



**MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA  
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA  
DA BAHIA**

**ATA  
ATA DE DEFESA DO TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO (TCC II)  
ENGENHARIA MECÂNICA**

Às 20:05 horas do dia 29 de janeiro de 2025, reuniu-se na sala de videoconferência, do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Bahia, campus Jequié, a Banca Examinadora para avaliação do Trabalho de Conclusão de Curso intitulado " ESTUDO EXPERIMENTAL DA INJEÇÃO COM NÉVOA DE ÁGUA EM MOTORES DE CICLO DIESEL PARA MITIGAÇÃO DAS EMISSÕES DE GASES POLUENTES" de autoria do(a) discente Mateus Evangelista dos Santos, composta pelos docentes Dr. Márcio Andrade Rocha (Orientador), Dra. Olândia Ferreira Lopes (coorientadora e membro examinador), Me. Filipe Dondoni Ramos (membro examinador) e Dr. Lesso Benedito dos Santos (membro examinador), para a sessão de defesa pública do referido trabalho, requisito para a obtenção do Grau de bacharel em Engenharia Mecânica, com ênfase em mecatrônica. Abrindo a sessão, o orientador e Presidente da Banca, Prof(a). Dr. Márcio Andrade Rocha, após cumprimentar e agradecer, passou a palavra a(o) discente para apresentação de seu trabalho, com duração de 19 minutos. Posteriormente, seguiu-se as contribuições proferidas pelos membros da Banca. Logo após, a Comissão se reuniu, sem a presença do(a) discente e do público, para julgamento e expedição do resultado final. O discente foi considerado APROVADO, pelos membros da Banca Examinadora, tendo sido atribuída nota **9,3** referente ao seu TCC. O resultado foi então comunicado publicamente ao discente pelo Presidente da Banca. Foi concedido o prazo máximo de 15 (quinze) dias para a(o) discente efetuar as correções sugeridas pela Banca Examinadora e apresentar o trabalho em sua redação definitiva, sob pena de não expedição do Diploma. E, para constar, foi lavrada a presente ata e assinada pelos membros da Banca para fins de produção de seus efeitos legais. Nada mais havendo a tratar, o Presidente da Banca Examinadora deu por encerrado o julgamento que teve por conteúdo o teor desta Ata.

Jequié -BA, 29 de janeiro de 2025.

## BANCA EXAMINADORA

Documento assinado digitalmente  
 **MARCIO ANDRADE ROCHA**  
Data: 29/01/2025 21:44:00-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

---

Dr. Márcio Andrade Rocha  
Presidente da Banca Examinadora

---

Dra. Olândia Ferreira Lopes  
Membro da Banca Examinadora

Documento assinado digitalmente  
 **FILIFE DONDONI RAMOS**  
Data: 29/01/2025 22:24:17-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

---

Me. Filipe Dondoni Ramos  
Membro da Banca Examinadora

Documento assinado digitalmente  
 **LESSO BENEDITO DOS SANTOS**  
Data: 29/01/2025 21:59:07-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

---

Dr. Lesso Benedito dos Santos  
Membro da Banca Examinadora

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA**  
**Pró-Reitoria de Desenvolvimento de Infraestrutura e Institucional**  
**Gerência de Desenvolvimento de Bibliotecas**  
**SISTEMAS DE BIBLIOTECAS(SIB) - REPOSITÓRIO IFBA**



**TERMO DE AUTORIZAÇÃO E DEPÓSITO LEGAL PARA PUBLICAÇÃO DE DOCUMENTOS NO REPOSITÓRIO DO INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA (RI-IFBA)**

Na qualidade de titular dos direitos autorais do autor que recai sobre a: ( ) Dissertação ( ) Tese, ( X ) TCCs, ( ) Artigos de periódicos ( ) Livros ( ) Outros: \_\_\_\_\_ aprovada pelo Programa de Pós-Graduação em:

no dia 29 / 01 / 2025, fundamentado na Lei de Direito Autoral nº 9.160 de 19 de fevereiro de 1998, art. 29, inciso III, autorizo o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia (IFBA) disponibilizar gratuitamente, sem ressarcimento dos direitos autorais para fins de leitura, impressão e downloads (aquisição) por meio do site do Repositório Institucional do IFBA no endereço <www.repositorio.ifba.edu.br> a partir desta data 07 / 04 / 2025.

**1 IDENTIFICAÇÃO DO AUTOR**

Nome: Mateus Evangelista Dos Santos

CPF: 077.870.165-40 RNE (estrangeiro) \_\_\_\_\_

E-mail: mateusevang20@gmail.com

**2 TÍTULO DA OBRA**

ESTUDO EXPERIMENTAL DA INJEÇÃO COM NÉVOA DE ÁGUA EM MOTORES DE CICLO DIESEL PARA MITIGAÇÃO DAS EMISSÕES DE GASES POLUENTES

Orientador: Márcio Andrade Rocha

CPF: 600.624.875-15 E-mail: marcioandrade@ifba.edu.br

Coorientador: Olândia Ferreira Lopes

CPF: \_\_\_\_\_ E-mail: olandialopes@ifba.edu.br

Instituição e/ou Centro Acadêmico de Defesa: Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Bahia, campus Jequié.

Área de Conhecimento: Engenharias

Palavras Chave: motores diesel; emissões; névoa de água; redução de gases.

Agência de Fomento (Ex.: CAPES/ CNPq):

Membros titulares da banca examinadora:

Dr. Márcio Andrade Rocha

Dra. Olândia Ferreira Lopes

Me. Filipe Dondoni Ramos

Dr. Lesso Benedito dos Santos

### 3) INFORMAÇÕES DE ACESSO AO DOCUMENTO

a) Restrição para sigilo industrial, razões éticas ou publicação.

b) Na restrição parcial o resumo e o abstract serão obrigatoriamente disponibilizados no Repositório Insitucional (RI)

(X) Texto Completo ( ) Restrição parcial ( ) Restrição total

Declaro para os devidos fins deste Termo de Autorização e Depósito Legal para Publicação de Teses e Dissertações Eletrônicas no Repositório Institucional do **INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA (RI-IFBA)**.

a) a restrição (parcial ou total) será mantida por um período de 2 anos a partir da data de autorização, de acordo com a Resolução Nº 23, de 04 de outubro de 2017. A prorrogação deste prazo requer justificativa junto ao Comitê Gestor do RI-IFBA, em tempo hábil, ou seja, antes de findar o período acima citado. Não havendo manifestação a modalidade **TEXTO COMPLETO** da obra será disponibilizada;

b) O conteúdo disponibilizado é de minha inteira responsabilidade;

c) A substituição do exemplar ou parte da tese e dissertação já depositada no RI por outra versão corrigida e/ou alterada será permitida mediante abertura de processo administrativo junto à Reitoria para ser avaliado pela Pró-Reitoria de Pesquisa e Pós-Graduação e;

d) a alteração da modalidade de acesso do documento após o depósito, assinala no item 3 deste termo de depósito legal, será permitida mediante solicitação ao RI, devendo ser assinado(a) pelo(a) autor(a) da tese ou dissertação.

Documento assinado digitalmente



MATEUS EVANGELISTA DOS SANTOS

Data: 07/04/2025 19:45:17-0300

Verifique em <https://validar.itf.gov.br>

Salvador-BA.\_\_\_\_\_/\_\_\_\_\_/\_\_\_\_\_.

Coordenação do RI/IFBA



**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA BAHIA**  
**IFBA – CAMPUS JEQUIÉ**

MATEUS EVANGELISTA DOS SANTOS

**ESTUDO EXPERIMENTAL DA INJEÇÃO COM NÉVOA DE ÁGUA EM MOTORES  
DE CICLO DIESEL PARA MITIGAÇÃO DAS EMISSÕES DE GASES POLUENTES**

Jequié-BA

2025

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA BAHIA  
IFBA – CAMPUS JEQUIÉ**

**MATEUS EVANGELISTA DOS SANTOS**

**ESTUDO EXPERIMENTAL DA INJEÇÃO COM NÉVOA DE ÁGUA EM MOTORES  
DE CICLO DIESEL PARA MITIGAÇÃO DAS EMISSÕES DE GASES POLUENTES**

Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) apresentado à disciplina de TCC, aos docentes Fabiano Borges e Rita Queiroz como requisito parcial para conclusão do curso de Bacharelado em Engenharia Mecânica.

Orientador: Dr Marcio Andrade Rocha.

Coorientadora: Dr<sup>a</sup> Olândia Ferreira Lopez.

Jequié-BA

2025

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, por qualquer meio convencional ou eletrônico, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

## **FICHA CATALOGRÁFICA**

Mateus Evangelista Dos Santos

**ESTUDO EXPERIMENTAL DA INJEÇÃO COM NÉVOA DE ÁGUA EM MOTORES  
DE CICLO DIESEL PARA MITIGAÇÃO DAS EMISSÕES DE GASES POLUENTES**

Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) apresentado à disciplina de TCC, aos docentes Fabiano Borges e Rita Queiroz como requisito parcial para conclusão do curso de Bacharelado em Engenharia Mecânica.

**COMISSÃO JULGADORA:**

---

Prof.(a). Dr. Marcio Andrade Rocha.  
Instituto federal da Bahia.

---

Prof.(a). Dr<sup>a</sup>. Olândia Ferreira Lopez.  
Instituto federal da Bahia.

---

Prof.(a).Me. Filipe Dondoni Ramos— Membro Interno.  
Instituto federal da Bahia.

---

Prof.(a). Dr. Lesso Benedito Dos Santos — Membro Externo.  
Instituto federal de Alagoas.

Jequié-BA, 29 de janeiro de 2025.

Dedico este trabalho a todos que me apoiaram ao longo da minha jornada acadêmica, e destaco à minha família, amigos e professores que sempre me incentivaram. Agradeço também ao Instituto Federal da Bahia, que foi fundamental no meu desenvolvimento profissional e pessoal.

## **AGRADECIMENTOS**

A Deus, fonte de sabedoria, força e inspiração, dedico cada conquista desta jornada. Sua presença constante me deu coragem e determinação para superar os desafios e alcançar esta etapa tão importante.

À minha família, pelo amor incondicional, apoio irrestrito e incentivo contínuo. Vocês foram meu alicerce e inspiração, motivando-me a perseverar mesmo nos momentos mais difíceis.

Ao Professor Dr. Márcio Andrade Rocha, meu orientador, registro minha profunda gratidão pela orientação precisa, paciência e generosidade ao compartilhar seu conhecimento. Suas contribuições foram fundamentais para a realização deste trabalho.

À Professora Dr<sup>a</sup>. Olândia Ferreira Lopes, minha coorientadora, pelo incansável apoio, dedicação e valiosas orientações que enriqueceram o desenvolvimento deste estudo.

A todos aqueles que, de alguma forma, contribuíram direta ou indiretamente para a concretização deste projeto, meus mais sinceros agradecimentos.

*“Na natureza, nada se cria, nada se perde,  
tudo se transforma”.*

*Antoine Lavoisier (1743–1794).*

## RESUMO

Os veículos sempre causaram um grande impacto na sociedade, ocasionando mudanças na evolução da mobilidade urbana. No entanto, os gases presentes nas emissões veiculares têm grande potencial de impacto ao meio ambiente, sobretudo os responsáveis pelo agravamento do efeito estufa, tais como dióxido de carbono, metano e óxido nitroso. Há outros gases emitidos pelo motor de veículos como óxidos de nitrogênio, dióxido de enxofre, monóxido de nitrogênio e dióxido de nitrogênio, que intensificam a chuva ácida. Ademais, ocasionam problemas respiratórios e provocam redução das funções cardíacas e problemas vasculares. Neste estudo, analisou-se a introdução de névoa de água na câmara de combustão em motores a diesel, para avaliar o potencial de redução de emissões, por meio de experimento. A pesquisa foi realizada no Laboratório de Máquinas Térmicas do Instituto Federal da Bahia, localizado no campus Jequié, com a utilização de um motor estacionário ciclo diesel Buffalo 5.0, empregando o diesel S-500 e diesel S-10. Os dados foram obtidos por meio do analisador de gases OPTIMA 7. A análise e tratamento dos dados foi realizada através do software Excel, versão 2408. Os resultados indicam que a injeção de névoa de água em motores a diesel tem o potencial de reduzir as emissões dos gases devido ao resfriamento da câmara de combustão, a exemplo do óxido de nitrogênio, no diesel S-10 a 1800 rotações por minuto obteve a diminuição de 20,73% na proporção de água de 179,55%, no diesel S-500 com as mesmas configurações obteve a diminuição de 24,33%, já para a rotação de 2700 com proporção da água equivalente a 67,34%, os resultados trazem a redução de 10,65% para o diesel S-10, e 25,16% para diesel S-500. Esse efeito foi obtido, uma vez que a água foi utilizada como fluido de resfriamento. Desta forma, houve o controle da formação de gases, uma vez que dependem de altas temperaturas para serem gerados.

**Palavras-Chave:** motores diesel; emissões; névoa de água; redução de gases.

## ABSTRACT

Vehicles have always had a major impact on society, causing changes in the evolution of urban mobility. However, the gases present in vehicle emissions have a major potential to impact the environment, especially those responsible for worsening the greenhouse effect, such as carbon dioxide, methane and nitrous oxide. Other gases emitted by vehicle engines include nitrogen oxides, sulfur dioxide, nitrogen monoxide and nitrogen dioxide, which intensify acid rain. In addition, they cause respiratory problems and reduce heart function and vascular problems. This study analyzed the introduction of water mist into the combustion chamber of diesel engines to evaluate the potential for reducing emissions through an experiment. The research was conducted at the Thermal Machines Laboratory of the Federal Institute of Bahia, located on the Jequié campus, using a Buffalo 5.0 diesel cycle stationary engine, using S-500 diesel and S-10 diesel. The data were obtained using an OPTIMA 7 gas analyzer. Data analysis and processing were performed using Excel software, version 2408. The results indicate that water mist injection in diesel engines has the potential to reduce gas emissions by cooling the combustion chamber. For example, nitrogen oxide was reduced by 20.73% in the S-10 diesel at 1800 rpm, with a water proportion of 179.55%; in the S-500 diesel with the same settings, a reduction of 24.33% was obtained; and for the 2700 rpm, with a water proportion equivalent to 67.34%, the results show a reduction of 10.65% for the S-10 diesel and 25.16% for the S-500 diesel. This effect was achieved because water was used as a cooling fluid. In this way, gas formation was controlled, since they depend on high temperatures to be generated.

**Keywords:** diesel engines; emissions; water mist; gas reduction.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Corte de um motor ciclo diesel.....	29
Figura 2 – P- v representação do ciclo diesel.....	30
Figura 3 – Funcionamento do sistema de névoa de água proposto.....	33
Figura 4 – Diagrama com estrutura lógica do sistema. ....	34
Figura 5 – Controle da rotação do motor.....	35
Figura 6 – Mensuração do consumo de diesel.....	36
Figura 7 – Equipamento OPTIMA 7 e seus acessórios.....	37
Figura 8 – Interface de passos de mensuração no equipamento OPTIMA 7. ....	37
Figura 9 – Dados técnicos do OPTIMA 7. ....	75

## LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Comparativo dos estudos. ....	24
Gráfico 2 – Emissão de HC na presença de água. ....	25
Gráfico 3 – Redução de emissões. ....	26
Gráfico 4 – Emissões de NO <sub>x</sub> e HC.....	26
Gráfico 5– Pressão na câmara.....	27
Gráfico 6 – Emissões NO <sub>x</sub> a 1800 RPM no diesel S-10.....	41
Gráfico 7 – Emissões NO <sub>x</sub> a 1800 RPM no diesel S-500.....	41
Gráfico 8 – Emissões NO <sub>x</sub> a 2700 RPM no diesel S-10.....	43
Gráfico 9 – Emissões NO <sub>x</sub> a 2700 RPM no diesel S-500.....	44
Gráfico 10 – Emissões NO a 1800 RPM no diesel S-10. ....	46
Gráfico 11 – Emissões NO a 1800 RPM no diesel S-500.....	46
Gráfico 12 – Emissões NO a 2700 RPM no diesel S-10. ....	48
Gráfico 13 – Emissões NO a 2700 RPM no diesel S-500. ....	48
Gráfico 14 – Emissões NO <sub>2</sub> a 1800 RPM no diesel S-10.....	50
Gráfico 15 – Emissões NO <sub>2</sub> a 1800 RPM no diesel S-500.....	50
Gráfico 16 – Emissões NO <sub>2</sub> a 2700 RPM no diesel S-10.....	52
Gráfico 17 – Emissões NO <sub>2</sub> a 2700 RPM no diesel S-500.....	53
Gráfico 18 – Emissões CO a 1800 RPM no diesel S-10. ....	55
Gráfico 19 – Emissões CO a 1800 RPM no diesel S-500. ....	55
Gráfico 20 – Emissões CO a 2700 RPM no diesel S-10. ....	56
Gráfico 21 – Emissões CO a 2700 RPM no diesel S-500. ....	57
Gráfico 22 – Emissões CO <sub>2</sub> a 1800 RPM no diesel S-10.....	58
Gráfico 23 – Emissões CO <sub>2</sub> a 1800 RPM no diesel S-500.....	58
Gráfico 24 – Emissões CO <sub>2</sub> a 2700 RPM no diesel S-10.....	59
Gráfico 25 – Emissões CO <sub>2</sub> a 2700 RPM no diesel S-500.....	60
Gráfico 26 – Emissões SO <sub>2</sub> a 1800 RPM no diesel S-10. ....	61
Gráfico 27 – Emissões SO <sub>2</sub> a 1800 RPM no diesel S-500.....	61
Gráfico 28 – Emissões SO <sub>2</sub> a 2700 RPM no diesel S-10. ....	62
Gráfico 29 – Emissões SO <sub>2</sub> a 2700 RPM no diesel S-500.....	63

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Detalhamento dos materiais usados para o experimento da pesquisa. .	38
Quadro 2 – Consumo específico para cada RPM utilizado. ....	39
Quadro 3 – Consumo Específico de Água do Umidificador.....	39
Quadro 4 – Proporção de água em relação ao combustível, em porcentagem.....	40

## LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas.
PWI	Injeção indireta de água (Port water injection).
HCCI	Ignição por compressão de carga homogênea
DI	Injeção Direta (Direct injection).
IMEP	Pressão média efetiva indicada.
AFR	Relação relativa ar-combustível.
EGR	Recirculação de gases de escape.
WI	Injeção de água.
SI	Ignição por faísca.
NO <sub>x</sub>	Óxido de nitrogênio.
NO <sub>2</sub>	Dióxido de nitrogênio.
NO	Monóxido de nitrogênio.
CO <sub>2</sub>	Dióxido de carbono.
CO	Monóxido de carbono
SO <sub>2</sub>	Dióxido de enxofre.
COVs	compostos orgânicos voláteis.
RPM	Rotação por minuto.
Ppm	Medidas em partes por milhão.
COP	Conferências das Partes Unidas sobre as Mudanças Climáticas.
GEE	Gases de efeito de estufa.

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>15</b>
1.1	Justificativa	16
1.2	Contextualização do problema	17
1.3	Hipótese	18
1.4	Objetivo geral	18
1.5	Objetivos específicos	18
<b>2</b>	<b>REFERENCIAL TEÓRICO</b>	<b>19</b>
2.1	Poluição do ar e mudanças climáticas provenientes de emissões de veículos	19
2.2	Programas de controle de emissões	20
2.3	Injeção de água em motores diesel	21
2.4	Relação da temperatura e mitigação das emissões de gases	24
2.5	Eficiência térmica e volumétrica com a névoa de água	27
2.6	Combustão	28
2.7	Princípio de funcionamento do motor	29
2.7.1	Termodinâmica do ciclo Diesel	30
<b>3</b>	<b>METODOLOGIA</b>	<b>31</b>
3.1	Tipos e métodos de pesquisa	31
3.2	Desenvolvimento do experimento	32
3.3	Determinação da rotação por minuto (RPM) do motor diesel	35
3.4	Determinação do consumo de combustível do motor Buffalo 5.0	35
3.5	Determinação do consumo de água do umidificador ultrassônico	36
3.6	Coleta e interpretação de dados	36
3.7	Materiais utilizados no experimento e suas características	38
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO</b>	<b>39</b>
4.1	Consumo de diesel e água	39

<b>4.2</b>	<b>Emissões</b> .....	40
4.2.1	Óxidos de nitrogênio (NO <sub>x</sub> ).....	40
4.2.2	Monóxidos de Nitrogênio (NO) .....	45
4.2.3	Dióxido de nitrogênio (NO <sub>2</sub> ).....	49
4.2.4	Monóxido de carbono (CO).....	54
4.2.5	Dióxido de carbono (CO <sub>2</sub> ).....	57
4.2.6	Dióxido de enxofre (SO <sub>2</sub> ).....	60
<b>5</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS</b> .....	64
	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	66
	<b>ANEXO A — Especificações do analisador de gases</b> .....	75

## 1 INTRODUÇÃO

No século XVIII, ocorreu grande marco tecnológico com o desenvolvimento da máquina a vapor. Essa invenção foi importante para o desencadeamento de processos essenciais na revolução Industrial na Inglaterra Nunes (2024). As tendências de melhoria das máquinas ocasionam investigações constante ao sistema de combustão, que impactam diretamente na locomoção humana. Os veículos de transporte desempenham um papel crucial no desenvolvimento econômico, entretanto, a elevada dependência do consumo de combustíveis fósseis torna o setor de transportes um dos principais emissores de gases de efeito de estufa (GEE) (Branco *et al.*, 2022).

O aumento acentuado da frota veicular traz desafios ambientais devido à poluição do ar. Assim buscam-se amenizar tais impactos a fim de tornar o motor um sistema menos poluente, enquanto soluções como veículos elétricos vêm ganhando espaço por oferecerem planos sustentáveis para a indústria automobilística a longo prazo. Porém como destaca Rossi *et al.* (2023), a existência de muitos veículos em circulação que possuem motores a combustão, se mostram os maiores contribuintes as emissões de GEE e de outros poluentes. Como é trazido por Guan (2021); Roberts (2015), para atender às legislações mais rigorosas sobre emissões, motores a diesel modernos utilizam sistemas avançados de pós-tratamento, que aumentam os custos e reduzem a eficiência devido a modos de combustão pós-tratamento.

A partir disso, buscando-se abordagens recentes, a técnica de uso de água como agentes de resfriamento em motores diesel vem sendo investigada como uma solução promissora para mitigar emissões de poluentes Welscher, *et al.* (2023).

Já que segundo Wilson (2011), a temperatura na câmara de combustão está diretamente relacionada às emissões de poluentes. Partindo desse princípio, a técnicas de resfriamento da câmara de combustão torna-se alternativa para redução das emissões dos motores.

Dentre as estratégias promissoras temos, a Injeção indireta que consiste na inserção de água no coletor de admissão pode diminuir consideravelmente a temperatura de combustão e mitigar a emissão de óxido de nitrogênio (NO<sub>x</sub>) e outras substâncias poluentes (Tauzia *et al.*, 2010; Sun *et al.*, 2022). Os estudos de Baeta *et al.* (2018) reforçam, que essa técnica pode aprimorar a eficiência térmica em motores

de ignição e motores a diesel ao reduzir as questões de detonação, fomentando uma combustão mais estável.

É real a necessidade urgente de métodos que tornem o funcionamento dos motores mais sustentável, sobretudo devido ao momento crítico marcado pela intensificação dos impactos climáticos derivados do agravamento do efeito estufa.

Propostas internacionais do governo para combater as mudanças climáticas e reduzir os impactos ambientais negativos incluem metas como as definidas durante a conferências das partes unidas sobre as Mudanças Climáticas (COP 21), visando reduzir as emissões veiculares, principais contribuintes para os GEE (Borsari e Bales, 2022). Visando investigar o potencial da técnica como um componente estratégico para atender às rigorosas regulamentações ambientais, como o Acordo de Paris, o Programa de Controle de Emissões Veiculares (PRONCOVE), entre outros. Este estudo, fundamentado nas teorias existentes sobre a relação entre temperatura e produção de gases nos motores, propõe avaliar experimentalmente a aplicação de injeção de névoa de água em motores a diesel.

A proposta busca comprovar os benefícios dessa técnica na mitigação de emissões de poluentes por meio da realização de análise dos dados coletados, contribuindo para o avanço sustentável da mobilidade humana e para os acordos internacionais sobre mudança climática.

