

FAACZ - FACULDADES INTEGRADAS DE ARACRUZ
ENGENHARIA MECÂNICA

DANIEL BONIFACIO DOS SANTOS
ESTER ROSA MOREIRA
GLEIDSON DA CONCEIÇÃO BARCELLOS
HEITOR RODRIGUES ALVES
MATHEUS LECCHI SOUZA

**ESTUDO DO SISTEMA DE REDUÇÃO CATALÍTICA SELETIVA (SELECTIVE
CATALYTIC REDUCTION - SCR) EM MOTORES DIESEL QUE UTILIZAM ARLA**

32

ARACRUZ

2022

DANIEL BONIFACIO DOS SANTOS
ESTER ROSA MOREIRA
GLEIDSON DA CONCEIÇÃO BARCELLOS
HEITOR RODRIGUES ALVES
MATHEUS LECCHI SOUZA

ESTUDO DO SISTEMA DE REDUÇÃO CATALÍTICA SELETIVA (SELECTIVE
CATALYTIC REDUCTION - SCR) EM MOTORES DIESEL QUE UTILIZAM ARLA 32

Trabalho de conclusão de curso apresentado às
Faculdades Integradas de Aracruz - FAACZ, como
requisito para obtenção do título de Bacharel em
Engenharia Mecânica.
Orientador: Prof. Esp. Patrik Borges do Nascimento
Leal.

ARACRUZ
2022

DANIEL BONIFACIO DOS SANTOS
ESTER ROSA MOREIRA
GLEIDSON DA CONCEIÇÃO BARCELLOS
HEITOR RODRIGUES ALVES
MATHEUS LECCHI SOUZA

**ESTUDO DO SISTEMA DE REDUÇÃO CATALÍTICA SELETIVA (SELECTIVE
CATALYTIC REDUCTION - SCR) EM MOTORES DIESEL QUE UTILIZAM ARLA
32**

Trabalho de conclusão de curso apresentado às
Faculdades Integradas de Aracruz - FAACZ, como
requisito para obtenção do título de Bacharel em
Engenharia Mecânica.

Aprovada em ____ de _____ de _____

COMISSÃO EXAMINADORA

Prof. Esp. Patrik Borges do Nascimento Leal

FAACZ
Orientador

Prof. Me. Daniel Ernesto Otarola Tasaico

FAACZ

Prof. Me. Mário Sérgio da Rocha Gomes

FAACZ

DECLARAÇÃO DO AUTOR

Declaro, para fins de pesquisa acadêmica, didática e técnico-científica, que este Trabalho de Conclusão de Curso pode ser parcialmente utilizado, desde que se faça referência à fonte e ao autor.

Aracruz, ____ de _____ de 2022.

DANIEL BONIFACIO DOS SANTOS

ESTER ROSA MOREIRA

GLEIDSON DA CONCEIÇÃO BARCELLOS

HEITOR RODRIGUES ALVES

MATHEUS LECCHI SOUZA

RESUMO

Dentre os motores de combustão interna se destacam os do tipo Diesel pela sua robustez e rendimento, que em contrapartida apresentam problemas de aumento das emissões poluentes. Por isso, notou-se a necessidade da criação de normas e leis ambientais que consigam reduzir essas emissões. Então, surge o Programa de Controle da Poluição do Ar por Veículos Automotores (PROCONVE), que tem por objetivo regulamentar os níveis aceitáveis de emissões poluentes por categoria de veículos. Desta forma, para que as montadoras e fabricantes de motores Diesel se adequem às novas normas ambientais, foi inserida a utilização do Agente Redutor Líquido Automotivo (Arla 32), em conjunto ao sistema de tratamento de gases de exaustão já existente nos motores Diesel chamado SCR (Redução Catalítica Seletiva), resultando em uma diminuição de até 90% das emissões de NO_x. No estudo utilizado neste trabalho, como base para elaborar os resultados, foi constatado e comprovado que a injeção do Arla 32 no sistema SCR reduziu em quase 80% a taxa de emissão de NO_x, medida em ppm, no escapamento do motor Diesel utilizado, e que no estado de São Paulo a massa desse poluente vem tendo um declive de 2,6% de 2006 a 2019 e desde então essas taxas continuam a diminuir, mesmo diante ao aumento da frota de veículos no Estado de São Paulo.

Palavras-chave: Sistema SCR. Motores a Diesel. Proconve. Arla 32.

LISTA DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 1 - Exemplo de motor a Diesel..... | 14 |
| Figura 2 - Ciclos de quatro tempos do motor Diesel..... | 15 |
| Figura 3 - Limites das emissões ao longo das fases do proconve..... | 22 |
| Figura 4 - Redução dos níveis de emissão da fase P7 comparada com a fase P5...22 | |
| Figura 5 - Sistema SCR integrado ao Arla 32 com sensor NO _x | 24 |
| Figura 6 - Funcionamento do sistema SCR..... | 28 |
| Figura 7 - Catalisador SCR em corte..... | 29 |
| Figura 8 - Reação de oxirredução do NO _x no catalisador..... | 30 |

LISTA DE QUADROS

| | |
|---|----|
| Quadro 01 - Componentes do sistema SCR..... | 25 |
|---|----|

LISTA DE TABELAS

| | |
|--|----|
| Tabela 01 – Dados comparativos com e sem o uso do Arla 32 | 37 |
| Tabela 02 – Evolução da frota de veículos a Diesel no Estado de São Paulo..... | 38 |
| Tabela 03 – Massa de NO _x emitida em São Paulo..... | 39 |

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

AEA – Associação Brasileira de Engenharia Automotiva

ANP - Agência Nacional de Petróleo

Arla 32 – Agente Redutor Líquido

CETESB – Companhia Ambiental do Estado de São Paulo

CONAMA – Conselho nacional do meio ambiente

ECU – Eletronic control unit

HC - Hidrocarbonetos

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

IEMA – Instituto de Energia e Meio Ambiente

IBAMA – Instituto Brasileiro de Meio Ambiente

IEMA – Instituto de Energia e Meio Ambiente

MP - Material Particulado

OMS – Organização Mundial da Saúde

PROCONVE - Programa de Controle de Emissões Veiculares

SCR – Selective catalytic reduction

EGR - Exhaust Gas Recirculation

Sumário

| | |
|--|----|
| 1 - INTRODUÇÃO | 11 |
| 2 - METODOLOGIA | 13 |
| 3 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA | 14 |
| 3.1 – MOTORES DE COMBUSTÃO INTERNA | 14 |
| 3.2 – MOTORES DE CICLO DIESEL DE QUATRO TEMPOS | 15 |
| 3.3 – ÓLEO DIESEL | 16 |
| 3.4 – GASES DE EXAUSTÃO | 17 |
| 3.5 – LEGISLAÇÃO AMBIENTAL PARA OS MOTORES DIESEL | 20 |
| 3.6 - ARLA 32 | 23 |
| 3.7 - SISTEMA SCR (REDUÇÃO SELETIVA CATALÍTICA) | 28 |
| 3.8 - SISTEMA EGR (RECIRCULAÇÃO DE GASES DE EXAUSTÃO) | 31 |
| 4 - RESULTADOS E DISCUSSÕES | 32 |
| 4.1 – EMISSÕES DE NO _x EM MOTOR DIESEL | 32 |
| 4.2 – INJEÇÃO DE ARLA 32 | 34 |
| 4.3 – EMISSÕES DE NO _x NO ESTADO DE SÃO PAULO | 38 |
| 5 – CONCLUSÃO | 41 |
| 6 - REFERÊNCIAS | 42 |

1 - INTRODUÇÃO

Atualmente, a elevada quantidade de automóveis presentes nos centros urbanos tem trazido diversos danos e problemas, desde o aumento do tráfego de veículos, que ocasiona grandes problemas de trânsito, até o maior de todos, que é a poluição atmosférica, que acaba prejudicando o meio ambiente e trazendo danos à saúde humana.

Conforme Who (2016) exemplifica, o ar é crucial para a saúde humana, e devido a poluição atmosférica, estamos sofrendo impactos significativos na mesma. Gouveia et al. (2006) diz que existem correlações entre a alta morbidade e danos na saúde humana com a poluição do ar atmosférico, como por exemplo, significativas correlações entre os poluentes atmosféricos e o surgimento de diversos casos de câncer têm sido observados, com um destaque maior para o câncer de pulmão.

Além de problemas relacionados a saúde, a poluição atmosférica gera, conforme Manahan (2000) relata, diversos problemas ao meio ambiente como o efeito estufa e a chuva ácida, pois os combustíveis fósseis, oriundos do petróleo, geram diversos gases como o dióxido de carbono (CO_2) e o óxido Nitroso (NO_x), sendo o NO_x um dos principais precursores.

Segundo Bosh (2002) os produtos derivados de petróleo, são as maiores fontes de consumo energético no mundo, tendo um foco muito maior na indústria de transportes do que em outras partes do mercado. Mesmo que atualmente tenhamos outras formas e fontes de energia, os derivados de petróleo ainda são os mais acessíveis quando o assunto é economia, porém eles ainda geram diversos problemas ao meio ambiente e à saúde humana.

Figueiredo (2013) destaca que várias políticas públicas foram feitas para que se possa diminuir o impacto da poluição atmosférica à saúde humana, tentando assim diminuir o consumo de produtos derivados do petróleo, através da criação de novos combustíveis, como o Etanol e o Biodiesel, através da criação de veículos flex, inspeção veicular, rodízio de veículos, incentivo ao uso do transporte não motorizado

(Utilização de ciclovias), além da utilização de Arla 32 em veículos Diesel que é o item principal da pesquisa deste trabalho.

Seguindo o contexto das políticas públicas, Dos Santos et al (2014), exemplifica que para atender a legislação foi necessária a utilização da tecnologia Euro 5, que consiste na injeção do Arla 32 em conjunto ao sistema de redução catalítica seletiva (SCR - Selective Catalytic Reduction). Após isso, foi constatado que os motores de ciclo Diesel deveriam ter sistemas para tratar os gases lançados ao meio ambiente.

Este trabalho visa explicar a utilização do Arla 32 em motores Diesel, e quais são as suas principais contribuições para o meio ambiente, apresentando também como o sistema SCR opera, além de apresentarmos desde características construtivas à até sobre a formulação do Arla 32.

1.1 - OBJETIVO GERAL

Apresentar o sistema SCR, utilizado nos motores Diesel como método alternativo de redução das emissões poluentes, com ênfase ao uso do Arla 32.

1.2 - OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Demonstrar o funcionamento do sistema SCR nos motores a diesel.
- Descrever o funcionamento dos motores de ciclo Diesel de quatro tempos.
- Analisar os resultados comparativos, de estudos já existentes, quanto à redução das emissões de NO_x quando se utiliza Arla 32.

2 - METODOLOGIA

Para a estruturação e escrita deste trabalho de conclusão de curso foi utilizado o método de pesquisa exploratória, o qual permitiu analisar e compreender o funcionamento do sistema SCR em motores a Diesel com ênfase na utilização do Arla 32 e os seus impactos ao meio ambiente.

Desse modo, este trabalho se baseou no levantamento de informações bibliográficas importantes acerca do sistema SCR, tendo como base artigos científicos voltados para tal temática e a lei Nº 8.723 de 28 de outubro de 1993, a qual regula a taxa de emissão gasosa por meio de veículos automotores e concede outras diligências.

