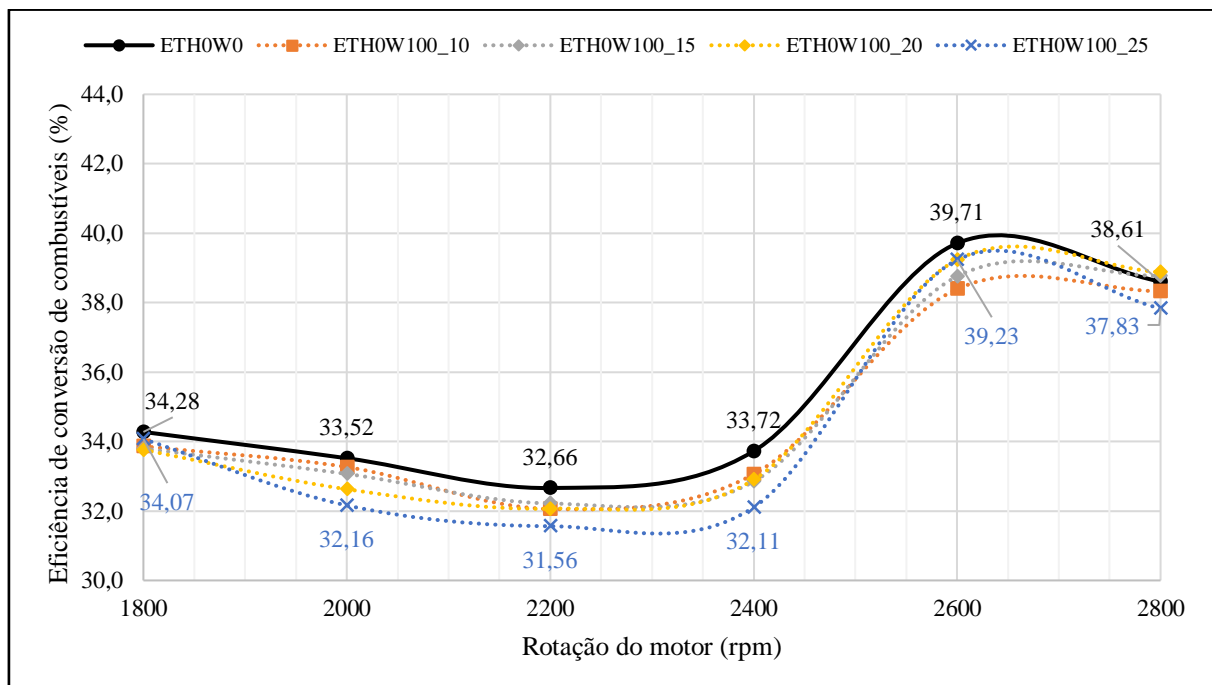
A grande variação da eficiência do ensaio ETH50W50\_20 é explicada pela também variação observada do consumo específico para esta mesma faixa de rotação. Não foram observadas variações de potências nesta faixa.

De modo geral, houve um leve ganho na eficiência em todos os ensaios com fumigação de ESH, sendo mais evidente no ensaio ETH50W50\_25 o qual houve um aumento médio de 2,3%. Neste mesmo ensaio houve perda de eficiência de 7% a 1.800 rpm e ganho de 7,6% a 2.600 rpm. Pode-se dizer que em altas rotações (2.600 a 2.800 rpm) o ganho médio foi de 6,9%.

Em todos os ensaios com ESH, em altas rotações observou-se o aumento da eficiência de conversão. Este ganho na eficiência pode ter ocorrido devido as características de maior velocidade de combustão do ETH em relação ao OD, favorecendo assim uma melhor queima e aproveitamento energético do ESH.

Os ensaios com fumigação de água, que apresentaram redução da potência, porém, mantendo os mesmos valores do PCI, e com o aumento do consumo específico de combustível, naturalmente ocorreu uma redução da eficiência de conversão nos ensaios, conforme é demonstrado na Figura 30.

Figura 30 – Eficiência de conversão (%) dos combustíveis com fumigação de água



Fonte: o autor (2020)

É notável que há uma forte correlação entre a perda da eficiência e o acréscimo de água na fumigação. Volumes maiores de água fumigada, possivelmente reduzirão ainda mais a

eficiência do motor. O ensaio ETH0W100\_25 apresentou a maior redução média da eficiência (2,7%) e com a maior redução pontual de 4,8% a 2.400 rpm.

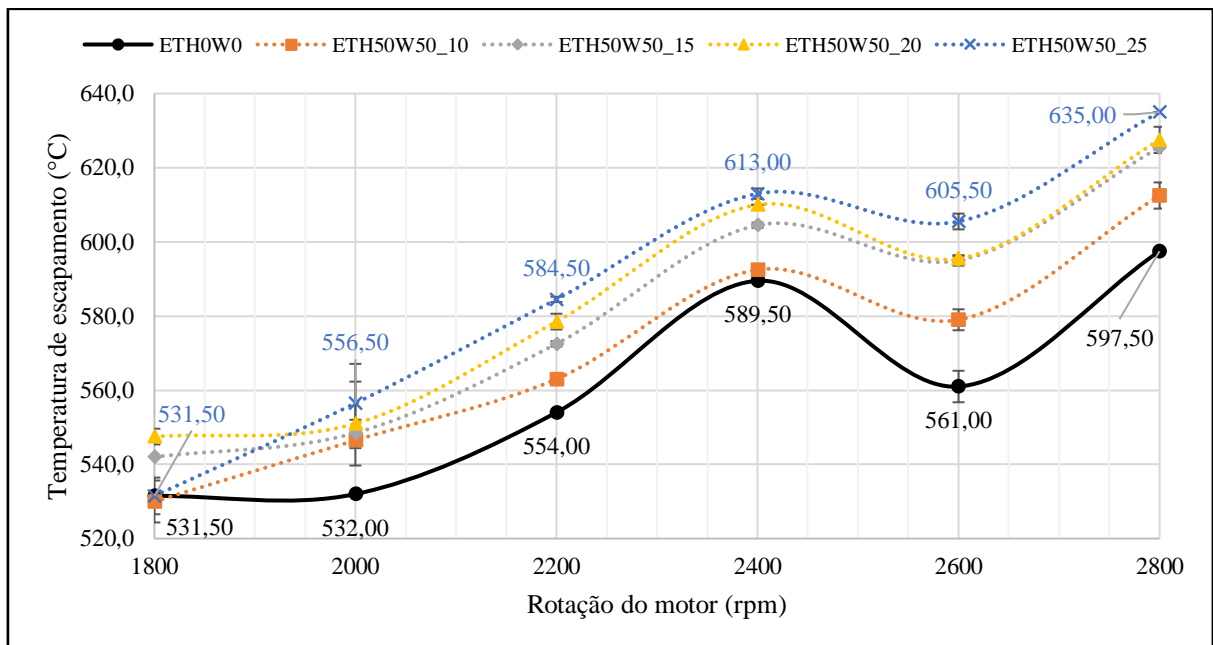
#### 4.3.5 Temperatura dos gases de escapamento

A temperatura dos gases de escapamento é um bom indicador dos fenômenos que ocorrem no interior do motor, como por exemplo a temperatura de combustão. Todos os ensaios com fumigação de ESH foi observado o aumento da temperatura média em todas as faixas de rotação, com exceção do ensaio ETH50W50\_10 que apresentou uma redução de 0,3% (530,0 °C) com relação ao ensaio testemunha (531,5°C), o que é desprezível, considerando o desvio padrão desta medida ser de 5,66 °C.

O maior registro de aumento da temperatura ocorreu no ensaio ETH50W50\_25, registrando um acréscimo de 7,9%, atingindo 605,5°C contra 561,0°C na mesma rotação do ensaio testemunha.

O aumento da temperatura pode ser uma consequência direta do aumento da potência do motor. A Figura 31 mostra os dados coletados nos ensaios com fumigação de ESH.

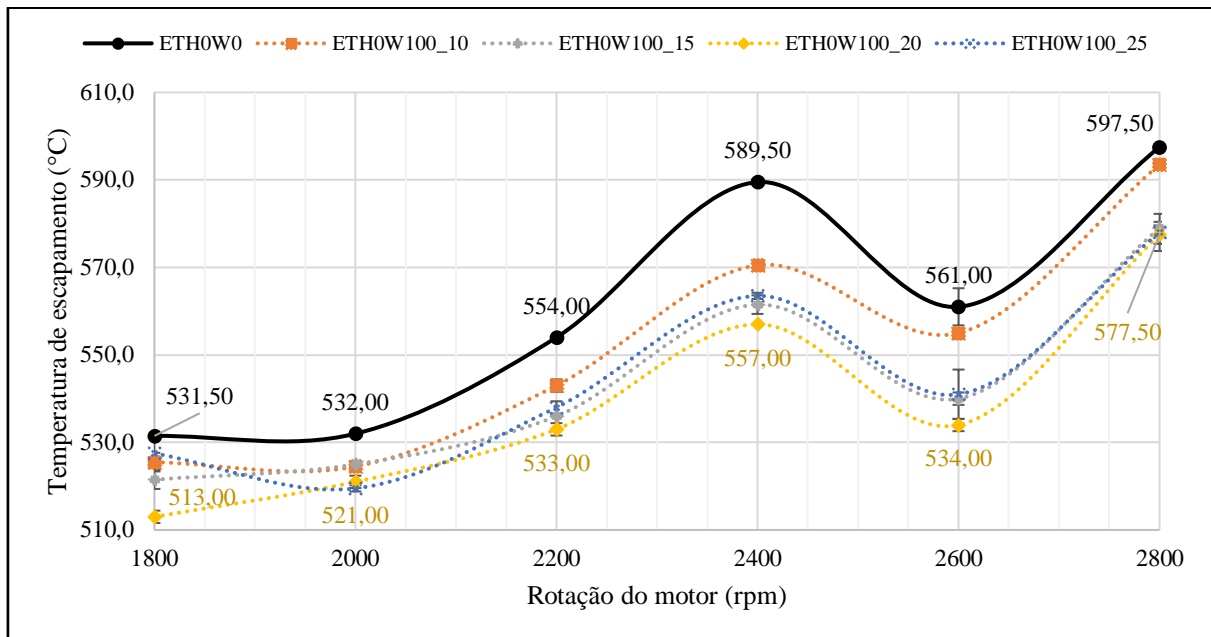
Figura 31 – Temperatura de escapamento (°C) com fumigação de ESH



Fonte: o autor (2020)

Para os ensaios com fumigação de água, observou-se um comportamento oposto aos ensaios de fumigação de ESH. Em todos os ensaios foi observada a redução da temperatura. A Figura 32 apresenta os dados registrados de temperatura dos gases de escapamento.

Figura 32 – Temperatura de escapamento (°C) com fumigação de água



Fonte: o autor (2020)

Um ponto importante a ser ressaltado é que as temperaturas dos gases de descarga apresentaram tendência de aumento com fumigação acima de 20% do volume de OD injetado. Portanto, o ensaio ETH0W100\_25 apresentou resultados de temperaturas de escapamento superior ao ensaio ETH0W100\_20, indicando que o aumento do volume de água injetado não é o único fator capaz de controlar a temperatura de combustão. No ensaio ETH0W100\_25 a 1.800 rpm observou-se um resultado da temperatura muito próximo do ensaio testemunha, indicando que maiores volumes de água fumigada podem não apresentar mais este fenômeno de redução da temperatura do escapamento. A maior redução pontual da temperatura ocorreu no ensaio ETH0W100\_20 a 2.400 rpm, reduzindo 5,5% da temperatura.

#### 4.4 ANÁLISE DAS EMISSÕES

Durante os ensaios, a análise das emissões permitiu um entendimento melhor dos fenômenos causados pela implementação do sistema de fumigação. Ambos os métodos

utilizados, seja de fumigação de ESH ou de água, claramente apresentaram resultados que demonstram uma combustão incompleta.