## **1.1 Justificativa**

Em 2019, o setor de transporte foi responsável por 15% das emissões totais de GEE pelo mundo (EPE, 2023). Além disso, dados de 2020 apontam que, que as emissões de dióxido de carbono na atmosfera, a segunda atividade com maior nível de emissões foi o transporte, que emitiu 7,10 bilhões de toneladas de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) (Ritchie; Rosado; Roser, 2020). conforme Potenza, *et al.* (2021), o aumento significativo na emissão de gases, na maioria devido ao aumento no número de veículos, verificado em um aumento de 9,5% nas emissões de CO<sub>2</sub> no Brasil em 2020.

A técnica proposta neste estudo pode subsidiar o Brasil a alcançar a meta definida no Acordo de Paris, já que visa reduzir a emissão de gases poluentes emitidas por veículos com motores a diesel, entre eles gases de efeito estufa como CO<sub>2</sub>, além

de auxiliar no cumprimento do objetivo de desenvolvimento sustentável (ODS) 13, que trata da temática mudanças climáticas.

. As principais vantagens deste estudo consistem no potencial de redução de emissões veiculares e conseqüentemente auxílio no controle de chuvas ácidas. Outrossim, também contribui para a saúde respiratória humana e para o cumprimento de acordos climáticos internacionais.

Dentre os benefícios há um aspecto importante que trata de o sistema proposto não é abrasivo ao motor e possuir componentes menos complexos que utilizados em outros estudos desse método. O custo para implementação da técnica também é baixo.

Este estudo auxilia com a difusão de conhecimento sobre técnicas de mitigação de gases do efeito estufa, princípios ambientais, regulação de emissões no Brasil, tecnologias de mitigação disponíveis (Musarra e Cardozo, 2023).

## **1.2 Contextualização do problema**

A poluição do ar é uma problemática atual e preocupante dado o potencial agressivo à saúde humana, principalmente em áreas populosas (WHO, 2005). Na América do Sul, especialmente os países subdesenvolvidos ou em desenvolvimento há problemas crescentes de poluição do ar. O aumento da frota de veículos automotores e de tecnologias industriais ultrapassadas são os responsáveis por essa situação desta forma submete pessoas vulneráveis a risco de morte e de doenças associadas a esse tipo de exposição ambiental (Andrade *et al.*, 2019 *apud* Piai, 2022).

Diversos estudos ao redor do mundo investigam a relação entre a exposição à poluição do ar e o risco de efeitos adversos à saúde humana, apresentando evidências consistentes de sua associação com doenças cardiovasculares, respiratórias e câncer de pulmão (IARC, 2013).

A exposição prolongada a altos níveis de concentração de monóxido de carbono (CO) pode causar problemas respiratórios, cardíacos, disfunção cerebral e até a morte (Reichert, 2017).

No estudo de Milchert e Melo (2024) traz que para enfrentar os impactos da emergência climática exige a adoção dos princípios da justiça climática e o cumprimento das metas. Conforme disposto no Decreto nº 9.073 (Brasil, 2017), o Acordo de Paris estabelece compromissos globais para a mitigação das mudanças

climáticas, um avanço significativo para a implementação de medidas externas ao controle das emissões de gases de efeito estufa, já que, O impacto dos GEE e de outros poluentes nocivos à saúde representa uma preocupação de alcance global, meios de controle de emissões são necessários.

Dessa forma, o governo brasileiro comprometeu-se a reduzir as emissões de gases de efeito estufa em 37% em 2025, com uma contribuição indicativa subsequente de redução de 43% em 2030, em relação aos níveis de emissões estimados para 2005 (Brasil, 2017).

Nesse contexto, a questão central investigada nesta pesquisa consiste na seguinte: a aplicação da técnica de resfriamento por névoa de água no duto de admissão de motores a diesel pode contribuir para a redução das emissões de gases poluentes?

### **1.3 Hipótese**

A névoa de água tem o potencial de reduzir as emissões de gases nocivos ao meio ambiente e a saúde humana, que dependem de altas temperaturas para a formação, devido à capacidade térmica hídrica.

### **1.4 Objetivo geral**

Investigar por meio de experimento o impacto da injeção com névoa de água em motores de ciclo Diesel como estratégia para a redução das emissões de gases poluentes.

### **1.5 Objetivos específicos**

- Implementar um sistema de injeção de névoa de água na câmara de combustão no motor ciclo diesel, e avaliar os possíveis benefícios ambientais;
- Analisar a mitigação de poluentes em proporções diferentes de água e em diferentes rotações;
- Analisar os dados das emissões dos gases dos combustíveis, diesel S-500 e diesel S-10.

## 2 REFERENCIAL TEÓRICO

### 2.1 Poluição do ar e mudanças climáticas provenientes de emissões de veículos

Os veículos de transporte desempenham um papel crucial no desenvolvimento econômico; entretanto, a elevada dependência do consumo de combustíveis fósseis torna o setor de transportes um dos principais emissores de GEE (Branco *et al.*, 2022).

A combinação de óxido de nitrogênio ( $\text{NO}_x$ ) e compostos orgânicos voláteis (COVs) sob radiação solar leva à formação do smog fotoquímico, que reduz a visibilidade e tem sérios impactos na saúde humana. A formação do *smog* depende da luz solar e da presença de compostos nitrogenados e COVs, desempenhando um papel importante na formação de ozônio, um poluente nocivo à saúde humana e às plantas (De Souza, 2023). Dessa forma com enfoque no estudo são.

Os óxidos de nitrogênio podem causar infecções respiratórias e asma. Além disso, reações fotoquímicas podem transformar o Monóxido de nitrogênio (NO) em ácido nítrico e nitratos, potenciais produtores de chuvas ácidas que afetam florestas e corpos d'água. O  $\text{NO}_x$  é formado pela alta temperatura dos gases queimados e pela reação entre nitrogênio e oxigênio em equilíbrio químico a altas temperaturas. Quanto mais quente for a combustão e quanto maior a presença de oxigênio, maior será a formação de  $\text{NO}_x$  (Martins, 2006).

O monóxido de carbono é incolor e inodoro, o que dificulta sua identificação. Pequenas doses prolongadas podem reduzir as funções cardíacas, causar problemas vasculares e prejudicar o desenvolvimento fetal. O CO persiste na atmosfera por cerca de um mês, sendo lentamente oxidado para  $\text{CO}_2$ . Sua produção é controlada principalmente pela riqueza da mistura (Martins, 2006).

O dióxido de carbono é um dos gases mais associados ao transporte rodoviário e representa uma parcela significativa das emissões de gases de efeito estufa. É o principal gás antrópico na composição do efeito estufa, exacerbando o aquecimento global (Potenza *et al.*, 2021; Willetts *et al.*, 2022).

Por outro lado, o dióxido de enxofre ( $\text{SO}_2$ ) é formado principalmente pela queima de combustíveis fósseis. Nesse processo, o enxofre presente no combustível é oxidado, formando  $\text{SO}_2$  e  $\text{SO}_3$ , conhecidos coletivamente como  $\text{SO}_x$ . Esses compostos são classificados como poluentes primários e secundários. Os poluentes secundários, como os ácidos gerados, têm impactos significativos na qualidade do

solo, da água e da vegetação, além de causarem chuvas ácidas (Vergnhanini, 2020). E por fim, o dióxido de nitrogênio ( $\text{NO}_2$ ).

O banco de dados da OMS, trouxe as medições terrestres das concentrações anuais de dióxido de nitrogênio, um poluente urbano e precursor do material particulado e do ozônio. Também foram incorporadas medições de partículas em suspensão com diâmetros de até 10  $\mu\text{m}$  ( $\text{PM}_{10}$ ) e 2,5  $\mu\text{m}$  ( $\text{PM}_{2,5}$ ), ambas originadas, principalmente, da queima de combustíveis fósseis (OPAS, 2022).

De acordo com Anenberg (2022), a poluição por dióxido de nitrogênio ( $\text{NO}_2$ ), proveniente da combustão, é um fator relevante na incidência de asma pediátrica, especialmente em áreas urbanas, destacando a importância de incluir a mitigação da poluição do ar nas estratégias de saúde pública para crianças.

## **2.2 Programas de controle de emissões**

Em âmbito internacional na 21ª Conferência das Partes (COP21) da Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima (UNFCCC), realizada em 2015 em Paris, foi adotado um novo acordo com o objetivo central de fortalecer a resposta global à ameaça da mudança do clima e de reforçar a capacidade dos países para lidar com os impactos decorrentes dessas mudanças, e trouxe como meta a estabelecer ações para manter o aumento da temperatura média global em menos de 2 °C e de envidar esforços para limitar o aumento da temperatura a 1,5 °C, (Brasil, 2016).

Outrossim, em Brasília no ano de 2021, o Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis (Ibama) publicou a Instrução Normativa n.º 21, de 10 de dezembro de 2021, relativo à determinação das emissões de gás orgânico não metano (NMOG) provenientes do escapamento de veículos rodoviários leves de passageiros e leves comerciais quando abastecidos com etanol hidratado brasileiro de referência (EHR), gasool A22, gasool A11H50, gás combustível veicular de referência (GVR) ou Diesel. Para as novas fases do Programa de Controle de Emissões Veiculares (Proconve). O objetivo é estabelecer cálculos para reduzir poluentes lançados por veículos a partir de 2025, incluindo os movidos a etanol, e contribuir com a qualidade do ar no país (Ibama, 2021).

De acordo com o Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis (Ibama, 2025), o Proconve visa reduzir a emissão de poluentes por

veículos, promovendo avanços tecnológicos na indústria nacional e melhorando a qualidade do ar.

O presidente da República, Luiz Inácio Lula da Silva, sancionou a lei que regulamenta o setor e cria o Sistema Brasileiro de Comércio de Emissões de Gases de Efeito Estufa (SBCE) (Lei 15.042, de 2024). Onde no artigo 2º e inciso 30 diz respeito sobre redução de emissões de GEE e dentre as atividades está a mobilidade sustentável. O texto foi publicado na edição desta quinta-feira (12) do Diário Oficial da União (DOU) (Brasil, 2024).

### 2.3 Injeção de água em motores diesel

O autor Kettner, *et al.* (2016) comprovou a diminuição de emissões de NO<sub>x</sub> do motor em análise em um estudo experimental, o efeito de resfriamento na entrada de admissão afeta diretamente na produção de emissões do escapamento. Nota-se que.

A ideia de injeção de água tem grande relação com princípio de conversão de energia por combustão. Bertram Hopkinson enfatizou em 1913 que “a introdução de água em motores de combustão interna não é novidade”. O uso de água para supressão de explosões e resfriamento interno de motores a gás provou ser tão bem-sucedido que Hopkinson começou a projetar usinas de energia que dependiam exclusivamente de água como sistema de resfriamento (Hopkinson, 1913, *apud* Dryer, 1977).

Farag, *et al.* (2017) em seu estudo concluiu, que a injeção de água no coletor de admissão aumenta as perdas de calor do motor. Dessa forma, o calor residual nos gases de escape é usado para vaporizar a água antes da combustão, evitando o efeito de resfriamento da água. A melhoria obtida com a injeção de água no coletor de escape a 25% recirculação de gases de escape (EGR) e a injeção de água no coletor de admissão fornece as menores emissões de NO<sub>x</sub>, com 88%.

No estudo de Mingrui, *et al.* (2017), infere-se que a injeção de água pode aumentar a potência do motor, otimizar a eficiência energética e reduzir o consumo de combustível, além de contribuir para a redução de emissões poluentes. No estudo executado por Da Rocha (2018), houve melhoria de desempenho ao introduzir injeção de água na proporção de 10%. Estes benefícios de eficiência não apenas permitem a redução de emissões, mas também são significativos para a redução do consumo de combustível.

No estudo de Novaes (2018) foi realizada uma simulação computacional de um motor ciclo diesel operando com misturas de diesel/biodiesel/vapor de água, usando um modelo zero dimensional, para investigar as taxas de fluxo de combustível e as emissões de gases de escape ( $\text{NO}_x$ , CO e  $\text{CO}_2$ ). Os resultados experimentais mostraram que a injeção de água diminuiu a emissão de ( $\text{NO}_x$ ) em aproximadamente metade, sem afetar significativamente o consumo de combustível. Ademais, a adição de água ao sistema de admissão tem um efeito limitado na pressão, variando conforme as condições de funcionamento.

Segundo estudo do autor Corcetti (2019), utilizando metodologia de referencial teórico, pode afirmar que, a análise da injeção de água na mistura ar-combustível visa diminuir as emissões de GEE durante o processo de queima, buscando, ao mesmo tempo, aprimorar o desempenho do motor em termos de potência, torque e eficiência volumétrica. Esse aprimoramento é alcançado por meio do resfriamento das câmaras de combustão dos motores e do aperfeiçoamento da eficiência na queima do combustível.

A injeção de água, com um efeito de resfriamento eficaz para o processo de combustão no cilindro, tem atraído extensas atenções nos últimos anos devido ao potencial de mitigação de detonação e de redução de  $\text{NO}_x$  redução (Zhu, 2019).

O autor Resende (2019) realizou um estudo que focou na implantação de sistemas de gerenciamento eletrônico nos motores utilizados e sistemas que permitem o gerenciamento da injeção de água. O experimento confirmou que o sistema de gerenciamento de injeção de água foi introduzido com sucesso. Isto possibilita definir com precisão o horário de início da injeção de água e adequar o tempo de injeção de água ao tempo de injeção de combustível. Esta implementação mostrou-se promissora para aplicação em pesquisas experimentais acadêmicas.

A adição de água na câmara de combustão é altamente benéfica para reduzir a temperatura de combustão e suprimir a ocorrência de detonação, dentre outros benefícios. Entretanto, há escassez de estudos sobre a injeção direta de água em motores de ignição por faísca (SI) com enriquecimento de hidrogênio em gás natural (Wang, 2020).

No intuito de controlar a combustão de maneira correta, um dos aspectos mais importantes da operação dual fuel é a injeção, que pode variar quanto à localização (na admissão ou diretamente na câmara de combustão), quanto ao tempo e quanto ao número (Hall, 2021).

Um estudo desenvolvido por Welscher, *et al.* (2023) indica que os resultados não mostram efeitos significativos da injeção de água no processo de combustão, mas grande potencial para redução de NO<sub>x</sub>. Foi demonstrado que com o uso de injeção de água em taxas de água para combustível de 25%, 50% e 100%, a redução de NO<sub>x</sub> sem deterioração dos níveis de fuligem pode ser alcançada em 62%, 40% e 20% dos experimentos, além disso, a injeção de água em combinação com EGR oferece redução adicional nas emissões de NO<sub>x</sub>.

Nos estudos de Liu, *et al.* (2024), indica que o método de injeção de hidrogênio melhora a eficiência e reduz emissões de CO<sub>2</sub> em até 77%, e concluiu que a injeção dividida de hidrogênio pode melhorar a eficiência do motor e reduzir as emissões, mas requer um equilíbrio cuidadoso entre a fração de injeção e a temporização para otimizar o desempenho.

Os autores Rueda-vázquez, *et al.* (2024), no seu estudo indica que o Injeção de água (WI) reduz ainda mais as emissões de NO<sub>x</sub> em até 50%. A evidência experimental demonstrou que a combinação de WI com redução de Taxa de compressão (CR) e Início da injeção (SOI) pode efetivamente reduzir as emissões de NO<sub>x</sub>.

A injeção direta de água afeta o processo de combustão em termos de liberação de calor e resfriamento de carga com efeitos no trabalho do ciclo e NO<sub>x</sub>, dependendo de vários fatores, como relação água/combustível (W/F) e tempos de injeção (Ianniello, *et al.*, 2024).

(Uma pesquisa realizada por Szóllósi e Kiss 2024) examina a literatura sobre os efeitos da água na combustão de diesel em sequência cronológica, com foco nas mudanças nas últimas três décadas, concluindo que a aplicação da água de admissão seria a melhor combinação com o EGR, para redução de emissões de NO<sub>x</sub> e partículas em toda a faixa operacional do motor, com reduções adicionais de emissões.

A injeção de água mostra eficácia na redução das emissões de NO<sub>x</sub>, mantendo ao tempo, a relação ar-combustível necessária, os resultados mostraram uma redução de 3 – 8% na relação lambda e uma redução substancial de 75–89% nas emissões de NO<sub>x</sub> com adição de água (Janjua, *et al.*, 2024).

Uma pesquisa desenvolvida por Mohamed, *et al.* (2024), em seus resultados, demonstra que as emissões de NO<sub>x</sub> foram reduzidas em 79% quando a água foi injetada a uma taxa de 5 kg/h a 10 bar IMEP e 2000 rpm. O uso de injeção de água

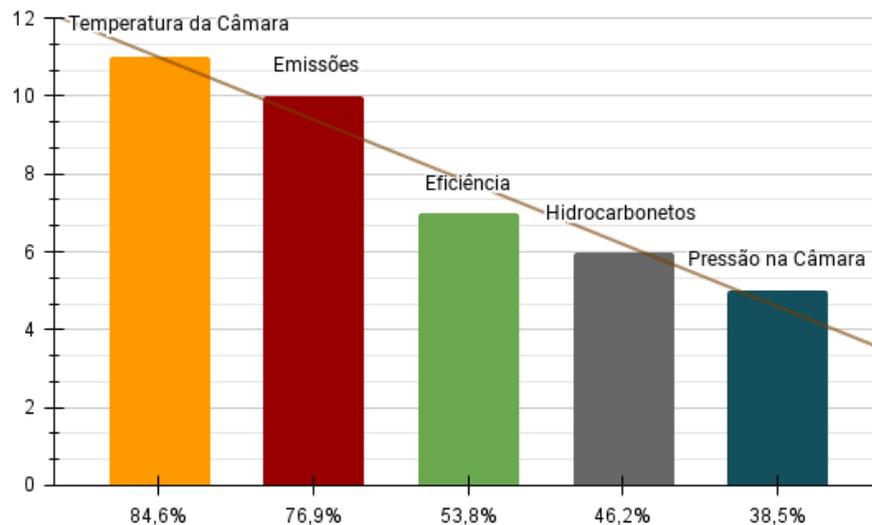
diminuiu as emissões de NO<sub>x</sub> do motor sob condições de alta carga em mais de 55%, mesmo em AFR mais rico em comparação à operação com hidrogênio puro.

## 2.4 Relação da temperatura e mitigação das emissões de gases

A análise de artigos relacionados à injeção de água permitiu avaliar diversos aspectos fundamentais da técnica, incluindo a eficiência do processo, a temperatura e a pressão na câmara de combustão, além das emissões de poluentes como NO<sub>x</sub>, CO, CO<sub>2</sub> e hidrocarbonetos. Um gráfico comparativo foi elaborado para apresentar visualmente a quantidade de estudos que abordam cada um desses itens, destacando as áreas de maior foco e as tendências emergentes na pesquisa (Evangelista; Vieira; Rocha, 2024).

A comparação oferece uma visão abrangente dos resultados obtidos, indicando as possíveis vantagens da injeção de água para reduzir emissões e melhorar a eficiência nos motores, a seguir será mostrado no Gráfico.1, elaborada pelos autores do estudo.

Gráfico 1 – Comparativo dos estudos.



Fonte: Evangelista, Vieira e Rocha (2024).

Na Tabela 1, e mostrado dados da relação de adição de água no combustível, com a redução de temperatura e de fuligem. Esses resultados fazem parte do estudo da técnica de injeção de água como agente de resfriamento no motor, sendo um trabalho

de revisão bibliográfica realizados por Evangelista, Vieira e Rocha (2024), que serviu como base para a pesquisa experimental realizada nesse trabalho.

Tabela 1 – Relação de porcentagem de água na redução de temperatura e na redução de fuligem.

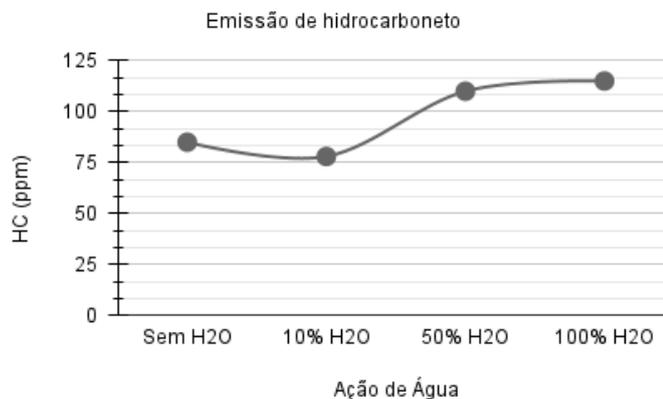
Combustível /H <sub>2</sub> O	Redução de temperatura	Redução de fuligem
5% H <sub>2</sub> O	43 K	26%
10% H <sub>2</sub> O	90 K	47%

Fonte: (Evangelista, Vieira e Rocha, 2024).

E exibido a associação da produção de fuligem com a temperatura do motor, e indica que quando maior a redução da temperatura utilizando combustível e água maior e a redução de fuligem, conforme (Evangelista, Vieira e Rocha, 2024).

A análise dos gráficos evidencia a relação entre a injeção de água e as emissões dos principais poluentes gerados na combustão. O Gráfico 2 mostra o aumento das emissões de hidrocarbonetos (HC) à medida que a proporção de água injetada cresce. Esse efeito ocorre devido à redução da temperatura da câmara de combustão, resultando em uma queima menos eficiente e, conseqüentemente, maior presença de HC não queimado.

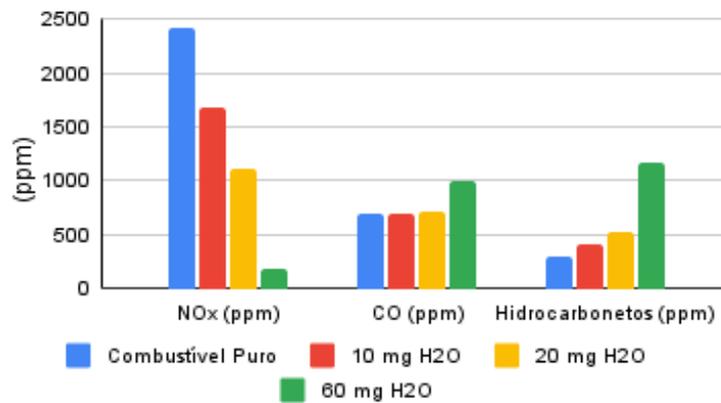
Gráfico 2 – Emissão de HC na presença de água.



Fonte: (Evangelista, Vieira e Rocha, 2024).

O gráfico 3 destaca a redução das emissões totais, demonstrando que a adição de água contribui para a mitigação de alguns poluentes, especialmente o  $\text{NO}_x$  proporcional ao aumento de água injetada na câmara de combustão, em contrapartida, o hidrocarboneto tende a aumentar com o aumento de proporção de água, e outras emissões como de  $\text{CO}$  e  $\text{CO}_2$  tem um aumento quando exposto a grandes quantidades de água.

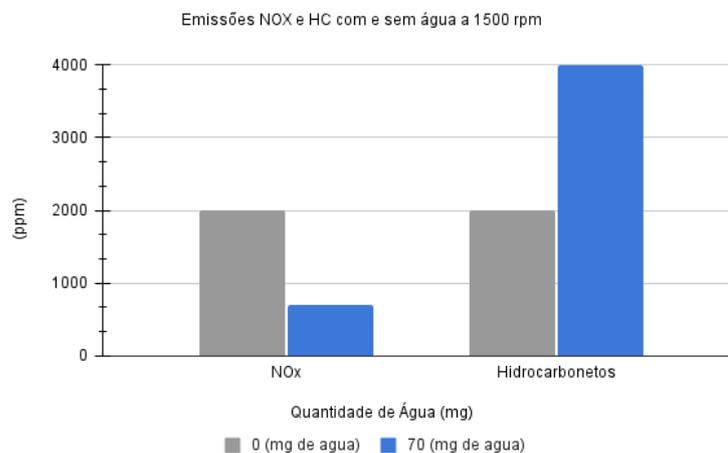
Gráfico 3 – Redução de emissões.



Fonte: (Evangelista, Vieira e Rocha, 2024).

O gráfico 4 apresenta a relação entre as emissões de  $\text{NO}_x$  e HC, evidenciando que, enquanto a injeção de água reduz significativamente a formação de  $\text{NO}_x$  devido ao resfriamento da câmara de combustão, ela também favorece o aumento da emissão de HC, indicando um impacto na eficiência da combustão.

