

# Análise Teórico-Experimental da Injeção de Água em Motores do Ciclo Diesel para Pesquisa de Emissões.

Mateus Evangelista Dos Santos<sup>1</sup>, Marcio Andrade Rocha<sup>2</sup>

Departamento de ensino, Instituto Federal da Bahia-Campus Jequié, Brasil. mateusevang20@gmail.com

Departamento de ensino, Instituto Federal da Bahia-Campus Jequié, Brasil. marcioandrade@ifba.edu.br

## Resumo

Os veículos sempre causaram um grande impacto na sociedade, sendo um elemento de mudança. São alvo de estudos intensivos visando melhorar o desempenho e sustentabilidade. Neste estudo, é analisado a introdução de névoa de água na câmara de combustão de motores a diesel, para reduzir emissões, por meio de um experimento acadêmico. O estudo engloba a coleta e análise de informações antes e durante a entrada de névoa de água, com foco na diminuição de NOx e outras substâncias nocivas. No intuito de diminuir a quantidade de gases prejudiciais ao meio ambiente e à saúde humana, podendo estimular estudos e avanços futuros no campo, auxiliando no desenvolvimento constante dos motores do ciclo Diesel. A pesquisa ocorreu 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, o combustível de análise foi o diesel S-10.

**Palavras-chave:** emissões, experimento, água, motores, tecnologia.

## Abstract

Vehicles have always had a great impact on society, being an element of change. They are the subject of intensive studies aimed at improving performance and sustainability. In this study, the introduction of water mist into the combustion chamber of diesel engines to reduce emissions is analyzed through an academic experiment. The study encompasses the collection and analysis of information before and during the entry of water mist, with a focus on reducing NOx and other harmful substances. In order to reduce the amount of gases harmful to the environment and human health, it can stimulate future studies and advances in the field, helping in the constant development of Diesel cycle engines. The research took place at the Thermal Machines Laboratory of the Federal Institute of Bahia, located on the Jequié campus, using a stationary Buffalo 5.0 diesel cycle engine, the analysis fuel was S-10 diesel.

**Keywords:** Emissions, experiment, water, engines.

## 1. Introdução

O pesquisador Rudolfo Christian Karl Diesel no ano de 1892 registrou a patente do motor de combustão interna a óleo combustível, o Motor Diesel. Máquinas que usam combustão interna realizam a transformação da energia térmica provocada pela combustão do combustível em energia mecânica, [1]. Com acentuação com o aumento de fluxo de veículos, para medidas atenuantes dos fenômenos climáticos cada vez mais recorrentes, o motor a combustão tem sido alvo de pesquisas para um melhor desempenho ambiental, alinhando a isso motores utilizando fontes elétricas tem sido proposta cada vez mais comuns por

grandes montadoras, por trazerem planos sustentáveis para indústria automobilística a longo prazo, no entanto, a grande problemática no que se refere aos veículos em circulação que fazem uso do motor a combustão onde se mostra um grande agente poluente e que agrava as emissões de gases de efeito estufa (GEE) e outros gases que afetam a natureza e ao ser humano. Diminuir a quantidade de gases prejudiciais ao meio ambiente e à saúde humana, o que pode estimular estudos e avanços futuros no campo, auxiliando no desenvolvimento constante dos motores do ciclo Diesel. Sendo assim, buscando técnicas para mitigar as emissões de gases nocivos, este estudo visa o uso da água em forma de névoa em motores diesel

para avaliar os possíveis benefícios no controle de emissões, segundo [2] a temperatura nesta região está diretamente relacionada às emissões de poluentes, sendo importante experimentar o uso de técnicas de resfriamento da câmara de combustão para melhorar a redução das emissões dos motores. Assim, Conforme destaca [3], a injeção de água em motores de combustão é amplamente adotada devido à sua eficácia comprovada no controle da batida e na redução das emissões de NOx (óxidos de nitrogênio). O estudo engloba a coleta e análise de informações antes, durante a injeção de névoa de água, com foco na diminuição de emissões, e outras substâncias nocivas. Neste cenário, a pesquisa preencherá as lacunas ao analisar o impacto da adição de água na redução de emissões, promovendo tecnologias automotivas mais ecológicas.

O método de névoa de água se revelar promissor, podendo impulsionar futuras pesquisas e inovações na área, além disso, o sistema experimental simples, econômico e fácil de adaptar, não necessitando de grandes modificações no motor, o experimento foi realizado visando contribuir na divulgar conhecimentos e informações a respeito da aplicação da névoa de água como estratégia na redução de emissões.

O objetivo geral é implantar e analisar a técnica do uso de água em forma de névoa na câmara de combustão, investigando a mitigação das emissões de poluentes. Assim foi estabelecido os objetivos específicos, sendo eles, testar um sistema adaptado para o uso da técnica de injeção de névoa de água, avaliar o desempenho ambiental antes e durante o uso do sistema e compara a mitigação de poluentes em proporções diferentes de água.