A presente pesquisa foi baseada em artigos acadêmicos, livros e sites que através de testes e ensaios práticos realizados em laboratório, de forma controlada, obtiveram resultados numéricos quanto às emissões de óxido de nitrogênio (NO_x) em motores Diesel.

Também neste trabalho, analisou-se testes realizados para medir as emissões de NO_x no escapamento de um veículo equipado com motor Diesel. Adotados dois cenários: o primeiro sem a injeção do Arla 32 no sistema SCR, e no segundo utilizando o Arla 32. A partir daí, foram coletadas todas as informações necessárias e comparadas umas com as outras para evidenciar as diferenças de comportamento resultantes.

Neste viés, ainda com o intuito de demonstrar o impacto do Arla 32 sobre a quantidade de óxidos de nitrogênio (NO_x), também foi realizado o levantamento de dados da Companhia de Meio Ambiente do Estado de São Paulo e do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, na qual pode-se obter os resultados das emissões de NO_x de 2006 à até 2019, bem como da frota de veículos a Diesel no mesmo período, tendo sido realizada uma comparação gráfica da quantidade da frota de veículos a Diesel com o volume de NO_x emitido por estes dentro do Estado de São Paulo.

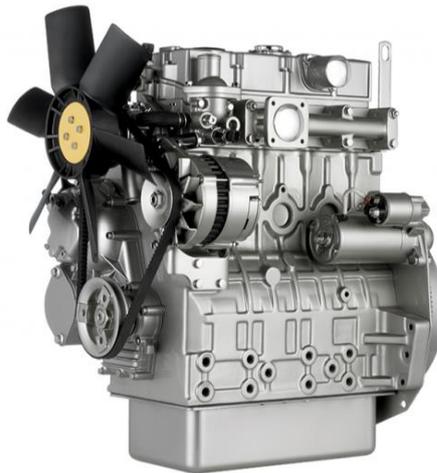
3 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Visto a importância dos motores à Diesel para a formulação deste trabalho, abordará-se alguns pontos a respeito do mesmo, além dos diferentes tipos de Óleo Diesel, Gases de exaustão dentre outros pontos relevantes para o referido estudo.

3.1 – MOTORES DE COMBUSTÃO INTERNA

Máquinas térmicas são equipamentos que visam transformar calor em trabalho, sendo este calor obtido de diferentes fontes como, Combustão, Energia elétrica ou atômica. Uma das principais máquinas térmicas, são os motores, que podem ser classificados como motores de combustão externa ou interna, A figura 1, demonstra um exemplo deste tipo de motor (BRUNETTI 2018).

Figura 1 - Exemplo de motor Diesel



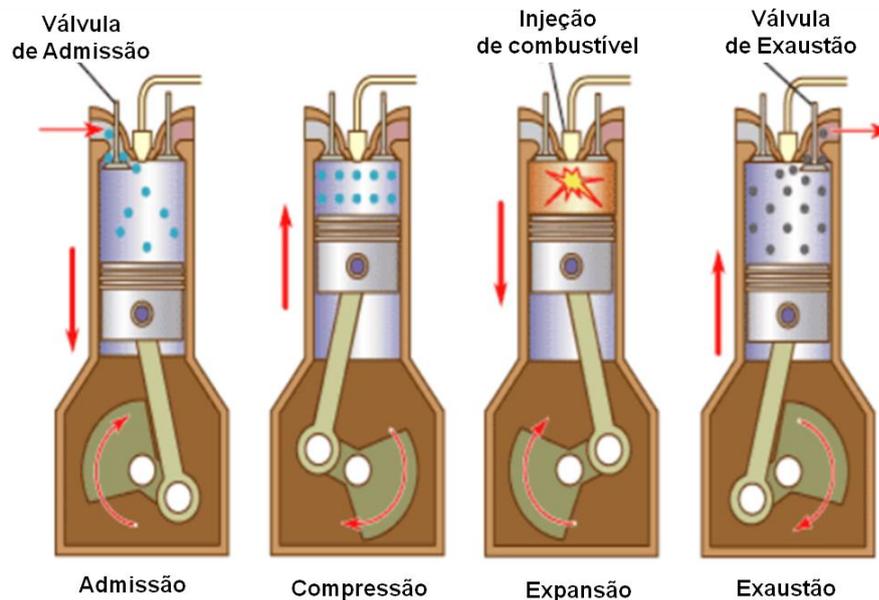
Fonte: Revista Cultivar (2021)

Conforme Figura 1, os motores do tipo de combustão interna, são os que através do sistema de pistões transformam em trabalho a energia química liberada durante a combustão. Ou seja, a movimentação do sistema mecânico de biela-manivela em forma de rotação (SIMÊNCIO, 2019).

3.2 – MOTORES DE CICLO DIESEL DE QUATRO TEMPOS

Os motores de ciclo Diesel, possuem quatro tempos em seu funcionamento, que serão apresentados a seguir, conforme a Figura 2.

Figura 2 - Ciclos do motor diesel



Fonte: Adaptado de Pimenta (2008)

O funcionamento deste tipo de motor se inicia pelo processo de admissão. Com a válvula de admissão aberta e o movimento do pistão saindo do ponto morto superior até o ponto morto inferior, o ar atmosférico é deslocado para dentro do cilindro preenchendo o mesmo. Em seguida temos a Compressão, agora com a válvula de admissão e escape fechadas, o pistão se desloca novamente retornando ao PMS. Com isso, o ar é comprimido e em consequência eleva sua temperatura tornando-o aquecido. Na etapa de Expansão, o combustível é injetado na câmara de combustão onde entra em contato direto com o ar presente lá dentro sob alta temperatura. Neste momento ocorre a ignição que obriga o pistão a descer até o PMI, em função do aumento da pressão na câmara. Para finalizar as etapas de trabalho, temos a fase de Escape que consiste na abertura da válvula de escape e o retorno do pistão ao PMS, obrigando os gases oriundos da combustão a serem expulsos para a atmosfera (PIMENTA, 2008).

Em função da alta pressão no interior do cilindro, após a etapa de compressão, se faz necessário que a injeção do combustível seja realizada de modo a conseguir superar a pressão interna e adentrar a câmara. Para atender a este requisito surgiram os sistemas de bombas injetoras, que pulverizam o combustível no menor tamanho possível para melhorar a mistura com o ar aquecido e, com isso, favorecendo para uma melhor combustão (PIMENTA, 2008).

3.3 – ÓLEO DIESEL

O óleo diesel, definido pela Agência Nacional de Petróleo (ANP) como um combustível líquido derivado de petróleo, composto por hidrocarbonetos com cadeias de 8 a 16 carbonos e, em menor proporção, nitrogênio, enxofre e oxigênio, são utilizados principalmente em motores ciclo diesel e seus tipos definidos basicamente pela concentração de enxofre.

Há diversos tipos de diesel disponíveis comercialmente, sendo eles o diesel S-10, S50, S500 e S1800, que de acordo com informações técnicas, possuem teor de enxofre de 10, 50, 500 e 1800 mg/kg respectivamente, assim como pode ser observado em suas respectivas siglas. Sendo os combustíveis S10 e S50 introduzidos em veículos produzidos a partir de 2012, os quais necessitam de um Diesel mais puro para seu funcionamento.

O S-500 é usado em veículos produzidos anteriormente a 2012 e o S-1800 é aplicado em usinas termoelétricas, mineração a céu aberto e transporte ferroviário. (PETROBRAS, 2021)

Conforme Campedelli (2011) ao passar dos anos e evolução dos motores diesel, foi necessário também um aprimoramento na característica dos combustíveis. A análise de qualidade de ignição e redução de viscosidade resulta em um aumento da eficiência e confiabilidade dos motores diesel.

Dentre as propriedades utilizadas para determinar a qualidade do combustível para motores diesel, pode-se destacar o Número de Cetano, definido por Knothe (2006) como um valor que mede a qualidade de combustão de combustíveis diesel, o número

de Cetano ou índice de Cetano é um indicador da velocidade de combustão do óleo diesel e da compressão necessária para a ignição. Definidos pelos respectivos índices, sua presença é medida em uma escala de 0 (zero) a 100 (cem), sendo o Cetano, um hidrocarboneto, a substância mais pura de alta qualidade de ignição recebendo um Número de Cetano igual a 100.

Para Sala (2008) quanto maior o número de Cetano, melhor o combustível e menor tempo de retardo, tempo entre a injeção e a combustão, de mesmo modo que para valores de índice mais baixos, o combustível pode ser de qualidade inferior e demorar mais para queimar, o que dificulta a partida a frio. Ainda de acordo com Sala (2008), combustíveis com número de Cetano à extremidade da escala, sendo eles muito altos ou muito baixos, podem gerar problemas operacionais no motor. Se muito alto pode ocorrer uma combustão incompleta devido à combustão do combustível antes da mistura correta com o ar. Caso seja muito baixo, pode sofrer dificuldades na combustão e o motor pode vir a falhar e trepidar e gerar fenômenos característicos de uma combustão incompleta.

3.4 – GASES DE EXAUSTÃO

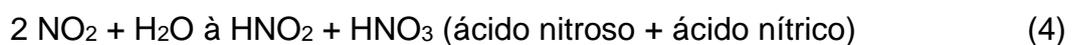
Segundo a Cetesb (2019), as principais emissões por veículos equipados com motores de combustão interna, são: Monóxido de Carbono (CO), óxidos de Enxofre (SOx) e Nitrogênio (NOx), Hidrocarbonetos (HC) e Material Particulado (MP). Estes, por sua vez, apresentam sérios riscos à saúde humana, quando absorvidos pelo sistema respiratório. Um exemplo disso é o que destaca a OMS, notificando uma estimativa de aproximadamente 4 milhões de pessoas que morrem de forma precoce no mundo, em decorrência da poluição presente na atmosfera.

Além dos efeitos negativos sobre a saúde humana, muitos poluentes têm efeitos adicionais ou indiretos sobre o meio ambiente. Por exemplo, os óxidos de enxofre e nitrogênio são precursores da chuva ácida, associados à acidificação de solos, lagos e rios (ABREU, 2005).

De acordo com ALABI (1997) a água da chuva é naturalmente ácida devido à presença de óxidos na atmosfera, com um pH de 5,6, não faz mal às pessoas nem à

natureza porque não tem tanta acidez. O problema é que devido à queima de combustíveis e um aumento significativo no acúmulo de gases poluentes na atmosfera, isso faz com que o pH da água da chuva caia para valores entre 5 e 2,2, causando problemas aos humanos e à natureza. À medida que o pH da água diminui e sua acidez aumenta, as precipitações tornam-se ácidas.