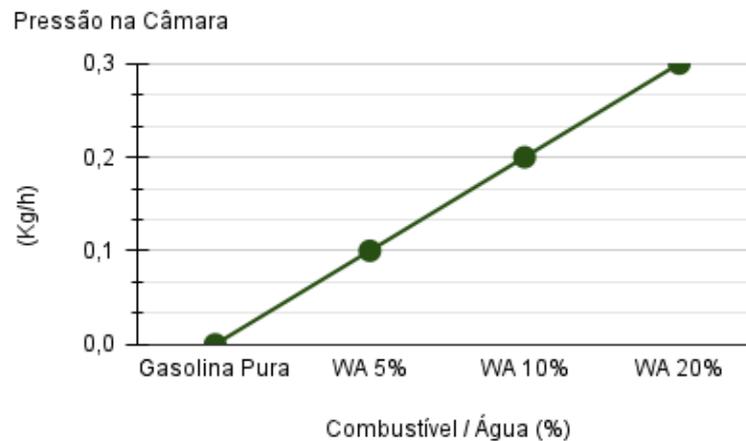
Gráfico 4 – Emissões de  $\text{NO}_x$  e HC.



Fonte: (Evangelista, Vieira e Rocha, 2024).

Na relação da pressão na câmara de combustão, que foi possível analisar graficamente no gráfico 5, sendo observado um aumento na pressão da câmara ao adicionar mais percentagem de água.

Gráfico 5– Pressão na câmara.



Fonte: (Evangelista, Vieira e Rocha, 2024).

De acordo com (Evangelista, Vieira e Rocha, 2024), a injeção de água, aliada a razões volumétricas adequadas de compressão, pode aprimorar a eficiência do motor e reduzir a chance de detonação, ao mesmo tempo, em que reduz as emissões de NO<sub>x</sub> e aprimora a volumétrica do motor.

Segundo Netto (2017), foram caracterizadas e analisadas tecnologias voltadas à maximização da eficiência na conversão de combustíveis. Entre essas, destacam-se os sistemas de injeção de combustível, injeção de água, controle da estrutura de fluxo, recirculação dos gases de escapamento e o impacto da relação volumétrica de compressão em motores monocilíndricos de pesquisa.

## 2.5 Eficiência térmica e volumétrica com a névoa de água

Inúmeras estratégias para otimizar a operação do motor são utilizadas como ferramentas para maximizar a eficiência global e reduzir as emissões de poluente (Amaral, 2024, p. 27).

Reforçado por Boretti (2015), a implementação da injeção de água pode resultar em uma economia de combustível situada entre 3% e 8%.

O autor Dryer (1977) mostra que a adição de água pode melhorar o desempenho do motor, otimizar a eficiência energética, reduzir o consumo de combustível e até contribuir para a redução das emissões de poluentes.

A técnica de injeção de água ainda não está totalmente desenvolvida para motor ciclo Otto, que utiliza a ignição por compressão de carga homogênea (HCCI). O HCCI é um motor ciclo Otto que trabalha com autoignição, ou seja, a ignição é por compressão. Dessa forma, os resultados mostraram que a injeção de água controlou eficazmente o faseamento da combustão e a taxa de liberação de calor, triplicando a carga operacional máxima. A injeção de água desempenhou um papel crucial no prolongamento da operação do HCCI em cargas mais elevadas, atuando como um mecanismo de controle do faseamento da combustão (Telli, 2022).

No estudo em motores de combustão interna: uma revisão sistêmica utilizando método de análise bibliográfica, teve como objetivo verificar a influência da injeção de água sobre os parâmetros de desempenho do motor. Os resultados sobre a pesquisa são que com a injeção de água, foi possível observar que a queima da mistura ocorreu mais rapidamente, e a água atuou como um agente antidetonante, aumentando o número de octanos na mistura. (Amaral, 2024, p. 47).

## 2.6 Combustão

A combustão em motores de combustão interna é um processo termoquímico influenciado pelo projeto da câmara de combustão, propriedades do combustível e condições atmosféricas, como temperatura e pressão. Sua otimização é essencial para maximizar a eficiência energética, prolongar a vida útil do motor e minimizar emissões nocivas. Um fator essencial se dá na relação ar/combustível é determinante na qualidade da combustão. Uma mistura estequiométrica permite a oxidação completa do combustível, gerando  $\text{CO}_2$  e água ( $\text{H}_2\text{O}$ ). No entanto, variações ocorrem devido à vaporização do combustível e à presença de gases residuais do ciclo anterior Rocha, *et al.* (2020).

O impacto causado pela combustão incompleta, ocasionada pela deficiência de oxigênio, leva à formação de poluentes, aldeídos e material particulado, prejudiciais ao meio ambiente e à saúde. Amaral (2024) Traz a relação da diminuindo as emissões de  $\text{NO}_x$  devido à limitação da reação de Zeldovich. No entanto, essa redução térmica também favoreceu a combustão incompleta, aumentando as emissões de HC, CO e

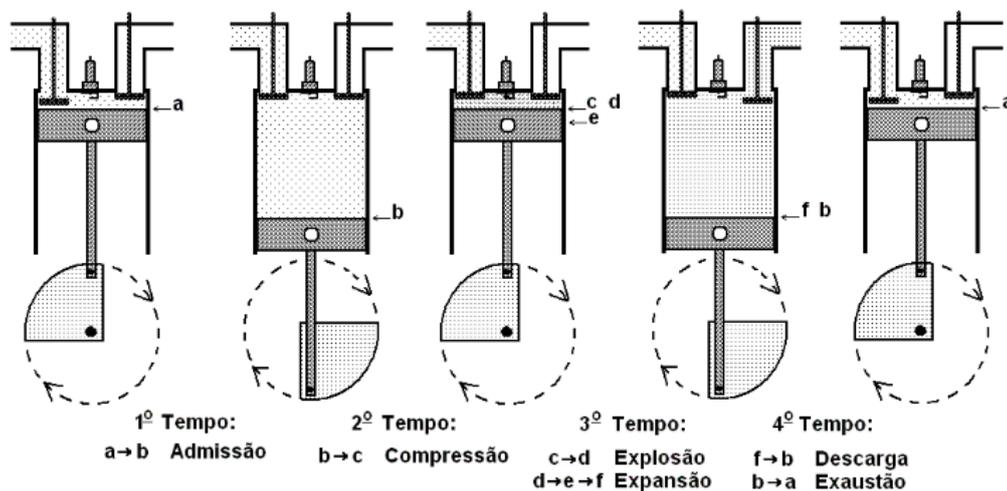
CO<sub>2</sub>. A interferência na relação ar/combustível pode ter impactado a eficiência da queima do diesel. Os resultados confirmam que a técnica equilibra redução de poluentes e possíveis perdas na combustão Rocha, *et al.* (2020). O controle adequado da injeção de água é essencial para otimizar desempenho e emissões.

## 2.7 Princípio de funcionamento do motor

Os motores de combustão interna desempenharam um papel fundamental na evolução da locomoção humana, convertendo a energia térmica da queima do combustível em energia mecânica (Tillmann, 2013).

No presente experimento, a técnica proposta aproveita o tempo de admissão do motor para introduzir névoa de água na câmara de combustão, utilizando a aspiração natural do sistema de admissão. Esse princípio está alinhado com a descrição de Martins (2006), segundo a qual o motor a diesel aspira ar puro, submetendo-o a uma compressão que eleva sua temperatura a um nível suficiente para inflamar o combustível no momento da injeção.

Figura 1 – Corte de um motor ciclo diesel.



Fonte: (Bosch, 2005).

A Figura 1 ilustra os quatro tempos de funcionamento do motor Diesel, cujo ciclo segue a descrição de Heywood (1988). No primeiro tempo, a admissão, o pistão desce e permitem a entrada de ar ou da mistura ar-combustível na câmara. Em seguida, na compressão, essa mistura é comprimida até alcançar uma condição ideal

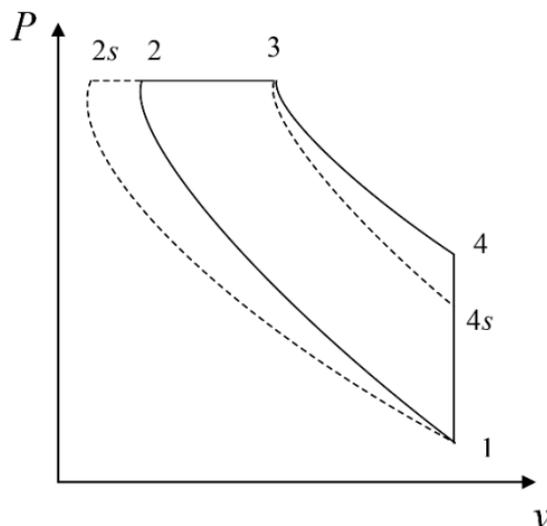
para a ignição. No terceiro tempo, a expansão, a combustão gera gases de alta pressão que impulsionam o pistão, convertendo energia térmica em movimento. Finalmente, na exaustão, os gases queimados são expulsos pela válvula de escape, completando o ciclo.

### 2.7.1 Termodinâmica do ciclo Diesel

Para compreender melhor os processos termodinâmicos envolvidos, a Figura 2 apresenta o diagrama pressão versus volume ( $P-v$ ) de um ciclo Diesel irreversível. O ciclo é composto por quatro transformações fundamentais:

- 1  $\rightarrow$  2: Compressão adiabática, na qual a temperatura e a pressão aumentam devido à redução do volume;
- 2  $\rightarrow$  3: Queima do combustível sob pressão constante, promovendo a liberação de energia térmica;
- 3  $\rightarrow$  4: Expansão adiabática, onde os gases em alta pressão impulsionam o pistão;
- 4  $\rightarrow$  1: Liberação dos gases queimados e início de um novo ciclo.

Figura 2 –  $P-v$  representação do ciclo diesel.



Fonte: (Shi, *et al.*, 2021).

A introdução de névoa de água nesse processo influencia diretamente a termodinâmica da combustão. A vaporização da água absorve calor da câmara de combustão, reduzindo a temperatura máxima do ciclo e, conseqüentemente, mitigando a formação de gases.

### 3 METODOLOGIA

#### 3.1 Tipos e métodos de pesquisa

O estudo é classificado como experimental, que conforme destacado por Gil (2008), de modo geral, o experimento representa o melhor exemplo de pesquisa científica. Essencialmente, o delineamento experimental consiste em determinar um objeto de estudo, selecionar as variáveis que conseguiriam influenciá-lo, definir as formas de controle e de observação dos efeitos que a variável produz no objeto.

Na primeira fase do procedimento metodológico foi realizada uma revisão de literatura o tema “Resfriamento na câmara de combustão”. O google acadêmico foi utilizado para a busca dos trabalhos e artigos científicos por meio da utilização das seguintes palavras-chave: injeção de água, injeção de fluido, mitigação de NO<sub>x</sub>, redução de (o, medidas de controle climático, método de controle de emissões, emissões no brasil, técnica de resfriamento do motor, motor ciclo diesel, injeção de hidrogênio, mitigação de emissões, emissões de GEE, termodinâmica ciclo diesel. A busca de pesquisas sobre a temática a partir do ano 1913 para a busca de técnicas similares a aplicada neste estudo, e para a faixa de trabalhos recentes, foram selecionados estudos dos últimos 7 anos.

A abordagem adotada será quantitativa para obter uma compreensão abrangente dos fenômenos em estudo através da instrumentação, análise e leitura de dados. Um experimento controlado com amostragem intencional foi conduzido segundo (Gil, 2008), empregando um motor ciclo Diesel escolhido devido à sua disponibilidade e facilidade de acesso. Os testes foram realizados nos laboratórios de máquinas térmicas do Instituto Federal da Bahia, situados no campus Jequié.

A escrita e a estrutura deste trabalho seguem as diretrizes estabelecidas pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), garantindo padronização e rigor acadêmico. Para a elaboração das referências, adota-se a NBR 6023 (ABNT, 2018), que define os critérios para a normalização das fontes utilizadas. As citações diretas e indiretas seguem as orientações da NBR 10520 (ABNT, 2023), assegurando coerência na incorporação de conteúdos externos. Já a organização estrutural do trabalho é fundamentada na NBR 14724 (ABNT, 2011), que estabelece os requisitos formais para apresentação de trabalhos acadêmicos, incluindo formatação, elementos do texto.

A pesquisa é composta por método que envolve elementos analíticos e práticos para estudo da técnica de névoa de água, que tem como alvo alcançar a diminuição das emissões, buscando identificar variações que contribua no que cabe ao estudo.

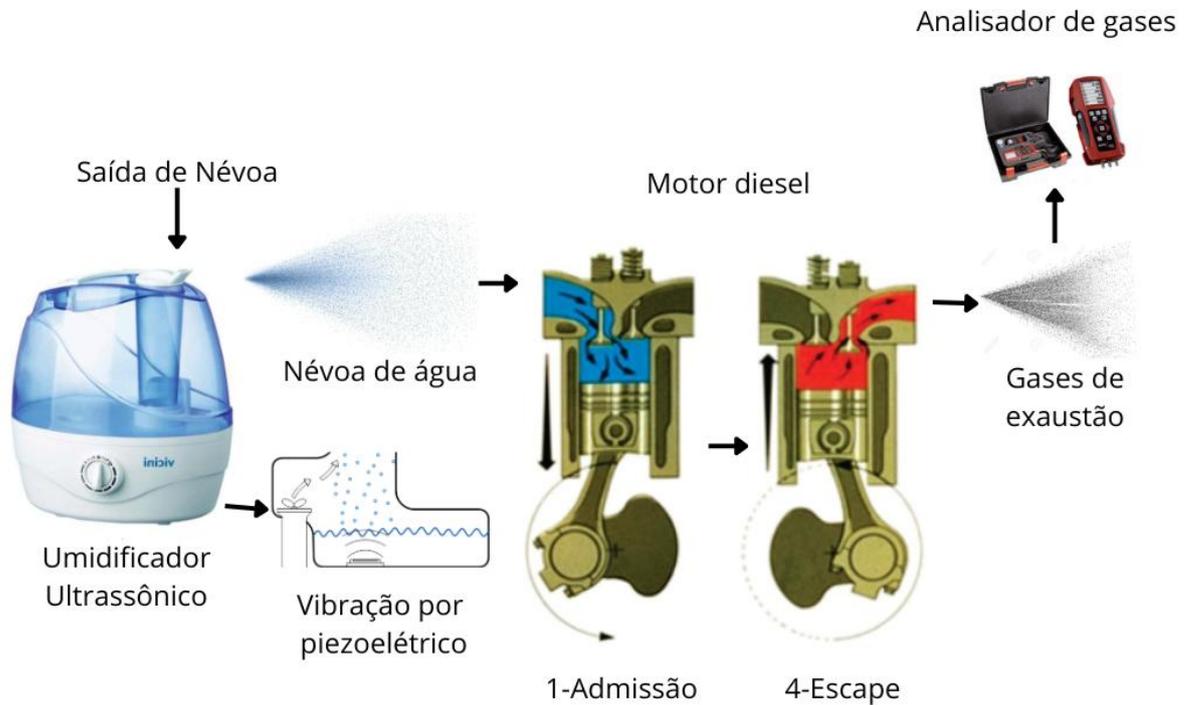
"A análise e interpretação dos dados constituem o núcleo central da pesquisa, onde se procura estabelecer as relações necessárias entre os dados obtidos e as hipóteses formuladas " (Lakatos; Marconi, 2003, p. 168).

### **3.2 Desenvolvimento do experimento**

Na fase de coleta de dados utilizou-se o equipamento de análise de gases OPTIMA 7, cedido temporariamente por meio de parceria, campus do universitário federal da Paraíba (UFPB), que disponibilizou o aparelho por um período de um mês, com objetivo de buscar e validar empiricamente sua eficácia, utilizando procedimentos de tratamento dos dados encontrados. Esses dados foram posteriormente convertidos em representações gráficas para facilitar a análise e a interpretação, conforme os objetivos propostos no estudo.

A bibliografia sugere o uso da água como fluido adequada para a técnica, desse modo, aplicou-se a pulverização de água na forma de névoa para resfriar a câmara de combustão a fim de reduzir as emissões. A adaptação consiste nos sistemas de injeção de névoa de água indireta em uns motores diesel, conforme Figura 3.

Figura 3 – Funcionamento do sistema de névoa de água proposto.

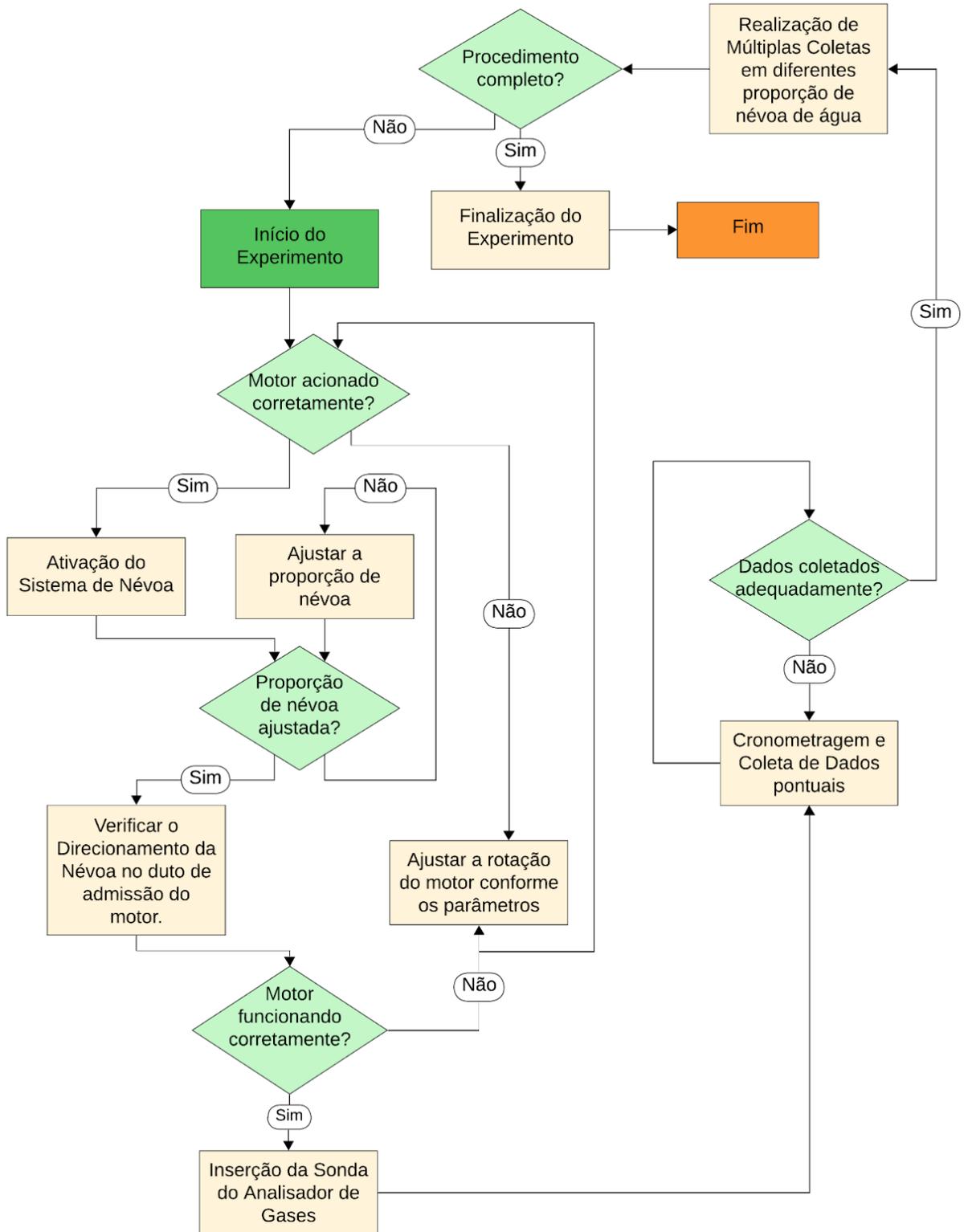


Fonte: Evangelista e Rocha (2024).

A Figura 3 descreve o desenvolvimento do sistema que dispõe dos seguintes componentes e passos: o umidificador ultrassônico geou a névoa introduzida no duto de admissão, aproveitando a aspiração natural do motor, por meio de ajustes e adaptações de tubulações. Isso incluía a verificação e a correção de vazamentos, o ideal era um sistema vedado. Em seguida, foi realizada a configuração do sistema de injeção de névoa de água, considerando a determinação da quantidade a ser injetada. Durante esse processo, mensurações foram salvas para cada situação. A sonda foi instalada no escapamento do motor, onde foram coletados e analisados os gases de escapamento. Para isso foi utilizado o analisador de gases OPTIMA 7.

A Figura 4 demonstra a lógica do sistema e a tomada de decisão durante todos os processos inerentes à experimentação realizada.

Figura 4 – Diagrama com estrutura lógica do sistema.

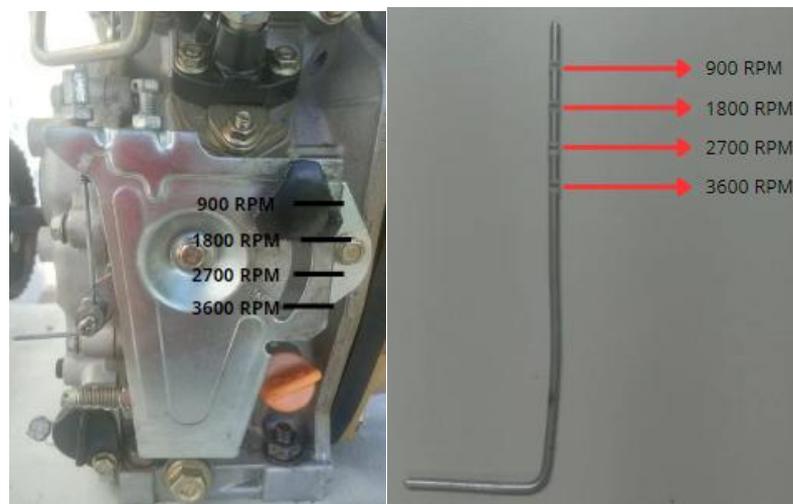


Fonte: Autoria própria (2025).

### 3.3 Determinação da rotação por minuto (RPM) do motor diesel

Para obter resultados variados e avaliar o desempenho em diferentes condições, foram escolhidas duas rotações distintas, 2/4 equivalente a 1800 RPM, 3/4 equivalente a 2700 RPM, 4/4 rotações máxima que é equivalente a 3600 RPM não foi utilizada para esse experimento. A configuração foi feita com base em marcas de referência na haste de metal, assim mostrada na Figura 5.

Figura 5 – Controle da rotação do motor.



Fonte: Autoria própria (2025).

### 3.4 Determinação do consumo de combustível do motor Buffalo 5.0

Para determinar o consumo de diesel do motor Buffalo 5.0, este foi operado por 10 minutos em rotações fixas de 1800 RPM e 2700 RPM. O procedimento consistiu na medição da massa de combustível antes e após o teste, utilizando uma balança de precisão. A diferença de massa foi então convertida para volume (ml/h) ao multiplicar o consumo registrado em 10 minutos por um fator de 6, considerando a densidade média do diesel de (0,837 g/ml) mostrado na Figura 6. Os resultados obtidos, permitem avaliar a taxa de consumo específico do motor em diferentes regimes de operação, que é visto no Quadro 2 – Consumo específico para cada RPM utilizado.

Figura 6 – Mensuração do consumo de diesel.



Fonte: Autoria própria (2025).

### 3.5 Determinação do consumo de água do umidificador ultrassônico

O umidificador Vicini foi operado em diferentes configurações de potência (mínima, média, alta e máxima) durante períodos de 10 minutos. A massa inicial e final da água no reservatório do umidificador foi medida utilizando uma balança de alta precisão para cada configuração de potência. A densidade da água foi considerada 1 g/ml para facilitar os cálculos de consumo. Os valores obtidos de consumo de água estão representados no Quadro 3 – Consumo Específico de Água do Umidificador.

### 3.6 Coleta e interpretação de dados

A análise das emissões foi conduzida com base nos parâmetros de proporção de água, rotação do motor e tipo de diesel utilizado. Para avaliação dos gases de exaustão, as coletas foram realizadas diretamente no escapamento do motor em operação, simulando condições reais de funcionamento. O motor foi operado por um período inicial de 10 minutos com o objetivo de alcançar a estabilização térmica do sistema e garantir a simulação de uma situação de operação contínua.

Durante o experimento, foram realizadas cinco coletas consecutivas, com intervalos de 30 segundos cada, para cada condição de vazão de névoa (sem água, 18 ml/h, 30 ml/h, 72 ml/h e 270 ml/h). O equipamento utilizado para a análise dos gases foi um analisador de gases da marca OPTIMA 7 (Figura 7), que possui uma capacidade de medição pontual, permitindo a coleta precisa dos dados em tempo real. Os gráficos apresentados neste estudo foram elaborados a partir das médias das coletas realizadas a cada 30 segundos, proporcionando uma visão detalhada da

variação das emissões sob diferentes condições experimentais. O monitoramento contínuo foi realizado para acompanhar o desempenho do motor a diesel sob as diferentes proporções de água injetada, com a devida prontidão para interromper o experimento caso ocorresse algum comportamento atípico no funcionamento do sistema.