## 2. Referencial teórico

### 2.1. Gases poluentes na exaustão do motor

Em 1966, as regulamentações sobre gases de escape começaram nos Estados Unidos e a indústria automobilística começou a investir em sistemas de controle eletrônico. Além disso, a crise do petróleo de 1973 levou o governo dos EUA a promulgar regulamentos que levaram à conservação de combustível. As regras baseiam-se no consumo médio dos veículos produzidos por cada montadora [4]. 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>(dióxido de carbono) no Brasil em 2020, conforme relatado por um novo estudo ambiental do centro observatório do clima, uma parceria do [5]. E a

China é o maior emissor de CO<sub>2</sub> do mundo, com 10,06 bilhões de toneladas métricas em 2018, [6].

Segundo [7]. Os componentes tóxicos são expelidos do motor, toda a composição do gás de escapamento, variam com o status geracional do motor. Assim, são os gases poluentes, NOx(óxidos de nitrogênio), CO(monóxido de carbono) e SO<sub>2</sub>(Dióxido de enxofre).

Óxidos de azoto (NOx): [8], São compostos formados na câmara de combustão a partir da reação de queima de um combustível com o ar atmosférico O NO<sub>2</sub> em contato com a luz forma O<sub>3</sub> (ozônio) um potente oxidante fotoquímico. Podem produzir infecções respiratórias e asma. Outra reação fotoquímica transforma o NO, em ácido nítrico e nitratos, ambos potenciais produtores de chuvas ácidas, podendo resultar na destruição de florestas e poluição de lagoas e rios. Será formada pela alta temperatura dos gases queimados, atrás da frente de chama, por reações entre o azoto e o oxigênio do ar em equilíbrio químico a alta temperatura. Quanto mais quente for a combustão e quanto mais oxigênio houver, uma maior quantidade destes compostos serão formados, [9].

Monóxidos de carbono (CO): É incolor e inodoro, sendo, portanto, difícil de identificar. Doses pequenas e prolongadas podem dar origem a redução das funções cardíacas, problemas vasculares, anemia e evolução lenta de fetos. O CO sobrevive na atmosfera por um mês, sendo gradualmente e lentamente oxidado para CO<sub>2</sub>, a produção do CO é controlada principalmente pela riqueza da mistura, [9].

Além de ser levemente inflamável, produzido pela combustão incompleta de combustíveis, pode levar a morte por asfixia, quando a hemoglobina responsável pelo transporte de oxigênio no corpo se une ao monóxido de carbono, sendo considerada uma “substância” tóxica. [8].

Dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>): O transporte rodoviário tem grande peso na emissão de CO<sub>2</sub>, sendo esse o gás antrópico mais significativo na composição do efeito estufa, [5].

Dióxido de enxofre (SO<sub>2</sub>): Ocorre quando acontece a queima dos combustíveis fósseis, o enxofre presente em sua composição é oxidado, o dióxido de enxofre (SO<sub>2</sub>) e trióxido de enxofre (SO<sub>3</sub>) sendo denominados óxidos de enxofre (SOx).

Os óxidos de enxofre são considerados poluentes primário e secundário. Os secundários são extremamente nocivos ao meio ambiente responsável pela formação da chuva ácida, [10].

### 2.2. Temperatura na câmara de combustão

A combustão é um processo químico no qual o carbono e o hidrogênio de um combustível se

combinam com o oxigênio do ar para formar  $\text{CO}_2$  e  $\text{H}_2\text{O}$  (caso concluído) e  $\text{CO}$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{NO}_x$ ,  $\text{HC}$  e  $\text{H}_2\text{O}$  (caso incompleto) como uma reação. O papel mais importante da combustão é ser uma reação exotérmica que libera energia para aquecer os gases e facilitar o funcionamento do motor, [11]. Resultados obtidos por [2]. Indicam que a formação de  $\text{NO}_x$  demonstra um aumento proporcional à temperatura, especialmente acima de aproximadamente 1800 K, onde essa tendência se intensifica rapidamente. Reduzir as temperaturas máximas revela-se uma estratégia eficaz para mitigar as emissões de  $\text{NO}_x$ , por implicar em menor disponibilidade energética para a quebra da tripla ligação N-N, crucial no estágio inicial da formação de  $\text{NO}_x$ .

De acordo com [12], em pesquisa bibliográfica, a injeção de água tem sido comprovada para reduzir a temperatura interna do cilindro e dos gases de escape, aliviar a detonação da combustão, aprimorar a faseamento da combustão e reduzir as emissões de  $\text{NO}_x$ . Essa tecnologia tem despertado grande interesse. Nos últimos anos, temos trabalhado para melhorar ainda mais a eficiência do combustível e cumprir os regulamentos sobre gases de escape.