#### 4.4.1 Monóxido de carbono

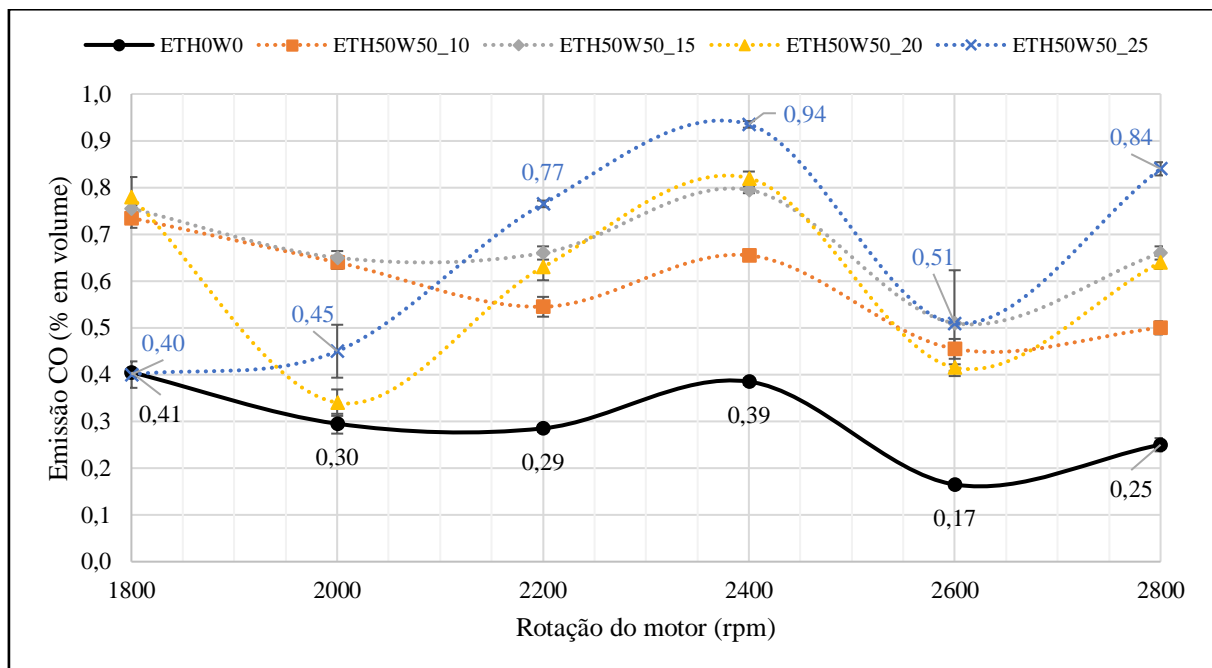
Conforme já exposto no capítulo 2, a presença de CO como produto da combustão é um forte indício de uma combustão incompleta. Os ensaios com fumigação de ESH, por ocorrerem com mistura menos pobre, houve um aumento considerável na emissão de monóxido de carbono.

No ensaio ETH50W50\_10 observou-se a menor emissão média de CO com fumigação de ESH, mas ainda assim, consideravelmente maior que o ensaio testemunha. Na média houve acréscimo de 105,9% da emissão de CO.

O ensaio ETH50W50\_25 apresentou um comportamento bem distinto em relação aos outros ensaios com fumigação de ESH. Na faixa de 1.800 a 2.200 observou-se o menor aumento médio da emissão de CO, na ordem de 73,2%. Porém, na faixa de 2.400 a 2.800 rpm, notou-se o maior aumento médio, na ordem de 196%. A 2.800 rpm o incremento de CO foi de 236%.

A Figura 33 ilustra notoriamente este comportamento das emissões de monóxido de carbono dos ensaios com fumigação de ESH em relação ao ensaio testemunha.

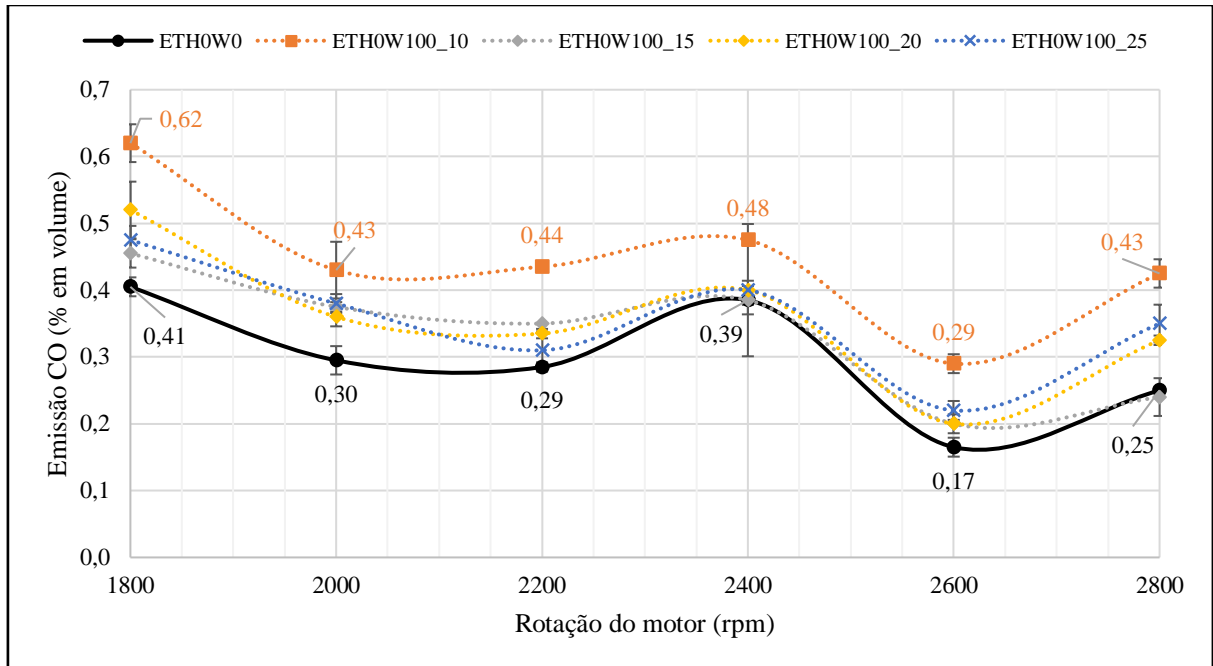
Figura 33 – Emissão de monóxido de carbono (% em volume) com fumigação de ESH



Fonte: o autor (2020)

Os ensaios com fumigação de água, apesar de apresentarem aumento na emissão de CO, observou-se que isto ocorreu em patamares menos impactantes. Os dados coletados de emissão de CO com fumigação de água são apresentados na Figura 34.

Figura 34 – Emissão de monóxido de carbono (% em volume) com fumigação de água



Fonte: o autor (2020)

O ensaio que apresentou o maior aumento da emissão de CO foi o ETH0W100\_10. Este ensaio possuía o menor volume de água fumigado, portanto este comportamento não era esperado pelo autor. Na amostra ETH0W100\_15 notou-se o menor aumento percentual médio, na ordem de 13,2%.

Telli (2018) observou que com o aumento do ETH fumigado, houve uma redução dos índices de CO. Este é um ponto indicativo que para ensaios onde ocorra o ajuste do débito de OD, a emissão de CO pode ser minimizada.

#### 4.4.2 Dióxido de carbono

Diferentemente das emissões de CO, as emissões de dióxido de carbono apresentaram um aumento menos significativo nos ensaios com fumigação de ESH, e uma pequena redução dos ensaios com fumigação de água.

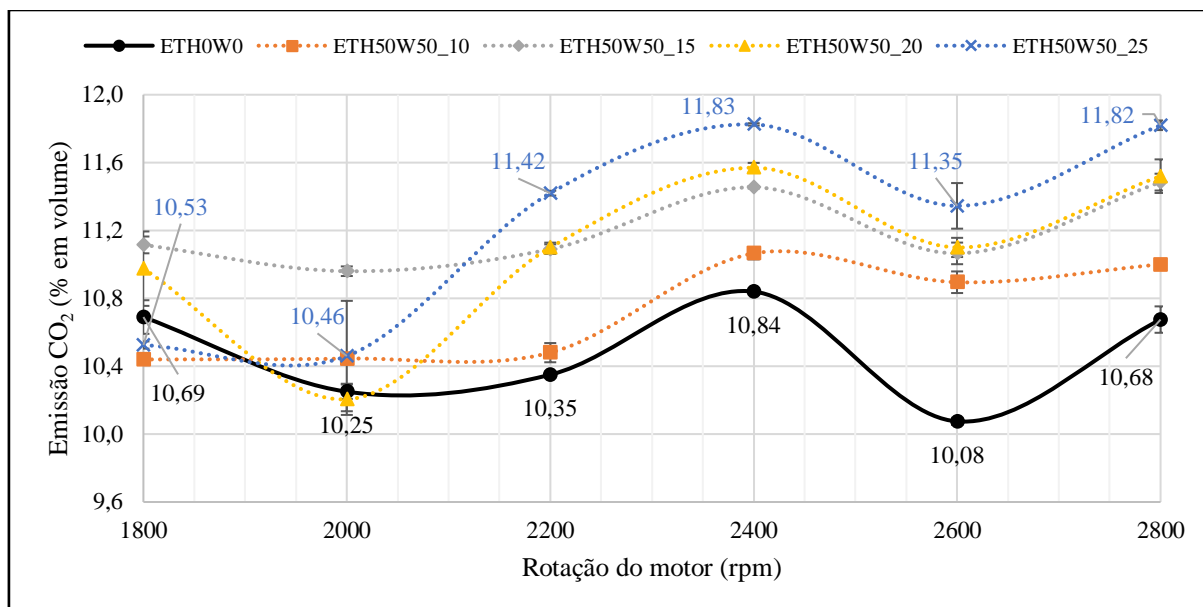
A amostra ETH50W50\_25 apresentou o maior aumento médio de emissão de CO<sub>2</sub> (7,2%) e o maior aumento percentual de 12,6% a 2.600 rpm. Telli (2018) observou uma redução



dos índices de CO<sub>2</sub> com fumigação de ETH e correção do consumo de OD, portanto, é provável que este aumento tenha ocorrido pela mistura rica utilizada nos ensaios com ESH.

A Figura 35 apresenta os dados coletados.

Figura 35 – Emissão de dióxido de carbono (% em volume) com fumigação de ESH



Fonte: o autor (2020)

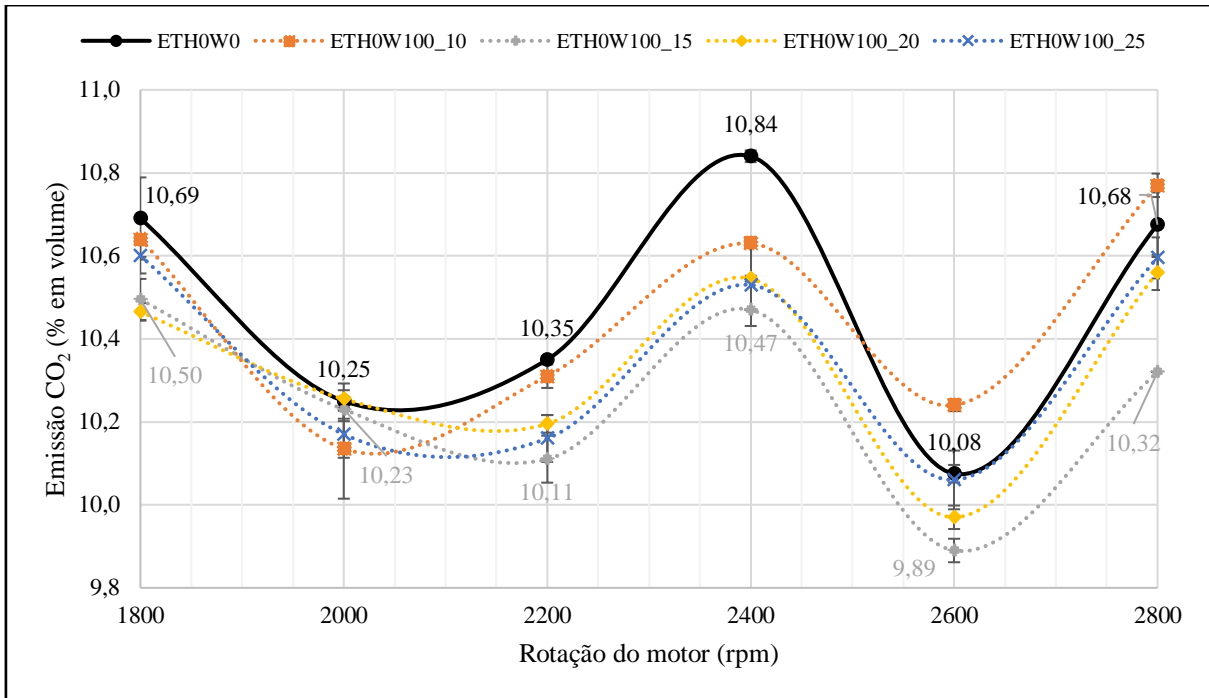
Nas amostras que utilizaram apenas fumigação de água, observou-se que os níveis de emissões de CO<sub>2</sub> ficaram muito próximos à amostra testemunha. Todos os ensaios apresentaram redução nos níveis de dióxido de carbono. A amostra ETH0W100\_10 apresentou a menor redução média de emissão de CO<sub>2</sub> observada, que foi de 0,2%. A maior redução ocorreu no ensaio ETH0W100\_15, chegando a 2,2% na média do ensaio, e pontualmente a 2.400 rpm observou-se redução de 3,4%.

Durante o ensaio testemunha, a maior emissão observada de CO<sub>2</sub> foi de 10,84% em relação ao volume dos gases de escapamento. Considerando as quatro amostras com fumigação de água, a menor emissão de CO<sub>2</sub> observada foi de 9,97%.

Considerando que o dióxido de carbono não é um gás nocivo à saúde humana, e que a variação máxima percentual foi menor que 1%, o autor considerou que o impacto nas emissões de CO<sub>2</sub> com o uso de fumigação de água foi nulo, não apresentando vantagens ou desvantagens em relação à implantação do sistema de fumigação.