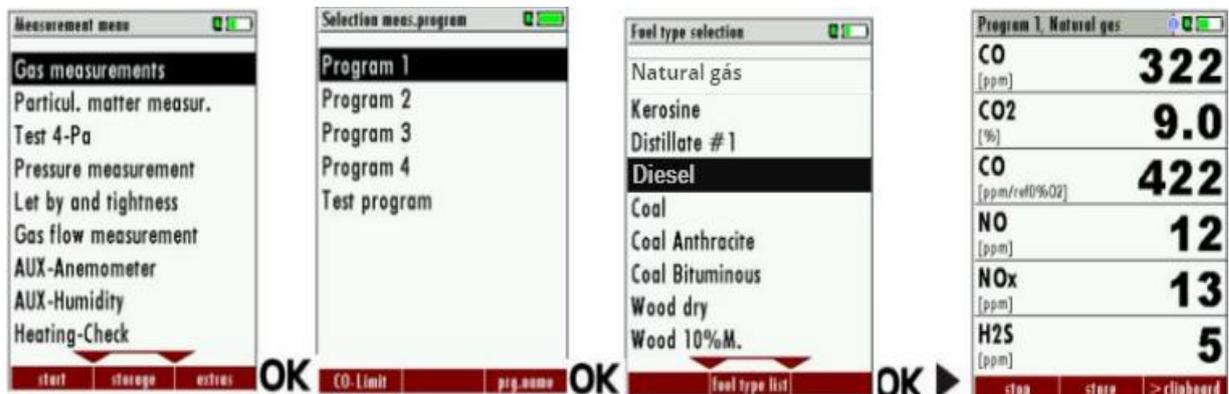
Figura 7 – Equipamento OPTIMA 7 e seus acessórios.



Fonte: mru.instruments.com

O procedimento é detalhado na Figura 8, houve a garantia da correta utilização do analisador de gases OPTIMA 7, obtendo resultados precisos e confiáveis. A tela intuitiva do dispositivo facilita a navegação e o ajuste de configurações, tornando o processo de medição eficiente e acessível para qualquer usuário. As especificações técnicas podem ser vistas no ANEXO A — Especificações do analisador de gases.

Figura 8 – Interface de passos de mensuração no equipamento OPTIMA 7.



Fonte: mru.instruments.com.

### 3.7 Materiais utilizados no experimento e suas características

O Quadro 1 apresenta a relação detalhada dos materiais empregados no experimento, incluindo suas especificações técnicas e a justificativa para suas escolhas. A seleção dos componentes considerou a disponibilidade no campus, garantindo acessibilidade e viabilidade para a execução do estudo. Além disso, foram adotadas soluções adaptativas para as conexões, priorizando alternativas de baixo custo e intercambiáveis, de modo a executar o sistema experimental.

Quadro 1 – Detalhamento dos materiais usados para o experimento da pesquisa.

<b>Categoria</b>	<b>Material</b>	<b>Especificações</b>	<b>Motivo da Escolha</b>
Motor	Motor ciclo Diesel Buffalo 5.0	Tipo: Monocilíndrico, Cilindrada: 219 cc; Admissão: Aspiração natural,	Acesso rápido e disponibilidade no laboratório, além de atender às características técnicas desejadas.
Sistema de injeção de névoa de água	Umificador ultrassônico Vicini VCL-200	Potência: 35 W-Consumo: 0,035 kWh Capacidade de concentração: 250 ml/h	Compatibilidade para adaptações e facilidade de aplicação.
Analisador de gases	OPTIMA 7, modelo 420076US1	Gases analisados: O <sub>2</sub> , CO <sub>2</sub> , SO <sub>2</sub> , H <sub>2</sub> S, CO, NO, NO <sub>2</sub>	Capacidade de realizar determinação de gases relevantes ao estudo.
Tubulações e mangueiras	Tubos flexíveis e emborrachadas	Materiais flexíveis para melhor adaptação.	Compatibilidade com as adaptações possíveis ao experimento.
Combustível	Diesel S-10	Quantidade: 2 litros.	Disponibilidade em postos de combustíveis.
	Diesel S-500	Quantidade: 2 litros.	
Instrumentos de medição	Balanço de precisão	Alta exatidão para proporção de massa.	Relevante para cálculos precisos no experimento.
Medição temporais	Cronômetro	Controle do tempo.	Essencial para medir a duração dos experimentos.
Medição volumétrica	Proveta	Realização de proporções volumétricas precisas de líquidos.	Necessária para dosagem correta dos líquidos.

Fonte: Autoria própria (2025).

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 Consumo de diesel e água

O Quadro 2 apresenta os valores de consumo específico para os óleos diesel B S-10 e B S-500, cujas densidades variam entre 0,819 g/ml e 0,860 g/ml. Para padronização e compatibilidade com a realidade da região de estudo, adotou-se o valor médio de 0,837 g/ml, em conformidade com a Resolução nº 968/2024 da Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP). Observa-se que o consumo de combustível aumenta proporcionalmente com a elevação da rotação do motor, o que é coerente com a demanda energética crescente para manter o funcionamento do sistema em regimes superiores.

Quadro 2 – Consumo específico para cada RPM utilizado.

Rotação (RPM)	Consumo (g/h)	Consumo (ml/h)
≅1800	126	150,41
≅2700	336	401,11

Fonte: Aatoria própria (2025).

O Quadro 3 apresenta os valores experimentais do consumo de água, obtidos a partir da operação do umidificador em diferentes níveis de potência para produção de névoa d'água. Conforme esperado, o consumo de água aumenta progressivamente com o incremento da potência do umidificador, variando de 18 ml/h na menor configuração até 270 ml/h na máxima. Esses dados são fundamentais para a análise do impacto da injeção de água na combustão, permitindo avaliar a influência de diferentes taxas de umidificação sobre o desempenho do motor.

Quadro 3 – Consumo Específico de Água do Umidificador.

Potência (Névoa d'água)	Consumo (g/h)	Consumo (ml/h)
P1	18	18
P2	30	30
P3	72	72
P4	270	270

Fonte: Aatoria própria (2025).

O Quadro 4 relaciona o consumo de água ao consumo de combustível durante um intervalo de 30 segundos, evidenciando as proporções de água aplicadas ao motor em diferentes rotações. Observa-se que, para 1800 RPM, a porcentagem de água em relação ao combustível varia de 11,97% (P1) a 179,55% (P4), enquanto para 2700 RPM, os valores oscilam entre 4,49% (P1) e 67,34% (P4). Esse comportamento pode ser atribuído ao aumento da demanda de ar em rotações mais elevadas, o que influencia a absorção da névoa d'água e a sua interação com o combustível no processo de combustão. A maior porcentagem de água na rotação de 1800 RPM indica uma maior capacidade de absorção do vapor pela massa de ar aspirada, enquanto em 2700 RPM, a velocidade do fluxo de ar pode limitar a retenção eficiente da névoa.

Quadro 4 – Proporção de água em relação ao combustível, em porcentagem.

Rotação (RPM)	Consumo de Combustível (ml/30s)	Potência (P)	Consumo de Água (ml/30s)	Porcentagem de Água (%)
≅1800	1,253	P1	0,15	11,97
≅1800		P2	0,25	19,95
≅1800		P3	0,6	47,89
≅1800		P4	2,25	179,55
≅2700	3,343	P1	0,15	4,49
≅2700		P2	0,25	7,48
≅2700		P3	0,6	17,96
≅2700		P4	2,25	67,34

Fonte: Autoria própria (2025).

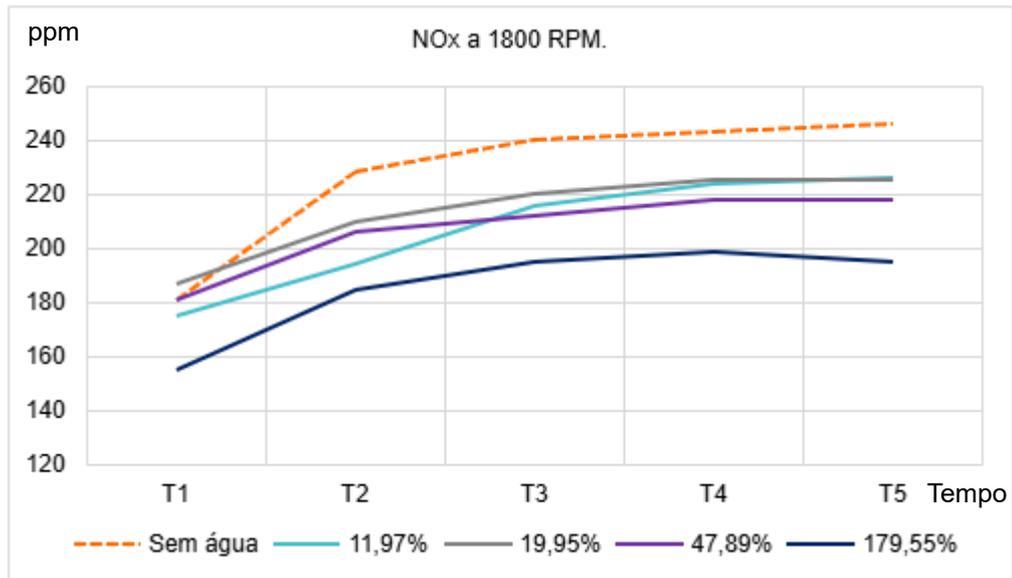
## 4.2 Emissões

### 4.2.1 Óxidos de nitrogênio (NO<sub>x</sub>)

O óxido de nitrogênio, no diesel S-10 a 1800 rotações por minuto obteve a diminuição de 20,73% na proporção de água de 179,55%, no Gráfico 6 apresenta a análise das emissões de NO<sub>x</sub> em um motor diesel operando a 1800 RPM com diesel S-10, submetido a diferentes proporções de névoa de água sendo: 0% (sem água),

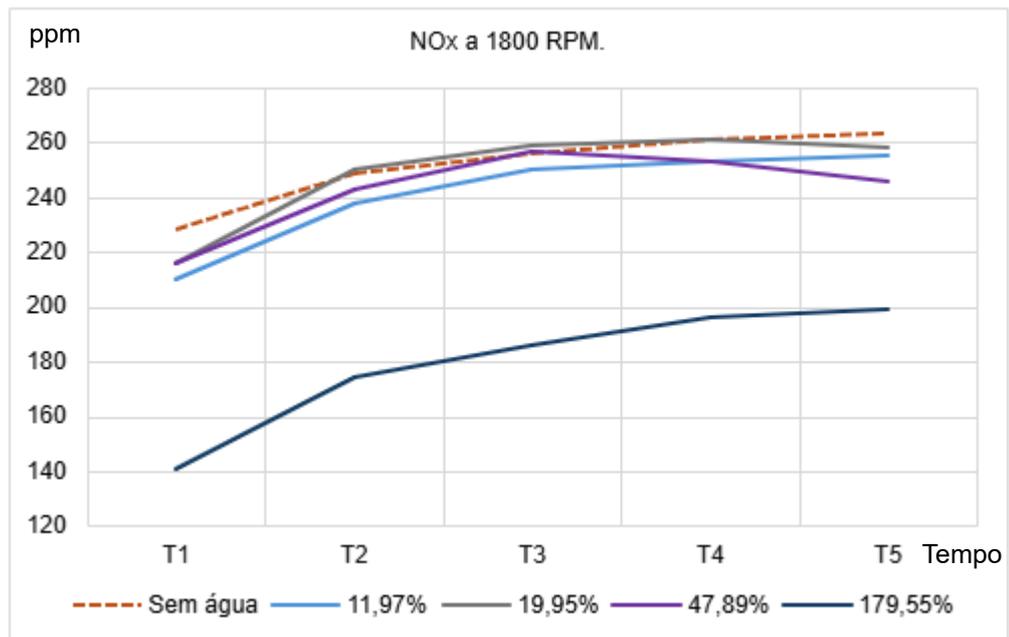
11,97%, 19,95%, 47,89% e 179,55%. O Gráfico 7 exibe as emissões de NO<sub>x</sub> para a mesma rotação, porém utilizando diesel S-500, avaliando o impacto das variações na injeção de água em diferentes condições operacionais.

Gráfico 6 – Emissões NO<sub>x</sub> a 1800 RPM no diesel S-10.



Fonte: Evangelista e Rocha (2024).

Gráfico 7 – Emissões NO<sub>x</sub> a 1800 RPM no diesel S-500.



Fonte: Autoria própria (2025).

Os resultados do Gráfico 6, indica que adicionar água através do método de injeção de nevoa proporcionou mitigação do  $\text{NO}_x$  visualizando a diminuição das curvas no eixo das partes por milhão (ppm) e as variações percentual dos intervalos do tempo de coleta da curva sem água e:  $T_2 \rightarrow T_1= 25,97\%$ ;  $T_3 \rightarrow T_2= 5,26\%$ ;  $T_4 \rightarrow T_3= 1,25\%$ ;  $T_5 \rightarrow T_4= 1,23\%$ . Obteve um aumento dos percentuais e mostra ser a curva com maior nível de ppm em relação as outras. Para a curva e ciano com 11,97% de nevoa de água a variação percentual de:  $T_2 \rightarrow T_1= 10,86\%$ ;  $T_3 \rightarrow T_2= 11,34\%$ ;  $T_4 \rightarrow T_3= 3,70\%$ ;  $T_5 \rightarrow T_4= 0,89\%$ , mostrando o aumento maior nos tempos iniciais, mostrando ser uma curva com nível intermediária de ppm. Para a curva cinza com 19,95% de nevoa de água as variações percentuais foram:  $T_2 \rightarrow T_1=12,30\%$ ;  $T_3 \rightarrow T_2=4,76\%$ ;  $T_4 \rightarrow T_3=2,27\%$ ;  $T_5 \rightarrow T_4$ =Manteve constante nesse ponto, graficamente mostra ser uma curva com nível intermediário de ppm. Para a curva em violeta com 47,89% de nevoa de água os percentuais se comportam da seguinte forma:  $T_2 \rightarrow T_1=13,81\%$ ;  $T_3 \rightarrow T_2=2,91\%$ ;  $T_4 \rightarrow T_3=2,83\%$ ;  $T_5 \rightarrow T_4$ = Manteve constante nesse ponto. No gráfico e identificada como uma curva com nível intermediário de ppm. Para a curva em azul com 179,55% de nevoa de água obteve:  $T_2 \rightarrow T_1=19,35\%$ ;  $T_3 \rightarrow T_2=5,41\%$ ;  $T_4 \rightarrow T_3=2,05\%$ ;  $T_5 \rightarrow T_4=- 2,01\%$  (recuo de 2,01%). Sendo assim como pode ser visto e a proporção com menor nível de ppm.

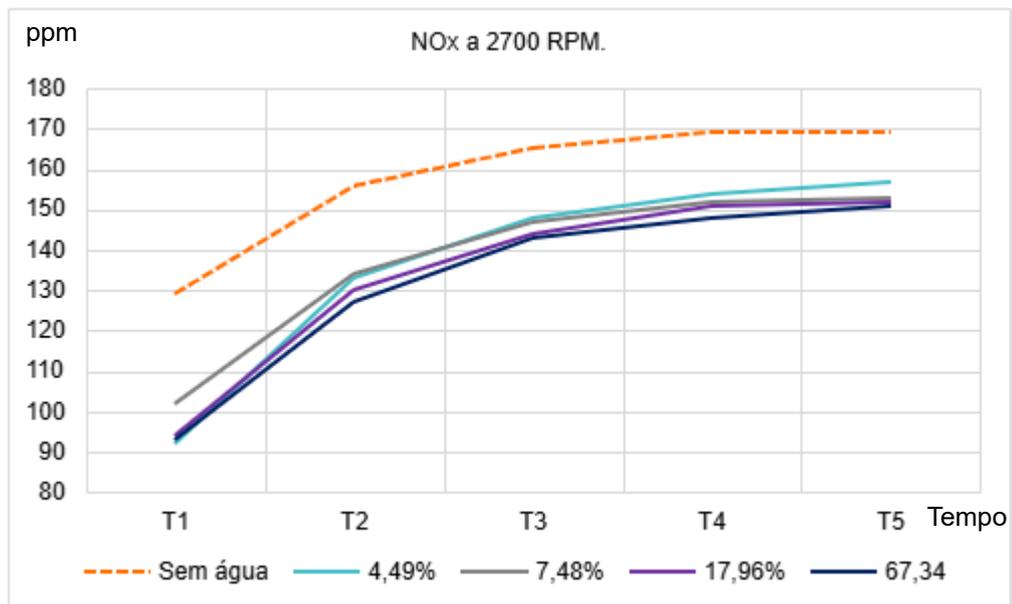
O resultado e consistente com os achados de Mazlan *et al.* (2018), identificaram o uso da água como um método eficaz para o gerenciamento de  $\text{NO}_x$ , graças ao resfriamento da câmara de combustão.

Os resultados do Gráfico 7, visualizando a diminuição das curvas no eixo das partes por milhão (ppm) e as variações percentual dos intervalos do tempo de coleta da curva sem água e:  $T_2 \rightarrow T_1=9,21\%$ ;  $T_3 \rightarrow T_2=2,81\%$ ;  $T_4 \rightarrow T_3=1,95\%$ ;  $T_5 \rightarrow T_4=0,77\%$ . Obteve um aumento dos percentuais e mostra ser a curva com maior nível de ppm no ponto T1 e T5 em relação as outras. Para a curva e ciano com 11,97% de nevoa de água a variação percentual de:  $T_2 \rightarrow T_1=13,33\%$ ;  $T_3 \rightarrow T_2=5,04\%$ ;  $T_4 \rightarrow T_3=1,20\%$ ;  $T_5 \rightarrow T_4=0,79\%$ . Mostrando o aumento maior do percentual nos tempos iniciais, mostrando ser uma curva com nível intermediária de ppm. Para a curva cinza com 19,95% de nevoa de água as variações percentuais foram:  $T_2 \rightarrow T_1=15,74\%$ ;  $T_3 \rightarrow T_2=3,60\%$ ;  $T_4 \rightarrow T_3=0,77\%$ ;  $T_5 \rightarrow T_4=- 1,15\%$  (recuo de 1,15%). Graficamente mostra ser uma curva com nível intermediário de ppm, tendo o ponto T3, elevado das demais. Para a curva em violeta com 47,89% de nevoa de água os

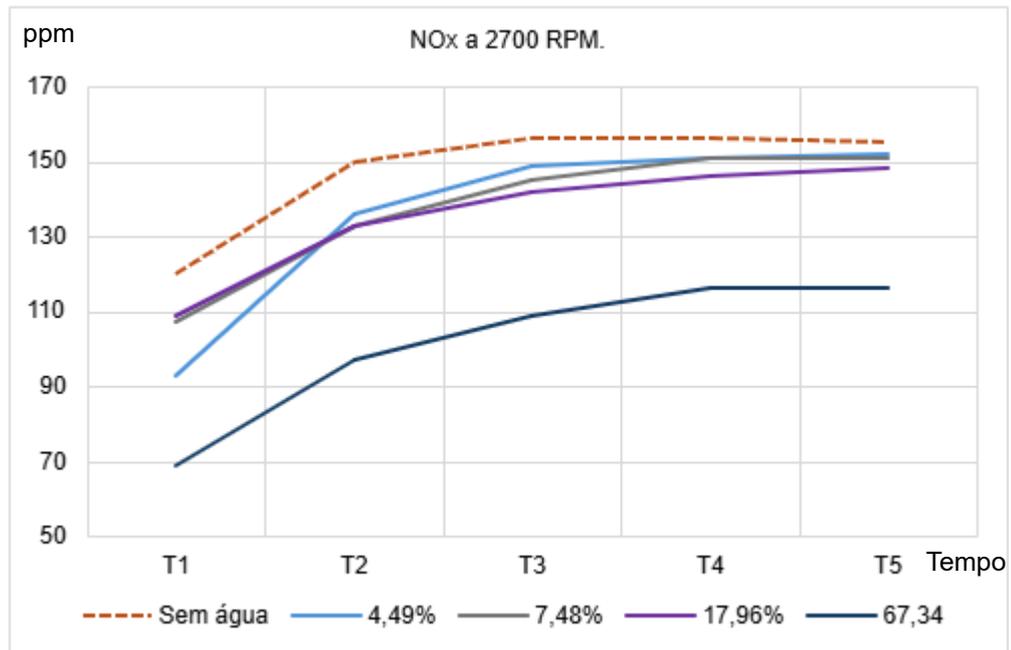
percentuais se comportam da seguinte forma:  $T2 \rightarrow T1=12,50\%$ ;  $T3 \rightarrow T2=5,75\%$ ;  $T4 \rightarrow T3=-1,56\%$  (queda de 1,56%);  $T5 \rightarrow T4=-2,77\%$  (queda de 2,77%). No gráfico é identificada como uma curva com nível intermediário de ppm. Para a curva em azul com 179,55% de névoa de água obteve:  $T2 \rightarrow T1=23,40\%$ ;  $T3 \rightarrow T2=6,90\%$ ;  $T4 \rightarrow T3=5,38\%$ ;  $T5 \rightarrow T4=1,53\%$ . Sendo assim como pode ser visto é a proporção com menor nível de ppm. É trazido por Kettner *et al.* (2016), que o uso de névoa de água em motores diesel contribui para uma redução eficaz nas emissões de  $\text{NO}_x$ .

O Gráfico 8 exibe a análise das emissões de  $\text{NO}_x$  em um motor diesel operando a 2700 RPM com diesel S-10, considerando distintas proporções de névoa de água: 0% (sem água), 4,49%, 7,48%, 17,96% e 67,34%. Já o Gráfico 9 apresenta os resultados para a mesma rotação, porém utilizando diesel S-500, avaliando o impacto da injeção de água nas emissões sob diferentes condições operacionais.

Gráfico 8 – Emissões  $\text{NO}_x$  a 2700 RPM no diesel S-10.



Fonte: Evangelista e Rocha (2024).

Gráfico 9 – Emissões NO<sub>x</sub> a 2700 RPM no diesel S-500.

Fonte: Autoria própria (2025).

Os resultados do Gráfico 8, visualizando a diminuição das curvas no eixo das partes por milhão (ppm) e as variações percentual dos intervalos do tempo de coleta da curva sem água e: T2 → T1=20,93%; T3 → T2=5,77%; T4 → T3=2,42%; T5 → T4=0% (estável). Obteve um aumento dos percentuais e mostra ser a curva com maior nível de ppm. Para a curva e ciano com 4,49% de nevoa de água a variação percentual de: T2 → T1=44,57%; T3 → T2=11,28%; T4 → T3=4,05%; T5 → T4=1,95%. Mostrando o aumento maior do percentual nos tempos iniciais, mostrando ser uma curva com nível intermediária de ppm. Para a curva cinza com 7,48% de nevoa de água as variações percentuais foram: T2 → T1=31,37%; T3 → T2=9,70%; T4 → T3=3,40%; T5 → T4=0,66%. Graficamente mostra ser uma curva com nível intermediário de ppm. Para a curva em violeta com 17,96% de nevoa de água os percentuais se comportam da seguinte forma: T2 → T1=38,30%; T3 → T2=10,77%; T4 → T3=4,86%; T5 → T4=0,66%. No gráfico é identificada como uma curva com nível intermediário de ppm. Para a curva em azul com 67,34% de nevoa de água obteve: T2 → T1=36,56%; T3 → T2=12,60%; T4 → T3=3,50%; T5 → T4=2,03%. Sendo assim como pode ser visto e a proporção com menor nível de ppm. Conforme é trazido por Frota (2019), os NO<sub>x</sub> são formados em altas temperaturas durante a combustão devido à reação entre o nitrogênio e o oxigênio do ar, a água também aumenta a capacidade

calorífica específica na câmara de combustão, dispersando o calor e limitando picos de temperatura localizados que favorecem a produção de NO<sub>x</sub>.

