

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ

JÉSSIMON FERREIRA

**DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA ELETRÔNICO PARA MONITORAMENTO
DA EFICIÊNCIA DE UM CATALISADOR SCR**

PONTA GROSSA

2022

JÉSSIMON FERREIRA

**DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA ELETRÔNICO PARA MONITORAMENTO
DA EFICIÊNCIA DE UM CATALISADOR SCR**

Development of a sensor for monitoring the efficiency of an SCR catalyst

Tese apresentada como requisito parcial à obtenção do título de Doutor em Engenharia de Produção, do Departamento de Engenharia de produção, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Dr. Angelo Marcelo Tusset

Coorientadora: Profa. Dra. Giane Gonçalves Lenzi

PONTA GROSSA

2022



Esta licença permite remixe, adaptação e criação a partir do trabalho, para fins não comerciais, desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es) e que licenciem as novas criações sob termos idênticos. Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.



JESSIMON FERREIRA

**DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA ELETRÔNICO PARA MONITORAMENTO DA
EFICIÊNCIA DE UM CATALISADOR SCR**

Trabalho de pesquisa de doutorado apresentado como requisito para obtenção do título de Doutor Em Engenharia De Produção da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR). Área de concentração: Gestão Industrial.

Data de aprovação: 16 de Dezembro de 2022

Dr. Angelo Marcelo Tusset, Doutorado - Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Dr. Clivaldo De Oliveira, Doutorado - Universidade Federal da Grande Dourados (Ufgd)

Dra. Joseane Pontes, Doutorado - Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Dra. Leda Maria Saragiotto Colpini, Doutorado - Universidade Federal do Paraná (Ufpr)

Dra. Regina Negri Pagani, Doutorado - Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Documento gerado pelo Sistema Acadêmico da UTFPR a partir dos dados da Ata de Defesa em 16/12/2022.

“Tudo posso, naquele que me fortalece”.

Dedico esse trabalho aos meus irmãos e irmã.
Vandrê, meu irmão caçula, um dia estaremos
juntos novamente. Não agora, mas um dia
estaremos.

Dedico esse trabalho aos meus pais. Tudo o que
eu sempre quis, é dar orgulho a eles. A minha
mãe, na sua simplicidade eterna se contenta em
saber que sou uma pessoa feliz. Meu pai com as
sábias palavras, uma vez me falou. Não espere
reconhecimento financeiro porque ela pode não
acontecer. Mas com certeza, como professor você
terá o reconhecimento pessoal, e proferiu a
seguinte parábola. “Você pode ter e não ser
reconhecido, você pode não ter e ser reconhecido.
O que você realmente está procurando?”. Logo
após, me fortaleci na minha Tese pois eu descobri
o que eu realmente queria.

AGRADECIMENTOS

Ao concluir esse trabalho acadêmico, me olhei no espelho e perguntei a mim mesmo: como consegui? Claro que, em um primeiro momento, me lembrei das noites em claro, abdições pessoais, dores musculares, de cabeça e do meu estômago, devido à muita cafeína. Mas logo em seguida me perguntei novamente se eu conseguiria alcançar o objetivo final sozinho. Não, claro que não. E de coração aberto, faço os meus agradecimentos.

Aos professores, Aldo Braghini Jr., Cassiano Moro Piekarski, Flavio Trojan, Giane Gonçalves Lenzi, João Luiz Kovaleski. Foi uma honra compartilhar dos conhecimentos.

Aos professores que participaram da banca examinadora, brilhantes considerações que guiaram a confecção final deste trabalho.

Ao professor Ângelo Marcelo Tusset, meu orientador. Ele é o grande responsável pela mudança do meu perfil profissional. Hoje, me vendo como um Doutor formado pela Universidade Tecnológica Federal do Paraná, é graças ao professor Ângelo, que acreditou e investiu em mim. E se torna a minha inspiração para ser um grande professor e sempre estar à disposição do próximo. Ele apostou em mim mais do que eu mesmo.

À minha esposa, que sempre me apoiou e incentivou. Sempre deixando o ambiente leve e agradável para o meu trabalho.

Aos meus amigos Leandro Mota e Atila Ribas, sempre me auxiliando nas traduções.

Agradeço à disponibilidade dos recursos físicos e de materiais fornecido pela UTFPR, do laboratório do SENAI de Telêmaco Borba-PR e Rio do Sul-SC, que com a infraestrutura disponibilizada, foi possível realizar simulações que validaram o projeto.

Agradeço a DEUS pelas oportunidades, pois se segui em frente. É pela certeza que veio DELE. E se assim eu acreditei, sabia que iria dar tudo certo. Agradeço também por ter devolvido meu filho caçula de volta à minha vida.

RESUMO

Catalisadores são equipamentos utilizados em veículos automotores, mais precisamente em veículos à combustão interna, integrados no sistema de exaustão dos gases pós-combustão. Em países comprometidos com preservação do meio ambiente, a sua utilização é promovida por força de lei, pois quando ativado, pode reduzir em até 98% os gases nocivos gerados pela combustão interna ocasionada pela mistura entre ar/combustível. A redução dos gases nocivos pode impactar, principalmente, na mitigação de casos de doença respiratória na população de grandes centros urbanos. A escolha de se pesquisar a influência desses gases na linha pesada à diesel, deve-se ao fato de haver poucas pesquisas relacionadas ao tema. Neste contexto, o estudo apresenta o projeto e desenvolvimento de um dispositivo eletrônico com capacidade de monitorar, através da temperatura dos gases, o funcionamento de um catalisador automotivo da linha de veículos pesados à diesel. A monitoração tem como objetivo principal a avaliação do estado de funcionamento do dispositivo catalítico e de forma proposital, podendo elaborar uma linha temporal do ciclo de vida funcional do catalisador. As variáveis de temperatura e gases NO_x , foram criteriosamente escolhidas para análise. O catalisador SCR, objeto de estudo desse trabalho, só entra em ativação após ser submetido a um valor inicial mínimo de temperatura, podendo atingir seu valor ótimo diante de uma reação química entre os gases de pós-combustão e os metais nobres incorporados internamente nos catalisadores. Esse valor ótimo é de grande pertinência, pois se coloca como responsável pela decomposição da ureia que é injetada de forma paralela aos gases na entrada do catalisador. A decomposição da ureia é responsável pela redução catalítica dos gases. O monitoramento do funcionamento do catalisador tem como motivação final avaliar se os gases NO_x estão sendo convertidos na saída do catalisador em H_2O e N_2 .

Palavras-chave: veículos pesados; motor à combustão; motor a diesel; catalisador veicular; gases NO_x ;

ABSTRACT

Catalysts are equipment used in motor vehicles, more precisely, in internal combustion vehicles and are integrated in the exhaust system of post combustion gases. In countries committed to preserving the environment, its use is promoted by law, because when activated, it can reduce by up to 98% the harmful gases generated by internal combustion caused by the air/fuel mixture. The reduction of harmful gases can impact the mitigation of cases of respiratory disease, mainly in the population of large urban centers. The choice of researching the influence of these gases in the diesel heavy-duty line is due to the fact that there is little research on the subject. In this context, this work presents the design and development of an electronic device capable of monitoring, through the temperature of the gases, the operation of an automotive catalyst for heavy-duty diesel vehicles. Monitoring has as its main objective the assessment of the state of operation of the catalytic device and purposely, being able to elaborate a timeline of the catalyst's functional life cycle. The variables temperature and NOX gases were carefully chosen for analysis. The SCR catalyst, object of study in this work, only activates after being subjected to a minimum initial temperature value and can reach its optimal value in the face of a chemical reaction between the post-combustion gases and the noble metals incorporated internally in the catalysts. This optimal value is of great relevance, as it is responsible for the decomposition of the urea that is injected parallel to the gases at the catalyst inlet. The decomposition of urea is responsible for the catalytic reduction of gases. Monitoring the functioning of the catalyst has the final motivation to assess whether the NOX gases are being converted at the output of the catalyst into H₂O and N₂.