Abreu (2005) destaca que a chuva com valores de pH inferiores a 5,6 encontra-se contaminada. A acidificação de certos ambientes resulta de processos que emitem compostos de enxofre na forma de SO₂, e Nitrogênio como NO_x. Posteriormente, esses compostos gasosos são às vezes transportados por longas distâncias; ao mesmo tempo, sofrem reações químicas nas quais a oxidação é proeminente e são transformadas em H₂SO₄ (ácido sulfúrico) e HNO₃ (ácido nítrico), respectivamente, conforme as equações 1, 2, 3 e 4 a seguir.



a) Óxidos de Nitrogênio (NO_x):

Os óxidos de nitrogênio são formados pela reação entre o nitrogênio e o oxigênio, no interior da câmara de combustão, em função das elevadas temperaturas na mesma, o termo NO_x é surgido para referir-se a todos os sete compostos de nitrogênio conhecidos, embora apenas dois sejam considerados importantes no que diz respeito à poluição atmosférica, são eles o monóxido de nitrogênio (NO) e dióxido de nitrogênio (NO₂). O NO é uma substância incolor, inodora e insípida que, em dias de radiação intensa, é oxidado, transformando-se em NO₂ (BAUKAL, 2001)

O dióxido de nitrogênio (NO_2) é tóxico, de cor marrom-avermelhada, com cheiro e gosto desagradáveis, além de ser irritante aos olhos e as mucosas nasais, pode provocar enfisema pulmonar, podendo também se transformar em substâncias cancerígenas no pulmão. O mesmo pode reagir com a água presente no ar e formar um dos principais componentes da chuva ácida: o ácido nítrico (HNO_3). Nas reações atmosféricas secundárias, o NO_2 associado a hidrocarbonetos é também responsável pelo surgimento do smog fotoquímico, que é a poluição do ar, sobretudo em áreas urbanas, por ozônio troposférico e outros compostos originados por reações fotoquímicas, reações químicas causadas pela luz solar. (FLEXA, 2007).

Atualmente o NO_x é um dos poluentes de maior preocupação no meio ambiental e depende cada vez mais dos avanços tecnológicos que favorecem seu combate, pois sua concentração tende a se elevar de acordo com que a eficiência dos motores também evolua, em especial os de ciclo Diesel (CETESB 2019).

b) Monóxido de Carbono (CO):

O surgimento e a liberação do Monóxido de Carbono (CO) se dá quando a queima do combustível, dentro da câmara de combustão, é realizada de maneira incompleta. Este, quando inalado, diminui a concentração de oxigênio presente no sangue (CETESB 2019).

c) Hidrocarbonetos (HC):

Segundo a Cetesb (2019), os Hidrocarbonetos (HC) correspondem ao percentual de combustível que não fora queimado pelo motor ou até mesmo expelido em forma de vapor no ato do abastecimento do veículo. Da mesma forma como os NO_x reagem na atmosfera, com o HC não é diferente, sendo comum classificá-los como Compostos Orgânicos Voláteis (COV).

d) Óxidos de Enxofre (SO_x):

Sua formação acontece em função da oxidação do enxofre que está contido no combustível, óleo Diesel, e seu efeito nocivo está diretamente ligado à resistência

respiratória das vias aéreas, bem como na extração de bactérias e partículas presentes nos pulmões (RIBEIRO, 2002).

e) Material Particulado (MP):

Também denominado de Fuligem devido seu tamanho pequeno, o Material Particulado está presente principalmente nos motores a Diesel, onde se tem a formação por meio da combustão incompleta do combustível (RIBEIRO, 2002). Além disso, o mesmo pode atacar o sistema de defesa do nosso organismo e também se depositar nos alvéolos pulmonares, causando inflamações (CETESB 2019).

3.5 – LEGISLAÇÃO AMBIENTAL PARA OS MOTORES DIESEL

Segundo a Aea (2016), a preocupação do Conselho Nacional do Meio Ambiente (Conama), com a deterioração da qualidade do ar nos centros urbanos do país, levou a criar em 1986, o Programa de Controle da Poluição do Ar por Veículos Automotores (Proconve).

O Programa foi formulado por esse conselho através de Resoluções que estabelecem diretrizes, prazos e padrões legais de emissão admissíveis para as diferentes categorias de veículos automotores, nacionais e importados. (IBAMA, 2013)

Desde então, instituído pela Resolução CONAMA nº 18/86, esse programa busca auxiliar na redução de emissões poluentes de novos veículos, por meio da inserção progressiva de fases que, gradativamente, obrigam a indústria automobilística a diminuir as emissões nos veículos que serão inseridos no mercado (AEA, 2016).

De acordo com o IBAMA (2013), o PROCONVE baseou-se na experiência internacional para moldar os índices à realidade brasileira, com o propósito principal de estabelecer limites máximos da contaminação atmosférica das fontes móveis, tais como veículos automotores, induzindo o desenvolvimento tecnológico dos fabricantes e estabelecer requisitos técnicos para veículos, cuja comprovação é baseada em testes padronizados.

O controle pelo PROCONVE é baseado na classificação dos veículos em razão de seu Peso Bruto Total (PBT), com fases caracterizadas por "L" para veículos leves e "P" para veículos pesados e que vêm sendo implantadas segundo cronogramas diferenciados (AEA, 2016).

O AEA (2016) ainda revela que para seguir o atendimento destes novos limites que entraram em vigor em de 1º de janeiro de 2012, foram usados duas tecnologias de controle de emissões de motores, sistema SCR (Selective Catalytic Reduction ou catalisador de redução seletiva), que exige a utilização do Agente Redutor Líquido de óxidos de nitrogênio Automotivo (ARLA 32) e o sistema EGR (Exhaust Gas Recirculation ou recirculação de gases de escapamento) combinado com filtro de material particulado ou catalisador de oxidação.

Tais medidas foram adotadas, a partir do crescimento da frota de automóveis, principalmente no contexto das grandes concentrações urbanas, que se ressalta ser inadiável a busca de soluções de mobilidade urbana como fator fundamental para a qualidade de vida das grandes cidades brasileiras (IBAMA, 2013).

Um ponto que se deve atenção, dentro dos objetivos do PROCONVE, é a questão da contribuição direta dos proprietários na manutenção adequada dos seus veículos, já que se usado de maneira errônea, este gera o efeito contrário no desempenho do veículo (IBAMA, 2013).

De maneira geral, a evolução das regulamentações de controle de emissões veiculares tóxicas, não apenas vêm impondo limites de emissões cada vez mais rígidos, mas também vêm se adequando à evolução do conhecimento sobre o efeito dos poluentes na saúde e sobre o controle das emissões veiculares. Eles são também influenciados pelas novas tecnologias, combustíveis e por demandas regionais. (ZAMONI et al, 2015)

A figura 3, a seguir, demonstra a comparação entre as fases da Euro e do Proconve, além de indicar a evolução dos limites de emissão ao longo dessas fases, desses programas, para veículos pesados.

Figura 3 - Limites de emissões ao longo das fases do Proconve

| LIMITES DAS EMISSÕES PARA VEÍCULOS PESADOS A DIESEL | | | | | | | | |
|---|--------|--------------------|-------------------|--------------------|---------------------------|----------------|------------------|---------------------|
| PROCONVE | EURO | CO (g/kW.h) | HC (g/kW.h) | NOx (g/kW.h) | MP (g/kW.h) | Norma (Conama) | Vigência | Teor de enxofre (S) |
| Fase P1 | - | 14,00 ¹ | 3,50 ¹ | 18,00 ¹ | - | Res. 18/85 | 1989 a 1993 | - |
| Fase P2 | Euro 0 | 11,20 | 2,45 | 14,40 | 0,60 ¹ | Res. 08/93 | 1994 a 1995 | 3.000 a 10.000 ppm |
| Fase P3 | Euro 1 | 4,90 | 1,23 | 9,00 | 0,40 ou 0,70 ² | Res. 08/93 | 1996 a 1999 | 3.000 a 10.000 ppm |
| Fase P4 | Euro 2 | 4,00 | 1,10 | 7,00 | 0,15 | Res. 08/93 | 2000 a 2005 | 3.000 a 10.000 ppm |
| Fase P5 | Euro 3 | 2,10 | 0,66 | 5,00 | 0,10 ou 0,13 ³ | Res. 315/02 | 2006 a 2008 | 500 a 2.000 ppm |
| Fase P6 ⁴ | Euro 4 | 1,50 | 0,46 | 3,50 | 0,02 | Res. 315/02 | 2009 a 2012 | 50 ppm |
| Fase P7 | Euro 5 | 1,50 | 0,46 | 2,00 | 0,02 | Res. 403/08 | a partir de 2012 | 10 ppm |

| | | | | | | | | | |
|-----------|---------------------|-----------|-----------------|------------|----------------------|-----------|----------------------|----------|---------|
| CO | monóxido de carbono | HC | hidrocarbonetos | NOx | óxidos de nitrogênio | MP | material particulado | S | enxofre |
|-----------|---------------------|-----------|-----------------|------------|----------------------|-----------|----------------------|----------|---------|

1. Não foram exigidos legalmente.

2. 0,70 para motores até 85 kW e 0,40 para motores com mais de 85 kW.

3. Motores com cilindrada unitária inferior a 0,75 dm³ e rotação à potência nominal superior a 3.000 RPM.

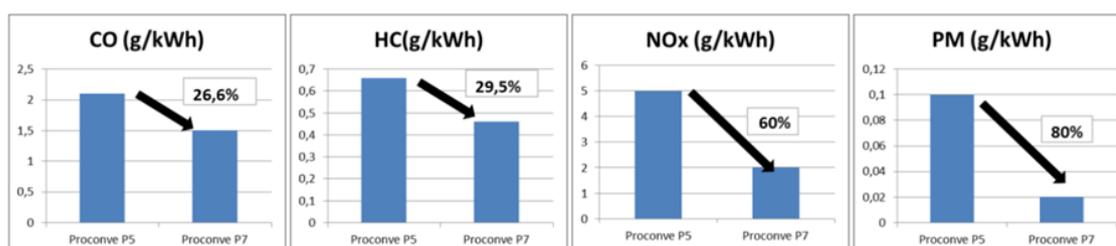
4. Não entrou em vigor na data prevista.

Fonte: AEA (2016)

Conforme exemplificado na figura acima, observa-se a evolução do PROCONVE ao passar dos anos, de forma que por meio de resoluções do CONAMA, instaurou novas fases de modo que o limite de emissão por cada veículo para cada gás emitido sofresse uma redução gradativa. Pode -se observar que a partir da fase P2, o Proconve se baseou na Norma EURO, legislação europeia cujo tem a mesma finalidade, e na fase P7, na qual está em vigor desde 2012, tornou-se obrigatório que veículos à diesel pesados utilizassem o ARLA 32 juntamente com o sistema SCR.

Para melhor exemplificar, na figura 4, a seguir, pode observar-se a redução dos níveis de emissão da fase P7 comparada com a fase P5 do PROCONVE.

Figura 4 - Redução dos níveis de emissão da fase P7 comparada com a fase P5



Fonte: AEA (2016)

Como resultado desse programa e medidas adotadas, comparadas a fase P5, constata-se reduções bastante significativas nos limites de emissão da fase P7 para veículos novos, uma redução de 60% nos limites de emissão dos óxidos de nitrogênio (NO_x) e 80% de material particulados (MP) (AEA, 2016).

Mesmo com tais determinações e efeitos, outra questão que Farah (2014) ressalta, é que a quantidade de ARLA 32 que está sendo consumido é menor do que seria esperado para o número de veículos equipados com SCR hoje existente. Tal informação sugere que sua utilização, de alguma forma, esteja sendo contornada, seja pelo uso de soluções de ureia fora das normas, seja por outros meios, o que pode levar a comprometer a durabilidade do sistema SCR (IEMA, 2014).