A Figura 36 apresenta graficamente os níveis de emissões observados.

Figura 36 – Emissão de dióxido de carbono (% em volume) com fumigação de água



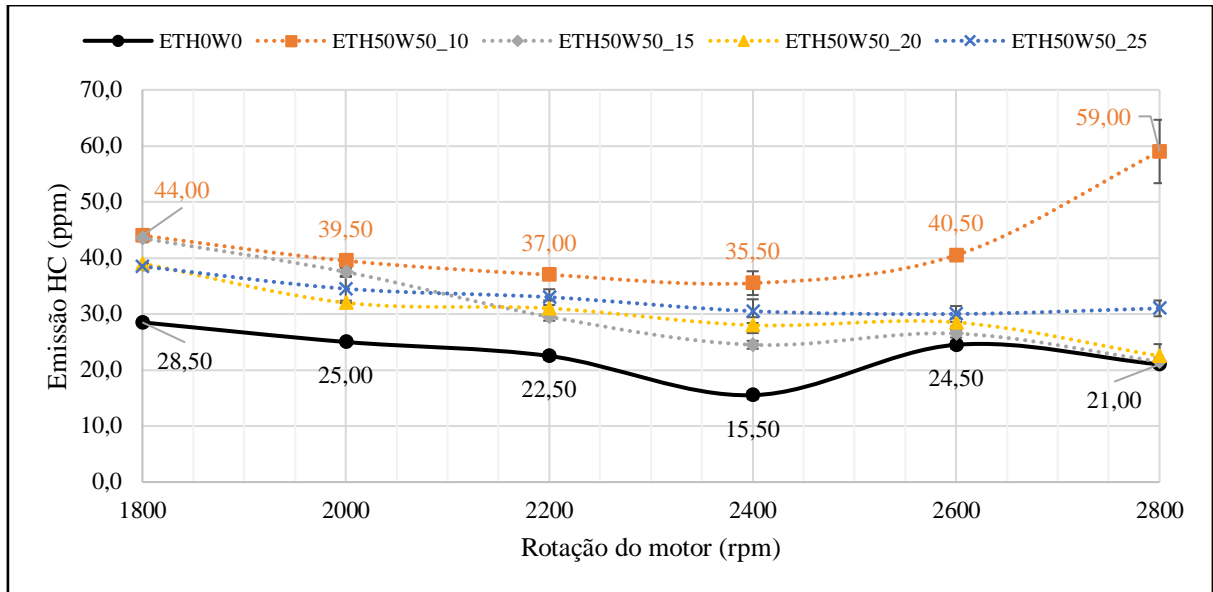
Fonte: o autor (2020)

#### 4.4.3 Hidrocarbonetos

Observou-se em todos os ensaios um aumento da emissão de hidrocarbonetos. Este é mais um fato notado que demonstra que o sistema de fumigação seja de ESH, seja de água, impacta diretamente no processo de combustão, tornando-o incompleto. Conforme exposto no capítulo 2, a presença de hidrocarbonetos nos gases de escape é uma evidência que parte do combustível não está sendo queimado no interior do motor. As amostras de ESH, por operarem com mistura rica de combustível, o aumento de HC é esperado. Morsy (2015) que operou com fumigação de ESH, observou um aumento de até 43,13% de aumento da emissão.

Observou-se nos ensaios de fumigação de ESH que o aumento médio de emissão de HC variou de 33,7% (ensaio ETH50W50\_15) à 92% (ensaios ETH50W50\_10). O ajuste do consumo específico de OD certamente reduziria estes valores, tendo em vista que misturas pobres contribuem positivamente para a redução da emissão de HC. Telli (2018) também observou este fenômeno de aumento das emissões de HC, em escalas ainda maiores, chegando a 670%. A Figura 37 ilustra o aumento das emissões de HC durante os ensaios com ESH.

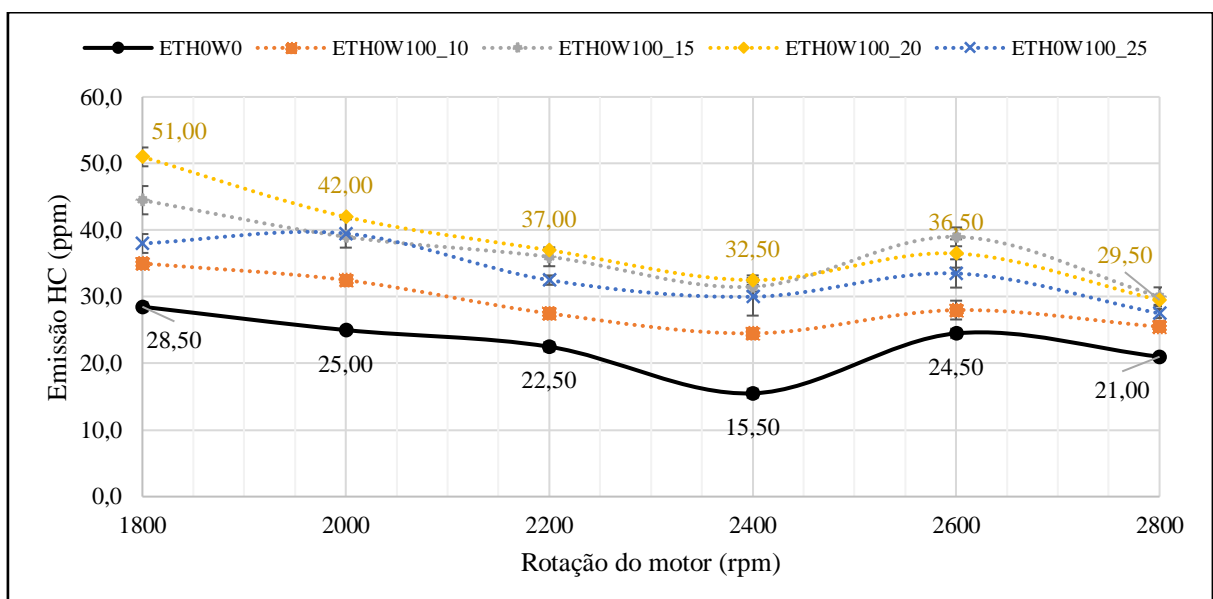
Figura 37 – Emissão de hidrocarbonetos (ppm) com fumigação de ESH



Fonte: o autor (2020)

Os aumentos de emissões de HC seguiram a mesma tendência nos ensaios com fumigação de água, onde variaram de 28,1% (ensaio ETH0W100\_10) a 68,4% (ensaio ETH0W100\_20). Os dados de emissões de HC seguiram o mesmo comportamento do ensaio testemunha, porém em patamares maiores. Para os casos de fumigação de água, o autor acredita o aumento da emissão de HC pois a água age como um elemento que dificulta o processo de combustão, e é um resultado inerente a técnica de fumigação com água. A Figura 38 apresenta os dados coletados referente as emissões de HC durante os ensaios com fumigação de água.

Figura 38 – Emissão de hidrocarbonetos (ppm) com fumigação de água



Fonte: o autor (2020)

#### 4.4.4 Óxidos de nitrogênio

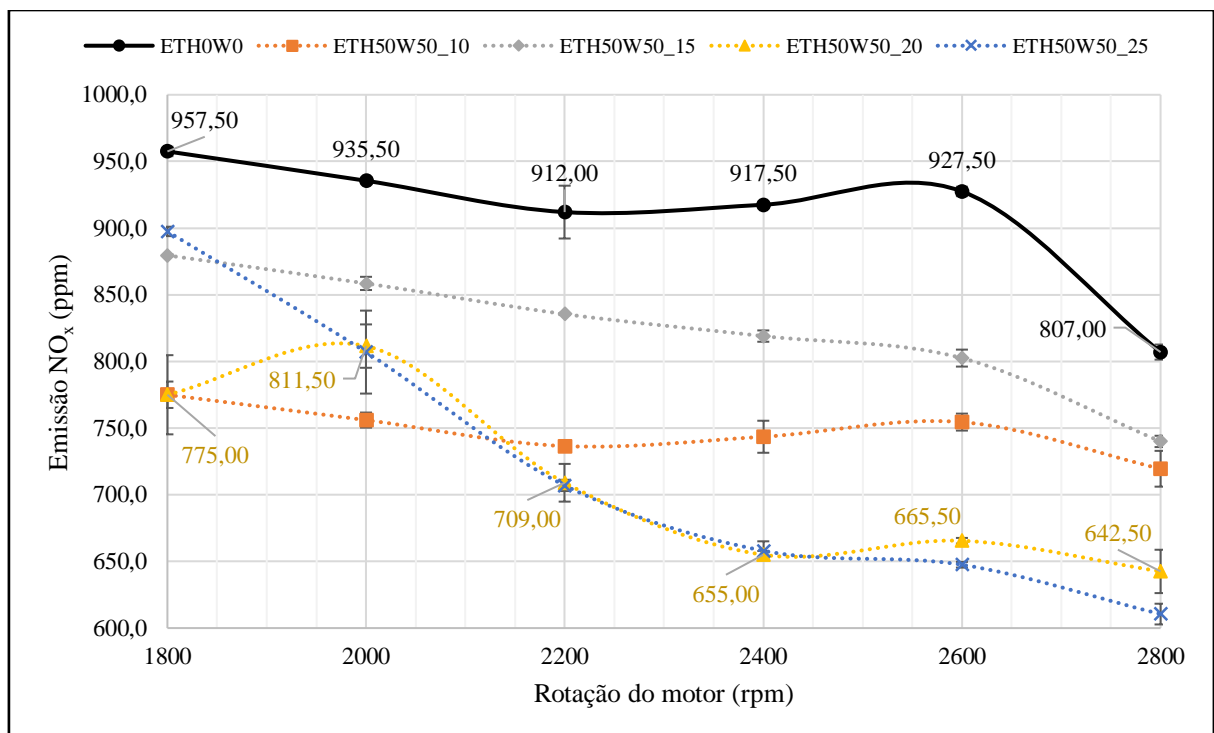
O último gás de emissão analisado foram os níveis de óxidos de nitrogênio, que foram os dados que motivaram autor a realizar este trabalho. Em todos os ensaios realizados, seja de fumigação com ESH ou fumigação com água, foi notado uma redução significativa dos níveis de emissões de  $\text{NO}_x$ .

Para as amostras de fumigação de ESH, notou-se uma redução média de pelo menos 9,5% (ensaio ETH50W50\_15), chegando a redução média de 22% (ensaio ETH50W50\_20). Importante destacar que durante o ensaio com ETH50W50\_25, foi observado uma redução de apenas 6,3% a 1.800 rpm. O ensaio ETH50W50\_20 foi o que melhor apresentou dados de redução de níveis de  $\text{NO}_x$ .

A redução dos níveis de  $\text{NO}_x$  indica que a presença do ESH atuou na redução da temperatura de combustão, um dos fatores que ajudam a formação destes gases. Isso pode ser afirmado pois também foi observada uma redução na temperatura dos gases de escapamento, conforme exposto no item 4.3.5.

A Figura 39 apresenta os níveis de emissões de  $\text{NO}_x$  para os ensaios com fumigação de ESH.

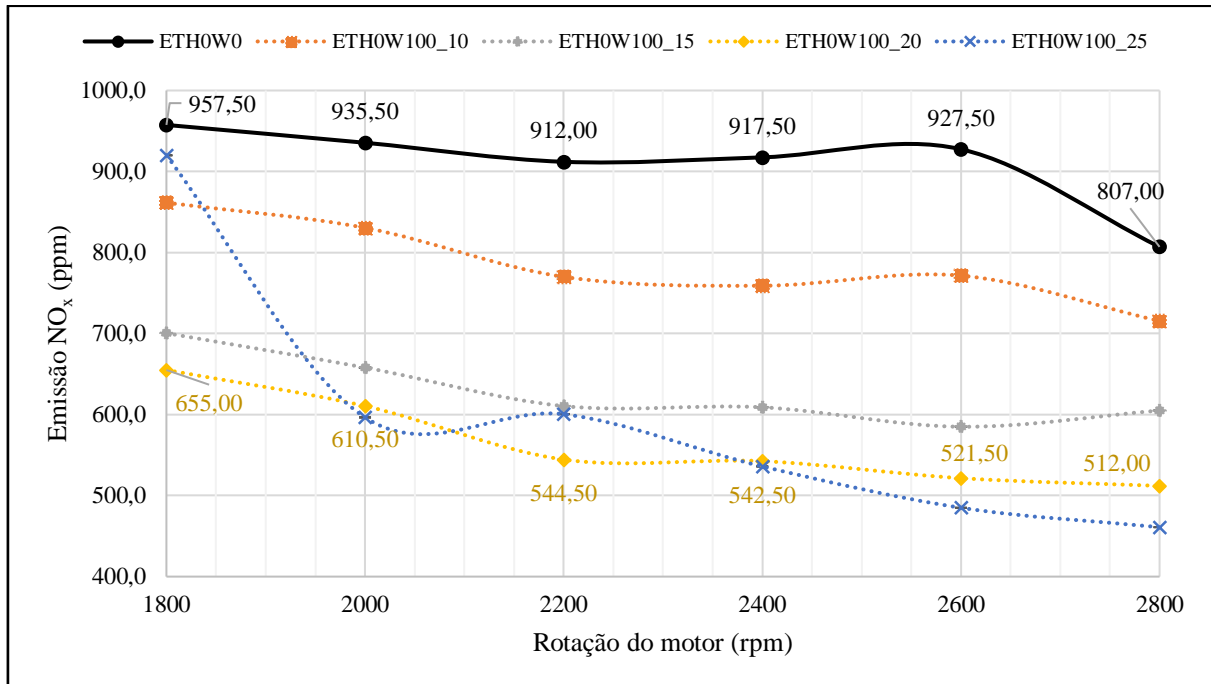
Figura 39 – Emissão de óxidos de nitrogênio (ppm) com fumigação de ESH



Fonte: o autor (2020)

Os ensaios com fumigação de água apresentaram uma redução ainda mais significativa dos níveis de  $\text{NO}_x$ . A Figura 40 ilustra estes dados.