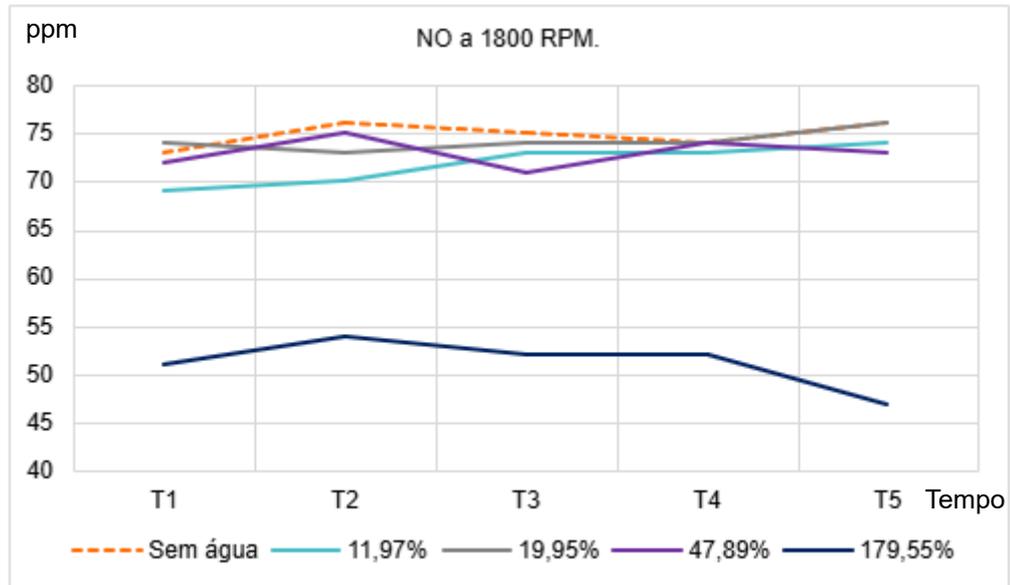
No diesel S-500 obteve a diminuição de 24,33%, já para a rotação de 2700 com proporção da água equivalente a 67,34%, visto nos resultados do Gráfico 9, visualizando as curvas no eixo das partes por milhão (ppm) e as variações percentual dos intervalos do tempo de coleta da curva sem água e: T2 → T1 =25,00%; T3 → T2 =4,00%; T4 → T3 =0,00% (estável); T5 → T4 =- 0,64% (recuo de 0,64%). Obteve um aumento dos percentuais e mostra ser a curva com maior nível de ppm. Para a curva e ciano com 4,49% de nevoa de água a variação percentual de: T2 → T1 =46,24%; T3 → T2 =9,56%; T4 → T3 =1,34%; T5 → T4 =0,66%. Mostrando o aumento maior do percentual nos tempos iniciais, mostrando ser uma curva com nível intermediária de ppm. Para a curva cinza com 7,48% de nevoa de água as variações percentuais foram: T2 → T1 =24,30%; T3 → T2 =9,02%; T4 → T3 =4,14%; T5 → =0,00% (estável). Graficamente mostra ser uma curva com nível intermediário de ppm. Para a curva em violeta com 17,96% de nevoa de água os percentuais se comportam da seguinte forma: T2 → T1 =22,02%; T3 → T2 =6,77%; T4 → T3 =2,82%; T5 → T4 =1,37%. No gráfico e identificada como uma curva com nível intermediário de ppm. Para a curva em azul com 67,34% de nevoa de água obteve: T2 → T1 =40,58%; T3 → T2 =12,37%; T4 → T3 =6,42%; T5 → T4 =0,00% (estável). Sendo assim como pode ser visto e a proporção com menor nível de ppm. Consistente com os achados de Mazlan *et al.* (2018), que identificaram o uso da água como um método eficaz para o gerenciamento de NO<sub>x</sub>. Esses autores afirmam que o aumento da capacidade térmica do fluido de trabalho resulta em temperaturas de combustão mais baixas. Esta redução nas emissões pode ser explicada pela redução da temperatura máxima de combustão ocasionada pelas propriedades de resfriamento da água, portanto, a produção de NO<sub>x</sub> diminui.

#### 4.2.2 Monóxidos de Nitrogênio (NO)

O Gráfico 10 ilustra a variação das emissões de NO em um motor diesel operando com diesel S-10 a 1800 RPM, considerando diferentes taxas de injeção de névoa de água quais são: 0% (sem água), 11,97%, 19,95%, 47,89% e 179,55%. Da

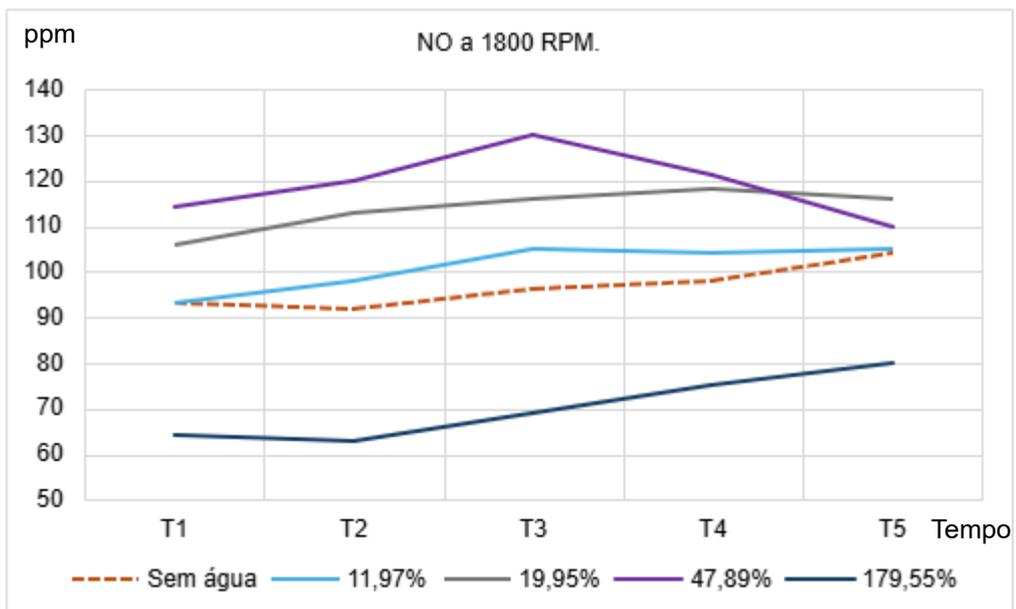
mesma forma, o Gráfico 11 apresenta a análise das emissões de NO para o diesel S-500 na mesma rotação, avaliando a mitigação desse gas.

Gráfico 10 – Emissões NO a 1800 RPM no diesel S-10.



Fonte: Evangelista e Rocha (2024).

Gráfico 11 – Emissões NO a 1800 RPM no diesel S-500.



Fonte: Autoria própria (2025).

Os resultados do Gráfico 10, indica que adicionar água através do método de injeção de nevoa proporcionou mitigação do NO visualizando a diminuição das curvas no eixo das partes por milhão (ppm) e as variações percentual dos intervalos do tempo

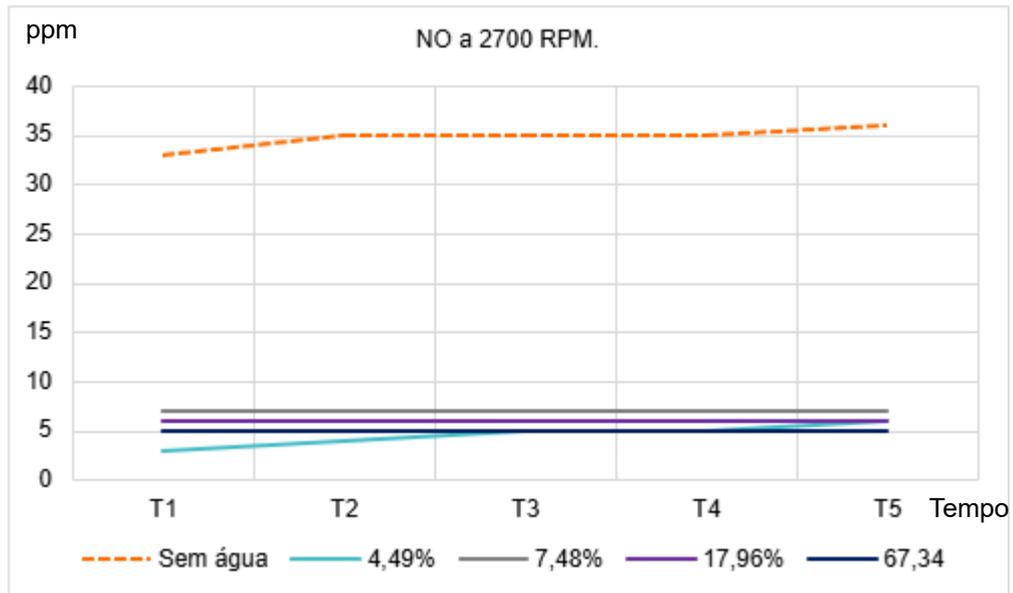
de coleta da curva sem água e:  $T2 \rightarrow T1 = 4,11\%$ ;  $T3 \rightarrow T2 = -1,32\%$ ;  $T4 \rightarrow T3 = -1,33\%$ ;  $T5 \rightarrow T4 = 2,70\%$ . Obteve um aumento dos percentuais e mostra ser a curva com maior nível de ppm em relação as outras. Para a curva e ciano com 11,97% de nevoa de água a variação percentual de:  $T2 \rightarrow T1 = 1,45\%$ ;  $T3 \rightarrow T2 = 4,29\%$ ;  $T4 \rightarrow T3 = 0,00\%$  (estável);  $T5 \rightarrow T4 = 1,37\%$ , mostrando uma estabilidade a partir do T3 e pouca crescimento na curva com nível intermediária de ppm. Para a curva cinza com 19,95% de nevoa de água as variações percentuais foram:  $T2 \rightarrow T1 = -1,35\%$ ;  $T3 \rightarrow T2 = 1,37\%$ ;  $T4 \rightarrow T3 = 0,00\%$  (estável);  $T5 \rightarrow T4 = 2,70\%$ , graficamente mostra ser uma curva com um pico de crescimento no T5. Para a curva em violeta com 47,89% de nevoa de água os percentuais se comportam da seguinte forma:  $T2 \rightarrow T1 = 4,17\%$ ;  $T3 \rightarrow T2 = -5,33\%$ ;  $T4 \rightarrow T3 = 4,23\%$ ;  $T5 \rightarrow T4 = -1,35\%$ , no gráfico e identificada como uma curva com nível intermediário de ppm. Para a curva em azul com 179,55% de nevoa de água obteve:  $T2 \rightarrow T1 = 5,88\%$ ;  $T3 \rightarrow T2 = -3,70\%$ ;  $T4 \rightarrow T3 = 0,00\%$  (estável);  $T5 \rightarrow T4 = -9,62\%$ , sendo assim como pode ser visto e a proporção com menor nível de ppm.

Os resultados do Gráfico 11, visualizando a diminuição das curvas no eixo das partes por milhão (ppm) e as variações percentual dos intervalos do tempo de coleta da curva sem água e:  $T2 \rightarrow T1 = -1,08\%$ ;  $T3 \rightarrow T2 = 4,35\%$ ;  $T4 \rightarrow T3 = 2,08\%$ ;  $T5 \rightarrow T4 = 6,12\%$ , a curva ficou no nível de produção intermediária do NO. Para a curva e ciano com 11,97% de nevoa de água a variação percentual de:  $T2 \rightarrow T1 = 5,38\%$ ;  $T3 \rightarrow T2 = 7,14\%$ ;  $T4 \rightarrow T3 = -0,95\%$ ;  $T5 \rightarrow T4 = 0,96\%$ , revelou um nível elevado de produção de NO em relação ao modelo sem a nevoa de água. Para a curva cinza com 19,95% de nevoa de água as variações percentuais foram:  $T2 \rightarrow T1 = 6,60\%$ ;  $T3 \rightarrow T2 = 2,65\%$ ;  $T4 \rightarrow T3 = 1,72\%$ ;  $T5 \rightarrow T4 = -1,69\%$ , no gráfico mostra um nível elevado principalmente no ponto T5. Para a curva em violeta com 47,89% de nevoa de água os percentuais se comportam da seguinte forma:  $T2 \rightarrow T1 = 5,26\%$ ;  $T3 \rightarrow T2 = 8,33\%$ ;  $T4 \rightarrow T3 = -6,92\%$ ;  $T5 \rightarrow T4 = -9,09\%$ , no gráfico e identificada o nível elevado de produção de NO em ponto T3. Para a curva em azul com 179,55% de nevoa de água obteve:  $T2 \rightarrow T1 = -1,56\%$ ;  $T3 \rightarrow T2 = 9,52\%$ ;  $T4 \rightarrow T3 = 8,70\%$ ;  $T5 \rightarrow T4 = 6,67\%$ , sendo assim como pode ser visto e a proporção com menor nível de ppm.

O Gráfico 12 apresenta a análise das emissões de NO em um motor diesel operando a 2700 RPM com diesel S-10, considerando diferentes proporções de nevoa

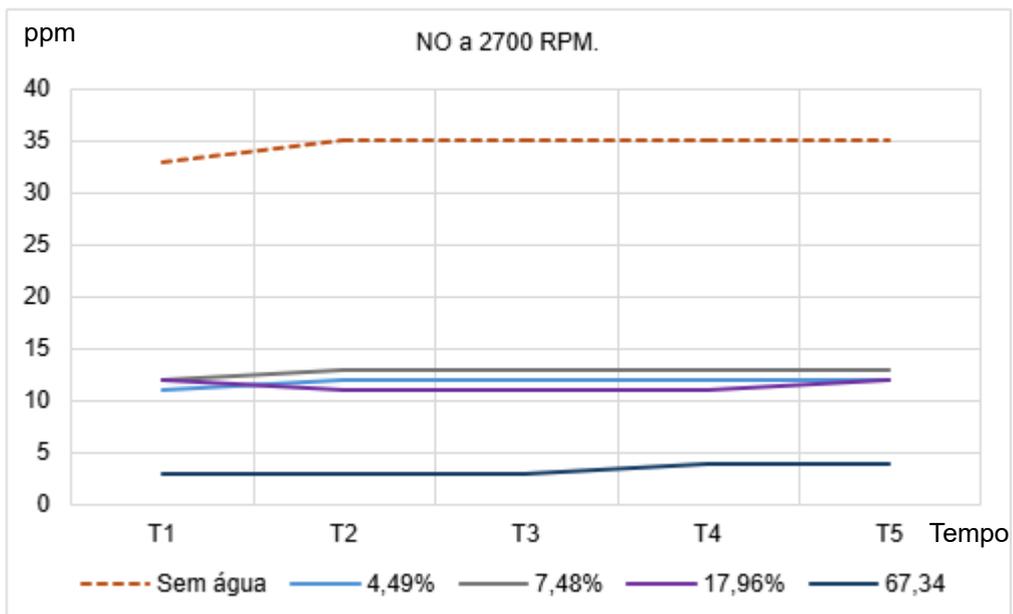
de água: 0% (sem água), 4,49%, 7,48%, 17,96% e 67,34%. De forma semelhante, o Gráfico 13 exibe a variação das emissões de NO para o diesel S-500 nas mesmas condições operacionais e proporções de injeção de água, permitindo a comparação dos efeitos da nebulização sobre a formação de óxidos de nitrogênio.

Gráfico 12 – Emissões NO a 2700 RPM no diesel S-10.



Fonte: Evangelista e Rocha (2024).

Gráfico 13 – Emissões NO a 2700 RPM no diesel S-500.



Fonte: Autoria própria (2025).

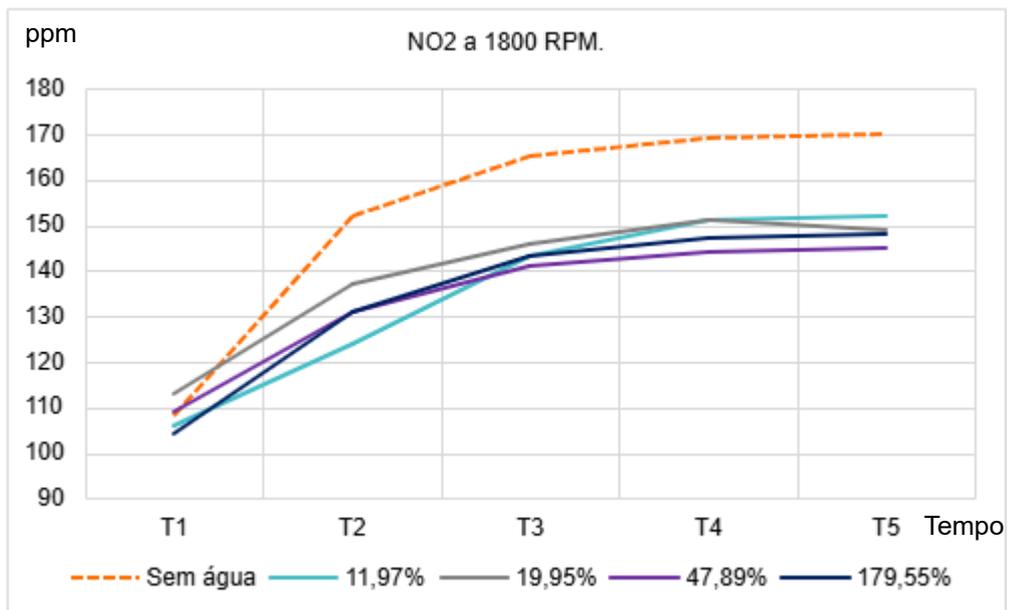
Os resultados do Gráfico 12, visualizando a diminuição das curvas no eixo das partes por milhão (ppm) e as variações percentual dos intervalos do tempo de coleta da curva sem água e:  $T2 \rightarrow T1 = 6,06\%$ ;  $T3 \rightarrow T2 = 0,00\%$  (estável);  $T4 \rightarrow T3 = 0,00\%$  (estável);  $T5 \rightarrow T4 = 2,86\%$ , configurando a curva com maior produção de ppm do NO. Para a curva e ciano com 4,49% de nevoa de água a variação percentual de:  $T2 \rightarrow T1 = 33,33\%$ ;  $T3 \rightarrow T2 = 25,00\%$ ;  $T4 \rightarrow T3 = 0,00\%$  (estável);  $T5 \rightarrow T4 = 20,00\%$ , possuindo o T1 e T2 inferior aos demais em relação a produção de ppm do NO. Para a curva cinza com 7,48% de nevoa de água não obteve variação se mantendo estável a curva com nível intermediário de ppm. Para a curva em violeta com 17,96% de nevoa de água não obteve variação se mantendo estável a curva com nível intermediário de ppm. Para a curva em azul com 67,34% de nevoa de água não obteve variação se mantendo estável a curva com nível intermediário de ppm. E destacado por Guan *et al.* (2021), que estratégias como a injeção de água em motores diesel reduzem significativamente as emissões de NO, justamente para diminuir a temperatura na câmara de combustão.

Os resultados do Gráfico 13, visualizando as curvas no eixo das partes por milhão (ppm) e as variações percentual dos intervalos do tempo de coleta da curva sem água e:  $T2 \rightarrow T1 = 6,06\%$ , os demais valores permaneceram constante ocorrendo 0 % de variação, a maior produção do NO a 2700 RPM, foi na curva em laranja com o sistema sem água. Para a curva e ciano com 4,49% de nevoa de água a variação percentual de:  $T2 \rightarrow T1 = 9,09\%$ , as demais coletas permaneceram constante, essa curva se caracteriza como intermediária. Para a curva cinza com 7,48% de nevoa de água as variações percentuais foram:  $T2 \rightarrow T1 = 8,33\%$ , as demais permaneceram constante, essa curva é intermediária. Para a curva em violeta com 17,96% de nevoa de água os percentuais se comportam da seguinte forma:  $T2 \rightarrow T1 = -8,33\%$  (redução) e  $T5 \rightarrow T4 = 9,09\%$ , as demais curvas permaneceram constante, essa curva está na faixa intermediária. Para a curva em azul com 67,34% de nevoa de água obteve:  $T4 \rightarrow T3 = 33,33\%$ , os demais pontos permaneceram constante, sendo essa a curva com menor produção de NO a 2700 RPM. Para Farag *et al.* (2017), o resfriamento fornecido pela névoa de água reduz as emissões de NO.

#### 4.2.3 Dióxido de nitrogênio (NO<sub>2</sub>)

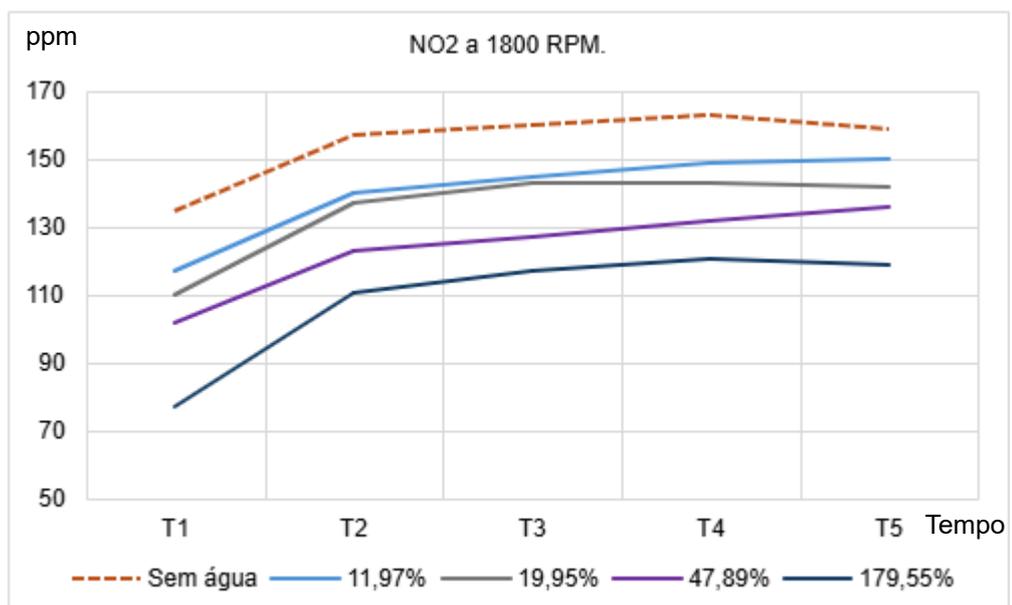
O Gráfico 14 apresenta a análise das emissões de NO<sub>2</sub> em um motor diesel operando a 1800 RPM com diesel S-10, submetido a diferentes proporções de névoa de água: 0% (sem água), 11,97%, 19,95%, 47,89% e 179,55%. Já o Gráfico 15 exibe a análise das emissões de NO<sub>2</sub> no motor diesel utilizando o diesel S-500, sob as mesmas condições experimentais e rotações aplicadas ao S-10, permitindo a comparação entre os dois combustíveis nas diferentes proporções de água injetada.

Gráfico 14 – Emissões NO<sub>2</sub> a 1800 RPM no diesel S-10.



Fonte: Autoria própria (2025).

Gráfico 15 – Emissões NO<sub>2</sub> a 1800 RPM no diesel S-500.



Fonte: Autoria própria (2025).

Os resultados do Gráfico 14, indica que adicionar água através do método de injeção de nevoa proporcionou mitigação do NO<sub>2</sub> visualizando a diminuição das curvas no eixo das partes por milhão (ppm) e as variações percentual dos intervalos do tempo de coleta da curva sem água e: T2 → T1=40 ,74%; T3 → T2=8 ,55%; T4 → T3=2 ,42%; T5 → T4=0 ,59%, sendo a curva que tem maior produção de NO<sub>2</sub>.