Keywords: heavy vehicles; combustion engine; diesel engine; vehicle catalyst; *Nox* gases.

LISTA DE DESENHOS

Desenho 1 - Sequência do processo de monitoramento do catalisador.....	70
Desenho 2 - Ponte de Whetstone.....	72
Desenho 3 - Display LCD	75
Desenho 4 - Sistema de monitoramento utilizando potenciômetros.....	81
Desenho 5 - Circuito em ponte resistiva para o sensor PT 100	82

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Resultantes da reação química do fluido ativo em um motor de combustão interna	26
Figura 2 - Principais partes de uma máquina térmica a combustão interna representada por um cilindro	27
Figura 3 - Apresentação dos quatro tempos realizados pela máquina térmica de Otto.....	27
Figura 4 - Primeiro tempo do ciclo de funcionamento de um motor de combustão interna	28
Figura 5 - Segundo tempo do ciclo de funcionamento de um motor de combustão interna	29
Figura 6 - Terceiro tempo do ciclo de funcionamento de um motor de combustão interna	29
Figura 7 - Quarto tempo do ciclo de funcionamento de um motor de combustão interna	30
Figura 8 - Composição de emissões de um motor diesel.....	33
Figura 9 - Alterações no motor para atender exigências do padrão P7	38
Figura 10 - Aprimoramento gestão de controle eletrônico para atender exigências do padrão P7	39
Figura 11 - Melhorias na produção do diesel para atender exigências do padrão P7.....	39
Figura 12 - Alterações no sistema de tratamento de gases pós exaustão para atender exigências do padrão P7	39
Figura 13 - Integração motor catalisador	42
Figura 14 - Suporte cerâmico de cordierita de um catalisador	43
Figura 15 - Sequência pós combustão de motor diesel e as conversões química desejadas	45
Figura 16 - Esquemático do catalisador de oxidação de diesel (DOC)	48
Figura 17 - Filtro catalítico de partículas.....	49
Figura 18 - Filtro de partículas típico.....	50
Figura 19 - Esquema de funcionamento do sistema de pós-tratamento SCR ...	51
Figura 20 - Aspectos típicos, obtidos por microscopia óptica, de catalisadores automotivos virgem (A) e usado (B). Escala lateral em mm.....	52
Figura 21 - Catalisador contaminado por fuligem	55
Figura 22 - Sistema de sensoriamento sugerido para o sistema de tratamento de gases	56
Figura 23 - Sistema de tratamento utilizando sensores diferencial de pressão e sensor de oxigênio	57

Figura 24 - Procedimento da mistura a/c em um motor ciclo Otto	59
Figura 25 - Procedimento da mistura a/c em um motor ciclo diesel	59
Figura 26 - Sistema de tratamento de gases de exaustão, com sensores EGT atuando como elementos de controle	62
Figura 27 - Sistema de pós exaustão e o a redução dos gases	63
Figura 28 - Valores de temperatura necessários para o desempenho do sistema de tratamento dos gases	63
Figura 29 - Conexão de um termopar a um sistema eletrônico	65
Figura 30 - RTD saída 2 fios conectado a uma ponte de Wheatstone	65
Figura 31 - representação gráfica do sensor de NO_x	66
Figura 32 - Sensor de NO_x utilizado em caminhões diesel	67
Figura 33 - Esquema elétrico do sensor de NO_x	68
Figura 34 - Catalisador típico para caminhões diesel	71
Figura 35 - Sensor EGTS RTD para gases de escape	72
Figura 36 - Sensor de NO_x	73
Figura 37 - Placa eletrônica embarcada com microcontrolador ATmega328P ..	74
Figura 38 - Modulo eletrônico de integração entre os elementos de monitoração	76
Figura 39 - Implementação do sistema de monitoramento <i>in loco</i>	76
Figura 40 - Integração dos componentes eletrônicos no sistema de monitoramento do catalisador SCR	77
Figura 41 - Integração entre os elementos sensores, módulos de conversão A/D e o sistema de aquisição de sinais	78

LISTA DE FOTOGRAFIAS

Fotografia 1 - Sistema de ensaio laboratorial	87
Fotografia 2 - Sistema de ensaio implementado para registro das mensagens	93
Fotografia 3 - Diferencial de temperatura abaixo de 10 %.....	93
Fotografia 4 - Diferencial de temperatura de 9%	94
Fotografia 5 - Falha na redução dos gases proveniente dos sinais dos sensores de <i>NOx</i>	94
Fotografia 6 - Estado ótimo de redução dos gases <i>NOx</i>	95

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Evolução da frota de veículos diesel por fase	37
Gráfico 2 - Condições necessárias para que se possa obter a eficiência na conversão dos gases	60
Gráfico 3 - Curva V_{out} em função da variação de temperatura e resistência elétrica do sensor.....	90
Gráfico 4 - evolução da curva gerada pela tabela 8 e 9	92

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Especificações do óleo diesel a partir de 01/janeiro/1993	
características especificações.....	35
Quadro 2 - Especificações óleo diesel padrão para ensaios de consumo e	
emissões.....	36

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Padrão europeu para emissões de gases	38
Tabela 2 - Limites máximos de emissão de poluentes para veículos pesados de uso rodoviário, da Fase Proconve P8	40
Tabela 3 - Composição dos metais nobres na confecção de catalisadores	44
Tabela 4 - Materiais utilizados na implementação do sistema de monitoramento	70
Tabela 5 - Informações sensor RTD	72
Tabela 6 - Variação da resistência elétrica do sensor PT 100 em função de valores hipotéticos de temperatura	83
Tabela 7 - Cálculo dos valores de resistência elétrica e ddp, em função da temperatura.....	88
Tabela 8 - Simulação de eficiência da redução dos gases NO_x utilizando a equação 18.....	90
Tabela 9 - Simulação de eficiência da redução dos gases NO_x utilizando a equação 19.....	91

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

a/c	ar combustível
AFEEVAS	Associação dos Fabricantes de Equipamentos para o Controle de Emissões Veiculares da América do Sul
ASC	Catalisador de Deslizamento de Amônia
CAN	<i>Controller Area Network</i>
cDPF	Filtro de partículas de diesel catalisado
CETESB	Companhia Ambiental do Estado de São Paulo
CNP	Conselho Nacional do petróleo
CONAMA	Conselho nacional do Meio Ambiente
ddp	Diferença de potência
DOC	Catalisador de oxidação de diesel
ECU	Unidade Central Eletrônica
EGR	Recirculação de gases de exaustão
EGTS	<i>Exhaust Gas Temperature</i>
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatísticas
INEP	Instituto Nacional de Estudos e Pesquisas Educacionais Anísio Teixeira
MP	Material Particulado
OBD	<i>On-Board Diagnostics</i>
PMI	Ponto médio inferior
PMS	Ponto médio superior
PROCONVE	Programa de Controle da Poluição do Ar por Veículos Automotores
PRONAR	Programa Nacional de Controle de Qualidade do Ar
RTD	Detector de temperatura de resistência
SCR	Catalisador de remoção seletivo
SENAI	Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial
UFPEL	Universidade Federal de Pelotas
UTFPR	Universidade Tecnológica Federal do Paraná