[13] em conformidade a [14], expõem que a autoignição promove o aumento da temperatura e da pressão no interior da câmara de combustão. Este aumento descontrolado reduz a potência do motor e aumenta a produção de gases nocivos. O estudo sugerem controlar a temperatura da combustão através do seu resfriamento via spray de água, controle via EGR dos gases de escape e redução dos tempos de abertura das válvulas de admissão e escape.

### 2.3. Injeção de água

A ideia de injeção de água está intimamente relacionado ao desenvolvimento de processos 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, [15], [16].

Para os autores no estudo de [17] observam que estudos recentes demonstram que a injeção de água pode aumentar a potência do motor, otimizar a eficiência energética e reduzir o consumo de combustível, enquanto contribui para a redução de emissões poluentes. [17], indicam que a adição de água pode aumentar a potência do motor, otimizar a eficiência energética e reduzir o consumo de combustível, além de contribuir para a diminuição de

emissões poluentes. [18], complementa essa visão, afirmando que a injeção de água desempenha um papel crucial na redução da temperatura elevada da carga do motor, mitigando a probabilidade de detonação. Além disso, ela elimina a necessidade de grandes volumes de combustível, oferecendo uma alternativa vantajosa ao resfriamento convencional da carga. Os resultados demonstram obtidos por [18], mostra 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 [19], 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 ( $\text{NO}_x$ ,  $\text{CO}$  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, [20]. Utilizando metodologia de referencial teórico, pode afirmar que, a análise da injeção de água na mistura ar-combustível visa diminuir as emissões de gases de efeito estufa (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 à potencial mitigação de detonação e  $\text{NO}_x$  redução, conforme [12].

O autor [21] 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 SI com enriquecimento de hidrogênio em gás natural [22].

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, [23].

#### 2.4. Eficiência térmica e volumétrica com a névoa de água.

Hoje, apesar do advento dos motores, a gasolina e o diesel continuam sendo os principais combustíveis para a propulsão de carros e veículos pesados. Portanto, diversas estratégias para otimizar a operação do motor são utilizadas como ferramentas para maximizar a eficiência global e reduzir as emissões de poluentes, [24].

Reforçado por [25], a implementação da injeção de água pode resultar em uma economia de combustível situada entre 3% e 8%. [16] mostram 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.

[26]. A técnica de injeção de água não foi totalmente desenvolvida para motores HCCI, logo, os resultados mostraram que a injeção de água controlou o faseamento da combustão e a taxa de liberação de calor, triplicando a carga operacional máxima. A injeção de água teve um papel fundamental no prolongamento da operação do HCCI em cargas mais elevadas, funcionando como um mecanismo de controle do faseamento da combustão.

[24]. 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. Nesse caso, os testes do motor foram feitos com combustíveis E27, em dois sistemas de injeção, PFI e DI, com uso de razão volumétrica de compressão de 15,0:1 e injeção indireta de água a 800000 pascal de IMEP. 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.

### 3. Metodologia

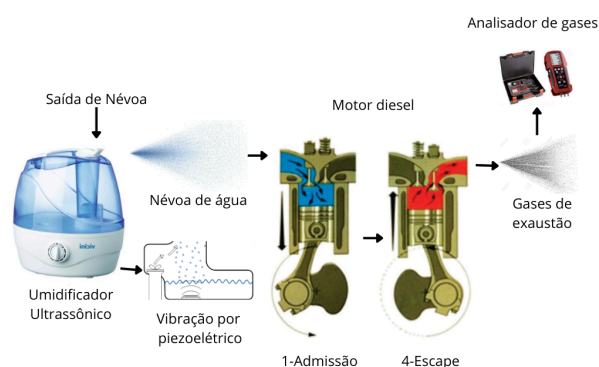
#### 3.1. Métodos e abordagem

O estudo é classificado experimental. Conforme destacado por [27], 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.

Abordagem adotada será quantitativa para obter uma compreensão abrangente dos fenômenos em estudo através da instrumentação, análise e leitura de dados. Literatura relevante sobre este tema foi selecionada usando o Google acadêmico, organizada em subtópicos com estudos iniciais da temática partir de 1913 e com estudos atuais a faixa de análise de artigos recentes entre 2018 a 2024. O ambiente de pesquisa será o Laboratório de Máquinas Térmicas do Instituto Federal da Bahia, localizado no campus de Jequié, no estado da Bahia, o acesso foi por meio de permissão de servidor previamente solicitada.