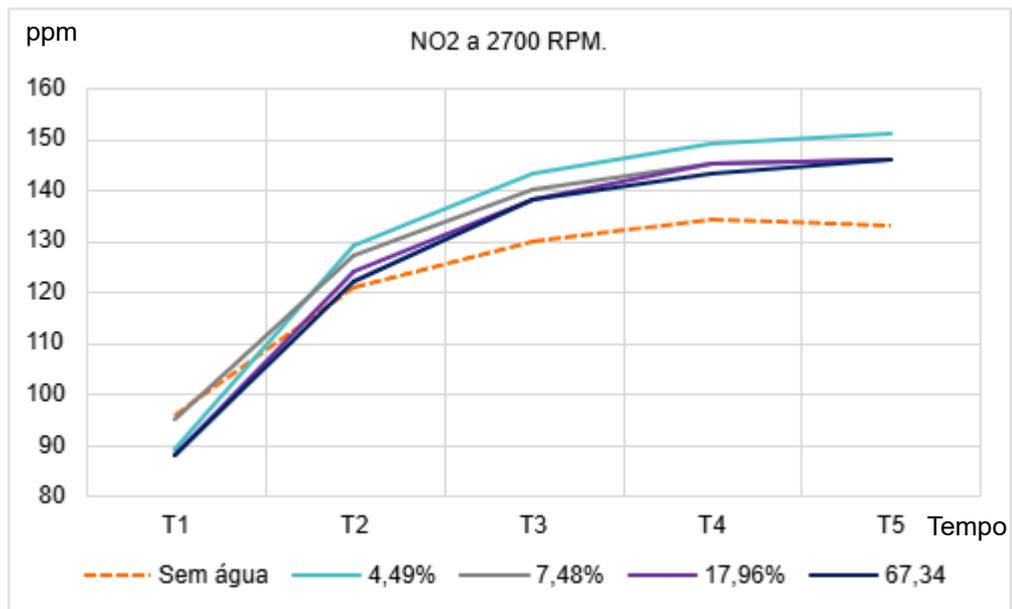
Para a curva e ciano com 11,97% de nevoa de água a variação percentual de: T2 → T1=16 ,98%; T3 → T2=15 ,32%; T4 → T3=5 ,59%; T5 → T4=0 ,66%, sendo curva de redução intermediária. Para a curva cinza com 19,95% de nevoa de água as variações percentuais foram: T2 → T1=21 ,24%; T3 → T2=6 ,57%; T4 → T3=3 ,42%; T5 → T4=- 1 ,32%, curva de redução intermediária. Para a curva em violeta com 47,89% de nevoa de água os percentuais se comportam da seguinte forma: T2 → T1=20 ,18%; T3 → T2=7 ,63%; T4 → T3=2 ,13%; T5 → T4=0 ,69%, essa curva obteve maior redução das emissões de NO<sub>2</sub>. Para a curva em azul com 179,55% de nevoa de água obteve: T2 → T1=25 ,96%; T3 → T2=9 ,16%; T4 → T3=2 ,80%; T5 → T4=0 ,68%, curva de redução do NO<sub>2</sub> intermediária. Segundo Frota (2019), destaca a formação dos gases poluentes e o NO<sub>2</sub> no impacto da temperatura 44 elevada na formação de NO<sub>2</sub>, em conformidade com teorias que relacionam altas temperaturas da combustão ao aumento das emissões desse poluente.

Os resultados do Gráfico 15, visualizando a diminuição das curvas no eixo das partes por milhão (ppm) e as variações percentual dos intervalos do tempo de coleta da curva sem água e: T2 → T1 =16 ,30%; T3 → T2 =1 ,91%; T4 → T3 =1 ,88%; T5 → T4=- 2 ,45%, curva que obteve maior produção de emissão de NO<sub>2</sub>. Para a curva e ciano com 11,97% de nevoa de água a variação percentual de: T2 → T1 =19 ,66%; T3 → T2 =3 ,57%; T4 → T3 =2 ,76%; T5 → T4 =0 ,67%, curva com redução de emissões intermediária. Para a curva cinza com 19,95% de nevoa de água as variações percentuais foram: T2 → T1 =24 ,55%; T3 → T2=4 ,38%; T4 → T3=0 ,00%; T5 → T4 =- 0 ,70%, curva que expõe redução intermediária. Para a curva em violeta com 47,89% de nevoa de água os percentuais se comportam da seguinte forma: T2 → T1 =20 ,59%; T3 → T2 =3 ,25%; T4 → T3=3 ,94%; T5 → T4 =3 ,03%, proporção de água trouxe redução significativa e está dentro da margem intermediária de mitigação. Para a curva em azul com 179,55% de nevoa de água obteve: T2 → T1

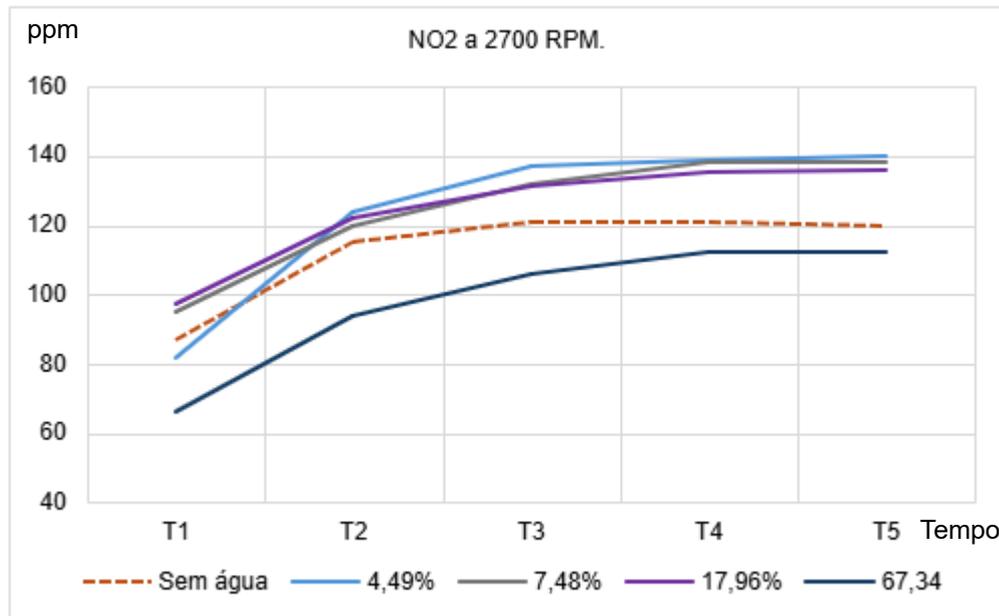
=44 ,16%; T3 → T2 =5 ,41%; T4 → T3 =3 ,42%; T5 → T4 =- 1 ,65%, a curva que propôs maior adição de água, trouxe como resultado a maior redução dentre as demais experimentadas.

O Gráfico 16 apresenta a análise das emissões de NO em um motor diesel operando a 2700 RPM com diesel S-10, submetido a diferentes concentrações de névoa de água: 0% (sem água), 4,49%, 7,48%, 17,96% e 67,34%. O Gráfico 17, por sua vez, detalha a variação nas emissões de NO ao utilizar o diesel S-500, nas mesmas condições de rotação e proporções de névoa de água.

Gráfico 16 – Emissões NO<sub>2</sub> a 2700 RPM no diesel S-10.



Fonte: Autoria própria (2025).

Gráfico 17 – Emissões NO<sub>2</sub> a 2700 RPM no diesel S-500.

Fonte: Autoria própria (2025).

Os resultados do Gráfico 16, visualizando a diminuição das curvas no eixo das partes por milhão (ppm) e as variações percentual dos intervalos do tempo de coleta da curva sem água e: T2 → T1 = 26,04%; T3 → T2 = 7,44%; T4 → T3 = 3,08%; T5 → T4 = - 0,75%, a curva sem água obteve melhores resultados em comparação as porcentagens de água adicionada ao motor. Para a curva e ciano com 4,49% de nevoa de água a variação percentual de: T2 → T1 = 44,94%; T3 → T2 = 10,85%; T4 → T3 = 4,20%; T5 → T4 = 1,34%, ocorreu altas produções de emissões nessa curva. Para a curva cinza com 7,48% de nevoa de água: T2 → T1 = 33,68%; T3 → T2 = 10,24%; T4 → T3 = 3,57%; T5 → T4 = 0,69%, obteve alta produção de emissões de NO<sub>2</sub>. Para a curva em violeta com 17,96% de nevoa de água: T2 → T1 = 40,91%; T3 → T2 = 11,29%; T4 → T3 = 5,07%; T5 → T4 = 0,69%, não ocorreu a mitigação e sim elevou a produção do NO<sub>2</sub>. Para a curva em azul com 67,34% de nevoa de água: T2 → T1 = 38,64%; T3 → T2 = 13,11%; T4 → T3 = 3,62%; T5 → T4 = 2,10%, produção permaneceu elevada nessa proporção de água. Com base nas análises, o resultado trouxe à tona a influência da rotação como fator direto na formação do gás, conclui-se que a injeção com névoa de água não teve benefício significativamente na rotação de 2700 RPM nas emissões de NO<sub>2</sub>, destacando assim uma maior oxigenação possibilitando a formação desse gás assim como e trazido nas análises de formação dos gases de Frota (2019).

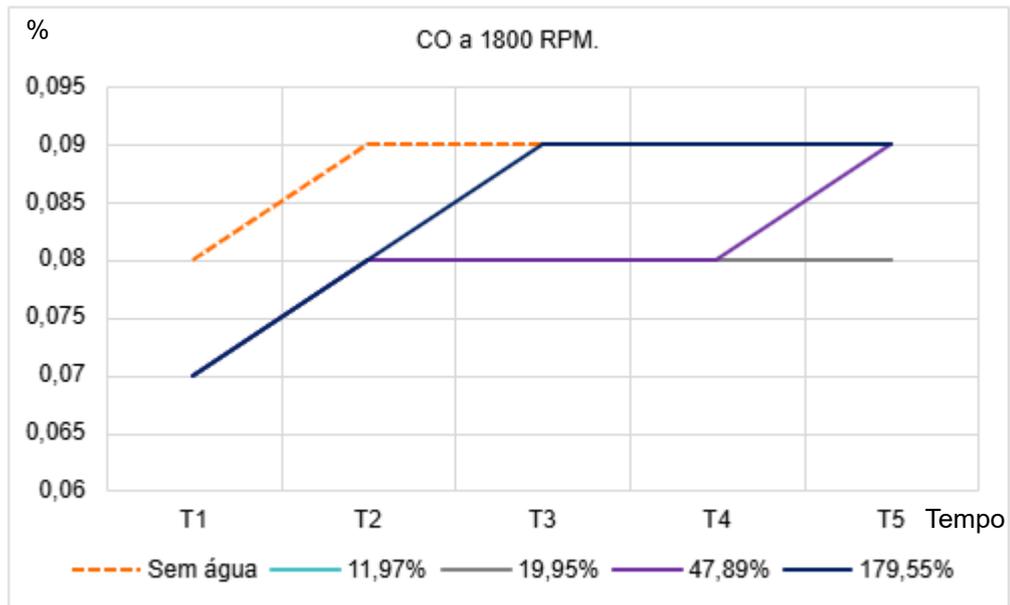
Os resultados do Gráfico 17, visualizando as curvas no eixo das partes por milhão (ppm) e as variações percentual dos intervalos do tempo de coleta da curva sem água e: T2 → T1 = 32,18%; T3 → T2 = 5,22%; T4 → T3 = 0,00%; T5 → T4 = - 0,83%, essa curva sem a água teve menor produção do NO<sub>2</sub>, em relação as proporções de água, no entanto a maior proporção de água ficou com resultados mais concisos sobre a mitigação do gas. Para a curva em ciano com 4,49% de nevoa de água a variação percentual de: T2 → T1 = 51,22%; T3 → T2 = 10,48%; T4 → T3 = 1,46%; T5 → T4 = 0,72%, obteve alta produção de NO<sub>2</sub>, não ocorrendo a mitigação desse gas.

Para a curva cinza com 7,48% de nevoa de água as variações percentuais foram: T2 → T1 = 26,32%; T3 → T2 = 10,00%; T4 → T3 = 4,55%; T5 → T4 = 0,00%, ocorreu maior produção de NO<sub>2</sub> em comparação a curva sem o sistema de nevoa de água. Para a curva em violeta com 17,96% de nevoa de água os percentuais se comportam da seguinte forma: T2 → T1 = 25,77%; T3 → T2 = 7,38%; T4 → T3 = 3,05%; T5 → T4 = 0,74%, cursa não proporcional diminuição desse gas, pelo contrário ocorreu a elevação. Para a curva em azul com 67,34% de nevoa de água obteve: T2 → T1 = 42,42%; T3 → T2 = 12,77%; T4 → T3 = 5,66%; T5 → T4 = 0,00%, a curva com maior proporção de água para a rotação 2700 RPM para o NO<sub>2</sub> mostrou-se eficaz visto que trouxe a mitigação do gas poluente, podendo ser explicado a formação desse gas por Frota (2019) onde explica que esse gas e uma forma oxidada do NO, e a influência do oxigênio aumenta sua produção.

#### 4.2.4 Monóxido de carbono (CO)

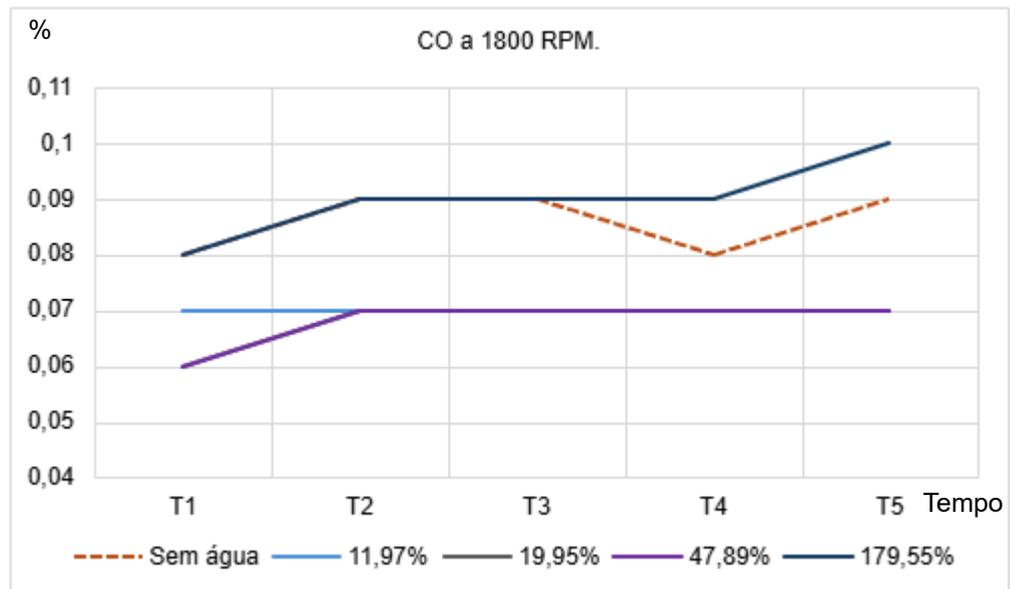
O Gráfico 18 apresenta a análise das emissões de CO em um motor diesel operando com diesel S-10, submetido a diferentes proporções de névoa de água de: 0% (sem água), 11,97%, 19,95%, 47,89%, 179,55%, nas rotações de 1800 RPM. Em comparação, o Gráfico 19 exhibe os resultados das emissões de CO no motor diesel utilizando o diesel S-500, sob as mesmas condições de proporção de névoa de água e rotação, permitindo a comparação dos efeitos da injeção de água em ambos os tipos de combustível.

Gráfico 18 – Emissões CO a 1800 RPM no diesel S-10.



Fonte: Evangelista e Rocha (2024).

Gráfico 19 – Emissões CO a 1800 RPM no diesel S-500.



Fonte: Autoria própria (2025).

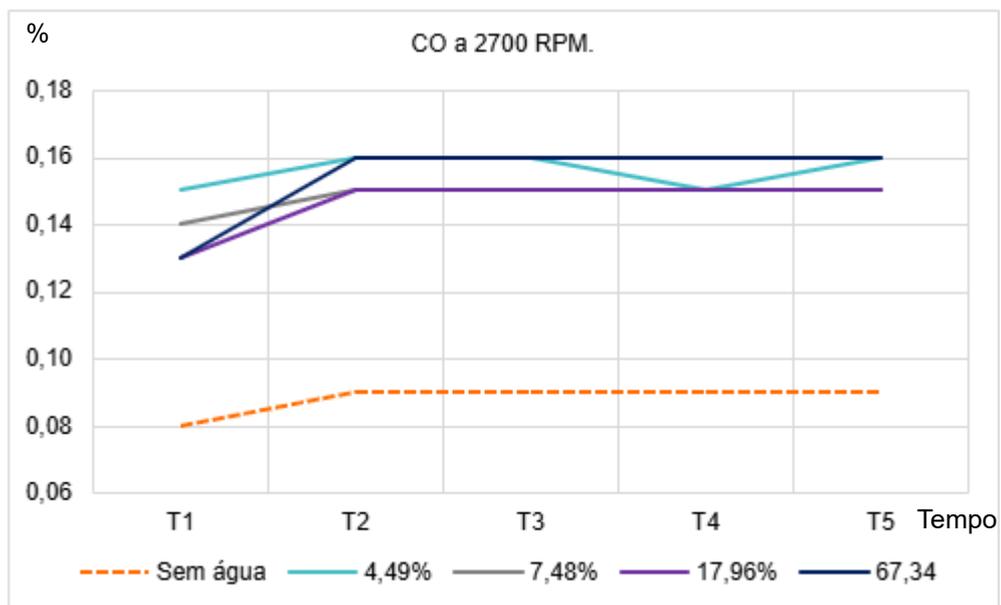
O Gráfico 18, mostra as emissões de CO que são predominantemente influenciadas pela relação ar/combustível. No gráfico, observa-se que, a 1800 RPM, as emissões são baixas. Isso ocorre devido à natureza das misturas utilizadas nos motores diesel, que já são naturalmente pobres. Com a introdução da névoa de água, verifica-se uma redução adicional nas emissões, com exceção do ponto onde a taxa

de injeção atinge sua maior porcentagem de água, resultando em uma diminuição na relação ar/combustível.

Já para o Gráfico 19, as emissões de CO são predominantemente influenciadas pela relação ar/combustível. Nas figuras, observa-se que, a 1800 RPM, as emissões são baixas. Isso ocorre devido à natureza das misturas utilizadas nos motores diesel, que já são naturalmente pobres. Com a introdução de injeção com névoa de água, verifica-se uma redução adicional nas emissões, com exceção do ponto onde a porcentagem de água é de 179,55%, com maior inclinação do T4 ao T5, resultando em uma diminuição na relação ar/combustível.

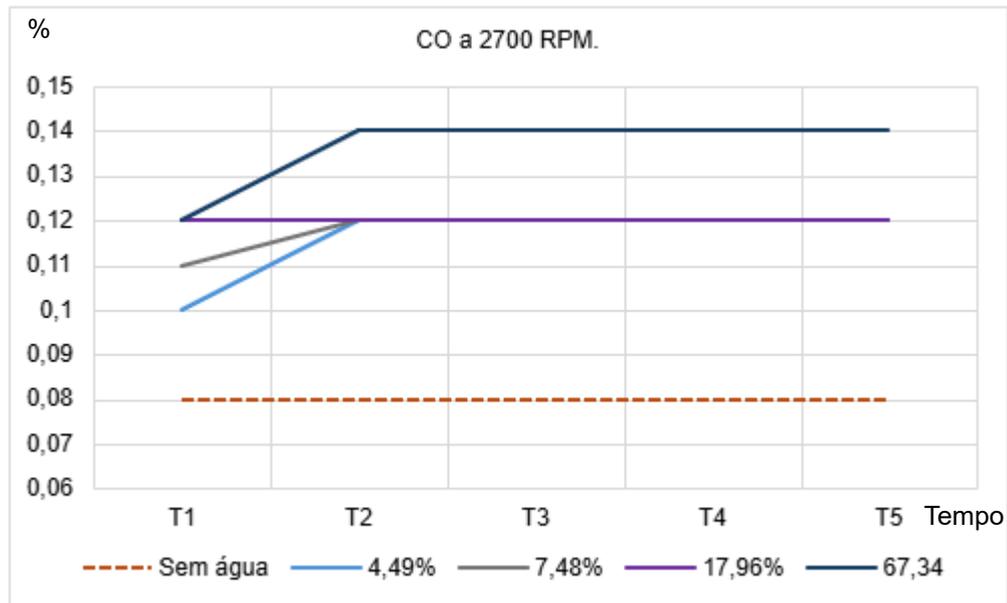
O Gráfico 20 ilustra a análise das emissões de CO em um motor diesel operando a 2700 RPM com diesel S-10, sob diferentes concentrações de névoa de água: 0% (sem água), 4,49%, 7,48%, 17,96% e 67,34%. Em contraste, o Gráfico 21 apresenta a variação das emissões de CO quando se utiliza o diesel S-500, mantendo as condições de rotação e proporções de névoa de água, possibilitando a comparação dos efeitos da nebulização sobre as emissões para ambos os combustíveis.

Gráfico 20 – Emissões CO a 2700 RPM no diesel S-10.



Fonte: Evangelista e Rocha (2024).

Gráfico 21 – Emissões CO a 2700 RPM no diesel S-500.



Fonte: Autoria própria (2025).

O Gráfico 20 mostra o CO a 2700 RPM, as emissões são mais altas (Evangelista; Rocha, 2024). Para Martins (2006), isso se deve à diminuição da relação ar/combustível associada a uma rotação mais elevada, resultando em uma mistura ainda mais pobre para a queima de combustível, todas as proporções foram ineficazes.

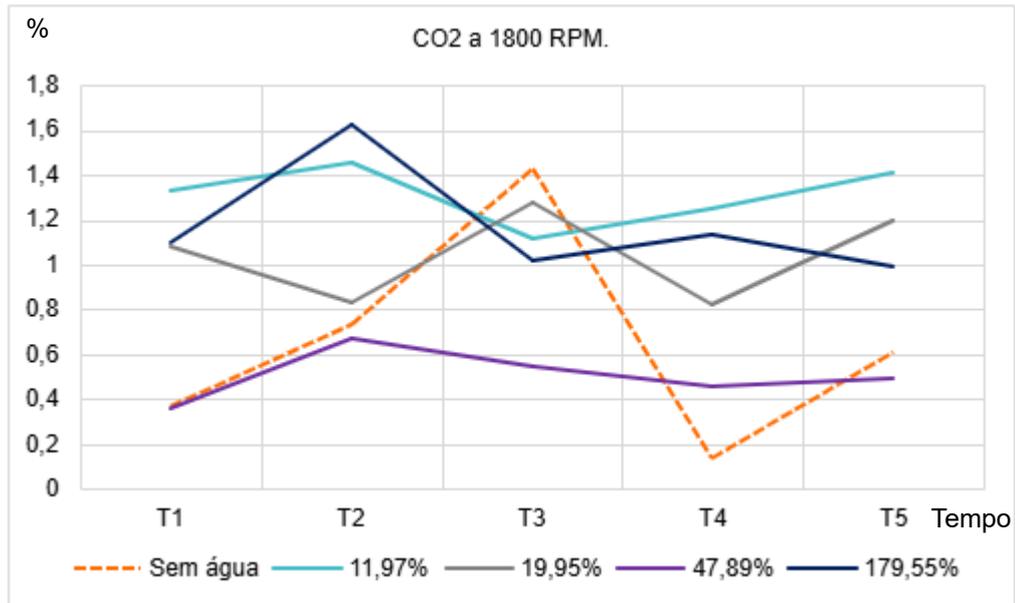
Já no Gráfico 21, com o CO a 2700 RPM, as emissões são elevadas em todas as proporções de água. Isso se deve à diminuição da relação ar/combustível associada a uma rotação mais elevada, resultando em uma mistura ainda mais pobre para a queima de combustível, seguindo os estudos de Martins (2006), onde se pesquisou as formações dos gases de emissões veiculares e trazem a relação ar/combustível como fator de formação do CO.

#### 4.2.5 Dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>)

O Gráfico 22 mostra a análise das emissões de CO<sub>2</sub> em um motor diesel operando com diesel S-10, exposto a diferentes proporções de névoa de água: 0% (sem água), 11,97%, 19,95%, 47,89% e 179,55%, a uma rotação de 1800 RPM. Em contraste, o Gráfico 23 apresenta os dados das emissões de CO<sub>2</sub> utilizando o diesel S-500, sob as mesmas condições de proporções de névoa de água e rotação,

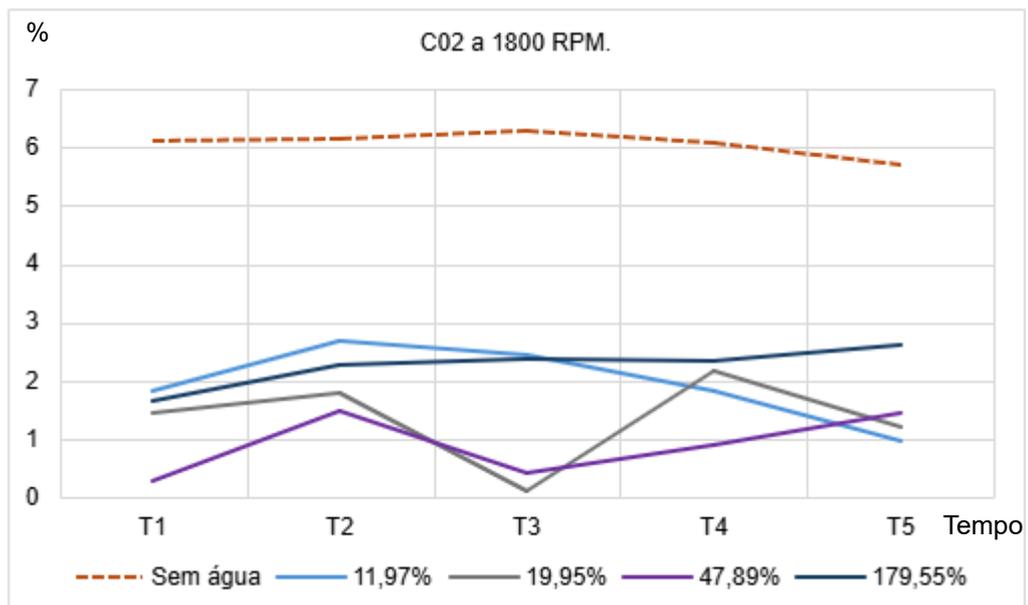
possibilitando uma análise comparativa dos efeitos da injeção de água sobre as emissões para ambos os combustíveis.