LISTA DE SÍMBOLOS

CO_2	Dióxido de Carbono
NO_2	Dióxido de Nitrogênio
NO_x	Óxidos de Nitrogênio
C	Carbono
O_2	Dióxigênio
CO	Monóxido de carbono
H_2	Hidrogênio Molecular
H_2O	Água
S	Enxofre
SO_2	Dióxido de Enxofre
N_2	Gás Nitrogênio
SO_3	Trióxido de Enxofre
NO	Oxido de Nitrogênio
NMHC	Hidrocarbonetos não Metânicos
THC	Hidrocarbonetos totais
Al_2O_3	Óxido de Alumínio
CeO_2	Óxido de Cério
ZrO_2	Dióxido de Zircônio
Pt	Platina
Pd	Paládio
Rh	Ródio
NH_3	Amônia

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	18
1.1	Problematização	19
1.2	Objetivos	19
1.2.1	Objetivo geral	19
1.2.2	Objetivos específicos.....	19
1.3	Justificativa	20
1.4	Estrutura da tese	21
2	REFERENCIAL TEÓRICO	23
2.1	Combustão	23
2.1.1	Reação de combustão.....	23
2.2	Características dos motores de combustão	24
2.2.1	Motores de combustão externa	25
2.2.2	Motor de combustão interna	25
2.2.3	Motor ciclo otto	26
2.2.4	Motores do ciclo diesel	28
2.3	Emissão de gases poluentes	30
2.3.1	Influência dos combustíveis diesel e biodiesel nas emissões de gases...32	
2.3.2	Histórico de resoluções do conama para os motores diesel.....	33
2.3.3	Classificação proconve quanto ao tipo de veículos	36
2.4	Controle de emissões para veículos pesados	37
2.5	Catalisadores	41
2.5.1	Dados históricos	41
2.5.2	Caracterização dos catalisadores.....	42
2.5.3	Estrutura dos catalisadores	43
2.5.4	Catalisadores veiculares da linha pesada a diesel	44
2.5.5	Catalisador de oxidação diesel (DOC)	46
2.5.6	Filtro catalítico de partículas para motores diesel (CDPF)	48
2.5.7	Catalisador de redução seletiva (SCR)	50
2.5.8	Ativação dos catalisadores	51
2.5.9	Influência das variáveis na eficiência catalítica	55
2.5.10	Influência da relação ar/combustível nos catalisadores	57
3	ESTADO DA TÉCNICA	60
3.1	Temperatura dos gases de escape	61
3.2	Sensor de temperatura	62

3.2.1	Característica dos sensores de temperatura.....	64
3.2.2	Sensor termopar.....	64
3.2.3	Sensor resistivo rtd.....	65
3.3	Método de avaliação na redução dos gases NOX	66
3.3.1	Sensor de NOX	66
4	MATERIAIS E METODOS	69
4.1	Método de validação teórica.....	69
4.2	Método de validação in loco.....	69
4.2.1	Materiais.....	70
4.2.2	Catalisador scr.....	71
4.2.3	Sensor de temperatura egts	71
4.2.4	Sensor de NOX	73
4.2.5	Microcontrolador eletrônico	74
4.2.6	Display LCD.....	75
4.2.7	Modulo de conversão A/D	75
4.2.8	Montagem do aparato experimental	76
4.2.9	Modo de funcionamento	78
4.3	Método de validação em laboratório	80
4.4	Simulações.....	81
4.5	Simulações matemática	81
4.5.1	Simulação teórica da temperatura do catalisador scr	81
4.5.2	Simulação teórica do sensor dos gases NOX	85
4.6	Simulações em bancada de teste	86
5	RESULTADOS	88
5.1	Resultado do modelo matemático sensor de temperatura.....	88
5.2	Resultado modelo matemático sensor de NOX	90
5.3	Resultados protótipo de ensaio	92
5.3.1	Mensagens gráficas	93
6	CONCLUSÕES	96
6.1	Continuidade e melhorias futuras do trabalho	97
6.2	Súmula curricular	98
	REFERÊNCIAS.....	98

1 INTRODUÇÃO

Avanços tecnológicos recentes têm ocasionado efeitos adversos sobre a humanidade, incluindo, entre as mais importantes, a poluição ambiental (ar) devido à rápida industrialização (SRIVASTAVA, 2021).

Com o desenvolvimento da indústria, da tecnologia e da conscientização ambiental, aumenta a necessidade de monitorar as emissões e níveis de gases na atmosfera (PALECZEK *et al.*, 2021). Apesar do crescimento econômico elevar os padrões da maioria dos países, também foi responsável pelo aumento das emissões de CO₂ e redução dos recursos naturais (MARDANI *et al.*, 2019). A indústria automobilística ocupa uma posição de destaque quando o assunto das emissões vem à tona.

O número crescente de usuários de automóveis em todo o mundo resultou em preocupações ecológicas genuínas, como a deterioração da qualidade do ar, o esgotamento da camada de ozônio e uma mudança climática desfavorável (MATHIYAZHAGAN; SENGUPTA; POOVAZHAGAN, 2018). As famílias nos Estados Unidos, em particular, são amplamente dependentes de veículos de propriedade privada para mobilidade pessoal (KARPLUS *et al.*, 2013).

Para Srivastava (2021), um dos principais gases com impacto negativo no meio ambiente e na saúde humana é o dióxido de nitrogênio (NO₂). O NO₂, compõem as emissões pós combustão dos motores de combustão interna utilizados em veículos automotores.

Um dispositivo expressamente importante para a redução de emissões veiculares é a utilização de catalisadores. O uso de catalisadores automotivos são utilizados para transformar os três principais compostos tóxicos (hidrocarbonetos, monóxido de carbono e óxido de nitrogênio) do escapamento de um veículo em compostos inofensivos (GLOBAL, 2021). Para Mendes (2016), a implantação de sistemas de conversão catalítica "é responsável por uma redução substancial das emissões veiculares".

Em junho de 1989, o CONAMA editou a Resolução n. 5 do PRONAR, com três objetivos: melhorar a qualidade do ar; atender aos padrões de qualidade estabelecidos e não comprometer a qualidade do ar em regiões não degradadas.

Neste contexto, este estudo apresenta a influência da utilização de catalisadores automotivos na redução da emissão de gases tóxicos, provenientes da

combustão interna de motores à diesel. O estudo apresenta também uma proposta de monitoramento, por meio de um sensoriamento que possibilita determinar a eficiência do catalisador, bem como o ponto adequado para se propor uma manutenção ou substituição.

1.1 Problematização

A vida útil estimada dos conversores catalíticos é de até 36 meses, de modo que devem ser substituídos a cada três anos, no mínimo (MAJIDI-JIRANDEHI; SOLEYMANI; DEGHANI, 2021).

Contudo, a vida útil do catalisador não é, na maioria das vezes, considerada pelos motoristas. Cerca de 37% dos carros não controlam suas emissões e 24% praticaram indevidamente a retirada dos catalisadores, ou mantêm em seu lugar componentes que não reduzem as emissões de poluentes (PROCONVE, 2022).