#### 3.2. Desenvolvimento do experimento

O principal objetivo da pulverização de água na forma de névoa é resfriar a câmara de combustão e reduzir as emissões. A adaptação proposta consiste na integração indireta de sistemas de injeção de água em motores diesel, conforme Fig.1, apresentada a seguir:



**Figura 1.** Funcionamento do sistema de névoa de água proposto. Fonte: Adaptado pelo autor 2024.

O desenvolvimento do sistema contará com seguintes componentes e passos: o umidificador ultrassônico gerará a névoa que será introduzida no duto de admissão, aproveitando a aspiração natural do motor, por meio de ajustes e adaptações de tubulações. Isso incluirá a verificação e a correção de vazamentos, o ideal e um sistema vedado. Em seguida, será feita a

configuração do sistema de injeção da névoa de água, considerando inicialmente a determinação da quantidade a ser injetada, este processo permitirá a calibração precisa do sistema. A sonda será acoplada no escapamento do motor, onde captará e analisa os gases de escapamento por meio de aparatos experimentais e suas mensurações serão salvas para cada condição.

### 3.3. Determinar rotação por minuto (RPM) do motor diesel

Para obter resultados variados e avaliar o desempenho em diferentes condições, foram escolhidas três rotações distintas, 2/4 da rotação máxima: 1800 RPM, 3/4 da rotação máxima: 2700 RPM, 4/4 da rotação máxima: 3600 RPM. Utilizou-se um método geométrico para medir as rotações do motor. A configuração foi feita com base em marcas de referência na haste de metal.

### 3.4. Determinar consumo de água do umidificador ultrassônica.

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.

**Tabela 1.** 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: elaboração própria.

### 3.5. Coleta interpretação de dados

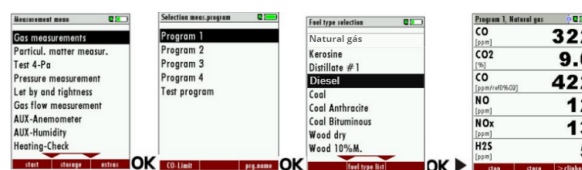
A análise das emissões será conduzida considerando os parâmetros buscados, sendo que, para a análise de NOx e outros gases de exaustão foram diretamente coletados no escapamento do motor em funcionamento no período de 10 minutos para aquecimento e simular uma situação real de operação, foram feitas 5 análises seguidas de 30 segundos para

as situações, sem água, 18 ml/h, 30 ml/h, 72 ml/h e 270 ml/h. Para analisar os gases de escape, empregou-se um dispositivo, o analisador de gases da marca OPTIMA 7, a Fig. 2, mostra o equipamento.



**Figura 2.** Equipamento e seus acessórios. Fonte: mru.instruments.com

Seguindo esses passos detalhados na Fig. 3, você garantirá a 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.



**Figura 3.** Interface de passos de mensuração no equipamento. Fonte: mru.instruments.co

### 3.6. Matérias utilizados e suas características

Foram utilizados diversos equipamentos e materiais específicos. O motor ciclo Diesel Buffalo 5.0 foi escolhido devido ao rápido acesso e disponibilidade no laboratório, além de apresentar as características técnicas desejadas para o experimento. Este motor é monocilíndrico, com uma cilindrada de 219 cc, admissão por aspiração natural, lubrificação por óleo com bomba, torque máximo de 10 N, taxa de compressão de 20:1 e curso do pistão de 57 mm. Para o sistema de injeção de água, utilizamos um umidificador ultrassônico Vicini VCL-200, com potência de 35W, consumo de 0,035 kWh, capacidade máxima de pulverização de 250 ml/h, e capacidade do reservatório de água de 2,2 litros, funcionando em voltagem bivolt automática (127V–220V). Este foi selecionado pela compatibilidade para adaptações e facilidade de manuseio. Para a coleta de dados, foi utilizado o analisador de gases OPTIMA 7, modelo 420076US1, capaz de medir oxigênio (O<sub>2</sub>), dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), dióxido de enxofre (SO<sub>2</sub>), sulfeto de hidrogênio (H<sub>2</sub>S), monóxido de carbono (CO), óxido nítrico (NO), dióxido de nitrogênio (NO<sub>2</sub>) e diferença

de pressão. Este equipamento foi selecionado por sua capacidade de realizar medições de gases relevantes ao estudo. As tubulações utilizadas foram do tipo flexível, assim como as mangueiras emborrachadas, todas escolhidas pela compatibilidade com as adaptações necessárias ao experimento. Combustível Diesel S-10: 2 litros, foi escolhido por ser comum em postos de combustíveis. Bancada de apoio: Construída em aço e madeira, para suporte dos equipamentos. Braçadeira de metal: Para fixação das tubulações e mangueiras. Balança de precisão: Para medições de massa com alta exatidão. Cronômetro: Para controle do tempo durante os experimentos. Proveta: Para medições volumétricas precisas dos líquidos utilizados.