Figura 40 – Emissão de óxidos de nitrogênio (ppm) com fumigação de água



Fonte: o autor (2020)

Os dados obtidos com a fumigação de água são compatíveis com a literatura. Tesfa *et. al* (2011) observaram uma redução de até 50% operando com fumigação de água, em um motor de maior porte ao ensaiado pelo autor.

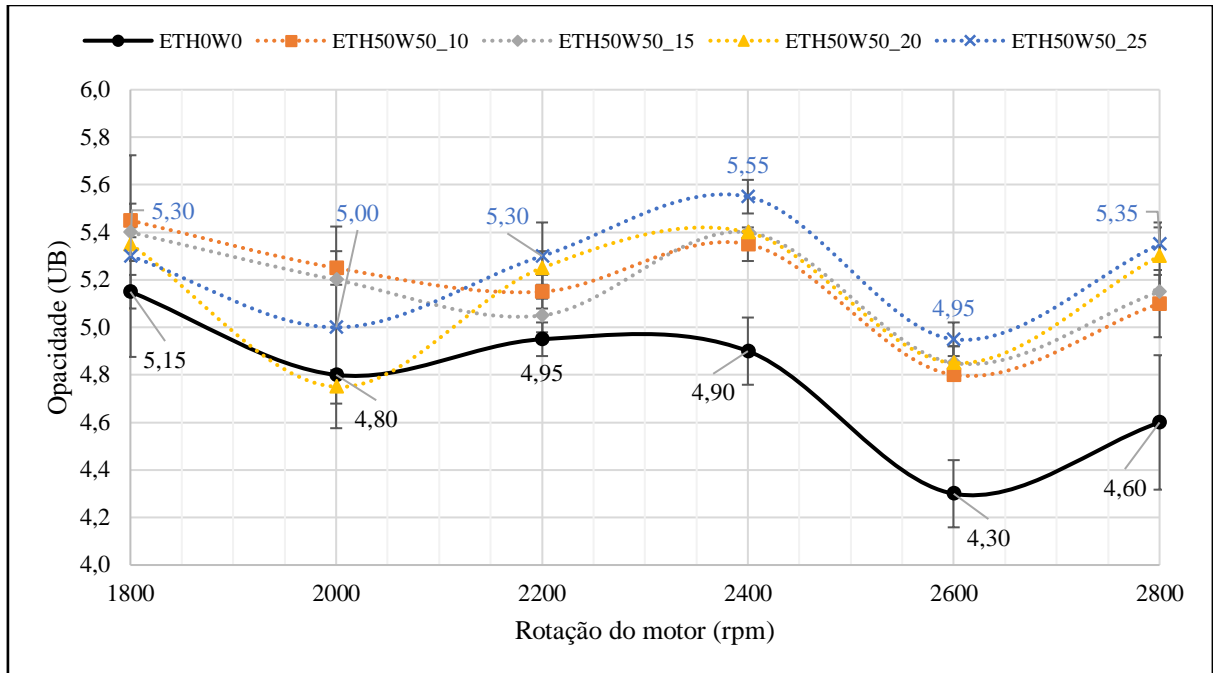
Foi observado que o ensaio ETH0W100\_20 apresentou a maior redução média dos níveis de  $\text{NO}_x$ , chegando a 38% de redução. Assim como no ensaio com ESH, o ensaio ETH0W100\_25, que utilizou o mesmo percentual volumétrico de fumigação, ocorreu um aumento exponencial da emissão de  $\text{NO}_x$  a 1.800 rpm, indicando que o volume máximo de água ou ESH estava próximo que o motor aceitaria antes de apresentar instabilidades de funcionamento, ou aumento dos níveis de emissão de  $\text{NO}_x$ .

#### 4.4.5 Índice de fumaça

Todos os ensaios executados neste trabalho foram observados um aumento do índice de fumaça. Este aumento é mais um indício que a combustão foi prejudicada com o uso do sistema de fumigação. Para o caso da fumigação de ESH, a combustão fora prejudicada em função do uso de mistura rica, enquanto a fumigação de água é um elemento que não participa da

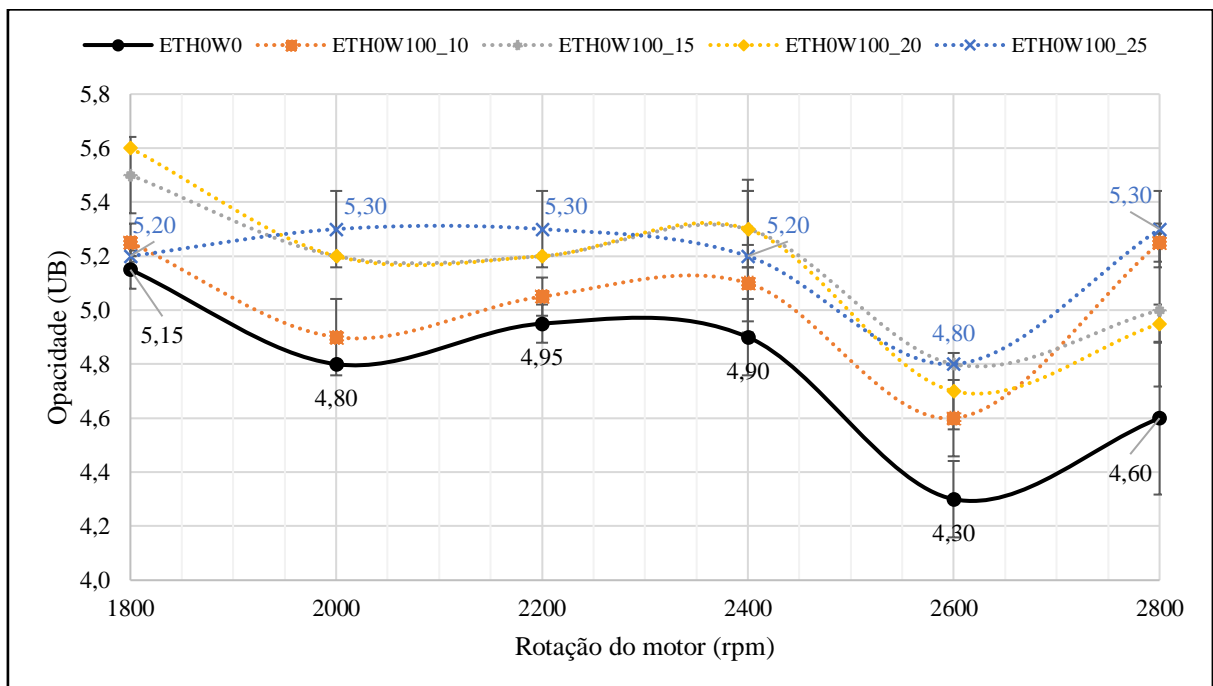
combustão e reduz a temperatura de combustão, prejudicando assim que as reações de queima ocorram de maneira eficiente. As Figura 41 e 42 ilustram os ganhos dos índices de fumaça observados.

Figura 41 – Índice de fumaça (UB) com fumigação de ESH



Fonte: o autor (2020)

Figura 42 – Índice de fumaça (UB) com fumigação de água



Fonte: o autor (2020)

#### 4.5 SÍNTESE DOS RESULTADOS

A Tabela 8 apresenta a síntese dos resultados médios dos ensaios executados, indicando a tendência de aumento ou redução dos parâmetros referenciados em função do ensaio testemunha.

Tabela 8 – Síntese dos resultados

<b>Parâmetro</b>	<b>Fumigação de ESH</b>	<b>Fumigação de água</b>
Torque	↑	↓
Potência	↑	↓
Consumo específico de combustíveis	↑	↑
Eficiência de conversão dos combustíveis	↓	↓
Temperatura dos gases de escapamento	↑	↓
Monóxido de carbono	↑	↑
Dióxido de carbono	↑	↑
Hidrocarbonetos	↑	↑
Óxidos de nitrogênio	↓	↓
Índice de fumaça	↑	↑

Fonte: o autor (2020)

## 5 CONCLUSÃO

Este trabalho apresentou os resultados obtidos através de ensaios experimentais dinamométricos de um motor monocilíndrico ciclo Diesel, operando a plena carga com injeção de etanol super-hidratado na admissão do motor e posteriormente com fumigação de água líquida também efetuada na admissão do motor. Ambos os ensaios tiveram seus resultados comparados com um ensaio testemunha realizado preliminarmente com o motor na condição original. Os combustíveis utilizados neste experimento foram caracterizados quanto ao seu poder calorífico e composição química.

Ao total foram realizados dezoito ensaios, com nove configurações diferentes de operação do motor, sendo que cada configuração foi realizada dois ensaios. As configurações de operação foram divididas em ensaio testemunha, quatro ensaios de fumigação de etanol super-hidratado e quatro ensaios com fumigação de água. As fumigações foram realizadas nas razões volumétricas de 10%, 15%, 20% e 25% do consumo volumétrico de óleo diesel observado no ensaio testemunha.

Durante os ensaios de fumigação de etanol super-hidratado, não houve a substituição de óleo diesel por etanol super-hidratado, portanto houve uma redução do coeficiente de excesso de ar durante a operação do motor e uma disponibilidade maior de combustíveis. Nesta configuração foi observado um aumento de torque de até 14,7% e um aumento de potência de até 15,4%. Este ganho no desempenho do motor ocorreu pelo aumento de massa de combustíveis disponíveis para a combustão. Por outro lado, a fumigação de água líquida provocou uma redução do torque de até 3,2% e da potência de até 5,4%. A perda de desempenho no motor era esperada e um dos principais motivos é devido as propriedades físicas da água, a qual subtraiu o calor da combustão.

Importante destacar que o comportamento da curva de torque do motor não apresentou um comportamento esperado para este modelo de motor. Observou-se uma redução de torque entre 1.800 e 2.200 rpm, quando nesta faixa de rotação espera-se que este motor tenha um comportamento praticamente linear. Isso indica que pode haver alguma inconsistência do dinamômetro utilizado nesta faixa de rotação.

Observou-se um comportamento distinto entre ambos os métodos de fumigação utilizados em relação à eficiência de conversão dos combustíveis. Os ensaios com fumigação de etanol super-hidratado obtiveram um leve aumento da eficiência, em função do aumento da potência gerada no motor, embora o poder calorífico da mistura tenha sido reduzido. Os dados obtidos sugerem que a eficiência do motor tende a diminuir caso ocorra a substituição parcial



do diesel por etanol super-hidratado injetado na admissão do motor. Naturalmente, com a redução de potência mais significativa, os ensaios com fumigação de água apresentaram uma perda maior de eficiência de conversão dos combustíveis, indicando que a água promove uma combustão incompleta do óleo diesel.

A hipótese de que a fumigação de etanol super-hidratado e água provocaram uma combustão incompleta condiz com os resultados observados nas emissões de monóxido de carbono e hidrocarbonetos além do índice de fumaça. A presença de hidrocarbonetos nos gases de escapamento é um sinal evidente que parte do combustível não foi oxidado durante a combustão, e por consequência não houve um balanço químico adequado, o que favorece a formação do monóxido de carbono. O aumento do índice de fumaça em relação a todos ensaios realizados com fumigação, corroboram com combustão incompleta presumida.

Dos parâmetros de emissões avaliados que são prejudiciais à saúde e ao meio ambiente, foi constatado que a injeção de etanol super-hidratado e injeção de água contribuíram positivamente para a redução da emissão de óxidos de nitrogênio. A fumigação de água conforme já dito, sequestra calor do processo de combustão, reduzindo assim teoricamente a temperatura da combustão, que é um dos fatores elementares para a formação dos óxidos de nitrogênio. Essa redução da temperatura de combustão também foi observada ao avaliar-se a temperatura dos gases de escapamento que também foram reduzidos. Entretanto, foi observado um comportamento discordante na fumigação de etanol super-hidratado. Nestes ensaios, também ocorreu a redução da emissão de  $\text{NO}_x$ , porém, houve um aumento da temperatura de combustão, o que indica que não houve redução da temperatura de combustão. Contudo, é essencial observar que nestas amostras houve um aumento do torque produzido, o que abre um precedente de que as pressões oriundas da combustão sofreram alterações significativas, parâmetro o qual não foi controlado e observado durante os ensaios.