A capacidade de redução dos gases nocivos por tecnologias desenvolvidas e implementadas é comprovada por artigos específicos ao tema. Porém, atualmente, um sistema de monitoramento só é possível em oficinas especializadas.

Tornar os proprietários de veículos automotores em agentes participativos no monitoramento do funcionamento ótimo dos dispositivos de redução dos gases é uma meta que pode ser atingida através de um sistema de monitoramento instalado no painel de instrumentos dos veículos.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo geral

Projetar e desenvolver um sensor eletrônico, com tecnologia capaz de monitorar o funcionamento de catalisadores automotivos, da linha pesada à diesel.

1.2.2 Objetivos específicos

- Analisar os modos de ativação catalítica em função de diferentes parâmetros;

- Desenvolver equações matemáticas para validar os valores teóricos das variáveis temperatura e gás NO_x;
- Montar um protótipo e realizar testes preliminares utilizando potenciômetros em substituição aos sensores.

1.3 Justificativa

Segundo Mohankumar *et al.* (2019), cerca de 65 milhões de carros foram vendidos em todo o mundo em 2017. Em torno de 25 bilhões de dólares em vendas de sensores automotivos no mercado global foram relatados em 2016. É válido ressaltar que 20% dos custos totais dos sistemas eletrônicos automotivos são para sensores, por conta de suas amplas aplicações nos sistemas de segurança, conforto e controle.

O sistema de sensoriamento, para um catalisador SCR automotivo desenvolvido, vem ao encontro de políticas de preservação ambiental organizadas por vários países, pois o proprietário do veículo poderá observar as mensagens gráficas apresentadas e, diante de uma prévia interpretação, promover a manutenção ou a substituição do dispositivo catalítico realizando a antecipação as emissões de gases. A lei de trânsito brasileira prevê multas pesadas para o motorista que trafegar com o catalisador desativado, incluindo pontos negativos na carteira de habilitação para conduzir veículos.

As literaturas que abordam os efeitos das emissões de gases da linha pesada apresentam um gap em relação ao tema. Esse trabalho, tem como objetivo acadêmico, fomentar as áreas de estudo e pesquisas envolvendo os veículos da linha pesada à diesel. Isso porque, as frotas da linha pesada têm um ciclo de vida maior que os veículos da linha leve, por conta do custo de produção e aquisição.

Para a área da engenharia de produção, o desenvolvimento desse produto pode ser considerado uma inovação tecnológica que tem como função, ser uma ferramenta auxiliar na redução de custos, promovendo manutenções preditiva e preventiva que são menos onerosas aos proprietários dos veículos. O dispositivo catalisador, se tornará mais sustentável, pois poderá apresentar um melhor desempenho ao longo do seu ciclo de vida, integrando qualidade e eficiência em relação a ausência do sistema de sensoriamento proposto nesse trabalho.

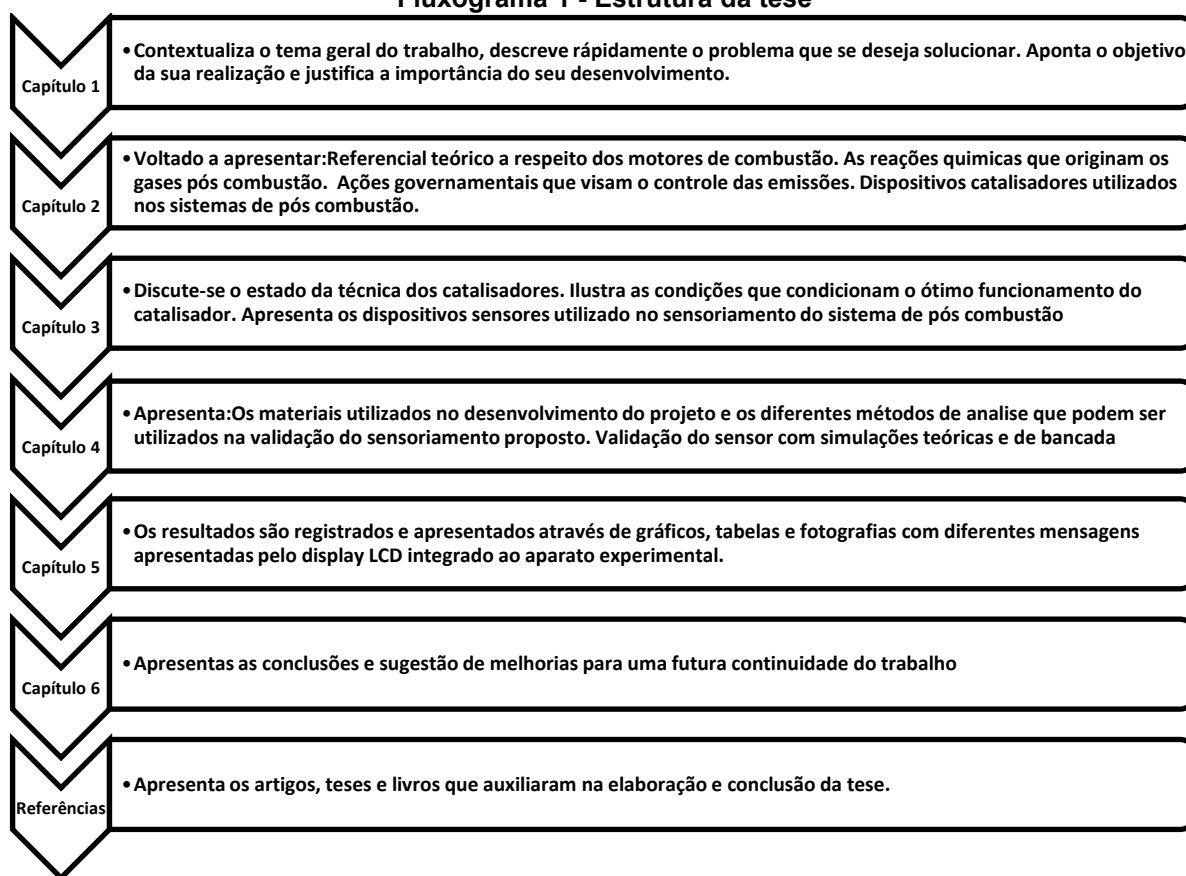
Considerando as áreas do conhecimento em Engenharia de Produção, destaca-se que esta pesquisa contribui com as áreas: **Engenharia de operações e processos da produção** no que diz respeito a gestão da manutenção; **Pesquisa operacional** considerando a contribuição com modelagem, simulação e otimização do dispositivo de sensoriamento; **Engenharia do produto** apresentando o planejamento e projeto do dispositivo de sensoriamento; **Engenharia econômica** no que diz respeito a gestão de custos e gestão de investimentos, considerando que o dispositivo proposto considera a utilização de componentes de baixo custo e sua proposta de utilização busca reduzir custos no tratamento de problemas respiratórios no sistema de saúde pública.

Com respeito ao Desenvolvimento Sustentável (ODS), cabe destacar que este trabalho atende a **Saúde e bem-estar**, pois o dispositivo proposto contribui com a melhor qualidade do ar, o que assegura uma vida saudável e promove o bem-estar para todos, em todas as idades. Contribui com a **Inovação infraestrutura**, com a contribuição em fomentar a inovação tecnológica. Também contribui com **Ação contra a mudança global do clima**, pois com a implementação do dispositivo de sensoriamento é possível reduzir a emissão de gases poluentes que contribuem com o aquecimento global.