#### 4. Resultados e discussões

As análises foram todas feitas com o diesel S-10 no motor sem o sistema e com o sistema em diferentes proporções de névoa de água como estratégia de mitigar a emissões de gases nocivos.

##### 4.1. Óxidos de azoto (NOX)

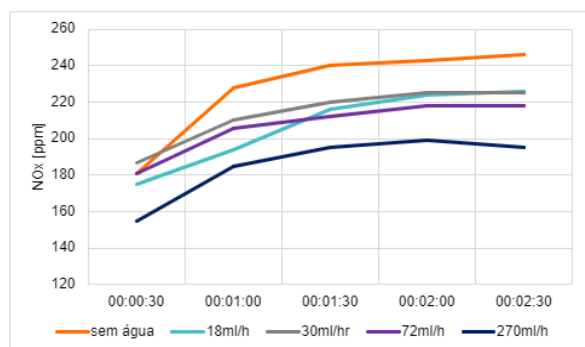


Gráfico 1. Emissões NOX a 1800 RPM. Fonte: autor 2024.

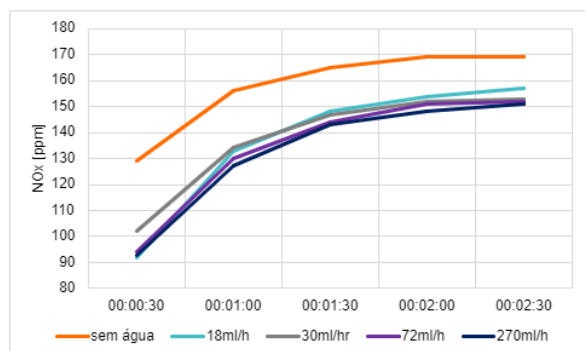


Gráfico 2. Emissões NOX a 2700 RPM. Fonte: autor 2024.

O gráfico 1 e 2 indica que todas as proporções de água experimental renderam melhores resultados na redução das emissões do NOx. Além disso, a taxa de 270 ml/h se comportou de maneira mais consistente, ao garantir uma quantidade substancial de redução de NOx. O gráfico acima indica que todas as proporções de água experimental renderam melhores resultados na redução das emissões do NOx. Além disso, a taxa de 270 ml/h se comportou de maneira mais consistente, ao garantir uma quantidade substancial de redução de NOx. Consistente com os achados de [28], identificaram o uso da água como um método eficaz para o gerenciamento de NOx. Onde afirmam o aumento da capacidade térmica do fluido de trabalho, resultando em temperaturas de combustão mais baixas. Esta redução nas emissões pode ser explicada pela redução da temperatura máxima de combustão porque arrefecimento da água e, portanto, à produção de NOx, sendo produzido principalmente a altas temperaturas.

##### 4.2. Monóxidos de Nitrogênio (NO).

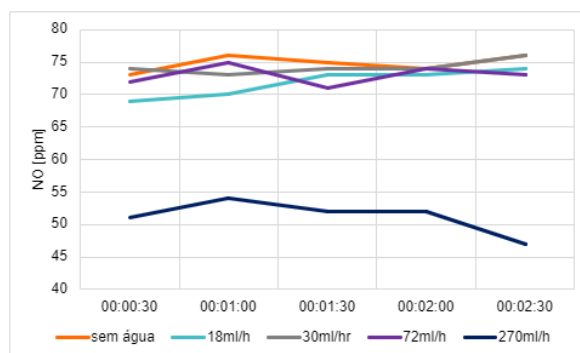


Gráfico 3. Emissões NO a 1800 RPM. Fonte: autor 2024.

O resultado indica que o NO a 1800 rpm, obteve redução nos percentuais de 18ml/h, 72ml/h, e a maior redução se encontra com 270 ml/h que é o maior percentual de água utilizado. No entanto, o percentual de 30 ml/h apresentou valor semelhante ao sistema sem água e assim não ocorrendo variação.

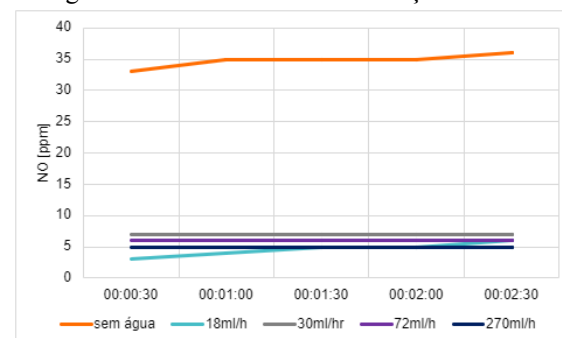
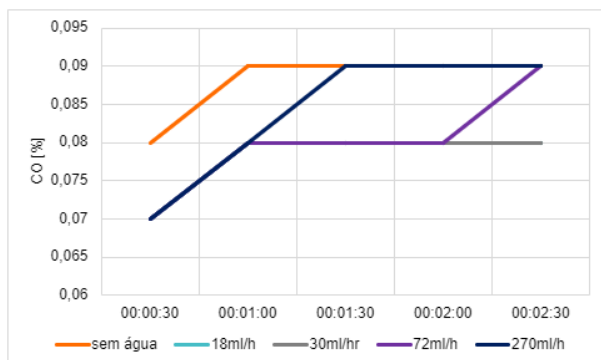


Gráfico 4. Emissões NO a 2700 RPM. Fonte: autor 2024.