Gráfico 22 – Emissões CO<sub>2</sub> a 1800 RPM no diesel S-10.



Fonte: Evangelista e Rocha (2024).

Gráfico 23 – Emissões CO<sub>2</sub> a 1800 RPM no diesel S-500.



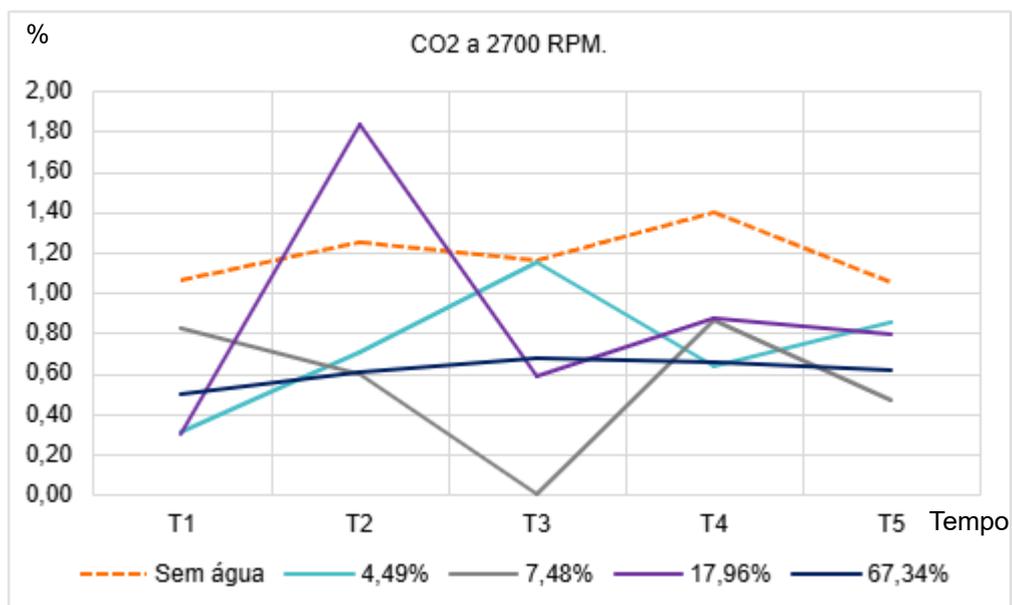
Fonte: Autoria própria (2025).

O gráfico 22, demonstra com base na análise do gráfico de dióxido de carbono produzido na rotação de 1800 rpm, ocorreu uma redução apenas no percentual de 47,89% de água, nos demais valores ocorreu um aumento em relação ao sem a água no sistema, e o maior aumento ocorreu na proporção de 11,97, apresenta a análise do CO<sub>2</sub> em um motor diesel utilizando o diesel S-10 submetido a diferentes proporções de névoa de água em rotações distintas.

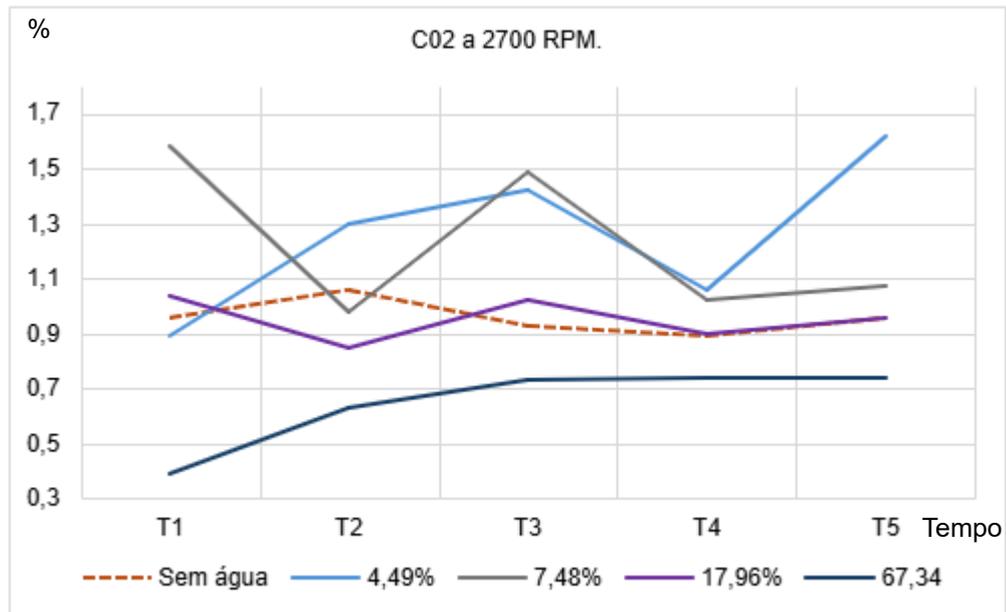
Já o Gráfico 23 demonstra a característica do dióxido de carbono produzido, fica claro que a rotação do motor teve um impacto significativo nos resultados. Na rotação de 1800 rpm, observa-se uma diminuição significativa nos valores de CO<sub>2</sub> para todos os percentuais de água em forma de névoa injetada na câmara de combustão

O Gráfico 24 apresenta a análise das emissões de CO<sub>2</sub> em um motor diesel operando a 2700 RPM com diesel S-10, sob diferentes proporções de névoa de água: 0% (sem água), 4,49%, 7,48%, 17,96% e 67,34%. O Gráfico 25, por sua vez, exibe a variação das emissões de CO<sub>2</sub> utilizando diesel S-500 nas mesmas proporções de névoa de água e rotação, permitindo a comparação detalhada dos efeitos da nebulização nas emissões de CO<sub>2</sub> para ambos os combustíveis.

Gráfico 24 – Emissões CO<sub>2</sub> a 2700 RPM no diesel S-10.



Fonte: Evangelista e Rocha (2024).

Gráfico 25 – Emissões CO<sub>2</sub> a 2700 RPM no diesel S-500.

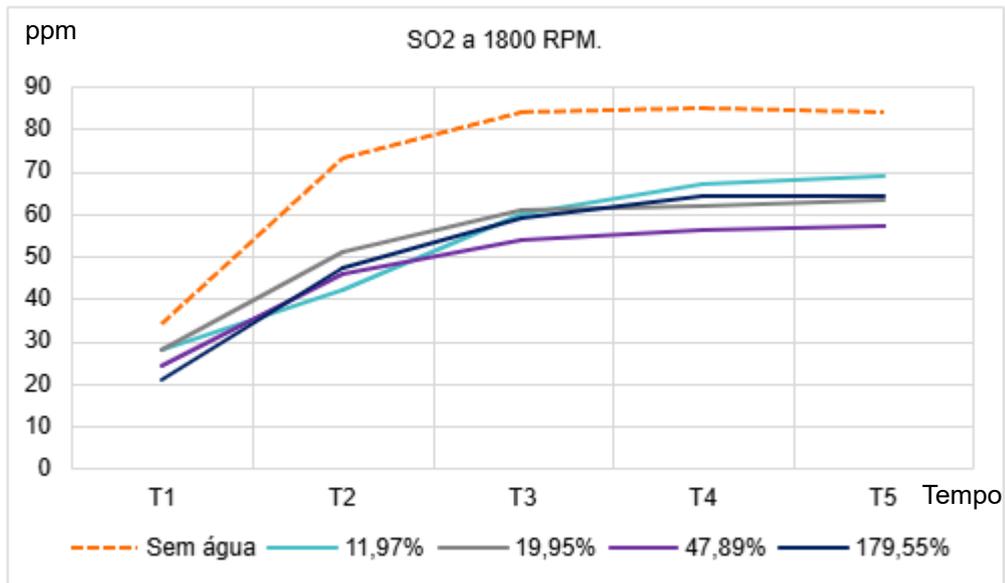
Fonte: Autoria própria (2025).

O Gráfico 24 exibe os valores obtidos na rotação de 2700 mostram uma diminuição nas emissões em todos os percentuais de água, com a maior diminuição na proporção de 7,48%.

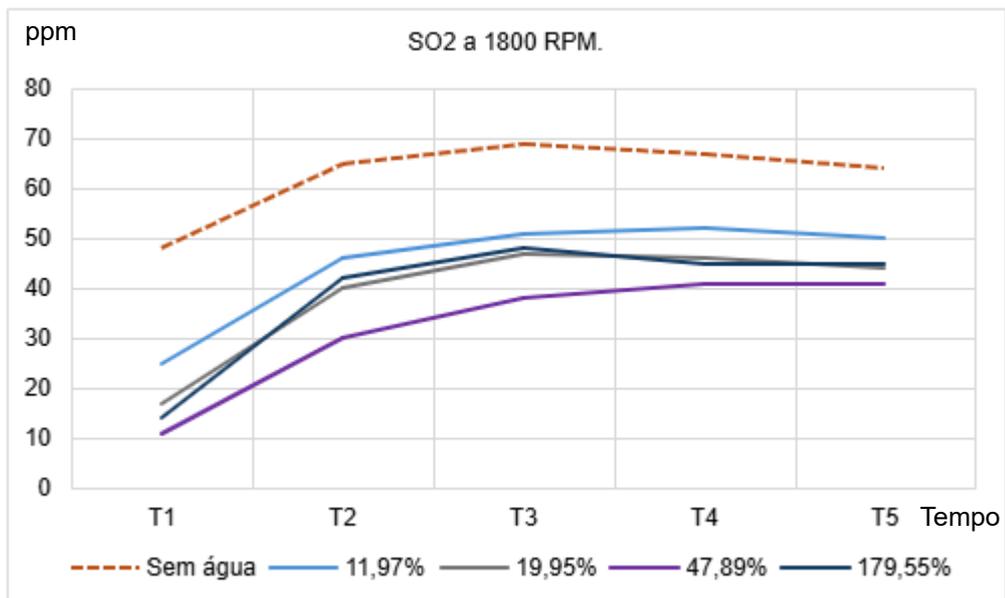
O Gráfico 25 com as análises configuradas para rotação de 2700 RPM, foram obtidos valores elevados para as relações de água de 4,49% e 7,48%, mas não foram observadas alterações significativas a 59 17,96% em comparação com a amostra sem água. Por outro lado, uma taxa de 67,34% reduziu significativamente as emissões de CO<sub>2</sub> em comparação com o caso sem água. Estes resultados mostram que a névoa de água foi eficaz na redução das emissões de CO<sub>2</sub> a 1.800 RPM, enquanto a estratégia de 2700 RPM foi eficaz na proporção de água mais alta de 67,34%.

#### 4.2.6 Dióxido de enxofre (SO<sub>2</sub>)

O Gráfico 26 apresenta as emissões de SO<sub>2</sub> em um motor diesel a 1800 RPM com diesel S-10, sob concentrações de névoa de água de 0% (sem água), 11,97%, 19,95%, 47,89% e 179,55%. O Gráfico 27 apresenta as emissões de SO<sub>2</sub> nas mesmas condições, porém com diesel S-500. A comparação permite avaliar o impacto da injeção de água nas emissões de SO<sub>2</sub> para ambos os combustíveis.

Gráfico 26 – Emissões SO<sub>2</sub> a 1800 RPM no diesel S-10.

Fonte: Evangelista e Rocha (2024).

Gráfico 27 – Emissões SO<sub>2</sub> a 1800 RPM no diesel S-500.

Fonte: Autoria própria (2025).

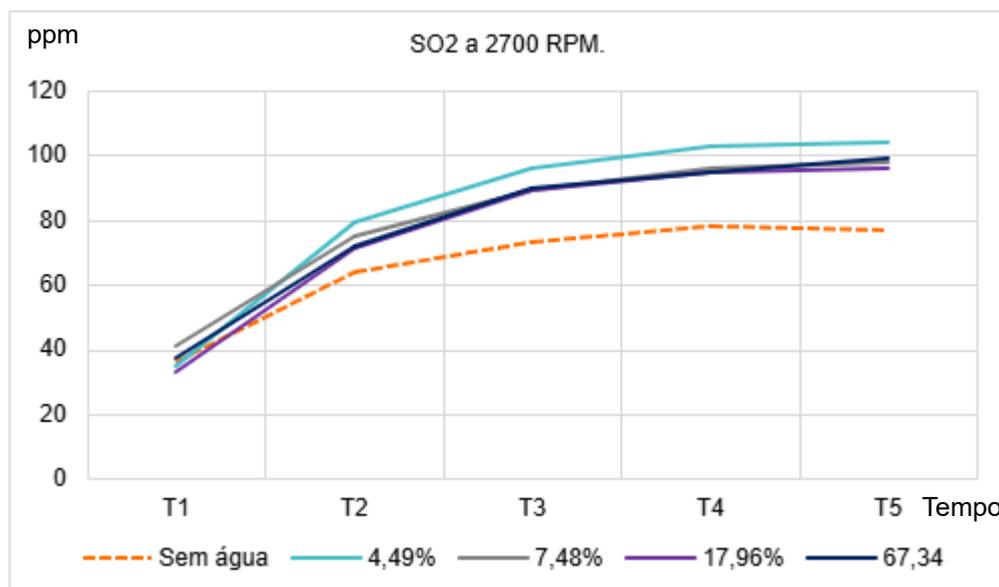
No Gráfico 26 com base nas análises feitas sobre os gráficos de emissão de óxido de enxofre, SO<sub>2</sub>, percebe-se uma redução significativa das emissões a 1800 RPM quando a água é injetada. Todos os valores nas diferentes proporções de água tiveram uma diminuição acentuada das emissões de SO<sub>2</sub>, porém, observa-se que a proporção de 47,89% teve a mais elevada redução. Com isso, pode-se dizer que a névoa de água tem um potencial eficaz de redução das emissões de SO<sub>2</sub> a 1800 RPM

pois segundo Mohamed, *et al.* (2024), gases com sua formação baseada em temperaturas, podem ser controlados através do resfriamento no ambiente de sua formação. (Evangelista; Rocha, 2024).

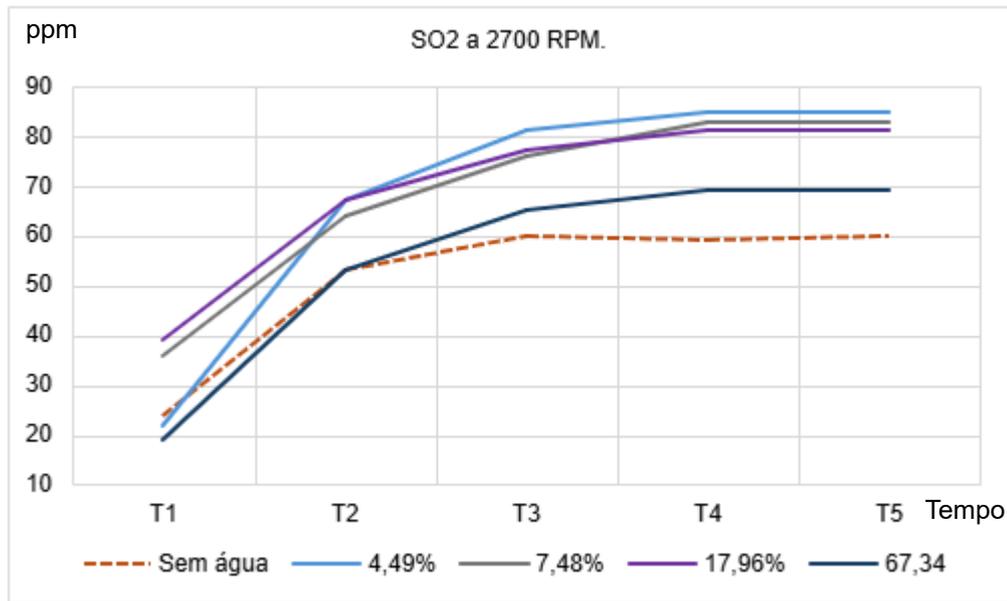
O Gráfico 27 retrata a emissão de óxido de enxofre, SO<sub>2</sub>, percebe-se uma redução significativa das emissões a 1800 RPM quando a água é injetada. Todos os valores nas diferentes proporções de água tiveram uma diminuição acentuada das emissões de SO<sub>2</sub>, porém, observa-se que a proporção de 47,89% com a diminuição de 23 ppm, as porcentagens de 19,95% e 179,55% ficaram na faixa de diminuição de 18 ppm, enquanto 11,97% obteve a diminuição média de 13 ppm. Com isso, pode-se dizer que a injeção com névoa de água tem um potencial eficaz de redução das emissões de SO<sub>2</sub> a 1800 RPM.

O Gráfico 28 apresenta a variação das emissões de SO<sub>2</sub> em um motor diesel operando a 2700 RPM com diesel S-10, sob concentrações de névoa de água de 0% (sem água), 4,49%, 7,48%, 17,96% e 67,34%. Alinhado ao Gráfico 29 ilustra a mesma análise para o diesel S-500, mantendo as condições de rotação e nebulização. A comparação entre os gráficos permite avaliar de forma detalhada o impacto da injeção de água nas emissões de SO<sub>2</sub> para ambos os combustíveis.

Gráfico 28 – Emissões SO<sub>2</sub> a 2700 RPM no diesel S-10.



Fonte: Evangelista e Rocha (2024).

Gráfico 29 – Emissões SO<sub>2</sub> a 2700 RPM no diesel S-500.

Fonte: Autoria própria (2025).

No Gráfico 28 mostra a operação a 2700 RPM nas emissões de SO<sub>2</sub>, apresenta um aumento de todas as ordens das proporções do teste, sendo assim a relação entre temperatura e produção desse gás não tem relação, vários fatores podem ter influenciado nesses resultados do aumento da formação do gás com a rotação elevada, respectivamente. Na análise da formação desse gás e trazido por Frota (2019), a adição de mais oxigênio o gás obteve maior produção dada sua natureza de possuir duas moléculas de oxigênio, além disso, a temperatura da câmara de combustão no momento do experimento podem ter relação direta com esse resultado.

Já o Gráfico 29 apresenta as emissões de dióxido de enxofre (SO<sub>2</sub>), em partes por milhão (ppm), em função do tempo (T1 a T5) para diferentes proporções da névoa de água em um motor operando a 2700 RPM. A curva "Sem água" (linha tracejada laranja) apresenta as menores emissões ao longo de todo o período de observação, estabilizando-se em aproximadamente 60 ppm a partir de T3. Em contrapartida, as emissões aumentam com a aplicação de injeção com névoa de água, sendo mais evidentes em proporções, como 4,49%, que resultaram nas maiores emissões, estabilizando-se em cerca de 85 ppm em T5. Concluindo assim que o SO<sub>2</sub> em alta rotação não surtiu efeito, como ainda elevou a produção da substância gasosa.

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A implementação do sistema e funcionamento do experimento foram efetivos visto que a névoa de água foi introduzida na câmara de combustão e os resultados indicam a ocorrência de mitigação de gases associados a alta temperatura. Esses dados reforçam a hipótese da relação de resfriamento da câmara de combustão com a formação de gases.

O estudo sugere que as características mais benéficas da pesquisa ocorreram para o  $\text{NO}_x$  em que todas as taxas da névoa de água reduziram as emissões, com destaque para a porcentagem de 179,55% para 1800 RPM e para 67,34% para 2700 RPM, sendo obtidos em ambas as rotações e para o diesel S-10 e S-500.

No que se refere ao  $\text{CO}_2$ , observou-se melhor desempenho com o diesel S-10. Em relação ao CO, a taxa de redução foi mais eficaz a 1800 rpm, com 19,95% para o diesel S-10 e 47,89% para o diesel S-500. Contudo, a 2700 rpm, nenhuma proporção foi eficiente devido à relação desse gás com a riqueza da mistura. Quanto ao NO, todas as proporções e rotações demonstraram reduções significativas com o diesel S-10. Já para o diesel S-500, o melhor desempenho foi registrado a 2700 rpm, com uma redução de 67,34%, sendo este o maior valor obtido entre os dois combustíveis e rotações avaliados. Em relação ao  $\text{SO}_2$ , os resultados de mitigação ocorreram somente a 1800 RPM em todas as porcentagens trazendo a diminuição, mas significativa na proporção de 47,89%, em ambos os Diesel S-10 e S-500. Já para o  $\text{NO}_2$  ocorreu característica semelhante, ocorrendo a mitigação em ambos os diesel a 1800 RPM, com destaque as maiores proporções de água.

A importância que o trabalho traz para a área ambiental, e a avaliação do método como proposta potencial para futuras melhorias sustentáveis em motores, já que a mitigação dos gases ocorreu no experimento, e isso pode ajudar em cumprimentos de metas governamental contra o aquecimento global.

Destaca-se que neste estudo não foram considerados os efeitos de oxidação que a água pode causar ao motor. Além disso, não foi realizada uma avaliação do desempenho do motor para determinar se a água interfere em algum aspecto da mecânica.

Recomenda-se para trabalhos futuros o desenvolvimento de outros estudos, com o intuito de avaliar o progresso nos detalhes da técnica de névoa de água,

identificar possíveis implicações e viabilizar a aplicação nos motores as áreas de interesse para avanço da pesquisa estão elencadas abaixo:

- Estudo da potência do motor em exposição a diferentes percentuais de névoa de água;
- Estudo de possíveis avarias que a técnica de névoa de água pode gerar no interior do motor;
- Testes do motor nos veículos para avaliar a simulação real de mitigação de gases no trânsito

## REFERÊNCIAS

ANDRADE, M. D. F. *et al.* Air Pollution and Health-A Science-Policy Initiative. **Annals of Global Health**, v. 85, n. 1, 2019. DOI: <http://doi.org/10.5334/aogh.2656>.

Disponível em: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC6923774/pdf/agh-85-1-2656.pdf>. Acesso em: 30 dez. 2024.

AMARAL, Lucimar Venâncio; FERREIRA, André Guimarães. **Combustíveis, combustão e motores de combustão interna: Uma revisão sistêmica**. 1 ed. Belo Horizonte: Editora Poisson, 2024. 58 p.

ANENBERG, Susan C. *et al.* Long-term trends in urban NO<sub>2</sub> concentrations and associated paediatric asthma incidence: estimates from global datasets. **The Lancet Planetary Health**, v. 6, n. 1, p. e49-e58, 2022. Disponível em:

<https://www.thelancet.com/journals/lanplh/article/PIIS2542-5196%2821%2900255-2/fulltext?gsid=b03a2730-9886-4a41-bc24-56d530c61ac5>. Acesso em: 23 dez. 2024.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 6023:**

Informação e documentação - Referências - Elaboração. Rio de Janeiro, 2018. 74 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 6028:**

Informação e documentação - Resumo - Apresentação. 2 ed. Rio de Janeiro, 2021. 3 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 10520:**

Informação e documentação – Citações em documentos - Apresentação. Rio de Janeiro, 2023. 23 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 14724:**

Informação e documentação - Trabalhos acadêmicos - Apresentação. 3 ed. Rio de Janeiro, 2011. 15 p.

BAÊTA, J. G. C.; SILVA, T. R. V.; NETTO, N. A. D.; MALAQUIAS, A. C. T.; RODRIGUES FILHO, F. A.; PONTOPPIDAN, M. Full spark authority in a highly boosted ethanol DISI prototype engine. **Applied Thermal Engineering**, v. 139, p. 35–46, 2018. Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1359431118309499>. Acesso em: 20 dez. 2024.

BORETTI, A.; SCALZO, J. Influence of water injection on performance and emissions of a direct injection jet ignition engine. **Journal of Environmental Science and Engineering Technology**, v. 3, n. 1, p. 29–35, 2015. Disponível em:

<https://savvysciencepublisher.com/index.php/jeset/article/view/360/337>. Acesso em: 24 out. 2024.

BORSARI, Vanderlei; BALES, Marcelo Pereira. Emissões veiculares e mudanças climáticas: o controle da emissão de gases de efeito estufa para veículos leves.