3.6 - ARLA 32

O Arla 32 é uma solução transparente de ureia e água desmineralizada utilizada para controlar as emissões de óxidos de nitrogênio (NO_x), que sai no gás de escapamento dos veículos com motores a diesel, e que tem como norma a NBR ISO 22.241, que procedimenta a fabricação do ARLA 32 no Brasil. Os veículos pesados produzidos no país, desde 2012, possuem o Sistema de Redução Catalisadora (SCR), sendo o uso do Arla 32 obrigatório (IBAMA, 2016).

De acordo com Keller (2021), as montadoras, objetivando atender os limites de emissão para os óxidos de nitrogênio, passaram a adotar o sistema SCR nos motores dos seus ônibus e caminhões. Desse modo, a comercialização da solução de 32,5% de ureia passou a ser necessária.

O termo Arla 32, que tende a ser empregado tanto para o fluido quanto para o sistema, é composto por 32,5% de ureia e 67,5% de água desmineralizada (deionizada) de alta qualidade (PEPPER, 2017).

Além dessa designação, o Aea (2016), discorre que o Arla 32, o qual é a abreviação para Agente Redutor Líquido Automotivo, é também conhecido como AdBlue na Europa, DEF (Diesel Exhaust Fluid) nos Estados Unidos e AUS 32 de forma genérica.

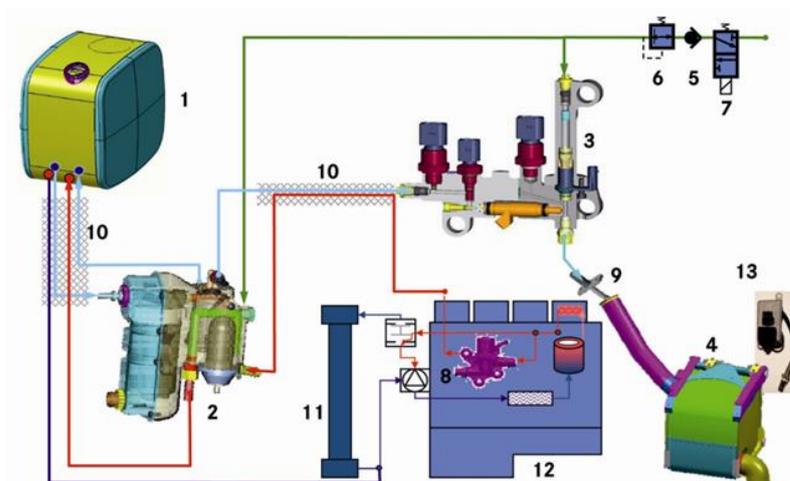
Quanto a sua utilização, o uso do líquido redutor geralmente é de cerca de 1 a 4% do diesel, portanto, para cada 100 L de diesel usado, espera-se usar cerca de 1 a 4 litros de Arla, podendo variar de acordo com as condições do veículo e tráfego. Apesar da taxa do seu consumo estar vinculada ao consumo de combustível, o Arla não é um combustível e nem um aditivo de combustível (SILVA, 2017).

a) Funcionamento

Acerca do seu funcionamento, normalmente um escapamento de diesel moderno flui primeiro para um conversor catalítico oxidante que transforma os poluentes: hidrocarboneto (HC), monóxido de carbono (CO), dióxido de carbono (CO₂) em água (H₂O). Na sequência, o escapamento passa por um filtro de partículas diesel (DPF) que tem por função remover as mesmas. Depois há a Redução Catalítica Seletiva, onde o agente é pulverizado no escapamento e o componente de água evapora, ajudando a espalhar a ureia uniformemente. A uréia se decompõe em amônia e dióxido de carbono, e o NO_x (óxido de nitrogênio) é convertido pela amônia em água e nitrogênio (PEPPER, 2017).

A figura 5 e o quadro 01, presentes a seguir, ilustram o esquema de injeção, controle e monitoramento do Arla 32, e seus respectivos componentes constituintes.

Figura 5 - Sistema SCR integrado ao Arla 32 com sensor NO_x



Fonte: Mercedes Benz (2011)

Quadro 01 – Componentes do Sistema SCR

| Item | Descrição | Item | Descrição |
|------|--------------------------------|------|--|
| 01 | Reservatório de Arla 32 | 08 | Válvula eletromagnética do aquecedor do reservatório |
| 02 | Módulo de Bomba | 09 | Injeção |
| 03 | Dispositivo de Dosagem | 10 | Linhas Agrupadas |
| 04 | Silencioso com catalisador SCR | 11 | Radiador |
| 05 | Válvula de Retenção | 12 | Motor |
| 06 | Válvula limitadora de pressão | 13 | Sensor NO _x com unidade controladora |
| 07 | Válvula 3/2 vias de ventilação | | |

Fonte: Mercedes Benz (2011)

Segundo a Mercedes Benz (2011), o módulo de bomba é quem retira o Arla 32 do reservatório, realiza a filtragem do mesmo e o transporta até o dispositivo de dosagem. Após isso, este dispositivo com o auxílio de uma válvula dosadora, acionada eletricamente, realiza a dosagem correta ao processo. Esta injeção ocorre quando um fluxo de ar comprimido, oriundo do próprio sistema de acessórios do veículo, flui através do dispositivo de dosagem, enviando o Arla 32 em forma de aerossol até um bico que o injeta ao fluxo dos gases de escape.

Este sistema de injeção de Arla 32 só inicia sua operação após o catalisador atingir a temperatura de 200° C. Este, por sua vez, é controlado e monitorado por um software (MR2) integrado à unidade de comando e controle do motor (MERCEDES BENZ, 2011).

Mercedes Benz (2011) ainda destaca que, como forma de prevenção ao congelamento do sistema, devido às baixas temperaturas de alguns países, as linhas de alimentação de Arla 32, módulo de bomba e o reservatório, são aquecidos com

líquido de arrefecimento. Este, controlado pela válvula eletromagnética do aquecedor do reservatório, de acordo com a temperatura.

Também são monitorados os níveis de emissão NO_x , nos gases de escape, pelo sensor NO_x . Quando ultrapassado o limite de 3,5 g/kWh, um alerta intermitente é emitido ao condutor do veículo. Caso o mesmo ignore a mensagem, e as emissões continuem a aumentar até que o valor atinja 7,0 g/kWh, o torque do motor é limitado em um intervalo de até 48 horas. (MERCEDES BENZ, 2011).

O torque do motor é limitado, pois consoante a BRUNETTI (2012) a formação do NO_x praticamente depende somente da temperatura da câmara de combustão. Esta redução do torque impacta diretamente na admissão de oxigênio e injeção de combustível na câmara de combustão, diminuindo assim a temperatura interna do cilindro, que conseqüentemente reduz as concentrações de NO_x .

b) aspectos positivos e negativos:

O uso de motores a diesel acarreta em emissões com teores de NO_x mais elevados principalmente por conta da elevada temperatura na câmara de combustão, sendo estas emissões acima dos padrões estabelecidos, e para reduzi-lo, sendo o maior ponto positivo deste, o Arla 32 é injetado no sistema de exaustão. Esse, reage com o NO_x na presença do SCR, gerando nitrogênio e vapor de água, e só então são lançados na atmosfera, cumprindo com os limites legais da fase P7 (AEA, 2016).

Existem poucos pontos negativos com o sistema do Arla 32, pois é um procedimento muito simples de utilizar. No entanto, quando se trata de DPF e SCR, podem ocorrer problemas de manutenção e reparo, pois eles são propensos a entupimento. Esses sistemas são complexos em design, mas um filtro simples entupido, pode provocar diferencial de pressões e temperaturas que podem afetar toda a performance do motor (CAPITAL REMAN, 2019).

Como foi mencionado, ainda que pareça um fluido de produção fácil, o Arla 32 demanda um alto controle de produção, uma vez que haja impurezas no fluido, que podem afetar o sistema SCR de diversas maneiras. Produtos que não utilizam água desmineralizada e não sintetizam a ureia de forma correta a partir da amônia e dióxido

de carbono, possuem um grau de impurezas alto, que podem levar a entupimento dos bicos de injeção, e contaminação do catalisador, diminuindo sua seletividade (MELO et al., 2015).

MELO et al. (2015), ainda expõe que, além de poder danificar o sistema SCR e o motor, uma injeção adequada do Arla, pode ser evitada pelas impurezas, limitando a conversão do NO_x no fluxo de exaustão do motor, fazendo assim, com que o veículo não respeite os limites de emissão estabelecidos pelas legislações reguladores vigentes.

Outro ponto relevante, é que a aplicação do Arla 32 em desconformidade com as especificações ou o uso de equipamentos ilegais aumenta as emissões de poluentes e gera danos ao veículo (AEA, 2016).

Greenchem (2017), ainda destaca que caso o Arla 32 não seja utilizado, o sistema SCR não funciona sem ele, e terá a reação oposta, aumentando as emissões de NO_x, levando o sistema de monitoramento do veículo a aumentar sua atividade para reduzir a poluição, ocasionando uma baixa na potência do motor.

Outro aspecto negativo do Arla, mencionado por Capital reman (2019), abrange o custo inicial maior para o veículo, peso nominal adicional e algum espaço para armazenar um galão extra de fluido.

Além disso, apesar do Arla 32 ser uma solução que não é inflamável, danoso ao meio ambiente, tóxica e ser de manuseio seguro, sendo classificada como produto de categoria de risco mínimo no transporte de fluídos, a uréia contém fator corrosivo para metais, como o alumínio, por isso, o agente deve ser transportado e armazenado em recipientes de aço inoxidável, assim como os tanques de armazenamento presente nos sistemas SCR. A recomendação é para que armazene o Arla em local seco, fresco, bem ventilado e fora da luz solar (ZHENG, 2011).

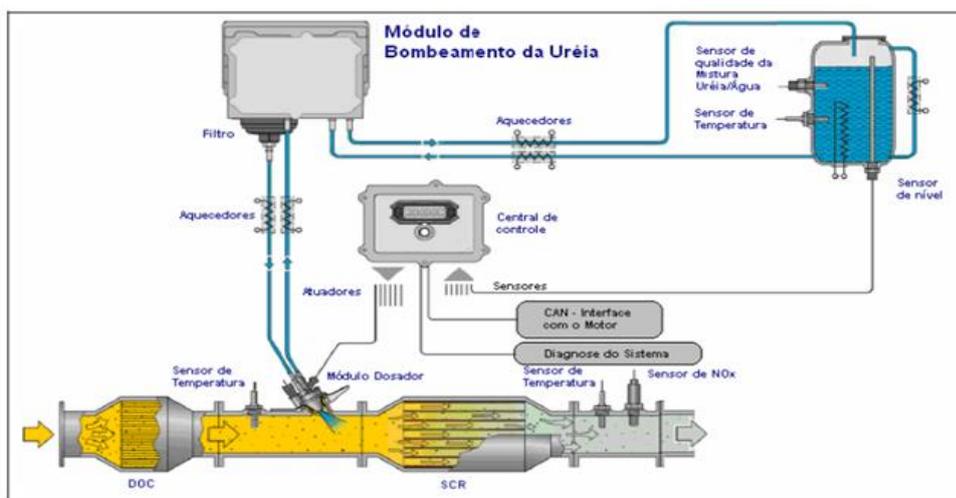
3.7 - SISTEMA SCR (REDUÇÃO SELETIVA CATALÍTICA)

a) Funcionamento:

Este sistema está condicionado a iniciar seu funcionamento quando a temperatura de escape do motor, já em operação, atingir determinado valor. Após isto, dois sensores, instalados na saída dos gases de combustão, monitoram esta temperatura. Quando atingida, o módulo eletrônico inicia o controle de injeção do Arla nos gases de escape, que conseqüentemente se misturam e passam pelo conversor catalítico SCR (PEREIRA, 2019).