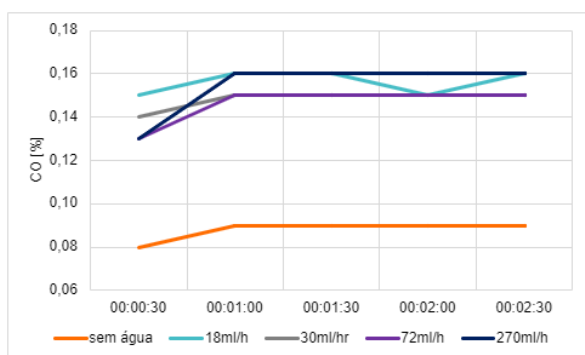


O resultado do NO em uma rotação de 2700 rpm apresentou uma mitigação da emissão em todos os percentuais de água aplicado ao motor.

### 4.3. Monóxidos de carbono (CO).



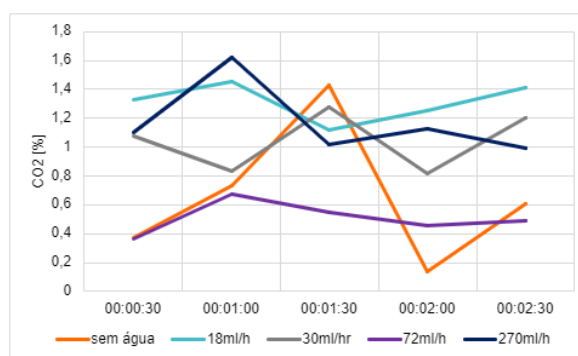
**Gráfico 5.** Emissões CO a 1800 RPM. Fonte: autor 2024.



**Gráfico 6.** Emissões CO a 2700 RPM. Fonte: autor 2024.

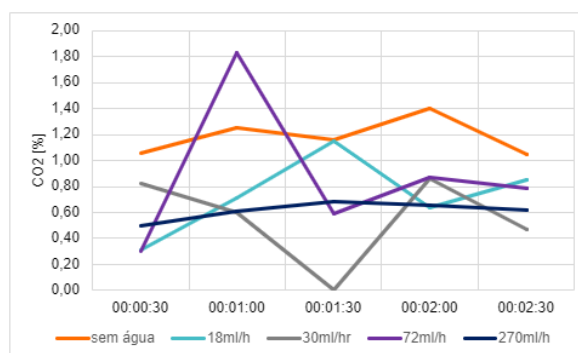
As emissões de CO são predominantemente influenciadas pela relação ar/combustível. No gráfico, observa-se que, a 1800 RPM, as emissões são baixas. Isso ocorre devido à natureza das misturas utilizadas nos motores diesel, que já são naturalmente pobres. Com a introdução de injeção de água, verifica-se uma redução adicional nas emissões, com exceção do ponto onde a taxa de injeção atinge 270 ml/h, resultando a uma diminuição na relação ar/combustível. Por outro lado, a 2700 RPM, as emissões são mais altas. 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.

### 4.4. Dióxido de carbono CO<sub>2</sub>.



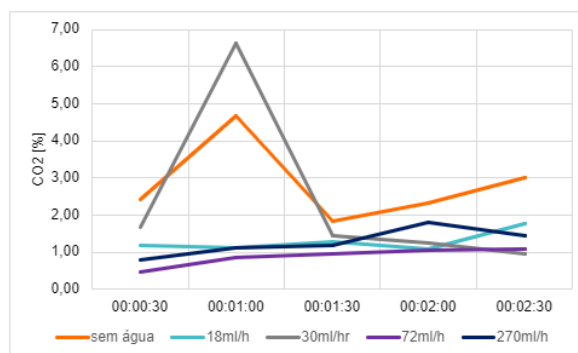
**Gráfico 7.** Emissões CO<sub>2</sub> a 1800 RPM. Fonte: autor 2024.

Com base na análise do gráfico de dióxido de carbono produzido na rotação de 1800 rpm, ocorreu uma redução apenas no percentual de 72ml/h de água, nos demais valores ocorreu um aumento em relação ao sem a água no sistema, e o maior aumento ocorreu na proporção de 18ml/h.