Dentro os objetivos estipulados para este trabalho, esperava-se observar relações diretas entre a temperatura de combustão com os níveis de emissões de  $\text{NO}_x$ , e demais gases provenientes da combustão, além claro, de determinar se a implementação de um sistema de fumigação pode ser viável em motores de combustão por compressão. É possível concluir que com as proporções de etanol super-hidratado e água injetados na admissão um motor monocilíndrico ciclo Diesel equipado com injeção mecânica não afetaram negativamente de forma considerável o desempenho do motor. Porém, observou-se impactos negativos nos níveis de índice de fumaça, e emissões de monóxido de carbono e hidrocarbonetos. No Brasil, a legislação vigente ainda não prevê normas emissivas para motores de categorias semelhantes ao avaliado, porém a médio e longo prazo a implantação de tais legislações é perfeitamente

plausível. Os dados observados nos ensaios evidenciam que os processos que levam a formação dos  $\text{NO}_x$  são complexos e requerem uma análise profunda e controlada de outros parâmetros inerentes a combustão, como temperatura e pressão interna na câmara de combustão.

## 5.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

A fim de prover a continuidade do estudo apresentado neste trabalho, seguem algumas sugestões para trabalhos futuros:

- a) Uso de injeção eletrônica tanto para o sistema de fumigação, quanto para o sistema de injeção de óleo diesel, explorando os efeitos da fumigação com diferentes parâmetros de injeção de óleo diesel, como ponto e tempo de injeção.
- b) Monitoramento dos dados de pressão e temperatura interna da câmara de combustão, a fim de obter maiores informações quanto os impactos do sistema de fumigação e a formação de óxidos de nitrogênio.
- c) Implantação de um sistema de fumigação em motores que atendam a norma Proconve P7, de forma a conciliar o sistema de fumigação de água, o uso da injeção eletrônica e sistemas de redução catalítica seletiva e conversores catalíticos oxidantes.

## REFÊRENCIAS

ABUS-QUDAIS, M.; HADDAD, O.; QUDAISAT M. **The effect of alcohol fumigation on diesel engine performance and emissions.** Energy Conversion and Management, v 41, p. 389-399. 2000. DOI: 10.1016/S0196-8904(99)00099-0

AGENCIA NACIONAL DO PRETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCMBUSTÍVEIS. **Óleo Diesel.** 2019. Disponível em <<http://www.anp.gov.br/petroleo-derivados/155-combustiveis/1857-oleo-diesel>>. Acesso em 24 de set. 2019.

BRUNETTI, F. **Motores de Combustão Interna.** São Paulo: Edgar Blucher, 2012.

CONSELHO NACIONAL DE POLÍTICA ENERGÉTICA. Resolução N° 16, 29 de outubro de 2018. **Diário Oficial da União**, seção 1, Brasília, DF, ano 155, n. 215, p. 2. 8 nov 2018

CONFEDERAÇÃO DA AGRICULTURA E PECUÁRIA DO BRASIL, **Levantamento de Custos de Produção de Cana-de-Açúcar, Açúcar, Etanol e Bioeletricidade do Brasil Fechamento da safra 2015/2016.** Disponível em <[https://www.cnabrazil.org.br/assets/arquivos/boletins/13-ativos\\_cana\\_0.16859200%201514916994.pdf](https://www.cnabrazil.org.br/assets/arquivos/boletins/13-ativos_cana_0.16859200%201514916994.pdf)>. Acesso em 25 de set. 2019.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Balço Energético nacional 2018: Ano base 2017 Empresa de Pesquisa Energética - Rio de Janeiro: EPE, 2018.** Disponível em: <[http://epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-303/topico-419/BEN2018\\_\\_Int.pdf](http://epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-303/topico-419/BEN2018__Int.pdf)>. Acesso em: 24 set. 2019.

ENCYCLOPÆDIA BRITANNICA, **Diesel engine.** 2019. Disponível em <<https://www.britannica.com/technology/diesel-engine>>. Acesso em 9 de set. 2019.

ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. **Nitrogen Oxides (NO<sub>x</sub>), why and how they are controlled.** Disponível em <<https://www3.epa.gov/ttnecat1/dir1/fnoxdoc.pdf>>. Acesso em 06 de jun. 2019.

EUROPEAN ENVIRONMENT AGENCY, **Emissions of Air Pollutants from Transport.** Disponível em <<https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/indicators/transport-emissions-of-air-pollutants-8/transport-emissions-of-air-pollutants-6>>. Acesso em 11 de ago. 2019.

FEITOSA, M. V. **Desenvolvimento do motor de ignição por compressão alimentado por injeção direta de óleo diesel e por etanol pós-vaporizado no coletor de admissão.** 2003. 238 f. Dissertação (Doutorado) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2003.

GARCIA, Roberto. **Combustíveis e combustão industrial.** 2. ed. Rio de Janeiro: Interciência, 2013.

GIACOSA, D. **Motori Endotermici.** 15. ed. Milano: Hoelipi, 2000.

HEYWOOD, J. B. **Internal Combustion Engine Fundamentals**. New York: Mcgraw-hill, 1988.

KEGL, B.; KEGL, M.; PEHAN, S. **Green Diesel Engines**. Londres: Springer, 2013.

KNOTHE, G.; GERPEN, J. V; KRAHL, J; RAMOS, L. P. **Manual do Biodiesel**. 1. ed. São Paulo: Edgar Blucher, 2006.

KROSS, Kenneth A. **Termodinâmica para engenheiros**. São Paulo Cengage Learning 2016  
1 recurso online ISBN 9788522124060.

LINTEC. **Motores linha Agrale**. Disponível em:

<<http://www.lintecmotores.com.br/produtos/motores/linha-agrale/m93-13>>. Acesso em: 31 mai. 2020.

LORA, E. E. S; VENTURINI, O. J. **Biocombustíveis**. 1 e 2 vol. Rio de Janeiro: Interciência, 2012.

MACHADO, C. A.; **Análise de desempenho e emissões de um motor diesel acoplado a um gerador operando em modo bicombustível através da injeção de etanol pelo método da fumigação**. 2018. 69 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Feevale, Novo Hamburgo, 2018.

MARTINS, C. A.; FERREIRA, M. A. **Considerações sobre a formação de NO<sub>x</sub> na combustão**, VI Congresso Nacional de Engenharia Mecânica, 2010.

MARTINS, J. **Motores de Combustão Interna**. 2 ed. Porto: Publindústria Edições Técnicas, 2006.

MORSY, M. H. **Assessment of a direct injection diesel engine fumigated with ethanol/water mixtures**. *Energy Conversion and Management*, v. 94, p. 406-414, 2015.

MURAYAMA, T., TSUKAHARA, M., MORISHIMA, Y., AND MIYAMOTO, N., **Experimental Reduction of NO<sub>x</sub>, Smoke, and BSFC in a Diesel Engine Using Uniquely Produced Water (0 - 80%) to Fuel Emulsion**, SAE Technical Paper 780224, 1978.


PRASAD, H. S.; VIJAY, V. S.; GONSALVIS, J. **Effect of direct water injection at different crank angles on diesel engine emission and performance**. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. v. 376, 2018.

PROCTOR, C. L., ARMSTRONG, L. V. H., Diesel engine. **ENCYCLOPÆDIA BRITANNICA**, jul. 1999. Disponível em: <<https://www.britannica.com/technology/diesel-engine>>. Acesso em: 18 set. 2019.

ROBERT BOSCH GMBH. **Automotive handbook**. 6.ed. rev. ext. Plochingen: SAE, 2004. 1232 p. ISBN 0768015138.

- SILVEIRA, F. L. **Máquinas térmicas à combustão interna de Otto e de Diesel**, jan. 2001. Disponível em: <http://www.if.ufrgs.br/~lang/Textos/maqterm.pdf>. Acesso em: 18 set. 2019.
- SOARES, L. H. de B.; ALVES, B. J. R.; URQUIAGA, S.; BODDEY, R. M. **Mitigação das emissões de gases efeito estufa pelo uso de etanol da cana-de-açúcar produzido no Brasil**. 2009. 14 f. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Seropédica, 2009.
- SONNTAG, Richard Edwin; BORGNAKKE, Claus; VAN WYLEN, Gordon John. **Fundamentos da termodinâmica**. São Paulo: E. Blücher, 1998. xii, 537 p. ISBN 8521201672.
- STONE, R. **Introduction to Internal Combustion Engines**. Londres: Macmillan, 1992.
- TAUZIA X.; MAIBOOM A.; SHAH S. R. **Experimental study of inlet manifold water injection on combustion and emissions of an automotive direct injection Diesel engine**. Energy, v. 35, p. 3628-3639, 2010.
- TEIXEIRA, E. C. **Biodiesel: Impacto Ambiental Agrônômico e Atmosférico**. Porto Alegre: Fepam, 2012.
- TELLI, G. D. **Análise do desempenho de um motor a combustão de ignição por compressão monocilíndrico no funcionamento bicomustível diesel-etanol**. 2018. 126 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade de Caxias do Sul, Caxias do Sul, 2018.
- TESFA, B.; MISHRA R.; GU F.; BALL A.D. **Water injection effects on the performance and emission characteristics of a CI engine operating with biodiesel**. Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 37, p. 333-344, 2011.
- TILLMANN, C. A. C. **Motores de combustão interna e seus sistemas**. Pelotas: Rede e-Tec Brasil, 2013.
- VLASSOV, D. **Combustíveis, combustão e câmaras de combustão**. Curitiba: Editora da UTFPR, 2001.
- WIMPERIS, H. E., **The internal Combustion Engine**. 4. ed. Londres, Bombaim, Sidney: Constable & Company Limited, 1922.

## ANEXO A – LAUDO TÉCNICO DO ÓLEO DIESEL



**CIENTEC**  
FUNDAÇÃO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA

Rua Washington Luiz, 675 - CEP 90010-460 - Porto Alegre/RS/Brasil - CNPJ 92.816.685/0001-67  
Fone +55 (51) 32872000 - e-mail faleconosco@cientec.rs.gov.br - www.cientec.rs.gov.br

---

Documento: **RELATÓRIO DE ENSAIO** Número: **4821 - 16890**

Os resultados contidos neste documento têm significação restrita e aplicam-se exclusivamente ao item ou itens ensaiados ou calibrados. Este documento somente poderá ser publicado na íntegra.

---

**ENSAIOS EM COMBUSTÍVEL**

**Cliente: FUNDAÇÃO UNIVERSIDADE DE CAXIAS DO SUL**  
Rua Francisco Getúlio Vargas, 1130 – Bloco 72.  
95070-560 – Caxias do Sul, RS.

**Item ensaiado:** (01) uma amostra entregue à CIENTEC, coletada e identificada pelo Cliente como “Óleo Diesel”.

**Data do recebimento do item:** 04 de outubro de 2016.

**Período da realização dos ensaios:** de 10 de outubro a 29 de novembro de 2016.

**Local de Realização:** Laboratório de Ensaio em Combustíveis.

**RESULTADOS:**

Enxofre total <sub>(b.c.r.)</sub> , %.....	0,04
Carbono <sub>(b.c.r.)</sub> , %.....	86,08
Hidrogênio <sub>(b.c.r.)</sub> , %.....	12,44
Nitrogênio <sub>(b.c.r.)</sub> , %.....	0,04
[Oxigênio + halogênios + cinza] <sub>(b.c.r.)</sub> , %.....	1,40
Poder Calorífico Superior <sub>(b.c.r.)</sub> , kcal/kg.....	10.840
Poder Calorífico Superior <sub>(b.c.r.)</sub> , J/g.....	45.385

Observações:

01) Abreviatura: (b.c.r.) = base como recebida.  
02) % = g/100g.  
03) O teor de [oxigênio + halogênios] é o resultado da diferença da análise elementar e cinzas. O teor de cinzas não foi determinado.

## ANEXO B – LAUDO TÉCNICO DO ETANOL



**CIENTEC**  
FUNDAÇÃO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA

Rua Washington Luiz, 675 - CEP 90010-460 - Porto Alegre/RS/Brasil - CNPJ 92.816.885/0001-67  
Fone +55 (51) 32872000 - e-mail faleconosco@cientec.rs.gov.br - www.cientec.rs.gov.br

---

Documento: **RELATÓRIO DE ENSAIO** Número: **4821 - 16887**

Os resultados contidos neste documento têm significação restrita e aplicam-se exclusivamente ao item ou itens ensaiados ou calibrados. Este documento somente poderá ser publicado na íntegra.

---

**ENSAIOS EM COMBUSTÍVEL**

**Cliente: FUNDAÇÃO UNIVERSIDADE DE CAXIAS DO SUL**  
Rua Francisco Getúlio Vargas, 1130 – Bloco 72.  
95070-560 – Caxias do Sul, RS.

**Item ensaiado:** (01) uma amostra entregue à CIENTEC, coletada e identificada pelo Cliente como "Etanol Hidratado de Posto de Combustível".