Em seguida, este módulo de controle mantém o monitoramento das temperaturas enviadas pelos sensores, na entrada e saída do catalisador, para certificar-se de que a mesma está maior na saída em relação a de entrada, conforme figura 6. Quando esta condição ocorre, significa que a reação (catálise) está acontecendo conforme esperado (PEREIRA, 2019).

Figura 6 - Funcionamento do sistema SCR



Fonte: Pereira (2019).

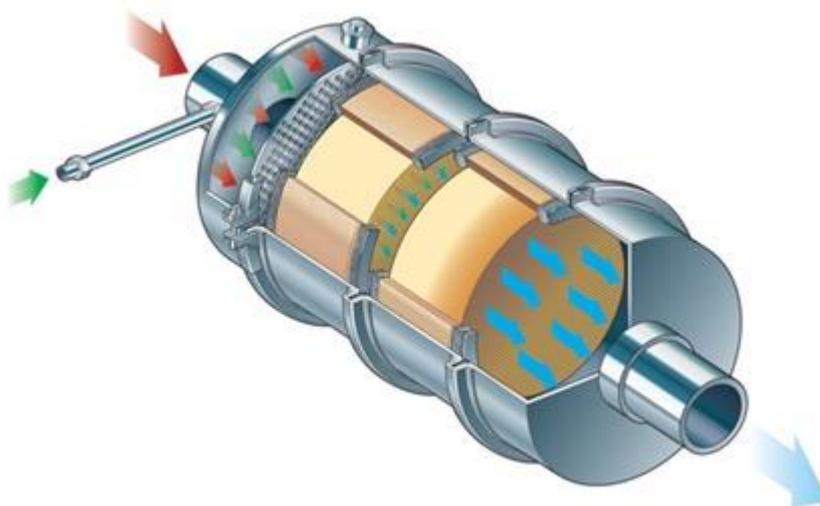
Pereira (2019) também destaca a presença do sensor de NO_x, que envia as informações atualizadas para o módulo de controle (ECU), no intuito de garantir que os níveis de poluentes foram reduzidos.

b) Redução Catalítica:

Segundo Matos (2013), os catalisadores são agentes que influenciam a velocidade de reação química em um determinado processo. Entretanto, não podem ser classificados como reagentes ou produtos da mesma, pois não sofrem alteração e nem são consumidos durante o processo.

Um catalisador do tipo SCR, conforme figura 7, é composto, basicamente, por um tubo de decomposição e um processador de gases. Aquele, também denominado de pré-câmara, tem por função canalizar a injeção vaporizada da mistura de ureia e água (Arla 32), otimizando a reação com os gases de escape que, conseqüentemente, melhoram a eficiência do processador de gases, no interior do catalisador (MATOS, 2013).

Figura 7 - Catalisador SCR em corte



Fonte: Matos (2013).

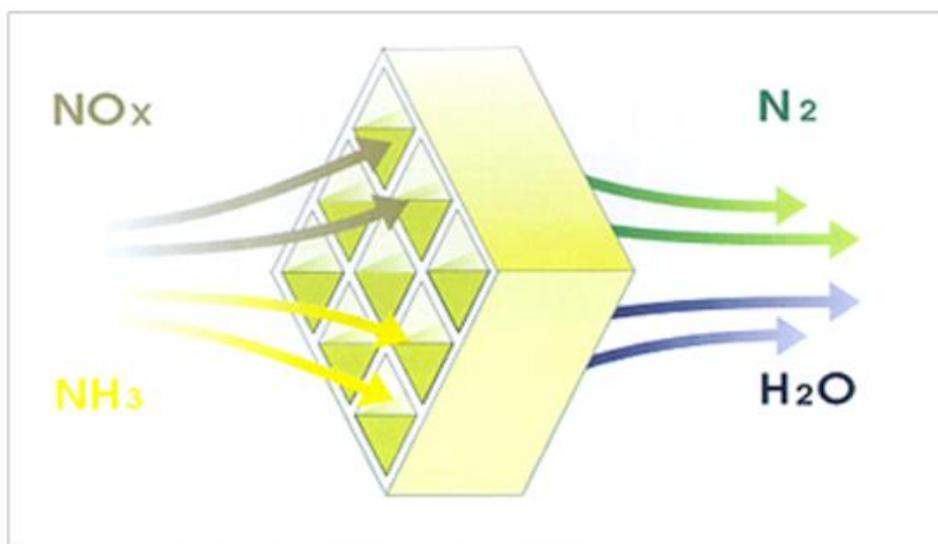
Matos (2013) ainda destaca que, no processo de vaporização da mistura de ureia e água, a solução é decomposta em $2\text{NH}_3 + \text{CO}_2$, conforme a equação 5 a seguir



Com o intuito de reduzir a formação de óxidos de enxofre e elevar a vida útil do catalisador, o modelo mais utilizado nos dias atuais, para os motores Diesel, é composto por óxido de vanádio (V_2O_5), dióxido de titânio (TiO_2) e trióxido de tungstênio (WO_3), sempre associado à combustíveis de baixo teor de enxofre (MATOS, 2013), na equação 6 e figura 8, pode-se observar a reação de oxirredução do NO_x no catalisador.



Figura 8 - Reação de oxirredução do NO_x no catalisador



Fonte: Matos (2013)

A mistura, da solução de Arla 32 vaporizada nos gases de escape, mais os elementos presentes no catalisador, reduzem o tempo de reação química, resultando na diminuição da concentração e presença do NO_x . Ou seja, por meio de uma oxirredução do nitrogênio (Equação 6 e Figura 8), prejudicial ao ambiente, o resultado obtido é apenas água e nitrogênio, que não representam risco algum à saúde (MATOS, 2013).

3.8 - SISTEMA EGR (RECIRCULAÇÃO DE GASES DE EXAUSTÃO)

Além do sistema SCR, apresentado no item 3.7, existem outros sistemas para tratamento dos gases de exaustão dos motores Diesel, e um dos principais é o sistema EGR a ser apresentado a seguir.

O Sistema EGR consiste em redirecionar parte dos gases de exaustão para a admissão do motor, o que torna diferentes as propriedades físicas e químicas da mistura gasosa de entrada do motor. De acordo Fernando (2006), a elevada temperatura no interior da câmara de combustão e o oxigênio em excesso são os principais fatores contribuintes para a geração de NO_x, o que é consoante a BRUNETTI (2012), que comenta que a formação do NO_x praticamente depende somente da temperatura da câmara de combustão, então é possível observar que a tecnologia EGR atua em ambos os fatores provocando a redução da geração dos poluentes supracitados. A redução da emissão de poluentes nesta técnica ocorre devido aos efeitos térmicos, químicos e de diluição.

Segundo Leavitt (2008), as vantagens que se tem do sistema EGR, são a não exigência de nenhuma ação por parte do motorista em relação à conformidade do sistema, sendo muito menos propensos a adulteração ou uso indevido, e a não utilização de fluido adicional para seu funcionamento.

Por funcionar com rotações altas, o EGR é menos vantajoso em caminhões. Ao reutilizar gases resfriados, o motor perde desempenho, o óleo lubrificante fica mais exposto à contaminação dos gases, o sistema se mostra bem mais sensível ao diesel de qualidade duvidosa, portanto ele é pouco utilizado frente ao sistema SCR (ESTADÃO, 2018).

4 - RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo, iremos abordar resultados obtidos através de pesquisas e estudos bibliográficos quanto a emissão de NO_x em motores de combustão a diesel.

Dentre os estudos serão abordados os resultados comparativos que são obtidos, no sistema SCR, entre a utilização e a não utilização do Arla 32, quanto às emissões de NO_x no escapamento de um veículo equipado com motor Diesel, bem como a demonstração da relação entre a frota de veículos a Diesel e a taxa de emissão de NO_x ao longo dos anos no Estado de São Paulo.

Também será abordado um estudo relacionado a um experimento quanto a emissão de NO_x em um motor a diesel testado em laboratório.

4.1 – EMISSÕES DE NO_x EM MOTOR DIESEL

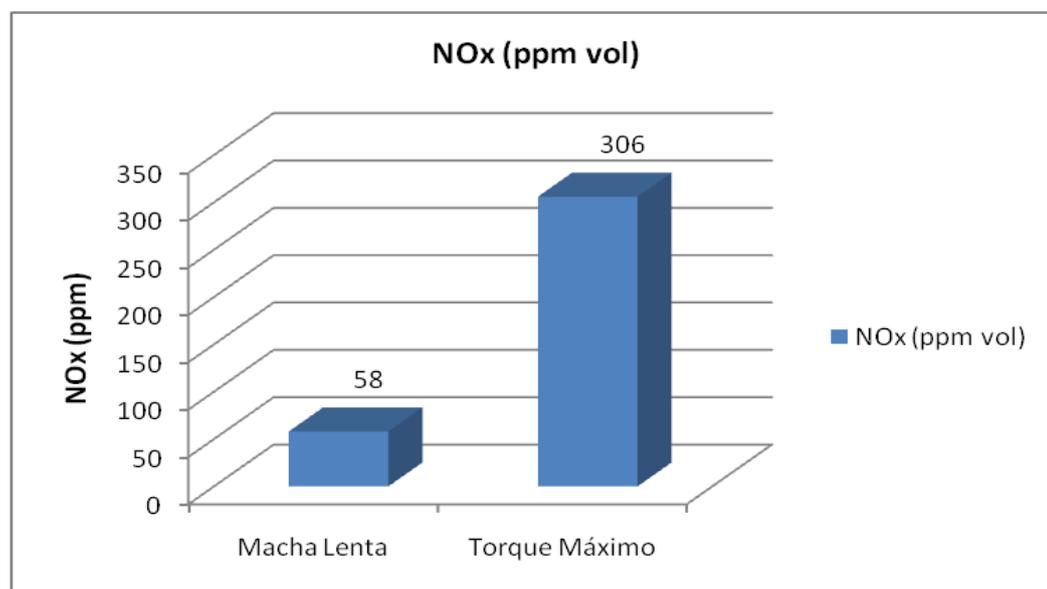
Cardoso e Romio (2019), realizaram um teste experimental quanto às emissões em motores de ciclo diesel. Neste estudo os autores realizaram testes de bancada utilizando dois tipos de combustível, sendo o diesel e etanol, mas para efeito de conexão com o tema do trabalho de conclusão de curso iremos abordar apenas os resultados obtidos nos testes utilizando o diesel como combustível.