**Gráfico 8.** Emissões CO<sub>2</sub> a 2700 RPM. Fonte: autor 2024.

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 30ml/h.



**Gráfico 9.** Emissões CO<sub>2</sub> a 3600 RPM. Fonte: autor 2024.

Com base na análise do gráfico de dióxido de carbono na rotação de 3600 rpm, observa-se uma diminuição significativa nos valores de  $\text{CO}_2$  para todos os percentuais de água em forma de névoa injetada na câmara de combustão. Estes resultados mostram que a injeção de água foi eficaz na redução das emissões de  $\text{CO}_2$  a 1.800 rpm, enquanto a estratégia de 2.700 rpm foi eficaz na proporção de água mais alta de 270 ml/h.

#### 4.5. Dióxido de enxofre ( $\text{SO}_2$ ).

Com base nas análises feitas sobre os gráficos de emissão de óxido de enxofre,  $\text{SO}_2$ , 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  $\text{SO}_2$ , porém, observa-se que a proporção de 72 ml/h teve a mais elevada redução. Com isso, pode-se dizer que a injeção de água tem um potencial eficaz de redução das emissões de  $\text{SO}_2$  a 1800 RPM. Em contrapartida, a operação a 2700 RPM apresenta um aumento de todas as ordens das proporções do teste.

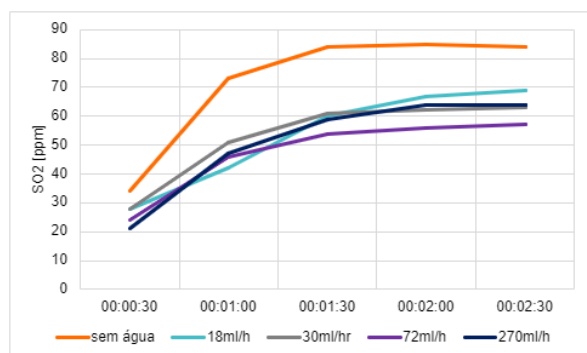


Gráfico 10. Emissões  $\text{SO}_2$  a 1800 RPM. Fonte: autor 2024.

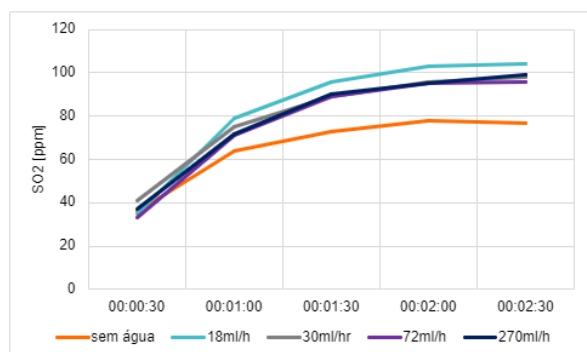


Gráfico 11. Emissões  $\text{SO}_2$  a 2700 RPM. Fonte: autor 2024.

#### 5. Conclusões

Com base nos resultados obtidos, pode-se concluir que a metodologia proposta foi eficiente para a quantificação de  $\text{CO}$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{NO}_x$ ,  $\text{NO}$ , e  $\text{SO}_2$ , provenientes de emissões de motor diesel com o emprego de névoa de água. O baixo custo do sistema usado no experimento torna o processo mais fácil de ser repetido para pesquisas acadêmicas na área.

No objetivo de investigando a mitigação das emissões de poluentes, as emissões de gases nocivos, ao verificar o desempenho ambiental do motor diesel comprovou-se uma diminuição nas emissões. Assim foi estabelecido os objetivos específicos, sendo eles, testar um sistema adaptado para o uso da técnica de injeção de névoa de água, avaliar o desempenho ambiental antes e durante o uso do sistema e compara a mitigação de poluentes em proporções diferentes de água, ao examinar os efeitos ambientais que o motor causa em seu estado natural, comparando-o com o método da névoa de água, a técnica revela uma redução significativa da poluição atmosférica, corroborando as hipóteses de outros autores de que a emissão de  $\text{NO}_x$  está relacionada à temperatura da câmara de combustão do motor. Dessa forma, o resfriamento é o principal responsável pelo controle dessa emissão.

É importante destacar que neste estudo não foram considerados os efeitos de oxidação que a água pode ocasionar ao motor. Além disso, não foi realizada uma avaliação do desempenho do motor para determinar se a água interfere.

Para trabalhos futuros: 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.