**Data do recebimento do item:** 04 de outubro de 2016.

**Período da realização dos ensaios:** de 10 de outubro a 29 de novembro de 2016.

**Local de Realização:** Laboratório de Ensaios em Combustíveis.

**RESULTADOS:**

Carbono <sub>(b.c.r.)</sub> , %.....	48,63
Hidrogênio <sub>(b.c.r.)</sub> , %.....	13,14
Nitrogênio <sub>(b.c.r.)</sub> , %.....	0,03
[Oxigênio + halogênios + cinza] <sub>(b.c.r.)</sub> , %.....	38,20
Poder calorífico superior <sub>(b.c.r.)</sub> , kcal/kg.....	6.430
Poder calorífico superior <sub>(b.c.r.)</sub> , J/g.....	26.920

Observações:

01) Abreviatura: (b.c.r.) = base como recebida.  
02) % = g/100g.  
03) O teor de [oxigênio + halogênios] é o resultado da diferença da análise elementar e cinzas. O teor de cinzas não foi determinado.

## APÊNDICE A – DADOS COLETADOS

Resultados obtidos no ensaio do motor M93 - ETH0W0																																	
Rotação [rpm]	Torque [Nm]		Potência Observada [kW]		Consumo (g/50s)		Consumo (g/s)		Consumo (l/h)		Óleo lubrificante [°C]		Admissão [°C]		Escape [°C]		Bulbo seco [°C]		Bulbo úmido [°C]		Pressão barométrica [kPa]		Opacidade [UB]		CO [%]		CO2 [%]		HC [ppm]		NOx [ppm]		
	Teste 1	Teste 2	Teste 1	Teste 2	Teste 1	Teste 2	Teste 1	Teste 2	Teste 1	Teste 2	Teste 1	Teste 2	Teste 1	Teste 2	Teste 1	Teste 2	Teste 1	Teste 2	Teste 1	Teste 2	Teste 1	Teste 2	Teste 1	Teste 2	Teste 1	Teste 2	Teste 1	Teste 2	Teste 1	Teste 2	Teste 1	Teste 2	Teste 1
2800	41,7	41,4	12,1	12,1	37,5	37,4	0,75	0,748	3,21	3,21	92	92	28	28	597	598	27	27	28	28	92,24	92,25	4,8	4,4	0,24	0,26	10,62	10,73	21	21	803	811	
2600	40,7	40,9	11	11,1	33,3	33,2	0,666	0,664	2,85	2,85	92	92	28	28	564	558	27	27	28	28	92,23	92,23	4,2	4,4	0,16	0,17	10,09	10,06	25	24	930	925	
2400	37,2	37,1	9,3	9,3	33	32,9	0,66	0,658	2,83	2,82	92	91	28	27	590	589	27	27	28	28	92,23	92,23	5	4,8	0,39	0,38	10,83	10,85	15	16	918	917	
2200	34,8	34,6	7,9	7,9	28,9	28,9	0,578	0,578	2,48	2,48	91	90	27	27	554	554	27	27	28	28	92,23	92,23	4,9	5	0,29	0,28	10,35	10,35	23	22	898	926	
2000	35,1	35,4	7,4	7,3	26,1	26,3	0,522	0,526	2,24	2,25	89	88	27	27	532	532	27	27	27	27	92,22	92,21	4,8	4,8	0,31	0,28	10,28	10,22	25	25	936	935	
1800	37,9	37,9	7,1	7,1	24,9	24,6	0,50	0,492	2,13	2,11	87	87	27	27	531	532	27	26	27	27	92,22	92,22	5,1	5,2	0,4	0,41	10,76	10,62	28	29	960	955	

Resultados obtidos no ensaio do motor M93 - ETH50W50_10																																	
Rotação [rpm]	Torque [Nm]		Potência Observada [kW]		Consumo (g/50s)		Consumo (g/s)		Consumo (l/h)		Óleo lubrificante [°C]		Admissão [°C]		Escape [°C]		Bulbo seco [°C]		Bulbo úmido [°C]		Pressão barométrica [kPa]		Opacidade [UB]		CO [%]		CO2 [%]		HC [ppm]		NOx [ppm]		
	Teste 1	Teste 2	Teste 1	Teste 2	Teste 1	Teste 2	Teste 1	Teste 2	Teste 1	Teste 2	Teste 1	Teste 2	Teste 1	Teste 2	Teste 1	Teste 2	Teste 1	Teste 2	Teste 1	Teste 2	Teste 1	Teste 2	Teste 1	Teste 2	Teste 1	Teste 2	Teste 1	Teste 2	Teste 1	Teste 2	Teste 1	Teste 2	Teste 1
2800	43	42,4	12,6	12,5	36,35	36,5	0,727	0,73	3,12	3,13	88	88	26	25	610	615	24	24	25	25	92,41	92,42	5,2	5	0,49	0,51	10,98	11,02	63	55	729	710	
2600	43,4	43,3	11,6	11,6	33,49	33,59	0,67	0,672	2,87	2,88	89	88	24	24	577	581	24	24	25	24	92,43	92,42	4,8	4,8	0,44	0,47	10,85	10,94	41	40	759	750	
2400	37,5	37,3	9,4	9,3	32,8	32,79	0,656	0,656	2,81	2,81	89	89	24	24	592	593	23	23	24	24	92,43	92,43	5,3	5,4	0,66	0,65	11,09	11,04	37	34	752	735	
2200	35,4	35,6	8,1	8,1	29,9	28,69	0,598	0,574	2,56	2,46	88	88	24	24	564	562	23	23	24	24	92,43	92,45	5,1	5,2	0,56	0,53	10,52	10,44	37	37	735	738	
2000	36,7	36,4	7,7	7,6	26,1	26,4	0,522	0,528	2,24	2,26	88	87	24	23	548	545	24	23	24	24	92,43	92,43	5,2	5,3	0,63	0,65	10,46	10,43	39	40	752	760	
1800	38,1	38	7,1	7,1	24,2	24,35	0,484	0,487	2,07	2,09	87	85	24	24	534	526	24	23	24	24	92,44	92,44	5,5	5,4	0,72	0,75	10,46	10,42	44	44	782	768	

Resultados obtidos no ensaio do motor M93 - ETH50W50_15																																	
Rotação [rpm]	Torque [Nm]		Potência Observada [kW]		Consumo (g/50s)		Consumo (g/s)		Consumo (l/h)		Óleo lubrificante [°C]		Admissão [°C]		Escape [°C]		Bulbo seco [°C]		Bulbo úmido [°C]		Pressão barométrica [kPa]		Opacidade [UB]		CO [%]		CO2 [%]		HC [ppm]		NOx [ppm]		
	Teste 1	Teste 2	Teste 1	Teste 2	Teste 1	Teste 2	Teste 1	Teste 2	Teste 1	Teste 2	Teste 1	Teste 2	Teste 1	Teste 2	Teste 1	Teste 2	Teste 1	Teste 2	Teste 1	Teste 2	Teste 1	Teste 2	Teste 1	Teste 2	Teste 1	Teste 2	Teste 1	Teste 2	Teste 1	Teste 2	Teste 1	Teste 2	Teste 1
2800	44,6	44,7	13	13,1	37,25	37,15	0,745	0,743	3,19	3,18	91	92	30	29	626	625	27	27	26	26	92,42	92,41	5,1	5,2	0,65	0,67	11,52	11,45	21	22	737	743	
2600	43,8	44	11,7	12	35,15	33,05	0,703	0,661	3,01	2,83	92	92	28	28	596	594	26	26	26	26	92,42	92,41	4,9	4,8	0,51	0,51	11,02	11,11	27	26	807	798	
2400	38,5	38,6	9,5	9,7	32,65	32,65	0,653	0,653	2,80	2,80	92	92	27	29	604	605	26	26	26	26	92,41	92,41	5,4	5,4	0,8	0,79	11,45	11,46	25	24	822	816	
2200	36,9	36,6	8,4	8,4	28,7	28,9	0,574	0,578	2,46	2,48	90	90	27	27	572	573	26	26	26	26	92,42	92,41	5,1	5	0,65	0,67	11,07	11,11	29	30	836	835	
2000	37	37,2	7,8	7,7	26,25	26,3	0,525	0,526	2,25	2,25	89	88	27	27	551	546	26	26	26	26	92,41	92,41	5,2	5,2	0,66	0,64	10,98	10,94	37	38	855	862	
1800	39,2	39	7,3	7,3	24,3	24,3	0,486	0,486	2,08	2,08	86	86	27	26	542	542	26	26	26	26	92,42	92,42	5,4	5,4	0,76	0,75	11,15	11,08	44	43	879	880	



Resultados obtidos no ensaio do motor M93 - ETH50W50_20																																
Rotação [rpm]	Torque [Nm]		Potência Observada [kW]		Consumo (g/50s)		Consumo (g/s)		Consumo (l/h)		Óleo lubrificante [°C]		Admissão [°C]		Escape [°C]		Bulbo seco [°C]		Bulbo úmido [°C]		Pressão barométrica [kPa]		Opacidade [UB]		CO [%]		CO2 [%]		HC [ppm]		NOx [ppm]	
	Teste 1	Teste 2	Teste 1	Teste 2	Teste 1	Teste 2	Teste 1	Teste 2	Teste 1	Teste 2	Teste 1	Teste 2	Teste 1	Teste 2	Teste 1	Teste 2	Teste 1	Teste 2	Teste 1	Teste 2	Teste 1	Teste 2	Teste 1	Teste 2	Teste 1	Teste 2	Teste 1	Teste 2	Teste 1	Teste 2	Teste 1	Teste 2
2800	45,4	45,5	13,2	13	37,4	37,3	0,748	0,746	3,21	3,20	91	93	29	29	625	630	27	27	27	27	92,3	92,31	5,4	5,2	0,63	0,65	11,45	11,59	21	24	654	631
2600	44,3	44,9	12,1	12,2	33,1	33,6	0,662	0,672	2,84	2,88	92	92	29	29	595	596	27	27	27	27	92,3	92,3	4,9	4,8	0,41	0,42	11,06	11,14	28	29	667	664
2400	39,6	39,6	9,7	9,8	33	32,9	0,66	0,658	2,83	2,82	92	92	28	28	610	610	27	27	27	27	92,3	92,3	5,4	5,4	0,83	0,81	11,55	11,59	29	27	657	653
2200	37,8	37,3	8,8	8,7	28,8	28,9	0,576	0,578	2,47	2,48	92	91	28	27	577	580	27	27	27	27	92,28	92,29	5,3	5,2	0,65	0,61	11,08	11,12	30	32	719	699
2000	38,2	35,4	7,9	7,3	28,4	26,2	0,568	0,524	2,43	2,25	91	90	27	27	559	543	27	27	27	27	92,28	92,28	4,8	4,7	0,36	0,32	10,27	10,14	32	32	800	823
1800	39,6	40,1	7,5	7,4	24,8	24,6	0,496	0,492	2,13	2,11	89	88	27	27	546	549	27	27	27	27	92,28	92,28	5,4	5,3	0,81	0,75	10,82	11,13	39	39	796	754

Resultados obtidos no ensaio do motor M93 - ETH50W50_25																																
Rotação [rpm]	Torque [Nm]		Potência Observada [kW]		Consumo (g/50s)		Consumo (g/s)		Consumo (l/h)		Óleo lubrificante [°C]		Admissão [°C]		Escape [°C]		Bulbo seco [°C]		Bulbo úmido [°C]		Pressão barométrica [kPa]		Opacidade [UB]		CO [%]		CO2 [%]		HC [ppm]		NOx [ppm]	
	Teste 1	Teste 2	Teste 1	Teste 2	Teste 1	Teste 2	Teste 1	Teste 2	Teste 1	Teste 2	Teste 1	Teste 2	Teste 1	Teste 2	Teste 1	Teste 2	Teste 1	Teste 2	Teste 1	Teste 2	Teste 1	Teste 2	Teste 1	Teste 2	Teste 1	Teste 2	Teste 1	Teste 2	Teste 1	Teste 2	Teste 1	Teste 2
2800	47,4	47,3	13,8	13,8	37,6	37,6	0,752	0,752	3,22	3,22	91	91	30	29	635	635	28	27	28	28	92,26	92,27	5,3	5,4	0,83	0,85	11,8	11,84	32	30	616	605
2600	46,6	47	12,7	12,8	33,2	33,1	0,664	0,662	2,85	2,84	92	92	29	29	607	604	28	27	28	28	92,25	92,27	4,9	5	0,59	0,43	11,44	11,25	31	29	646	649
2400	40,8	40,7	10,3	10,2	32,8	32,9	0,656	0,658	2,81	2,82	92	92	28	27	612	614	28	28	28	28	92,27	92,25	5,6	5,5	0,93	0,94	11,82	11,83	32	29	663	653
2200	37,7	38,1	8,7	8,8	29	29,1	0,58	0,582	2,49	2,49	91	90	27	27	584	585	27	27	28	28	92,26	92,26	5,4	5,2	0,76	0,77	11,41	11,43	32	34	710	704
2000	38,9	36,4	8,1	7,9	26,3	26,1	0,526	0,522	2,25	2,24	89	89	26	26	564	549	27	27	27	27	92,26	92,26	4,7	5,3	0,41	0,49	10,23	10,69	33	36	829	785
1800	38	37,6	7,1	6,9	24,4	24,3	0,488	0,486	2,09	2,08	88	87	26	26	535	528	27	27	27	27	92,26	92,26	5	5,6	0,42	0,38	10,51	10,54	39	38	895	900