**Revista Ambiente**, v. 1, 2022. Disponível em:

<https://revista.cetesb.sp.gov.br/revista/article/view/183>. Acesso em: 2 jan. 2025.

BOSCH, Robert. **Manual de tecnologia automotiva**. 25 ed. São Paulo: Editora Blucher, 2005.

BRANCO, J. E. H.; BARTHOLOMEU, D. B.; ALVES JUNIOR, P. N.; CAIXETA FILHO, J. V. Evaluation of the economic and environmental impacts from the addition of new railways to the brazilian's transportation network: an application of a network equilibrium model. **Transport Policy**, [S.L.], v. 124, p. 61-69, ago. 2022. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.tranpol.2020.03.011>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0967070X20300263>. Acesso em: 2 jan. 2025.

BRASIL. Decreto nº 9.073, de 5 de junho de 2017. Promulga o Acordo de Paris, adotado em Paris em 12 de dezembro de 2015. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, 6 jun. 2017. Disponível em: [https://www.gov.br/mcti/pt-br/acompanhe-o-mcti/sirene/publicacoes/acordo-de-paris-e-ndc/arquivos/pdf/acordo\\_paris.pdf](https://www.gov.br/mcti/pt-br/acompanhe-o-mcti/sirene/publicacoes/acordo-de-paris-e-ndc/arquivos/pdf/acordo_paris.pdf). Acesso em: 10 out. 2024.

BRASIL. **Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis (Ibama)**. Programa de controle de emissões veiculares (Proconve). Disponível em: <https://www.gov.br/ibama/pt-br/assuntos/emissoes-e-residuos/emissoes/programa-de-controle-de-emissoes-veiculares-proconve>. Acesso em: 11 out. 2024.

BRASIL. Lei nº 15.042, de 9 de janeiro de 2024. Altera a Lei nº 11.105, de 24 de março de 2005, **que dispõe sobre o regulamento da energia nuclear no Brasil**. Disponível em: [https://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_ato2023-2026/2024/lei/L15042.htm](https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2023-2026/2024/lei/L15042.htm). Acesso em: 10 out. 2024.

CORCETTI, Liniker Lima de Araújo. **SUSTENTABILIDADE AUTOMOBILÍSTICA: comparação entre sistemas de acionamentos dos automóveis atuais utilizando o método AHP**. 2019. Dissertação de Mestrado. Instituto Politecnico do Porto (Portugal). Disponível em: <https://www.proquest.com/openview/b19e76bac2e20e0b3162f7fede4ca0c8/1?pq-origsite=gscholar&cbl=2026366&diss=y>. Acesso em: 10 ago. 2024.

DA ROCHA, Deborah Domingos. **Estudo da injeção de água e alteração da razão volumétrica de compressão para mitigação da detonação e melhoria do desempenho de um motor de combustão interna**. 2018. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Minas Gerais. Disponível em: <https://repositorio.ufmg.br/handle/1843/BUOS-B8WG8G>. Acesso em: 11 ago. 2024.

DE SOUZA, Maria Clara R. *et al.* **A influência dos compostos orgânicos voláteis nas mudanças climáticas: uma breve revisão**. 2023. Disponível em: <https://s3.saeast-1.amazonaws.com/static/sites.s bq.org.br/rvq.s bq.org.br/pdf/v15n2a04.pdf>. Acesso em: 13 ago. 2024.

DRYER, F. L. Water addition to practical combustion systems—concepts and applications. *In: Symposium (international) on combustion*. Elsevier, 1977. p. 279-295. Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0082078477803329>. Acesso em: 20 ago. 2024.

EPE, Empresa de Pesquisa Energética. **Balço Energético Nacional 2023**: Ano Base 2022/Empresa de Pesquisa Energética. EPE: Rio de Janeiro, Brazil, 2023. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-748/topico-687/BEN2023.pdf>. Acesso em: 16 ago. 2024.

EVANGELISTA, Mateus Santos; ROCHA, Márcio Andrade. Análise teórico-experimental da injeção de água em motores do ciclo Diesel para pesquisa de emissões, utilizando o Diesel S-10. *In*: CONGRESSO IBEROAMERICANO DE INGENIERÍA MECÁNICA –CIBIM, XVI, 2024, Concepción. **Anais [...]**. Concepción: CIBIM, 2024.

EVANGELISTA, Mateus Santos; VIEIRA, Emanuel Santos; ROCHA, Márcio Andrade. Estudo da injeção de água como agente de resfriamento em câmaras de combustão automotiva. *In*: CONGRESSO NACIONAL DE ENGENHARIA MECÂNICA – CONEM, XII, 2024, Natal. **Anais [...]**. Natal: CONEM, 2024. ISSN 2966-3121. DOI: [doi://10.26678/ABCM.CONEM2024.CON24-0732](https://doi.org/10.26678/ABCM.CONEM2024.CON24-0732).

FROTA, Evanise Batista; VASCONCELOS, Nadja Maria Sales de. **Química Ambiental**. 2. ed. Fortaleza-CE: EdUECE, 2019. 214 p.

FARAG, Mohamed *et al.* Effects of intake and exhaust manifold water injection on combustion and emission characteristics of a DI diesel engine. **Journal of Thermal Science and Technology**, v. 12, n. 1, p. JTST0014-JTST0014, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1299/jtst.2017jtst0014>. Disponível em: [https://www.jstage.jst.go.jp/article/jtst/12/1/12\\_2017jtst0014/\\_article/-char/ja/](https://www.jstage.jst.go.jp/article/jtst/12/1/12_2017jtst0014/_article/-char/ja/). Acesso em: 10 jul. 2024.

GIL, Antonio Carlos. **Métodos e técnicas de pesquisa social**. 6. ed. Editora Atlas SA, 2008.

GUAN, Wei *et al.* Exploring the high load potential of diesel–methanol dual-fuel operation with Miller cycle, exhaust gas recirculation, and intake air cooling on a heavy-duty diesel engine. **International Journal of Engine Research**, v. 22, n. 7, p. 2318-2336, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1177/1468087420926775>. Disponível em: <https://journals.sagepub.com/doi/abs/10.1177/1468087420926775>. Acesso em: 24 dez. 2024.

HALL, Carrie; KASSA, Mateos. Advances in combustion control for natural gas–diesel dual fuel compression ignition engines in automotive applications: a review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 148, p. 111291, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111291>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1364032121005785>. Acesso em: 24 ago. 2024.

HEYWOOD, John B. **Internal combustion engine fundamentals**. New York: McGraw-Hill, 1988. 930 p.

HOPKINSON, Bertram. A new method of cooling gas-engines. **Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers**, v. 85, n. 1, p. 679–715, 1913. DOI: [https://doi.org/10.1243/PIME\\_PROC\\_1913\\_085\\_008\\_02](https://doi.org/10.1243/PIME_PROC_1913_085_008_02). Disponível em: [https://journals.sagepub.com/doi/abs/10.1243/PIME\\_PROC\\_1913\\_085\\_008\\_02](https://journals.sagepub.com/doi/abs/10.1243/PIME_PROC_1913_085_008_02). Acesso em: 15 jul. 2024.

IANNIELLO, Roberto *et al.* A study on supercritical water injection as waste heat recovery system in internal combustion engines. **Applied Thermal Engineering**, v. 248, p. 123084, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2024.123084>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S135943112400752X>. Acesso em: 19 jul. 2024.

IBAMA – Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis. **Instrução Normativa nº 21, de 10 de dezembro de 2021**. Brasília, 2018. Disponível em: <https://www.gov.br/ibama/pt-br/assuntos/noticias/2021/ibama-apresenta-avancos-no-controle-de-poluentes-por-veiculos>. Acesso em: 8 dez. 2024.

INTERNATIONAL AGENCY FOR RESEARCH ON CANCER (IARC). Press Release N.º 221. IARC: **Outdoor air pollution a leading environmental cause of cancer deaths**. IARC-WHO, 2013. Disponível em: [https://www.iarc.who.int/wpcontent/uploads/2018/07/pr221\\_E.pdf](https://www.iarc.who.int/wpcontent/uploads/2018/07/pr221_E.pdf). Acesso em: 2 jan. 2025.

JANJUA, Asad Asghar *et al.* Exploring the efficacy of port water injection on air–fuel ratios and NO<sub>x</sub> emissions in diesel engines: an experimental study. **Engineering Proceedings**, v. 75, n. 1, p. 38, 2024. DOI: <https://doi.org/10.3390/engproc2024075038>. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2673-4591/75/1/38>. Acesso em: 18 jul. 2024.

KETTNER, M. *et al.* Investigating the influence of water injection on the emissions of a diesel engine. **Journal of Mechanical Engineering and Sciences**, v. 10, n. 1, p. 1863–1881, 2016. DOI: 10.15282/jmes.10.1.2016.11.0179. Disponível em: <https://journal.ump.edu.my/jmes/article/view/7820>. Acesso em: 28 jul. 2024.

LAKATOS, Eva Maria; MARCONI, Marina de Andrade. **Fundamentos de metodologia científica**. 5. ed. São Paulo: Atlas, 2003. 311 p.

LIU, Fengshan; CONSALVI, Jean-Louis; FUENTES, Andrés. Effects of water vapor addition to the air stream on soot formation and flame properties in a laminar coflow ethylene/air diffusion flame. **Combustion and Flame**, v. 161, n. 7, p. 1724–1734, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2013.12.017>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0010218013004653>. Acesso em: 13 nov. 2024.

LIU, Xinyu *et al.* Split injection strategies for a high-pressure hydrogen direct injection in a small-bore dual-fuel diesel engine. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 57, p. 904–917, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2024.01.065>. Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360319924000685>. Acesso em: 9 nov. 2024.

Manual Buffalo Diesel: motores e acoplados. Disponível em: <https://www.buffalo.com.br/uploads/Produtos/manuais/01dfe01b064afd59614d2f9ca3b37b74.pdf>. Acesso em: 12 jun. 2024.

MARTINS, Jorge. **Motores de combustão interna**. 4. ed. revista e aumentada. [S. l.: s. n.], 2006. 437 p.

MAZLAN, Nurul Aiyshah *et al.* Effects of different water percentages in non-surfactant emulsion fuel on performance and exhaust emissions of a light-duty truck. **Journal of Cleaner Production**, v. 179, p. 559–566, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.01.143>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0959652618301653>. Acesso em: 11 nov. 2024.

MILCHERT, Artur Bernardo; MELO, Milena Petters. A emergência global climática e o green new deal: reflexões acerca da justiça climática e das disposições do Acordo de Paris. **Revista de Direito Econômico e Socioambiental**, Curitiba, v. 15, n. 1, p. e254, 2024. DOI: 10.7213/revdireconsoc.v15i1.29909. Disponível em: <https://periodicos.pucpr.br/direitoeconomico/article/view/29909>. Acesso em: 2 jan. 2025.

MINGRUI, Wei *et al.* Water injection for higher engine performance and lower emissions. **Journal of the Energy Institute**, v. 90, n. 2, p. 285–299, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.joei.2015.12.003>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1743967115300611>. Acesso em: 4 nov. 2024.

MOHAMED, Mohamed *et al.* Exploring the benefits of hydrogen-water injection technology in internal combustion engines: a rigorous experimental study. **International Journal of Engine Research**, [S. l.], p. 14680874241288624, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1177/14680874241288624>. Disponível em: <https://journals.sagepub.com/doi/full/10.1177/14680874241288624>. Acesso em: 21 nov. 2024.

MRU Instruments. Disponível em: <http://mru.instruments.com>. Acesso em: 3 jul. 2024.

MUSARRA, Raíssa Moreira Lima Mendes; CARDOZO, Renata Gonçalves. Mitigação de emissões dos gases causadores do efeito estufa e o Shale Gas. **Contribuciones a las Ciencias Sociales**, v. 16, n. 7, p. 5731–5756, 2023. DOI: <https://doi.org/10.55905/revconv.16n.7-032>. Disponível em: <https://ojs.revistacontribuciones.com/ojs/index.php/clcs/article/view/1110>. Acesso em: 6 nov. 2024.

NETTO, Nilton Antonio Diniz. **Estudo experimental de tecnologias que visam a maximização da eficiência de conversão de combustível em um motor monocilindro de pesquisa**. 2018. 193 p. (Dissertação). Departamento de

Engenharia Mecânica, UFMG, Belo Horizonte, MG, Brasil. Disponível em: [https://repositorio.ufmg.br/bitstream/1843/BUBD-AYSMVD/1/mestrado\\_nilton\\_final\\_revisado.pdf](https://repositorio.ufmg.br/bitstream/1843/BUBD-AYSMVD/1/mestrado_nilton_final_revisado.pdf). Acesso em: 16 nov. 2024.

NOVAES, Thiago Luis Costa Cavalcanti. **Modelo zero dimensional e estudo paramétrico de um motor ciclo Diesel operando com misturas diesel/biodiesel/vapor de água**. 2018. Tese Pós Graduação - Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2018. Disponível em: <https://repositorio.ufpe.br/bitstream/123456789/32855/1/TESE%20Thiago%20Luis%20Costa%20Cavalcanti%20Novaes.pdf>. Acesso em: 14 jul. 2024.

NUNES, Ivanil. **As ferrovias no contexto da formação econômica do Brasil no século XIX**. [S. l.: s. n.], 2024. DOI: <http://dx.doi.org/10.18616/transp02>. Disponível em: <http://repositorio.unesc.net/handle/1/11317>. Acesso em: 13 nov. 2024.

OPAS – ORGANIZAÇÃO PAN-AMERICANA DA SAÚDE. **Novos dados da OMS revelam que bilhões de pessoas ainda respiram ar insalubre**. Organização Pan-Americana da Saúde, 4 abr. 2022. Disponível em: [https://www.paho.org/pt/noticias/4-4-2022-novos-dados-da-oms-revelam-que-bilhoes-pessoas-ainda-respiram-ar-insalubre?utm\\_source=chatgpt.com](https://www.paho.org/pt/noticias/4-4-2022-novos-dados-da-oms-revelam-que-bilhoes-pessoas-ainda-respiram-ar-insalubre?utm_source=chatgpt.com). Acesso em: 5 jan. 2025.

PIAI, Kamila de Almeida. **Avaliação de risco à saúde humana associada a exposição inalatória de arsênio, níquel e chumbo no MP10 de fonte veicular, na cidade de São Paulo, SP**. 2022. Dissertação (Mestrado em Saúde Pública) - Faculdade de Saúde Pública, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2022. DOI: 10.11606/D.6.2022.tde-07062022-144835. Disponível em: <https://proceedings.science/abrascao-2022/trabalhos/avaliacao-de-risco-a-saude-humana-associada-a-exposicao-inalatoria-de-arsenio-ni?lang=pt-br>. Acesso em: 17 nov. 2024.

POTENZA, Renata Fragoso *et al.* Análise das emissões brasileiras de gases de efeito estufa e suas implicações para as metas climáticas do Brasil 1970–2020. **Sistema de Estimativas de Emissões e Remoções de Gases de Efeito Estufa (SEEG)**, v. 54, 2021. Disponível em: <https://energiaeambiente.org.br/wp-content/uploads/2023/04/SEEG-10-anos-v5.pdf>. Acesso em: 25 jul. 2024.

REICHERT, Jonatas. TABAGISMO PASSIVO–IMPLICAÇÕES GENÉTICAS EM GERAÇÕES. **ASSOCIAÇÃO MÉDICA DO PARANÁ**, v. 75, n. 1, p. 103, 2017. Disponível em: [https://dracamilesilvelloperreira.com.br/wp-content/uploads/2021/09/revista-medica-do-parana-volume-75-n-1-janeiro-junho-2017\\_1528897342.pdf#page=103](https://dracamilesilvelloperreira.com.br/wp-content/uploads/2021/09/revista-medica-do-parana-volume-75-n-1-janeiro-junho-2017_1528897342.pdf#page=103). Acesso em: 10 nov. 2024.

RESENDE, Ricardo Manuel Oliveira. **Desenvolvimento e programação de um sistema de injeção e ignição de um motor de combustão interna**. 2019. Dissertação (Mestrado) – Universidade do Minho, Portugal. Disponível em: <https://www.proquest.com/openview/30038c6d96ca13c943b33a99f810644b/1?pq-origsite=gscholar&cbl=2026366&diss=y>. Acesso em: 10 dez. 2024.

RITCHIE, Hannah; ROSADO, Pablo; ROSER, Max. Breakdown of carbon dioxide, methane and nitrous oxide emissions by sector. **Our World in Data**, 2020.

Disponível em: <https://ourworldindata.org/emissions-by-sector?ref=boothby.com.au>. Acesso em: 11 dez. 2024.

ROCHA, Márcio Andrade *et al.* **Estudo do avanço de injeção de biodiesel em um motor dual de ignição por compressão utilizando gás natural e biodiesel**. 2020. Dissertação (Doutorado) – Universidade Federal da Paraíba, João pessoa. Disponível em: <https://repositorio.ufpb.br/jspui/handle/123456789/20944>. Acesso em: 10 dez. 2024.

ROSSI, Edoardo *et al.* Water Injection in Spark-Ignition Engine II (FVV Project Nr. 1367). *In: International Stuttgart Symposium*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2023. p. 293-311. DOI: [https://doi.org/10.1007/978-3-658-42048-2\\_20](https://doi.org/10.1007/978-3-658-42048-2_20). Disponível em: [https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-658-42048-2\\_20#citeas](https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-658-42048-2_20#citeas). Acesso em: 14 dez. 2024.

ROBERTS, Leighton *et al.* Modeling the impact of early exhaust valve opening on exhaust aftertreatment thermal management and efficiency for compression ignition engines. **International Journal of Engine Research**, v. 16, n. 6, p. 773-794, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1177/1468087414551616>. Disponível em: <https://journals.sagepub.com/doi/abs/10.1177/1468087414551616>. Acesso em: 3 dez. 2024.

RUEDA-VÁZQUEZ, Juan Manuel *et al.* Experimental analysis of the effect of hydrogen as the main fuel on the performance and emissions of a modified compression ignition engine with water injection and compression ratio reduction. **Applied Thermal Engineering**, v. 238, p. 121933, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2023.121933>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1359431123019622>. Acesso em: 3 dez. 2024.

SHI, Shuangshuang *et al.* Performance optimizations with single-, bi-, tri-, and quadru-objective for irreversible Atkinson cycle with nonlinear variation of working fluid's specific heat. **Energies**, v. 14, n. 14, p. 4175, 2021. DOI: <https://doi.org/10.3390/en14144175>. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1996-1073/14/14/4175>. Acesso em: 9 dez. 2024.

SUN, X.; NING, J.; LIANG, X.; JING, G.; CHEN, Y.; CHEN, G. Effect of direct water injection on combustion and emissions characteristics of marine diesel engines. **Fuel**, v. 309, p. 122213, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2021.122213>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0016236121020883>. Acesso em: 14 dez. 2024.

SZŐLLŐSI, Dániel; KISS, Péter. Effects of water injection in diesel engine emission treatment system—a review in the light of EURO 7. **Energies**, v. 17, n. 20, 2024. DOI: [10.3390/en17205107](https://doi.org/10.3390/en17205107). Disponível em: [https://openurl.ebsco.com/EPDB%3Agcd%3A9%3A25447449/detailv2?sid=ebsco%3Aplink%3Ascholar&id=ebsco%3Agcd%3A180557846&crl=c&link\\_origin=scholar.google.com.br](https://openurl.ebsco.com/EPDB%3Agcd%3A9%3A25447449/detailv2?sid=ebsco%3Aplink%3Ascholar&id=ebsco%3Agcd%3A180557846&crl=c&link_origin=scholar.google.com.br). Acesso em: 18 nov. 2024.

TAUZIA, Xavier; MAIBOOM, Alain; SHAH, Samiur Rahman. Experimental study of inlet manifold water injection on combustion and emissions of an automotive direct injection diesel engine. **Energy**, v. 35, n. 9, p. 3628–3639, 2010. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2010.05.007>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0360544210002707>. Acesso em: 29 jul. 2024.

TEIXEIRA, E. C.; FELTES, S.; SANTANA, E. R. R. Estudo das emissões de fontes móveis na região metropolitana de Porto Alegre, Rio Grande do Sul. **Química Nova**, v. 31, n. 2, p. 244-248, 2008. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-40422008000200010>. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/qn/a/4YhvrWNcLgBjGGYRPzjYrfK/?format=html>. Acesso em: 3 dez. 2024.

TELLI, G. D. *et al.* **An experimental study of performance, combustion and emissions characteristics of an ethanol HCCI engine using water injection.** Applied Thermal Engineering, v. 204, p. 118003, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2021.118003>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S135943112101423X>. Acesso em: 10 nov. 2024.

TILLMANN, Carlos Antonio da Costa. **Motores de combustão interna e seus sistemas.** Pelotas: Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia, Rede e-Tec Brasil, 2013. 165 p.

VERGNHANINI FILHO, Renato. Emissão de óxidos de enxofre (SO<sub>x</sub>) na combustão industrial. **Revista IPT: Tecnologia e Inovação**, v. 4, n. 14, 2020. Disponível em: <https://revista.ipt.br/index.php/revistaIPT/article/view/119>. Acesso em: 23 set. 2024.

WANG, Jinfei *et al.* Numerical investigation of water injection quantity and water injection timing on the thermodynamics, combustion and emissions in a hydrogen enriched lean-burn natural gas SI engine. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 45, n. 35, p. 17935–17952, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.04.146>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0360319920315494>. Acesso em: 9 set. 2024.

WELSCHER, Sebastian *et al.* A comprehensive evaluation of water injection in the diesel engine. **International Journal of Engine Research**, v. 24, n. 1, p. 99–112, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1177/14680874211044297>. Disponível em: <https://journals.sagepub.com/doi/full/10.1177/14680874211044297>. Acesso em: 19 dez. 2024.

WILLETTS, Elizabeth *et al.* **Review of IPCC Evidence.** 2022. Disponível em: <https://cdn.who.int/media/docs/default-source/climate-change/who-review-of-ipcc-evidence-2022-adv-version.pdf>. Acesso em: 16 dez. 2024.

WILSON, J. Parley. **Effects of water injection and increased compression ratio in a gasoline spark ignition engine.** 2011. Tese (Doutorado). University of Idaho. Disponível em:

[http://www.tuks.nl/pdf/Reference\\_Material/ICE\\_and\\_Water\\_Injection/Wilson%20-%20Effects%20of%20Water%20Injection%20and%20Increased%20Compression%20Ratio%20in%20a%20Gasoline%20Spark%20Ignition%20Engine%20-%202011.pdf](http://www.tuks.nl/pdf/Reference_Material/ICE_and_Water_Injection/Wilson%20-%20Effects%20of%20Water%20Injection%20and%20Increased%20Compression%20Ratio%20in%20a%20Gasoline%20Spark%20Ignition%20Engine%20-%202011.pdf). Acesso em: 6 set. 2024.

WORLD HEALTH ORGANIZATION (WHO). **Air quality guidelines for particulate matter, ozone, nitrogen dioxide and sulfur dioxide**: Global update 2005. p. 1– 21, 2005.

ZHU, Sipeng *et al.* A review of water injection applied on the internal combustion engine. **Energy Conversion and Management**, v. 184, p. 139–158, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2019.01.042>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0196890419300883>. Acesso em: 10 set. 2024.

## ANEXO A — Especificações do analisador de gases.

Figura 9 – Dados técnicos do OPTIMA 7.

<b>Faixas de medição</b>	
O <sub>2</sub> - Oxigênio	0 ... 21,0%
CO <sub>2</sub> - Dióxido de carbono	0 ... 100%
CH <sub>4</sub> - Metano	0 ... 100%
H <sub>2</sub> S - Sulfeto de hidrogênio	0 ..... 2.000 ppm * sobrecarga 5.000 ppm
CO - Monóxido de carbono	0 a 4.000 ppm * sobrecarregam 10.000 ppm (opcional)
NO - Óxido nítrico	0 a 1.000 ppm * sobrecarga 0 a 5.000 ppm (opcional)
NO <sub>2</sub> - Dióxido de nitrogênio	0 ..... 200 ppm * sobrecarregam 1.000 ppm (opcional)
Dif. pressão	± 120 inH <sub>2</sub> O
<b>Dimensões e outros dados</b>	
Interface PC	USB e Bluetooth
Condicionamento de gás de amostra	Separador de condensado grande com filtro de PTFE
Habitação	Reforçado com fibra de vidro
Funcionamento a pilhas / tempo de funcionamento	6 a 8 h de operação contínua
Peso	2,0 libras.

Fonte: [mru.instruments.com](http://mru.instruments.com)