#### 6. Referências

- [1] TILLMANN, Carlos Antonio da Costa. Motores de combustão interna e seus sistemas. Pelotas: Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia, p. 9-25., 2013.
- [2] WILSON, P. "Effects of water injection and increase compression ratio in a gasoline spark ignition engine – A thesis presented in partial fulfilment of the requirements for the degree of Master of Science with a Major in Mechanical Engineering in the College of Graduate Studies University of Idaho" ., 2011.
- [3] BERNAL, Jair Leopoldo Loaiza. Study of the operation of an internal combustion engine, fueled by indirect injection of ethanol and direct injection of water into the combustion chamber= Estudo do funcionamento de um motor de combustão interna,



alimentado por injeção indireta de etanol e injeção direta de água na câmara de combustão. Tese de Doutorado. [sn]., 2019.

[4] RIBBENS, W. B. Understanding Automotive Electronics. Fifth Edition, ButterworthHeinemann Publishing Co., Woburn, 1998.

[5] 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. Brasília: SEEG., 2021

[6] RICARDO, Javier. Economia e Negócios: Os 5 países que mais produzem dióxido de carbono (co2), 14 fevereiro., 2021.

[7] CARVALHO, André. Desempenho e emissões de gases de um mci-diesel utilizando óleo diesel e mistura de biocombustível. 2014. Tese de Doutorado. Dissertação (Mestrado em Engenharia da Energia)—Universidade de São João Del rei. São João Del Rei.

[8] COMPET. A saúde da população e a Poluição atmosférica. Programa Economizar. 2006.

[9] MARTINS, Jorge, 2006. Motores de Combustão Interna-4ª edição Revista e Aumentada.

[10] VERGNHANINI FILHO. Renato. Emissão De Óxidos De Enxofre (Sox) Na Combustão Industrial. Revista IPT: Tecnologia e Inovação, v. 4, n. 14., 2020.

[11] GIACOSA, D. Endothermic Engines. Third Edition. Editorial Dossat, S.A., 1988. 479

[12] ZHU, Sipeng et al. Uma revisão da injeção de água aplicada no motor de combustão interna. Conversão e gestão de energia , v. 184, p. 139-158., 2019.

[13] AKAL, D.; Öztuna, S.; Büyükakın. MK A análise de hidrogênio uso em interno combustão motores (gasolina-GLP-diesel) de combustão desempenho aspecto. Internacional J. Hidrogênio Energia 2020 , 45 , 35257–35268., 2020.

[14] FAIZAL, M. et al. Review of hydrogen fuel for internal combustion engines. Journal of Mechanical Engineering Research and Developments (JMERD), v. 42, n. 3, p. 35-46., 2019.

[15] HOPKINSON, B. A new method of cooling gas-engines. Journal of the Royal Society of Arts, Royal Society for the Encouragement of Arts, Manufactures and Commerce, v. 61, n. 3168, p. 867–872., 1913.

[16] DRYER, F. Water addition to practical combustion systems—concepts and applications. In: ELSEVIER. Symposium (international) on combustion. [S.l.]. v. 16, n. 1, p. 279–295., 1977.

[17] MINGRUI, W. et al. Water injection for higher engine performance and lower emissions. Journal of the Energy Institute., 2017.

[18] 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.

[19] 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.

[20] CORCETTI, Liniker Lima de Araújo. SUSTENTABILIDADE AUTOMOBILÍSTICA: comparação entre sistemas de acionamentos dos automóveis atuais utilizando o método AHP. Tese de Doutorado., 2019.

[21] RESENDE, Ricardo Manuel Oliveira. Desenvolvimento e programação de um sistema de injeção e ignição de um motor de combustão interna. Tese de Doutorado., 2019.

[22] WANG, Jinfei et al. Investigação numérica da quantidade de injeção de água e do tempo de injeção de água na termodinâmica, combustão e emissões em um motor SI de gás natural de queima pobre enriquecido com hidrogênio. Revista Internacional de Energia de Hidrogênio , v. 35, pág. 17935-17952., 2020.

[23] 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, [s. l.], v. 148, n. August 2020, p. 111291., 2021.

[24] AMARAL, Lucimar Venâncio; FERREIRA, André Guimarães. Combustíveis, combustão e

motores de combustão interna: Uma revisão sistêmica., 2024.

[25] BORETTI, A. e Scalzo, J. “Influence of water injection on performance and emissions of a direct injection jet ignition engine”. In Journal of Environmental Science and Engineering Technology, 2015, 3, 29-35., 2015.

[26] TELLI G.D., G.Y. ZULIAN, T.D.M. LANZANOVA, M.E.S. MARTINS, L.A.O. ROCHA. An experimental study of performance, combustion, and emissions characteristics of an ethanol HCCI engine using water injection. Applied Thermal Engineering, v. 204., 2022.

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

[28] MAZLAN, Nurul Aiyshah et al. Efeitos de diferentes porcentagens de água em combustível de emulsão não surfactante no desempenho e nas emissões de escapamento de um caminhão leve. Revista de produção mais limpa , v. 179, p. 559-566., 2018.