1.4 Estrutura da Tese

A elaboração deste trabalho utilizou-se de métodos específicos para que fosse possível: delimitar o problema, realizar as observações e interpretá-las com base nas relações encontradas, fundamentar-se nas teorias existentes e alcançar o propósito final. O Fluxograma 1 apresenta a elaboração sintetizada de cada capítulo.

Fluxograma 1 - Estrutura da tese



Fonte: Autoria própria (2022)

2 REFERENCIAL TEÓRICO

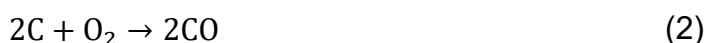
Neste capítulo, são apresentados os efeitos da combustão interna dos motores automotivos e das emissões de gases poluentes, as reações químicas envolvidas e os parâmetros que influenciam nos processos de ativação e desativação dos dispositivos catalíticos utilizados na redução dos gases poluentes.

2.1 Combustão

Diversos tipos de fontes de energia têm influenciado o desenvolvimento das civilizações através dos tempos, mas a combustão ocupa um lugar de destaque quando o assunto é geração de energia. Segundo o INEP, "é a partir de combustões que resultam a maior parte da energia da qual necessitamos". Ainda conforme o INEP, "exemplos cotidianos de processos de combustão incluem desde a chama de uma vela, a queima da lenha ou do gás de fogão, até a queima de combustível que ocorre dentro dos motores de automóveis".

2.1.1 Reação de combustão

Para Garcia (2013), combustão é a reação rápida entre o oxigênio e os constituintes de um combustível, com a produção de calor e luz. Suas reações básicas estão apresentadas nas Equações: 1, 2, 3, 4, 5 e 6.



As reações de combustão são bastante comuns no cotidiano da sociedade, pois possuem um grau de importância muito grande e influenciam vários setores. Quando um combustível reage com oxigênio, produz calor, gás carbônico e água (se for completa), monóxido de carbono ou fuligem (se for incompleta) (FOGAÇA, 2022).

Segundo Turns (2013), em 2007, dois terços de todo o petróleo importado ou produzido pelos Estados Unidos, foram consumidos por veículos de transporte terrestres e aéreos equipados, na sua grande maioria, por motores de combustão.

O setor de transporte rodoviário, representado por bilhões de veículos em todo o mundo, é o elemento essencial da sociedade moderna (HAO *et al.*, 2016). As emissões de CO₂ do escapamento de veículos pesados aumentaram em média 2,2% ao ano, desde 2000. Os caminhões são responsáveis por mais de 80% desse crescimento. Padrões de eficiência de veículos, juntamente com esforços para melhorar a eficiência logística e operacional, são necessários para reduzir o crescimento das emissões (TRUCKS; BUSES, 2020).

No Brasil, o meio de transporte mais utilizado é o rodoviário. O Transporte Rodoviário é uma modalidade de transporte terrestre constituído principalmente por veículos automotores de combustão.

2.2 Características dos motores de combustão

Motores de combustão são máquinas térmicas que permitem transformar calor em trabalho (BRUNETTI; FRANCO, 2018). Para Martins (2004), a energia térmica provém da combustão de uma mistura combustível-comburente, libertando a energia química do combustível. Os motores de combustão podem ser classificados como:

- Combustão externa: no qual o fluido de trabalho está completamente separado da mistura ar/combustível, sendo o calor dos produtos da combustão transferido através das paredes de um reservatório ou caldeira;
- Combustão interna: no qual o fluido de trabalho consiste nos produtos da combustão da mistura de ar/combustível.

2.2.1 Motores de combustão externa

Os primeiros motores à combustão externa, batizados de motores do ciclo Stirling, apareceram no século XVIII, aperfeiçoados pelo escocês Robert Stirling, com o auxílio de seu irmão. Estes motores à vapor eram, geralmente, utilizados em máquinas estacionárias. O combustível inicial era a lenha. Atualmente, os motores do ciclo Stirling podem operar com diversos tipos de combustíveis e podem atingir até 45% de eficiência energética, muito além dos 20% a 30% atingidos por outros tipos de motores movidos a óleo diesel ou gasolina.

Esse tipo de motor apresenta diversas vantagens: é pouco poluente pois a combustão é contínua, e não intermitente como nos motores Ciclo de Otto e Ciclo Diesel, permitindo uma queima mais completa e eficiente do combustível. Sua maior desvantagem consiste na dificuldade de dar partida e variar sua velocidade de rotação rapidamente, sendo complicado seu emprego em veículos como carros e caminhões, embora modelos de propulsão híbrida (elétrico e motor térmico) possam ser viáveis. Também há problemas técnicos a serem resolvidos quanto ao sistema de vedação, que impede o vazamento do fluido de trabalho, particularmente quando se empregam gases inertes e leves (hélio, hidrogênio), difíceis de serem confinados sob alta pressão sem escaparem para o exterior. Além disso, por ser uma tecnologia pouco difundida, os motores Stirling são mais caros, tanto na aquisição quanto na manutenção (UFPEL, 2013).

A locomotiva foi uma das mais importantes máquinas térmicas, pois possibilitou viagens e transporte de cargas. Com o passar do tempo, as locomotivas foram sendo aperfeiçoadas e, em 1924, seus motores a vapor, de combustão externa, foram substituídos por motor diesel de combustão interna.

Em meados do século XIX, surgiram os primeiros motores de combustão interna que transformam a energia térmica libertada pela reação química de combustão entre o ar e o combustível em energia mecânica, disponibilizada sob a forma de trabalho (GREGÓRIO, 2017). Estes motores térmicos utilizavam o aumento da pressão da mistura gasosa resultante da combustão para realizar trabalho.

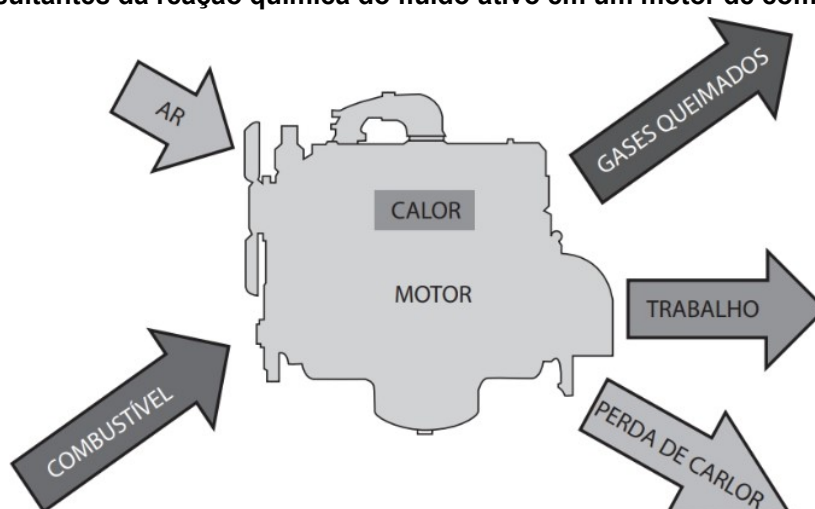
2.2.2 Motor de combustão interna

Os motores de combustão interna são classificados em relação ao princípio de funcionamento, em dois tipos: do ciclo Otto e do ciclo Diesel. O ciclo Otto foi descrito por Nikolaus A. Otto, em 1876; o ciclo Diesel foi detalhado por Rudolf Diesel, em 1893.