Em seus testes Cardoso e Romio (2019), utilizaram um motor Fiat-GM 1.3 litro Multijet™ originalmente movido a óleo Diesel, com configuração de 4 cilindros em linha, duplo comando no cabeçote, 4 válvulas por cilindro e aspiração por turbo compressor, Além de possuir um diâmetro de cilindro de 82 mm e curso de 69,6 mm resultando em uma taxa de compressão de 18:1, atingindo a potência máxima de 70 CV a 4000 rpm e 180 Nm a 1750 rpm.

Os testes de Cardoso e Romio (2019) foram realizados na divisão de testes de motores do Instituto Mauá de Tecnologia, na qual o motor foi testado quanto às emissões de poluentes a Diesel em condição de marcha lenta e em condição de torque máximo por 30 minutos, todos de acordo com a norma ABNT NBR ISO 8178 – 2012.

Os resultados obtidos pelos testes, foram adaptados pelos autores deste trabalho, e serão apresentados de acordo com o Gráfico 1.

Gráfico 1 - Emissão de NO_x em motor a Diesel



Fonte: Adaptado dos Autores Cardoso e Romio (2019)

Conforme observado no gráfico 1, ambos os testes realizados no motor à Diesel, tiveram relevantes emissões de NO_x até mesmo na condição de marcha lenta, conforme Fernando (2006) cita em seu estudo, a elevada temperatura no interior da câmara de combustão e o oxigênio em excesso são os principais fatores contribuintes para a geração de NO_x.

E conforme o gráfico 1, as condições de torque máximo do motor foram as que mais contribuíram nas emissões de NO_x, o que BRUNETTI (2012) já alerta que a formação do NO_x praticamente depende somente da temperatura da câmara de combustão, e devido ao alto torque do motor, a temperatura e injeção de oxigênio aumentam ainda mais, o que resulta na elevação das emissões de NO_x apresentadas acima.

Outro fator a se observar no gráfico 1, é a correlação com os dados apresentados pela Mercedes Benz (2011), que diz que o torque do motor é limitado em um intervalo de até 48 horas caso as emissões de NO_x continuem a aumentar, o que é correlato com o estudo apresentado acima, visto que o torque do motor está diretamente ligado com a emissão de NO_x.

4.2 – INJEÇÃO DE ARLA 32

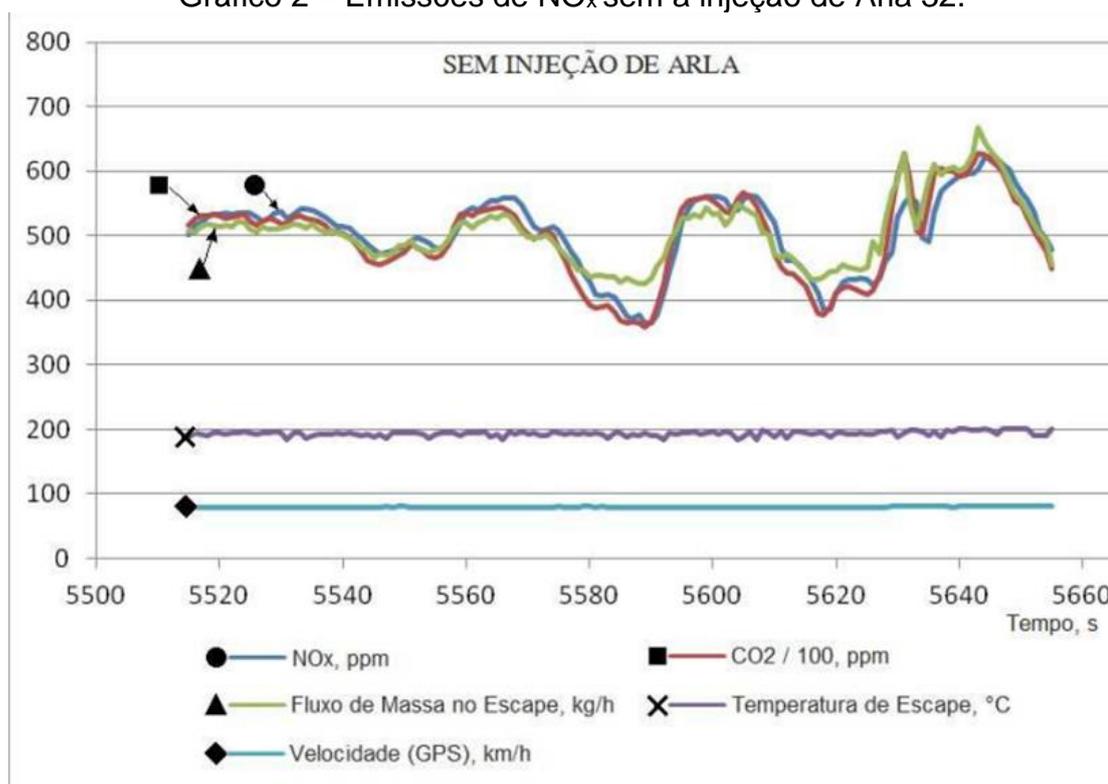
Estudos como o do Ibama (2016) demonstram que o Arla 32 é utilizado para controlar as emissões de óxidos de nitrogênio (NO_x), que saem no gás de escapamento dos veículos com motores a diesel.

Visto que o NO_x é um dos poluentes de maior preocupação no meio ambiental conforme detalha a Cetesb (2019), iremos abordar neste capítulo, estudos realizados por Melo et al (2015) com relação a eficiência da utilização do Arla 32 em motores a Diesel.

Para a realização do referido estudo, Melo et al (2015) realizou ensaios quanto a emissão de NO_x no escapamento de um caminhão, com o sistema SCR embarcado ao mesmo. Também foi utilizado o equipamento de medição de emissões “on-board” chamado PEMS (Portable Emission Measurement System), sendo este capaz de realizar diversas leituras em tempo real de vários tipos de poluentes emitidos pelo caminhão.

Neste contexto, Melo et al (2015) utilizou o caminhão em vias públicas, e com velocidade constante de 80 km/h a ser controlado via piloto automático, que acabou gerando picos e vales nas emissões por conta de variações na pista e força do vento por exemplo, que fazem com que a aceleração do motor seja alterada.

O gráfico 2, presente a seguir apresenta a oscilação, ao longo de um intervalo de tempo, para cada variável do processo monitorada: - Concentração de NO_x; - Fluxo de Massa e Temperatura no escapamento; - Velocidade do veículo e CO₂/100 em ppm.

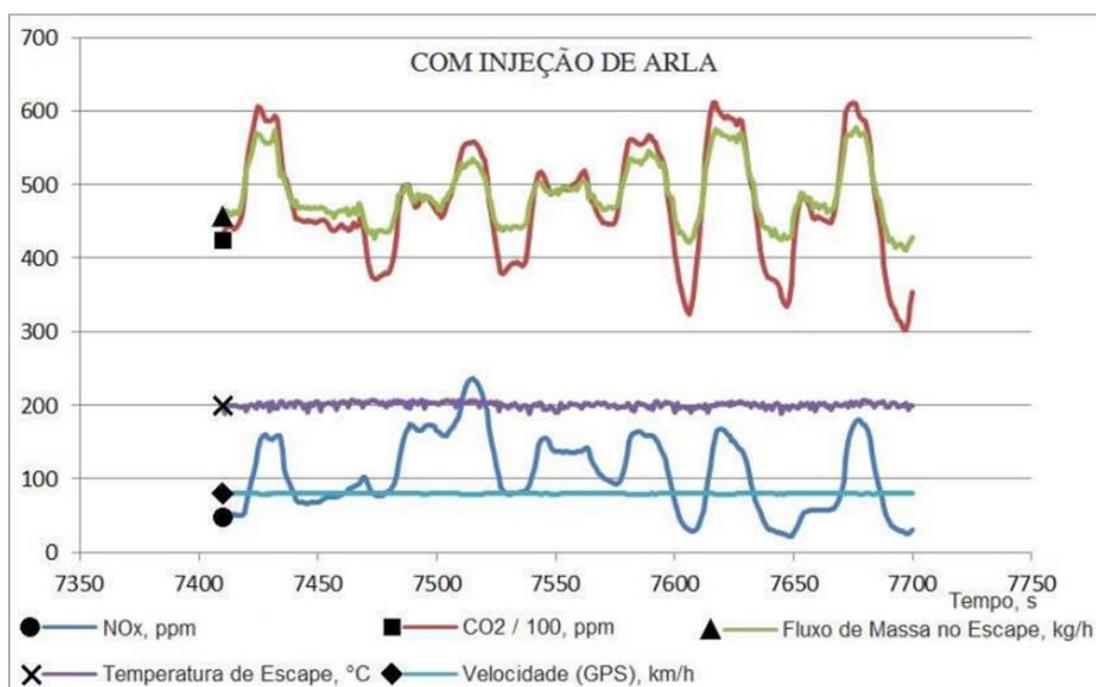
Gráfico 2 – Emissões de NO_x sem a injeção de Arla 32.

Fonte: Melo et al (2015)

Observa-se no gráfico 2, que a velocidade do caminhão permaneceu constante juntamente com a temperatura do escape, e que as oscilações de gases no escape têm oscilações semelhantes, consoantes umas às outras.

Outro ponto a se observar no gráfico 2, são os picos e vales do sistema, que tem correlação a aceleração do caminhão, que acaba sendo alterada devido a força de atrito do vento e do asfalto.

O gráfico 3, na página seguinte, ilustra os resultados alcançados com a injeção do Arla 32 ao sistema de redução catalítica presente no caminhão testado por Melo et al (2015), em um intervalo de tempo posterior ao teste realizado do gráfico 2.

Gráfico 3 - Emissões de NO_x com a injeção de Arla 32

Fonte: Melo et al (2015)

O Primeiro fator que se pode observar é uma redução acentuada na emissão de NO_x no gráfico 3 (com injeção de Arla 32), quando comparado ao gráfico 2 (sem injeção de Arla 32). Isso reforça o que Matos (2013) explica no referencial bibliográfico quanto à Oxirredução do Nitrogênio, que ocorre quando a solução de Arla 32 é injetada nos gases de escape que antecedem o catalisador.

Outro ponto que pode-se destacar é, os níveis de CO₂ e o Fluxo de Massa no Escapamento, se mantiveram praticamente nos mesmos patamares entre os gráficos 2 e 3, Isso indica que, a utilização do Arla 32 exerce pouca ou nenhuma influência no comportamento das emissões destas variáveis, ou seja, se resume e se destina apenas ao controle de NO_x ao meio externo.

Com o intuito de melhor demonstrar quantitativamente os resultados comparativos entre os cenários acima, adaptamos a tabela 1 dos autores Melo et al. (2015):

Tabela 01 – Dados comparativos com e sem o uso do Arla 32

| Variáveis do Processo | Média Sem Arla 32 | Média Com Arla 32 | Variação (%) |
|--|--------------------------|--------------------------|---------------------|
| NO_x (ppm) | 505 | 107 | 78,8 |
| CO₂/100 (ppm) | 498 | 473 | 5,0 |
| Fluxo de Massa no Escape (kg/h) | 507 | 487 | 3,9 |
| Temperatura de Escape (°c) | 193,5 | 200,2 | 3,5 |
| Velocidade do veículo (km/h) | 79,7 | 79,6 | 0,1 |

Fonte: Adaptado dos autores Melo et al. (2015)

Perante os dados da Tabela 01, podemos visualizar o que relata Greenchem (2017), quando diz que a injeção do Arla 32 no sistema de redução catalítica seletiva, é capaz de diminuir em até 90% a presença do NO_x no escapamento. Nos testes em questão, foram reduzidos em quase 80%, comprovando a eficiência deste sistema e a teoria em literatura.