Resultados obtidos no ensaio do motor M93 - ETH0W100_10																																
Rotação [rpm]	Torque [Nm]		Potência Observada [kW]		Consumo (g/50s)		Consumo (g/s)		Consumo (l/h)		Óleo lubrificante [°C]		Admissão [°C]		Escape [°C]		Bulbo seco [°C]		Bulbo úmido [°C]		Pressão barométrica [kPa]		Opacidade [UB]		CO [%]		CO2 [%]		HC [ppm]		NOx [ppm]	
	Teste 1	Teste 2	Teste 1	Teste 2	Teste 1	Teste 2	Teste 1	Teste 2	Teste 1	Teste 2	Teste 1	Teste 2	Teste 1	Teste 2	Teste 1	Teste 2	Teste 1	Teste 2	Teste 1	Teste 2	Teste 1	Teste 2	Teste 1	Teste 2	Teste 1	Teste 2	Teste 1	Teste 2	Teste 1	Teste 2	Teste 1	Teste 2
2800	40,8	40,6	11,9	11,9	36,9	37,3	0,738	0,746	3,16	3,20	92	92	30	30	594	593	27	26	27	27	92,4	92,39	5,3	5,2	0,41	0,44	10,79	10,75	25	26	717	714
2600	39,7	39,9	10,7	10,7	33,2	33,4	0,664	0,668	2,85	2,86	92	92	27	27	555	555	26	26	27	27	92,4	92,4	4,5	4,7	0,3	0,28	10,25	10,23	29	27	778	765
2400	35,9	36,2	8,9	9	32,5	32,2	0,65	0,644	2,79	2,76	92	91	27	27	571	570	26	26	27	27	92,4	92,38	5,2	5	0,48	0,47	10,63	10,63	25	24	760	758
2200	34	33,9	7,8	7,6	28,4	29	0,568	0,58	2,43	2,49	90	90	27	27	544	542	26	26	27	27	92,4	92,4	5,1	5	0,44	0,43	10,29	10,33	27	28	770	770
2000	35,4	35,3	7,3	7,4	26,9	25,9	0,538	0,518	2,31	2,22	89	89	26	27	525	524	26	26	26	26	92,4	92,4	4,8	5	0,4	0,46	10,05	10,22	33	32	855	806
1800	37,4	37,4	7	7	24,7	24,7	0,494	0,494	2,12	2,12	86	86	26	26	524	527	25	25	26	26	92,4	92,4	5,3	5,2	0,6	0,64	10,61	10,67	35	35	867	856

Resultados obtidos no ensaio do motor M93 - ETH0W100_15																																	
Rotação [rpm]	Torque [Nm]		Potência Observada [kW]		Consumo (g/50s)		Consumo (g/s)		Consumo (l/h)		Óleo lubrificante [°C]		Admissão [°C]		Escape [°C]		Bulbo seco [°C]		Bulbo úmido [°C]		Pressão barométrica [kPa]		Opacidade [UB]		CO [%]		CO2 [%]		HC [ppm]		NOx [ppm]		
	Teste 1	Teste 2	Teste 1	Teste 2	Teste 1	Teste 2	Teste 1	Teste 2	Teste 1	Teste 2	Teste 1	Teste 2	Teste 1	Teste 2	Teste 1	Teste 2	Teste 1	Teste 2	Teste 1	Teste 2	Teste 1	Teste 2	Teste 1	Teste 2	Teste 1	Teste 2	Teste 1	Teste 2	Teste 1	Teste 2	Teste 1	Teste 2	Teste 1
2800	41,7	41,4	12,1	12,3	37,7	37,5	0,754	0,75	3,23	3,21	89	88	24	23	578	580	21	21	22	22	92,63	92,63	5,2	4,8	0,22	0,26	10,32	10,32	31	29	625	585	
2600	40,6	40,3	10,9	10,8	33,4	33,5	0,668	0,67	2,86	2,87	88	88	23	23	541	539	21	21	22	22	92,62	92,63	4,8	4,8	0,2	0,2	9,91	9,87	40	38	587	583	
2400	36,2	36,3	9,1	9,1	33,1	33,1	0,662	0,662	2,84	2,84	88	87	23	23	560	563	21	21	22	22	92,63	92,6	5,4	5,2	0,38	0,39	10,47	10,47	32	31	606	612	
2200	34,6	34,8	7,9	7,9	29,2	29,4	0,584	0,588	2,50	2,52	84	84	23	23	536	536	22	22	22	22	92,6	92,61	5,2	5,2	0,35	0,35	10,15	10,07	37	35	616	605	
2000	36	35,9	7,5	7,5	27,1	27,1	0,542	0,542	2,32	2,32	82	82	23	23	525	525	22	23	22	22	92,61	92,61	5,2	5,2	0,37	0,38	10,21	10,25	39	39	661	655	
1800	37,9	37,9	7,1	7,1	25,1	25,1	0,502	0,502	2,15	2,15	79	79	23	23	520	523	22	22	22	22	92,6	92,61	5,4	5,6	0,44	0,47	10,46	10,53	43	46	699	702	

Resultados obtidos no ensaio do motor M93 - ETH0W100_20																																	
Rotação [rpm]	Torque [Nm]		Potência Observada [kW]		Consumo (g/50s)		Consumo (g/s)		Consumo (l/h)		Óleo lubrificante [°C]		Admissão [°C]		Escape [°C]		Bulbo seco [°C]		Bulbo úmido [°C]		Pressão barométrica [kPa]		Opacidade [UB]		CO [%]		CO2 [%]		HC [ppm]		NOx [ppm]		
	Teste 1	Teste 2	Teste 1	Teste 2	Teste 1	Teste 2	Teste 1	Teste 2	Teste 1	Teste 2	Teste 1	Teste 2	Teste 1	Teste 2	Teste 1	Teste 2	Teste 1	Teste 2	Teste 1	Teste 2	Teste 1	Teste 2	Teste 1	Teste 2	Teste 1	Teste 2	Teste 1	Teste 2	Teste 1	Teste 2	Teste 1	Teste 2	Teste 1
2800	41,9	41,9	12,3	12,2	37,4	37,9	0,748	0,758	3,21	3,25	89	89	26	25	579	576	24	23	23	24	92,59	92,59	4,9	5	0,33	0,32	10,59	10,53	29	30	517	507	
2600	40,3	40,7	11	11	33,5	33,5	0,67	0,67	2,87	2,87	89	89	25	24	535	533	23	23	24	24	92,59	92,58	4,8	4,6	0,19	0,21	9,95	9,99	35	38	520	523	
2400	37,1	36,9	9,1	9,1	33,1	33	0,662	0,66	2,84	2,83	88	88	25	25	557	557	23	23	24	24	92,57	92,58	5,4	5,2	0,41	0,39	10,55	10,54	33	32	546	539	
2200	34,3	34,4	7,8	7,9	29,2	29,3	0,584	0,586	2,50	2,51	85	85	25	25	532	534	24	24	24	24	92,57	92,57	5,2	5,2	0,34	0,33	10,18	10,21	37	37	545	544	
2000	35,2	35,6	7,5	7,3	27,1	27,1	0,542	0,542	2,32	2,32	83	83	25	25	520	522	24	23	24	24	92,56	92,55	5,2	5,2	0,35	0,37	10,24	10,27	42	42	615	606	
1800	37,7	37,4	7,1	7	24,9	25	0,498	0,5	2,13	2,14	80	80	25	25	514	512	23	23	23	23	92,55	92,55	5,6	5,6	0,49	0,55	10,48	10,45	50	52	656	654	

Resultados obtidos no ensaio do motor M93 - ETH0W100_25																																	
Rotação [rpm]	Torque [Nm]		Potência Observada [kW]		Consumo (g/50s)		Consumo (g/s)		Consumo (l/h)		Óleo lubrificante [°C]		Admissão [°C]		Escape [°C]		Bulbo seco [°C]		Bulbo úmido [°C]		Pressão barométrica [kPa]		Opacidade [UB]		CO [%]		CO2 [%]		HC [ppm]		NOx [ppm]		
	Teste 1	Teste 2	Teste 1	Teste 2	Teste 1	Teste 2	Teste 1	Teste 2	Teste 1	Teste 2	Teste 1	Teste 2	Teste 1	Teste 2	Teste 1	Teste 2	Teste 1	Teste 2	Teste 1	Teste 2	Teste 1	Teste 2	Teste 1	Teste 2	Teste 1	Teste 2	Teste 1	Teste 2	Teste 1	Teste 2	Teste 1	Teste 2	Teste 1
2800	41	41,1	12	12	37,9	37,9	0,758	0,758	3,25	3,25	92	92	29	29	581	575	25	26	26	26	92,47	92,46	5,4	5,2	0,37	0,33	10,56	10,63	27	28	466	456	
2600	40,4	39,9	11	10,9	33,4	33,3	0,668	0,666	2,86	2,85	91	91	27	27	545	537	25	25	26	26	92,46	92,46	4,8	4,8	0,23	0,21	10,11	10,01	32	35	487	483	
2400	36,6	35,8	8,8	8,8	32,8	32,7	0,656	0,654	2,81	2,80	90	89	26	27	563	564	25	25	26	26	92,45	92,44	5	5,4	0,33	0,47	10,46	10,6	28	32	555	517	
2200	33,6	33,6	7,7	7,7	29,2	29,1	0,584	0,582	2,50	2,49	88	87	26	27	537	539	25	25	26	26	92,44	92,43	5,4	5,2	0,33	0,29	10,2	10,12	32	33	655	546	
2000	34,6	34,5	7,2	7,2	27,2	26,3	0,544	0,526	2,33	2,25	86	85	26	26	519	520	26	25	26	26	92,43	92,43	5,2	5,4	0,37	0,39	10,13	10,21	38	41	622	571	
1800	37,9	37,6	7,1	7,1	24,9	24,9	0,498	0,498	2,13	2,13	83	82	26	26	525	530	25	25	25	25	92,41	92,41	5,2	5,2	0,46	0,49	10,57	10,63	39	37	919	921	

## APÊNDICE B – DADOS CALCULADOS

Resultados obtidos no ensaio do motor M93 - ETH0W0																					
Rotação [rpm]	Torque [Nm]	Potência Observada [kW]	Potência corrigida [kW] ISO 1585	Vazão mássica de combustível [g/h]	Vazão mássica de ESH [g/h]	Consumo específico [g/kWh]	% m OD	% m ESH	PCI [MJ]	Eficiência [%]	Óleo lubrificante [°C]	Admissão [°C]	Escape [°C]	Bulbo seco [°C]	Bulbo úmido [°C]	Pressão barométrica [kPa]	Opacidade [UB]	CO [%]	CO2 [%]	HC [ppm]	NOx [ppm]
2800	41,6	12,1	12,9	2696,4	0,00	222,84	100%	0%	41,85	38,6	92	28	598	27	28	92,2	4,6	0,25	10,68	21,0	807
2600	40,8	11,1	11,7	2394,0	0,00	216,65	100%	0%	41,85	39,7	92	28	561	27	28	92,2	4,3	0,17	10,08	24,5	928
2400	37,2	9,3	9,9	2372,4	0,00	255,10	100%	0%	41,85	33,7	92	28	590	27	28	92,2	4,9	0,39	10,84	15,5	918
2200	35	8	8,4	2081	0,00	263,39	100%	0%	41,85	32,7	91	27	554	27	28	92,2	5	0	10	22,5	912
2000	35,3	7,4	7,8	1886,4	0,00	256,65	100%	0%	41,85	33,5	89	27	532	27	27	92,2	4,8	0,30	10,25	25,0	936
1800	37,9	7,1	7,6	1782,0	0,00	250,99	100%	0%	41,85	34,3	87	27	532	27	27	92,2	5,2	0,41	10,69	28,5	958

Resultados obtidos no ensaio do motor M93 - ETH50W50_10																					
Rotação [rpm]	Torque [Nm]	Potência Observada [kW]	Potência corrigida [kW] ISO 1585	Vazão mássica de combustível [g/h]	Vazão mássica de ESH [g/h]	Consumo específico [g/kWh]	% m OD	% m ESH	PCI [MJ]	Eficiência [%]	Óleo lubrificante [°C]	Admissão [°C]	Escape [°C]	Bulbo seco [°C]	Bulbo úmido [°C]	Pressão barométrica [kPa]	Opacidade [UB]	CO [%]	CO2 [%]	HC [ppm]	NOx [ppm]
2800	42,7	12,6	13,2	2622,6	268,29	230,35	91%	9%	39,05	40,0	88	26	613	24	25	92,4	5,1	0,50	11,00	59,0	720
2600	43,4	11,6	12,1	2414,9	258,84	230,49	90%	10%	38,93	40,1	89	24	579	24	25	92,4	4,8	0,46	10,90	40,5	755
2400	37,4	9,4	9,9	2361,2	244,66	278,71	91%	9%	39,01	33,1	89	24	593	23	24	92,4	5,4	0,66	11,07	35,5	744
2200	35,5	8,1	8,5	2109,2	225,74	288,27	90%	10%	38,93	32,1	88	24	563	23	24	92,4	5,2	0,55	10,48	37,0	737
2000	36,6	7,7	8,0	1890,0	206,83	274,10	90%	10%	38,87	33,8	88	24	547	24	24	92,4	5,3	0,64	10,45	39,5	756
1800	38,1	7,1	7,5	1747,8	198,95	274,19	90%	10%	38,76	33,9	86	24	530	24	24	92,4	5,5	0,74	10,44	44,0	775