Para os motores de combustão interna, o calor é obtido através da queima de uma energia química (combustível) e, como consequência dessa ação, dependendo do projeto e da finalidade, é possível obter como resultado um trabalho mecânico.

Para Brunetti e Franco (2018), a obtenção de trabalho é ocasionada por uma sequência de processos realizados em uma substância denominada "fluido ativo - FA". O FA é formado pela mistura de ar e combustível na entrada do volume de controle e produtos da combustão na saída. A Figura 1 ilustra a formação do FA em um motor de combustão interna e as resultantes de saída dessa reação química.

Figura 1 - Resultantes da reação química do fluido ativo em um motor de combustão interna



Fonte: Brunetti e Franco (2018)

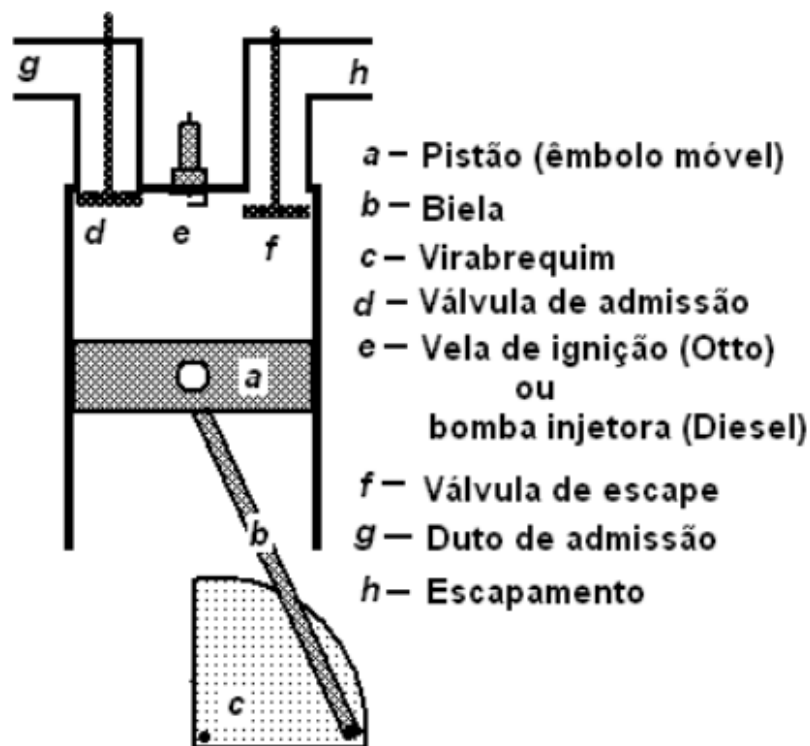
2.2.3 Motor ciclo Otto

Otto desenvolveu o princípio de funcionamento conhecido como Ciclo Otto, que consiste em transformações termodinâmicas que podem ser observadas nos automóveis até os dias de hoje (RANGEL, 2018). Os primeiros modelos tinham como princípio de funcionamento o gás e, após alguns anos, foram modificados para funcionarem à gasolina, com admissão de ar. O motor de Otto apresenta 4 tempos para cada cilindro do motor e a característica fundamental está na admissão que ocorre no 1º tempo, em que é aspirado uma mistura gasosa de ar e combustível (gasolina, álcool, gás e outro combustível).

Esses motores possuem, no mínimo, um cilindro contendo um pistão (embolo móvel) e outras peças móveis. A Figura 2 apresenta as principais partes de uma

máquina térmica à combustão interna, representada por um cilindro. Caso haja mais cilindros na composição da máquina, o sistema se repete por igual em todos.

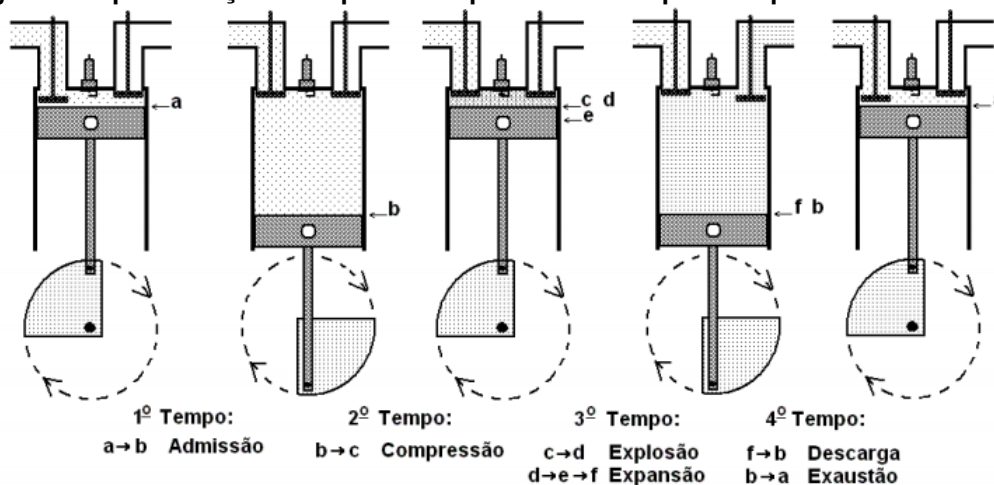
Figura 2 - Principais partes de uma máquina térmica a combustão interna representada por um cilindro



Fonte: Silveira (2022)

A Figura 3 apresenta os quatro tempos da máquina térmica de Otto.

Figura 3 - Apresentação dos quatro tempos realizados pela máquina térmica de Otto



Fonte: Silveira (2022)

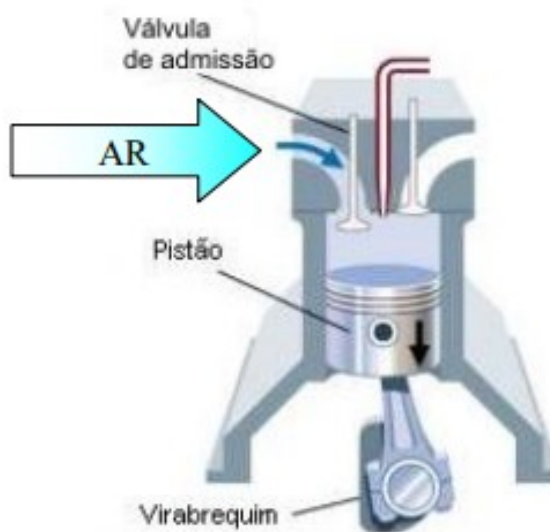
2.2.4 Motores do ciclo diesel

As diferenças básicas entre seu motor ciclo diesel e o de Otto estão na forma de misturar o ar com o combustível e na ignição do motor. No diesel, a ignição é por compressão; no Otto, por centelha elétrica.

Os motores do ciclo diesel utilizam a compressão de uma massa de ar na câmara interna de um cilindro para dar início à reação de combustão. Somente ar é admitido. Após a compressão, o combustível é pulverizado na massa de ar quente, dando início a combustão (VARELLA; SANTOS, 2010). Os motores do ciclo diesel também realizam o ciclo de funcionamento em quatro tempos, conforme explicado abaixo:

- Primeiro tempo - admissão: Nesse curso, ocorre a admissão de ar no cilindro como ilustra a Figura 4.