Por outro lado, quando analisamos as variações de CO₂ e Fluxo de Massa em dados numéricos, constatamos que de fato a influência exercida pelo Arla 32 nestas variáveis é bem pequena, o que reforça nossa constatação realizada anteriormente ao analisar apenas as figuras 20 e 21.

4.3 – EMISSÕES DE NO_x NO ESTADO DE SÃO PAULO

Com o intuito de demonstrar resultados a respeito da utilização do Arla 32 para a redução das emissões de NO_x, analisou-se dados obtidos do CETESB e IBGE de forma que se possa traçar uma correlação de influência da utilização do Arla 32 com as reduções de NO_x.

A tabela 02, demonstra a evolução da frota de veículos equipados com motores a Diesel, no estado de São Paulo, ao longo de um período de 15 anos.

Tabela 02 – Evolução da frota de veículos a Diesel no estado de São Paulo

| ANO | CAMINHÃO | ÔNIBUS | TOTAL VEÍCULOS |
|------------|-----------------|---------------|-----------------------|
| 2006 | 490.455 | 102.322 | 592.777 |
| 2007 | 513.029 | 109.745 | 622.774 |
| 2008 | 538.356 | 117.235 | 655.591 |
| 2009 | 557.795 | 121.105 | 678.900 |
| 2010 | 582.761 | 126.880 | 709.641 |
| 2011 | 609.154 | 134.659 | 743.813 |
| 2012 | 626.913 | 140.654 | 767.567 |
| 2013 | 643.241 | 145.166 | 788.407 |
| 2014 | 658.713 | 150.518 | 809.231 |
| 2015 | 664.617 | 153.113 | 817.730 |
| 2016 | 669.056 | 155.317 | 824.373 |
| 2017 | 672.998 | 156.750 | 829.748 |
| 2018 | 678.933 | 159.712 | 838.645 |
| 2019 | 688.249 | 164.507 | 852.756 |

Fonte: Adaptado do Autor IBGE (2021)

Conforme dados acima, a quantidade de veículos sofreu um aumento de aproximadamente 44% entre os anos de 2006 e 2019. Além disso, a tendência média de crescimento da frota, durante este período analisado, é de cerca de 3% ao ano.

Outra informação relevante, foi divulgada pelo CETESB (2019) em seu estudo sobre emissão veicular, é a massa de NO_x emitida no estado de São Paulo entre os períodos de 2006 e 2019, conforme a Tabela 03 na página seguinte.

Tabela 03 – Massa de NO_x emitida em São Paulo

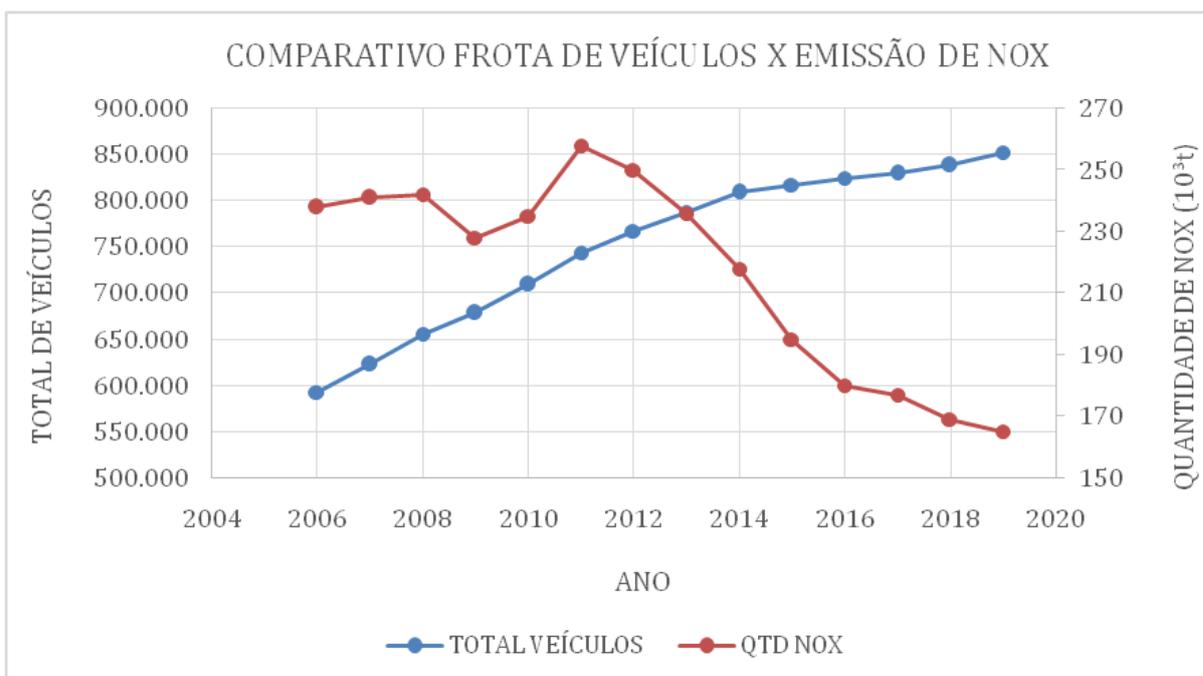
| ANO | NO_x (10³ t) |
|------------|--|
| 2006 | 238 |
| 2007 | 241 |
| 2008 | 242 |
| 2009 | 228 |
| 2010 | 235 |
| 2011 | 258 |
| 2012 | 250 |
| 2013 | 236 |
| 2014 | 218 |
| 2015 | 195 |
| 2016 | 180 |
| 2017 | 177 |
| 2018 | 169 |
| 2019 | 165 |

Fonte: Adaptado do Autor CETESB (2022)

Conforme a tabela 03, a massa de NO_x recuou cerca de 31% entre 2006 comparado a 2019. Uma redução média de 2,6% ao ano, com ênfase aos períodos de 2014 a 2015, que teve a maior queda registrada (-10,6%) dentre as demais.

Esta redução dos níveis de emissão de NO_x tem correlação com a implementação da obrigatoriedade da utilização do Arla 32 em veículos pesados a Diesel, Mas é importante salientar que outros fatores também contribuem para a redução nas emissões de NO_x, tais como a utilização de biocombustíveis, utilização de veículos elétricos, rodízio de veículos, de forma estimulada pelo Estado entre outros.

Para melhor exemplificar, aglutinou-se as informações da tabela 2 e 3, e criou-se o gráfico 04, presente na próxima página, que ilustra exatamente o comportamento e a comparação entre a quantidade da frota de veículos a Diesel e a massa de NO_x emitida no Estado de São Paulo, ao longo dos anos, entendendo que a frota de veículos em funcionamento, que utiliza o sistema SCR pode contribuir para esta redução, contudo ela não é a única variável a ser a causadora deste fenômeno.

Gráfico 04 – Comparativo frota de veículos e Emissão de NO_x

Fonte: Autores (2022)

Fica evidente que, justamente após o ano de 2012 (implementação do Proconve P7 que obriga a utilização do Arla 32), começa a tendência de queda na emissão de NO_x no estado de SP. Esta, por sua vez, continua em declive ao longo dos anos, embora a frota de veículos se comporte de maneira inversa, ou seja, em em uma tendência de elevação a cada ano que se passa.

Conforme observado, a linha das emissões de NO_x, apresentou uma queda acentuada de 2,6% ao ano, sendo aos períodos de 2014 a 2015 com a maior queda registrada (-10,6%) dentre as demais, sendo que no ano de 2019 apresentou a mínima histórica dentre o período analisado, de aproximadamente 165000 toneladas.

Ainda sobre o Gráfico 04, observa-se que a quantidade de veículos aumentou aproximadamente 44% entre os anos de 2006 e 2019, tendo uma média de crescimento de 3% ao ano, sendo que o ano de 2019 apresentou 852.756 veículos pesados a diesel no Estado de São Paulo.

5 – CONCLUSÃO

Com o presente estudo, observou-se que os motores Diesel são grandes emissores de NOX para a atmosfera. Diante dos estudos expostos, observou-se que motores Diesel emitem NOX até mesmo em condição de marcha lenta, o que acaba sendo prejudicial ao meio ambiente.

Também foi possível concluir com o presente trabalho que a utilização do Arla 32 em motores a Diesel, equipados com o sistema SCR, possui influência na redução de até 80% das emissões de NO_x ao meio externo. Assim, contribui de forma direta para um ar de maior qualidade nos grandes centros urbanos, o que conseqüentemente traz maiores benefícios à saúde humana.

Além disso, notou-se que a frota de veículos a Diesel tem aumentado a cada ano, entretanto, as emissões de NO_x não acompanharam essa tendência de elevação, muito pelo contrário, constatamos que após a implementação do Arla 32 ocorreu uma redução do percentual emitido desses gases, entendendo que também existem outros fatores que podem impactar nesta redução tais como a utilização de biocombustíveis, utilização de veículos elétricos, rodízio de veículos, de forma estimulada pelo Estado entre outros. O que comprova todos os benefícios trazidos por esta tecnologia e demonstra o avanço das práticas de combate às emissões de poluentes, bem como a preocupação em manter o equilíbrio entre a demanda de veículos, mundial, e a sustentabilidade.

6 - REFERÊNCIAS

ABREU, Mauricio Lobo. OCORRÊNCIA DE CHUVA ÁCIDA EM UNIDADES DE CONSERVAÇÃO DA NATUREZA URBANAS – ESTUDO DE CASO NO PARQUE ESTADUAL DA PEDRA BRANCA – RIO DE JANEIRO - RJ. Orientador: Olavo Barbosa Filho Ph. D. 2005. Dissertação de Mestrado (Engenharia Ambiental) - Universidade do Estado do Rio de Janeiro, [S. l.], 2005. Disponível em: <http://www.peamb.eng.uerj.br/trabalhosconclusao/2005/MauricioLoboAbreuPEAMB2005.pdf>. Acesso em: 30 nov. 2022.

ALABI, E. L. Geografia o homem no espaço global. São Paulo 1997

AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS. **Óleo diesel**. Ministério de Minas e Energia, 2020. Disponível em: <https://www.gov.br/anp/pt-br/assuntos/producao-de-derivados-de-petroleo-e-processamento-de-gas-natural/producao-de-derivados-de-petroleo-e-processamento-de-gas-natural/oleo-diesel>. Acesso em: 25 maio 2022.

Associação Brasileira de Engenharia Automotiva (AEA). **CARTILHA DE CONSCIENTIZAÇÃO PÚBLICA DO USO DO ARLA 32**. São Paulo, 2017

BAUKAL, Charles E. The John Zink Combustion Handbook. CRC Press, Boca Raton, Florida, 2001

BOSCH, Peter. The European Environment Agency focuses on EU-policy in its approach to sustainable development indicators. Statistical Journal of the United Nations Economic Commission for Europe, v. 19, n. 1-2, p. 5-18, 2002.