Resultados obtidos no ensaio do motor M93 - ETH50W50_15																					
Rotação [rpm]	Torque [Nm]	Potência Observada [kW]	Potência corrigida [kW] ISO 1585	Vazão mássica de combustível [g/h]	Vazão mássica de ESH [g/h]	Consumo específico [g/kWh]	% m OD	% m ESH	PCI [MJ]	Eficiência [%]	Óleo lubrificante [°C]	Admissão [°C]	Escape [°C]	Bulbo seco [°C]	Bulbo úmido [°C]	Pressão barométrica [kPa]	Opacidade [UB]	CO [%]	CO2 [%]	HC [ppm]	NOx [ppm]
2800	44,7	13,1	13,9	2678,4	406,36	236,38	87%	13%	37,87	40,2	92	30	626	27	26	92,4	5,2	0,66	11,49	21,5	740
2600	43,9	11,9	12,5	2455,2	392,28	240,29	86%	14%	37,69	39,7	92	28	595	26	26	92,4	4,9	0,51	11,07	26,5	803
2400	38,6	9,6	10,2	2350,8	370,82	283,50	86%	14%	37,74	33,7	92	28	605	26	26	92,4	5,4	0,80	11,46	24,5	819
2200	36,8	8,4	8,9	2073,6	341,31	287,49	86%	14%	37,58	33,3	90	27	573	26	26	92,4	5,1	0,66	11,09	29,5	836
2000	37,1	7,8	8,2	1891,8	311,81	284,34	86%	14%	37,58	33,7	89	27	549	26	26	92,4	5,2	0,65	10,96	37,5	859
1800	39,1	7,3	7,7	1749,6	293,03	279,81	86%	14%	37,52	34,3	86	27	542	26	26	92,4	5,4	0,76	11,12	43,5	880

Resultados obtidos no ensaio do motor M93 - ETH50W50_20																					
Rotação [rpm]	Torque [Nm]	Potência Observada [kW]	Potência corrigida [kW] ISO 1585	Vazão mássica de combustível [g/h]	Vazão mássica de ESH [g/h]	Consumo específico [g/kWh]	% m OD	% m ESH	PCI [MJ]	Eficiência [%]	Óleo lubrificante [°C]	Admissão [°C]	Escape [°C]	Bulbo seco [°C]	Bulbo úmido [°C]	Pressão barométrica [kPa]	Opacidade [UB]	CO [%]	CO2 [%]	HC [ppm]	NOx [ppm]
2800	45,5	13,1	13,9	2689,2	541,39	246,61	83%	17%	36,79	39,7	92	29	628	27	27	92,3	5,3	0,64	11,52	22,5	643
2600	44,6	12,2	12,8	2401,2	521,88	240,58	82%	18%	36,46	41,0	92	29	596	27	27	92,3	4,9	0,42	11,10	28,5	666
2400	39,6	9,8	10,4	2372,4	492,61	293,85	83%	17%	36,66	33,4	92	28	610	27	27	92,3	5,4	0,82	11,57	28,0	655
2200	37,6	8,8	9,3	2077,2	453,60	289,23	82%	18%	36,44	34,2	92	28	579	27	27	92,3	5,3	0,63	11,10	31,0	709
2000	36,8	7,6	8,1	1965,6	414,58	313,18	83%	17%	36,59	31,4	91	27	551	27	27	92,3	4,8	0,34	10,21	32,0	812
1800	39,9	7,5	7,9	1778,4	391,17	291,22	82%	18%	36,41	34,0	89	27	548	27	27	92,3	5,4	0,78	10,98	39,0	775

Resultados obtidos no ensaio do motor M93 - ETH50W50_25																					
Rotação [rpm]	Torque [Nm]	Potência Observada [kW]	Potência corrigida [kW] ISO 1585	Vazão mássica de combustível [g/h]	Vazão mássica de ESH [g/h]	Consumo específico [g/kWh]	% m OD	% m ESH	PCI [MJ]	Eficiência [%]	Óleo lubrificante [°C]	Admissão [°C]	Escape [°C]	Bulbo seco [°C]	Bulbo úmido [°C]	Pressão barométrica [kPa]	Opacidade [UB]	CO [%]	CO2 [%]	HC [ppm]	NOx [ppm]
2800	47,4	13,8	14,7	2707,2	672,88	244,93	80%	20%	35,84	41,0	91	30	635	28	28	92,3	5,4	0,84	11,82	31,0	611
2600	46,8	12,8	13,5	2386,8	648,41	238,06	79%	21%	35,40	42,7	92	29	606	28	28	92,3	5,0	0,51	11,35	30,0	648
2400	40,8	10,3	10,9	2365,2	611,71	290,43	79%	21%	35,65	34,8	92	28	613	28	28	92,3	5,6	0,94	11,83	30,5	658
2200	37,9	8,8	9,3	2091,6	562,77	303,36	79%	21%	35,45	33,5	91	27	585	27	28	92,3	5,3	0,77	11,42	33,0	707
2000	37,7	8,0	8,4	1886,4	513,83	300,03	79%	21%	35,39	33,9	89	26	557	27	27	92,3	5,0	0,45	10,46	34,5	807
1800	37,8	7,0	7,4	1753,2	484,47	319,67	78%	22%	35,31	31,9	88	26	532	27	27	92,3	5,3	0,40	10,53	38,5	898

Resultados obtidos no ensaio do motor M93 - ETH0W100_10																					
Rotação [rpm]	Torque [Nm]	Potência Observada [kW]	Potência corrigida [kW] ISO 1585	Vazão mássica de combustível [g/h]	Vazão mássica de ESH [g/h]	Consumo específico [g/kWh]	% n OD	% n ESH	PCI [MJ]	Eficiência [%]	Óleo lubrificante [°C]	Admissão [°C]	Escape [°C]	Bulbo seco [°C]	Bulbo úmido [°C]	Pressão barométrica [kPa]	Opacidade [UB]	CO [%]	CO2 [%]	HC [ppm]	NOx [ppm]
2800	40,7	11,9	12,7	2671,2	0,00	224,47	100%	0%	41,85	38,3	92	30	594	27	27	92,4	5,3	0,43	10,77	25,5	716
2600	39,8	10,7	11,3	2397,6	0,00	224,07	100%	0%	41,85	38,4	92	27	555	26	27	92,4	4,6	0,29	10,24	28,0	772
2400	36,1	9,0	9,5	2329,2	0,00	260,25	100%	0%	41,85	33,1	92	27	571	26	27	92,4	5,1	0,48	10,63	24,5	759
2200	34,0	7,7	8,1	2066,4	0,00	268,36	100%	0%	41,85	32,1	90	27	543	26	27	92,4	5,1	0,44	10,31	27,5	770
2000	35,4	7,4	7,8	1900,8	0,00	258,61	100%	0%	41,85	33,3	89	27	525	26	26	92,4	4,9	0,43	10,14	32,5	831
1800	37,4	7,0	7,5	1778,4	0,00	254,06	100%	0%	41,85	33,9	86	26	526	25	26	92,4	5,3	0,62	10,64	35,0	862

Resultados obtidos no ensaio do motor M93 - ETH0W100_15																					
Rotação [rpm]	Torque [Nm]	Potência Observada [kW]	Potência corrigida [kW] ISO 1585	Vazão mássica de combustível [g/h]	Vazão mássica de ESH [g/h]	Consumo específico [g/kWh]	% n OD	% n ESH	PCI [MJ]	Eficiência [%]	Óleo lubrificante [°C]	Admissão [°C]	Escape [°C]	Bulbo seco [°C]	Bulbo úmido [°C]	Pressão barométrica [kPa]	Opacidade [UB]	CO [%]	CO2 [%]	HC [ppm]	NOx [ppm]
2800	41,6	12,2	12,8	2707,2	0,00	221,90	100%	0%	41,85	38,8	89	24	579	21	22	92,6	5,0	0,24	10,32	30,0	605
2600	40,5	10,9	11,3	2408,4	0,00	221,97	100%	0%	41,85	38,8	88	23	540	21	22	92,6	4,8	0,20	9,89	39,0	585
2400	36,3	9,1	9,6	2383,2	0,00	261,89	100%	0%	41,85	32,8	88	23	562	21	22	92,6	5,3	0,39	10,47	31,5	609
2200	34,7	7,9	8,3	2109,6	0,00	267,04	100%	0%	41,85	32,2	84	23	536	22	22	92,6	5,2	0,35	10,11	36,0	611
2000	36,0	7,5	7,9	1951,2	0,00	260,16	100%	0%	41,85	33,1	82	23	525	23	22	92,6	5,2	0,38	10,23	39,0	658
1800	37,9	7,1	7,5	1807,2	0,00	254,54	100%	0%	41,85	33,8	79	23	522	22	22	92,6	5,5	0,46	10,50	44,5	701

Resultados obtidos no ensaio do motor M93 - ETH0W100_20																					
Rotação [rpm]	Torque [Nm]	Potência Observada [kW]	Potência corrigida [kW] ISO 1585	Vazão mássica de combustível [g/h]	Vazão mássica de ESH [g/h]	Consumo específico [g/kWh]	% n OD	% n ESH	PCI [MJ]	Eficiência [%]	Óleo lubrificante [°C]	Admissão [°C]	Escape [°C]	Bulbo seco [°C]	Bulbo úmido [°C]	Pressão barométrica [kPa]	Opacidade [UB]	CO [%]	CO2 [%]	HC [ppm]	NOx [ppm]
2800	41,9	12,3	12,9	2710,8	0,00	221,29	100%	0%	41,85	38,9	89	26	578	24	24	92,6	5,0	0,33	10,56	29,5	512
2600	40,5	11,0	11,5	2412,0	0,00	219,27	100%	0%	41,85	39,2	89	25	534	23	24	92,6	4,7	0,20	9,97	36,5	522
2400	37,0	9,1	9,6	2379,6	0,00	261,49	100%	0%	41,85	32,9	88	25	557	23	24	92,6	5,3	0,40	10,55	32,5	543
2200	34,4	7,9	8,3	2106,0	0,00	268,28	100%	0%	41,85	32,1	85	25	533	24	24	92,6	5,2	0,34	10,20	37,0	545
2000	35,4	7,4	7,8	1951,2	0,00	263,68	100%	0%	41,85	32,6	83	25	521	24	24	92,6	5,2	0,36	10,26	42,0	611
1800	37,6	7,1	7,5	1796,4	0,00	254,81	100%	0%	41,85	33,8	80	25	513	23	23	92,6	5,6	0,52	10,47	51,0	655

Resultados obtidos no ensaio do motor M93 - ETH0W100_25																					
Rotação [rpm]	Torque [Nm]	Potência Observada [kW]	Potência corrigida [kW] ISO 1585	Vazão mássica de combustível [g/h]	Vazão mássica de ESH [g/h]	Consumo específico [g/kWh]	% n OD	% n ESH	PCI [MJ]	Eficiência [%]	Óleo lubrificante [°C]	Admissão [°C]	Escape [°C]	Bulbo seco [°C]	Bulbo úmido [°C]	Pressão barométrica [kPa]	Opacidade [UB]	CO [%]	CO2 [%]	HC [ppm]	NOx [ppm]
2800	41,1	12,0	12,8	2728,8	0,00	227,40	100%	0%	41,85	37,8	92	29	578	26	26	92,5	5,3	0,35	10,60	27,5	461
2600	40,2	11,0	11,5	2401,2	0,00	219,29	100%	0%	41,85	39,2	91	27	541	25	26	92,5	4,8	0,22	10,06	33,5	485
2400	36,2	8,8	9,4	2358,0	0,00	267,95	100%	0%	41,85	32,1	90	27	564	25	26	92,4	5,2	0,40	10,53	30,0	536
2200	33,6	7,7	8,2	2098,8	0,00	272,57	100%	0%	41,85	31,6	88	27	538	25	26	92,4	5,3	0,31	10,16	32,5	601
2000	34,6	7,2	7,6	1926,0	0,00	267,50	100%	0%	41,85	32,2	86	26	520	26	26	92,4	5,3	0,38	10,17	39,5	597
1800	37,8	7,1	7,6	1792,8	0,00	252,51	100%	0%	41,85	34,1	83	26	528	25	25	92,4	5,2	0,48	10,60	38,0	920