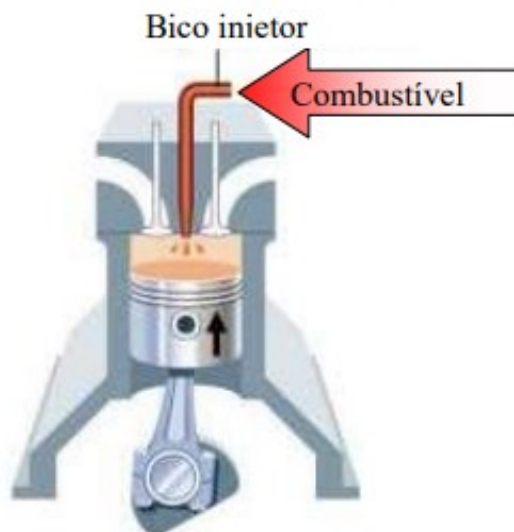
Figura 4 - Primeiro tempo do ciclo de funcionamento de um motor de combustão interna



Fonte: Varella e Santos (2010)

- Segundo tempo - compressão: O pistão se desloca do PMI para o PMS. Nesse curso, ocorre a compressão do ar. As válvulas de admissão e descarga estão fechadas. A compressão do ar na câmara de combustão produz elevação da temperatura como apresentado na Figura 5.

Figura 5 - Segundo tempo do ciclo de funcionamento de um motor de combustão interna



Fonte: Varella e Santos (2010)

- Terceiro tempo - expansão: O pistão se desloca do PMS para o PMI. Nesse curso, ocorre a expansão do ar. As válvulas de admissão e descarga estão fechadas. À medida que o combustível é injetado, vai se inflamando e aumentando a temperatura dos gases que tendem a se dilatar cada vez mais, como ilustrado na Figura 6.

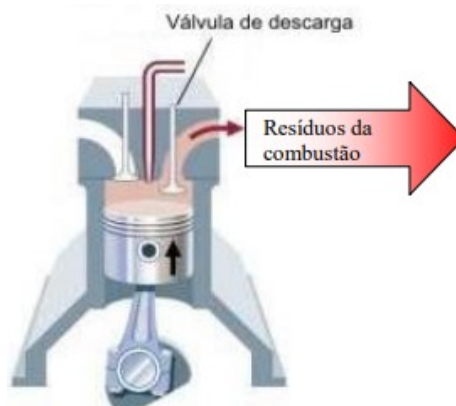
Figura 6 - Terceiro tempo do ciclo de funcionamento de um motor de combustão interna



Fonte: Varella e Santos (2010)

- Quarto tempo - descarga: O pistão se desloca do PMI para o PMS. Nesse curso, ocorre a descarga dos resíduos da combustão. A válvula de admissão está fechada e a de descarga está aberta. O movimento ascendente do pistão expulsa do cilindro os resíduos da combustão através da válvula de descarga, conforme apresentado na Figura 7.

Figura 7 - Quarto tempo do ciclo de funcionamento de um motor de combustão interna



Fonte: Varella e Santos (2010)

Os benefícios proporcionados pelos sistemas de combustão são muitos e os meios de transporte destoam em termos de grandeza. O transporte de produtos e pessoas, de um modo geral, trazem riqueza para as nações. Porém, traz como desvantagem a poluição ambiental, ocasionada pelas emissões de gases que ocorre no quarto curso do pistão.

Os principais poluentes gerados nos processos de combustão são os hidrocarbonetos não queimados ou parcialmente queimados, os óxidos de nitrogênio (NO e NO_2), o monóxido de carbono (CO), os óxidos de enxofre (SO_2 e SO_3) e os particulados em suas várias formas (TURNES, 2013).

2.3 Emissão de Gases Poluentes

O setor de transporte rodoviário, representado por bilhões de veículos rodoviários em todo o mundo, é o elemento essencial da sociedade moderna (HAO *et al.*, 2016). As emissões de CO_2 do escapamento de veículos pesados aumentaram, em média, 2,2% ao ano desde 2000. Os caminhões são responsáveis por mais de 80% desse crescimento. Padrões de eficiência de veículos, juntamente com esforços

para melhorar a eficiência logística e operacional, são necessários para reduzir o crescimento das emissões (TRUCKS; BUSES, 2020).

As emissões de gases de escape dos veículos têm sido uma das culpadas da contaminação ambiental global (AO *et al.*, 2021). Essa emissão é composta de gases como: monóxido de carbono (CO), óxidos de nitrogênio (NO_x), hidrocarbonetos (HC), óxidos de enxofre (SO_x), material particulado (MP).

Altos níveis de poluentes atmosféricos, como dióxido de nitrogênio (NO_2) ou material particulado com diâmetro aerodinâmico menor ou igual a $10\mu m$ ou $2,5\mu m$ (PM_{10} ou $PM_{2,5}$), são encontrados em ambientes urbanos (SANTIAGO *et al.*, 2021). Viver em um ambiente poluído faz com que as pessoas sofram de doenças respiratórias e outras complicações de saúde. Além de problemas de saúde, a emissão descontrolada agrava o efeito estufa (DEMIRKIRAN *et al.*, 2016a).

O CO, que é um dos poluentes mais comuns conhecidos, é um gás tóxico, incolor e inodoro, originário da combustão incompleta de combustíveis em geral (*“Energy and Air Pollution - World Energy Outlook 2016 Special Report”*, 2016). Quando inalado, este gás entra rapidamente na corrente sanguínea, onde se liga à hemoglobina (Hb), formando o complexo carboxihemoglobina (COHb). Essa ligação é 200 vezes mais forte que a ligação na qual o oxigênio forma com a hemoglobina, deslocando o equilíbrio e causando hipóxia dos tecidos do corpo da vítima. Os riscos associados à inalação de CO dependem da concentração e da exposição.

Em 2015, a emissão anual na América Latina foi de 6 milhões de toneladas, menos da metade do que países como Estados Unidos e China. Majoritariamente, o setor de transporte foi responsável por quase 50% da emissão de NO_x , com exceção da China, em que este setor divide com a indústria a maior parcela das emissões (*“Energy and Air Pollution - World Energy Outlook 2016 Special Report”*, 2016).

Para Kebede, Tulu e Lisinge (2021), é evidente que as emissões dos veículos são problemáticas não apenas para o meio ambiente global, mas também para a saúde humana. É reconhecido que uma forma lógica de reduzir esses impactos negativos seria diminuir as emissões dos veículos.

Projeções para 2040 preveem uma tendência mundial de reduzir o consumo desses combustíveis e emissão de gases poluentes. Em diversos países da União Europeia, da América do Norte e até mesmo na China, por exemplo, é esperada uma redução no consumo de combustíveis fósseis, como carvão e petróleo, por fontes menos poluentes de energia. Na contramão, nos países da América Latina, África e

Sul da Ásia, é esperado um aumento nos milhões de toneladas de NO_x emitidos todos os anos, concomitante ao aumento do consumo de derivados do petróleo, como o óleo diesel, para a produção energética (*“Energy and Air Pollution - World Energy Outlook 2016 Special Report”*, 2016).

2.3.1 Influência dos combustíveis diesel e biodiesel nas emissões de gases

Os motores a diesel são amplamente utilizados por ocasião de sua alta eficiência e baixo consumo de combustível. No entanto, o gás de escape da combustão contém uma grande quantidade de NO_x e PM (PHUGOT *et al.*, 2018).