CAMPEDELLI, Roberta Ruschel. **Determinação do número de cetano através de medidas do tempo de retardo da ignição nos motores Diesel**. 2012. Disponível em: <https://www.lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/55891/000859421.pdf?sequence=1&isAllowed=y>>. Acesso em: 30 maio de 2022.

CAPITAL REMAN. **20 Facts You Need To Know About Diesel Exhaust Fluid (DEF)**. 2019. Disponível em: <<https://www.capitalremanexchange.com/20-facts-you-need-to-know-about-diesel-exhaust-fluid-def/>>. Acesso em: 1 jun. 2022.

CARDOSO, Matheus Simões; ROMIO, Renato. **AValiação DAS EMISSÕES DE GASES POLUENTES POR MOTOR DE COMBUSTÃO INTERNA DE CICLO DIESEL EM OPERAÇÃO EXPERIMENTAL COM ETANOL**. [S. l.], 2019. Disponível em: <https://maua.br/files/122018/avaliacao-das-emissoes-gases-poluentes-por-motor-combustao-interna-ciclo-diesel-operacao-experimental-com-etanol-281646.pdf>. Acesso em: 8 nov. 2022.

CETESB (São Paulo). **Emissão Veicular**. In: CETESB (São Paulo). **Emissão Veicular**. [S. l.], 2022. Disponível em: <https://cetesb.sp.gov.br/veicular/>. Acesso em: 5 out. 2022.

COMO FUNCIONA o motor a diesel e suas vantagens. In: REVISTA CULTIVAR. **Como funciona o motor a diesel e suas vantagens**. [S. l.], 2021. Disponível em: <https://revistacultivar.com.br/noticias/como-funciona-o-motor-a-diesel-e-suas-vantagens>. Acesso em: 4 nov. 2022.

DA SILVA, Gabriel; JÚNIOR, Luiz; NERY, Laiane. **Economic-Financial Analysis of an Investment of Tanks for ARLA 32 at the Fleet of a Transportation Company**. Independent Journal of Management & Production, vol. 8, n. 5, 2017.

ENGINEER, T. **Electronic Diesel Control (EDC) Components and Working Principles**. 2022. Disponível em: <<https://innovationdiscoveries.space/electronic-diesel-control-edc-components-and-working-principles/>>. Acesso em 22 maio. 2022.

FARAH, A. M. **Petróleo e seus Derivados: Definição, constituição, aplicação, especificações e características de qualidade**. São Paulo: Editora LTC, 2012.

FARAH, E.L. **Licões e decorrências do PROCONVE P-7**. In: Seminário sobre Emissões AEA 2014. São Paulo. Associação Brasileira de Engenharia Automotiva AEA. Abril de 2014.

FERNANDO, S; HALL, C; JHA, S. NO x reduction from biodiesel fuels. Energy & Fuels, v. 20, n. 1, p. 376-382, 2006.

FLEXA, Arsenio. Et al. SCR – Selective Catalytic Reduction – Para atender legislações IV E V: linhas aquecidas para dosagem de ureia. São Paulo, maio 2007

GALDINO, Tevenilson Gustavo. **Tecnologias para controle das emissões de nox em motores diesel – proconve p7**. Natal, 2021. Disponível em: https://repositorio.ufrn.br/bitstream/123456789/38076/3/TecnologiasParaControle_Galdino_2021.pdf. Acesso em: 22 Mai 2022.

GAUKMOTORS. **Injeção indireta em um motor de combustão interna onde o combustível não está diretamente injetado dentro da câmara de combustão**. 2016. Disponível em: <https://gaukmotors.co.uk/post/indirect-injection> Acesso em: 26 maio 2022.

GIROTTI. **Diferenças entre EUI, HEUI e Common Rail - Girotti Injeção Diesel**. 2020. Disponível em: <https://girotti.com.br/diferencas-entre-eui-heui-e-common-rail/>. Acesso em: 22 jun. 2022.

GREENCHEM. **What is an SCR system?**, 2017 . Disponível em: <https://www.greenchemadblue.com/scr-system>. Acesso em: 15 jun. 2022.

IBAMA. **Cartilha orienta uso do Arla 32 para controle das emissões de poluentes**. Disponível em: <http://www.ibama.gov.br/noticias/58-2016/132-cartilhaorienta-uso-do-arla-32-para-controle-das-emissoes-de-poluente>>. Acesso em: 23 mai. 2022.

IBAMA. Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis.

Programa de controle da poluição do ar por veículos automotores – PROCONVE/PROMOT/IBAMA, 3 ed. Brasília: IBAMA/DIQUA, 2011. 584p. (Coleção Meio Ambiente. Série Diretrizes – Gestão Ambiental, nº 3) ISBN 978-85-7300-358-1. ISSN 1415-1901.

IBGE. Frota de Veículos. *In: Frota de Veículos*. [S. l.], 2022. Disponível em: <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/pesquisa/22/28120?indicador=28123&tipo=grafico>. Acesso em: 10 out. 2022.

IEMA. **ANÁLISE PRELIMINAR SOBRE A IMPLANTAÇÃO DO PADRÃO EURO VI NO BRASIL**. 2015. São Paulo. Disponível em: <https://iema-site-staging.s3.amazonaws.com/Avalia%C3%A7%C3%A3o_EURO_VI_3.pdf>. Acesso em: 1 jun. 2022.

KELLER, Vitor. **ARLA 32: Otimização do Processo de Análise de Qualidade em um Laboratório**. 2021. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Química) - Universidade Federal Fluminense, Escola de Engenharia, Niterói-RJ, 2021.

KHAIR, Magdi K.; JÄÄSKELÄINEN, Hannu. **Injeção de Combustível Diesel**. 2020. Disponível em: <https://dieselnet.com/tech/diesel_fi.php>. Acesso em: 25 maio 2022.
KNOTHE, G. **A história dos combustíveis derivados de óleos vegetais**. *In: KNOTHE, G.(Org); VAN GERPEN, J.; KRAHL, J. Manual de Biodiesel*. Tradução: Luiz Pereira Ramos. São Paulo: E Blucher, 2006. p.5-18.

LEAVITT, Wendy. SCR ou EGR?. Fleet Owner, 2008. Disponível em: <<https://www.fleetowner.com/operations/article/21666958/scr-or-egr>>. Acesso em: 25 nov. 2022.

MATOS, heverton. **Sistema de redução catalítica de nox com injeção de uréia**. Santo André, 2013. Disponível em: <http://fatecsantoandre.edu.br/arquivos/TCC213.pdf>. Acesso em: 26 Abr 2022.

MELO, Tadeu de et al. **Efeito da Qualidade da Solução de Arla 32 na Eficiência do Scr, nas Emissões de Nox e no Sistema de Injeção de Arla**. 2015.

Mercedes Benz. **Sistema SCR (Redução Catalítica Seletiva)**, 2011. Disponível em: <<https://idoc.pub/download/278689667-apostila-scr-doc-arla-32-ylyxyxpqenm>>. Acesso em: 01 abril 2022.

MILHOR, Carlos Eduardo. **Sistema de Desenvolvimento para Controles Eletrônicos dos Motores de Combustão Interna Ciclo Otto**. Mestrado-escola de Engenharia, Universidade de São Paulo, São Carlos, [2002].

MIYASAKI, FERNANDA VIANA. **Determinação experimental da densidade e viscosidade de misturas BX a partir de biodiesel produzido do óleo de pinhão manso**. 2021. Disponível em: <https://repositorio.unesp.br/bitstream/handle/11449/214947/miyasaki_fv_tcc_rosa.pdf?sequence=6&isAllowed=y>. Acesso em: 31 maio 2022

MUNDIAL TURBINAS. **Injeção Eletrônica Diesel: tudo o que você precisa saber sobre o procedimento**. 2020. Disponível em: <<https://mundialturbinas.com/injecao-eletronica-diesel/>>. Acesso em: 30 maio. 2022

PEPPER, Robert. **All about adblue, diesel exhaust fluid (DEF) and selective catalytic reduction (SCR)**. 2017. Disponível em: <<https://practicalmotoring.com.au/4x4/all-about-adblue-diesel-exhaust-fluid-and-selective-catalytic-reduction-scr/>>. Acesso em: 20 mai. 2022.

PEREIRA, David. **Análise dos métodos de controle e redução dos poluentes emitidos pelos motores de combustão interna no Brasil**. 2019. Disponível em: <https://app.uff.br/riuff/handle/1/16024>. Acesso em: 10 Mar 2022.

PETROBRAS. **Óleo diesel: Informações técnicas. Coordenação de assistência técnica**. Disponível em: https://petrobras.com.br/data/files/04/93/72/4C/5A39C710E2EF93B7B8E99EA8/Manual-de-Diesel_2021.pdf Acesso em: 25 maio 2022.

PIMENTA, Daniel. **Estudo da Influência do Biodiesel no Funcionamento de um Motor Diesel**. 2008. 79. Mestrado- Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto, Cidade do Porto, 2008.

RODRIGUES, Eduardo. **Manutenção e eficácia do sistema SCR para reduzir os níveis de emissão de poluentes, provenientes de motores a diesel**. 2019.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Mecânica) - Centro Universitário UNIFACVEST, Lages-SC, 2019.

SALA, JOSÉ ANTÔNIO. **Desempenho de um motor diesel injeção indireta em função da variação do teor de biodiesel**. 2008. Disponível em: <<https://repositorio.ufsm.br/bitstream/handle/1/7506/JOSEANTONIOSALA.pdf?sequence=1&isAllowed=y>>. Acesso em: 31 maio 2022.

SILVERA, Fernando: **Máquinas Térmicas de Combustão Interna de Otto e Diesel**. Instituto de Física da UFRGS, Rio Grande do Sul, 2008. Disponível em: <http://www.if.ufrgs.br/~lang/Textos/maqterm.pdf>. Acesso em: 24 abr. 2022.

SIMÊNCIO, Éder. **Motores de Combustão Interna**. Londrina: Editora e Distribuidora Educacional, 2019.

STUDENTLESSON. **Entendendo um sistema de injeção indireta**. 2020. Disponível em: <<https://studentlesson.com/indirect-injection-definition-functions-components-working/>> Acesso em: 26 mai. 2022.

WEB MOTORES. **Injeção eletrônica: direta x indireta**. 2020. Disponível em: <<https://www.webmotors.com.br/wm1/dicas/injecao-eletronica-indireta-x-direta>>. Acesso em: 26 mai. 2022.

ZAMBONI, Aemilson *et al.* ANÁLISE PRELIMINAR SOBRE A IMPLANTAÇÃO DO PADRÃO EURO VI NO BRASIL. **Instituto de energia e meio ambiente**, [S. l.], p. 1-56, 2 fev. 2015. Disponível em: <https://docplayer.com.br/37164712-Analise-preliminar-sobre-a-implantacao-do-padrao-euro-vi-no-brasil.html>. Acesso em: 1 nov. 2022.

ZHENG, M.; READER, G.T.; HAWLEY, J.G.. **Diesel engine exhaust gas recirculation – a review on advanced and novel concepts**. Elsevier, Energy Conversion & Management n° 45, p. 883-900, 2004. Disponível em: (PDF) Diesel Engine Exhaust Gas Recirculation — A Review on Advanced and Novel Concepts (researchgate.net). Acesso em: 15 Mai. 2022.