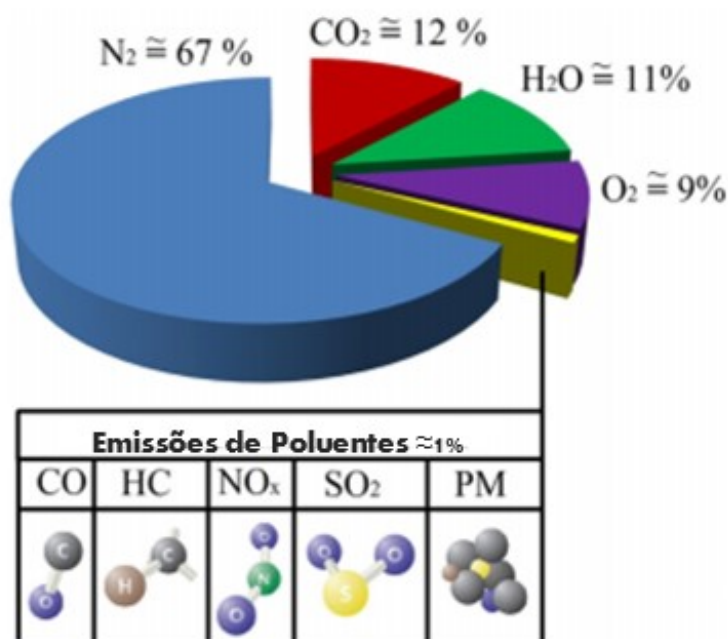
Durante a operação dos motores a diesel, o PM, referido como fuligem, é gerado a partir da combustão incompleta do combustível diesel (DONADEL, 2010).

Segundo Ribas *et al.* (2016), “o transporte coletivo urbano é basicamente movido pela queima de combustíveis fósseis (diesel) e renováveis (biodiesel)”. A queima desses combustíveis é responsável pela emissão de poluentes nocivos à saúde e que degradam o ambiente urbano.

Para Wang, Yang e Song (2020), “os óxidos de nitrogênio, como um dos principais poluentes atmosféricos, são gerados principalmente na combustão de combustíveis fósseis e biocombustíveis”.

Segundo relatório desenvolvido pela CETESB em 2016, o total de emissões geradas pelos veículos automotores no estado de São Paulo, foi composto por 331 mil toneladas de CO, 73 mil toneladas de NMHC, 180 mil toneladas de NO_x , 5 mil toneladas de MP, 4,7 mil toneladas de SO_2 e 1,7 mil toneladas de aldeídos, todos poluentes tóxicos. Os caminhões foram os maiores emissores de MP, NO_x e SO_2 . As emissões de SO_2 ocorrem em função da existência de enxofre nos combustíveis fósseis, em especial no diesel (BRUNI *et al.*, 2017). A Figura 8 apresenta a composição de emissões de um motor diesel.

Figura 8 - Composição de emissões de um motor diesel



Fonte: Resitoglu, Altinisik e Keskin (2014)

Para melhorar a qualidade do ar, as limitações de emissões veiculares devem ser adotadas com base em medições confiáveis e representativas (GÓMEZ *et al.*, 2021). A elaboração de normas é ferramenta auxiliar que tem como objetivo normalizar as medições de emissões.

Para a Associação Brasileira de Transportes Urbanos, no Brasil, as normas são reguladas pelo CONAMA, que implementou o Proconve.

O Proconve, por meio de Resoluções, estabelece diretrizes, prazos e padrões legais de emissão admissíveis para as diferentes categorias de veículos automotores, nacionais e importados. O Proconve baseou-se na experiência internacional para adequar os índices à realidade brasileira e tem como principal meta a redução da contaminação atmosférica das fontes móveis, tais como veículos automotores, por meio da fixação dos limites máximos de emissão, induzindo o desenvolvimento tecnológico dos fabricantes e estabelecendo exigências tecnológicas para veículos, cuja comprovação é feita a partir de ensaios padronizados (IBAMA, 2011).

2.3.2 Histórico de resoluções do CONAMA para os motores diesel

O CONAMA, através da Resolução n. 10/1989, criada em 14 de dezembro de 1988, considerou que os veículos com motor do ciclo Diesel contribuem para a

contínua degradação da qualidade do ar e se constituem em uma das principais fontes de emissão de óxidos de nitrogênio para a atmosfera. Ainda segundo a Resolução n. 10/1989, considerando que existem soluções técnicas que permitem o controle das emissões de gases de escapamento, torna público decisões norteadas nos seguintes artigos:

Art. 1º - A partir de 01 de janeiro de 1993, a emissão de gases de escapamento por veículos automotores com motor do ciclo Diesel não deverá exceder os seguintes valores:

- monóxido de carbono: 11,20 grama por quilowatt-hora;
- hidrocarbonetos: 2,80 gramas por quilowatt-hora;
- óxidos de nitrogênio: 18,00 grama por quilowatt-hora.

Art. 2º - A partir de 01 de janeiro de 1995, a emissão de gases de escapamento por veículos automotores com motor do ciclo Diesel não deverá exceder os seguintes valores:

- monóxido de carbono: 11,20 grama por quilowatt-hora;
- hidrocarbonetos: 2,80 gramas por quilowatt-hora;
- óxidos de nitrogênio: 14,40 grama por quilowatt-hora.

O Art. 7 da mesma resolução define que o CNP deve especificar e fiscalizar o teor de enxofre total em 0,5% em peso como valor máximo, a partir de 01 de janeiro de 1993. O conteúdo de enxofre do combustível afeta negativamente o desempenho do catalisador, principalmente do SCR e do armazenamento/redutor. Portanto, quando utilizados como dispositivos de pós-tratamento diesel, exigem que o combustível seja do tipo S50 ou S10 (óleo diesel com 50 ou 10 *ppm* de enxofre). Isto porque o enxofre, na forma de sulfato, é adsorvido com preferência pelo agente catalisador, anulando a sua ação quanto aos outros gases poluentes. Do mesmo modo, o fósforo e cinzas do óleo lubrificante podem degradar a ação do catalisador (MANAVELLA, 2018b).

Para o cumprimento dos limites máximos de emissão estabelecidos nesta resolução, o Conselho Nacional do Petróleo deverá assegurar a disponibilidade de

óleos diesel padrão e comercial, conforme as especificações constantes nos quadros 1 e 2.

Quadro 1 - Especificações do óleo diesel a partir de 01/janeiro/1993 características especificações

Características Especificações
Destilação, °C, 50% evaporado (Fixar valor definido pelo Grupo de elaboração do protocolo)
Destilação, °C, 85% evaporado máximo 370
Viscosidade a 37,8 °C, eSt 1,6 – 6,0
Resíduo de carbono dos 10% finais da destilação, % peso, máximo 0,5
Enxofre, % peso, máximo 0,5
Ponto de fulgor, - °C ⁽¹⁾
Cinzas, % peso, máximo 0,02
Corrosividade ao cobre, a 50 °C, máximo 2
Água e sedimentos, % volume, máximo 0,05
Cor ASTM, máximo 3,0
Ponto de névoa, °C, máximo 6 - 19 ⁽³⁾
Densidade á 20/4, °C 0,81 – 0,85
Aspecto (visual) Límpido, isento de material em suspensão
Número de cetano, mínimo 40 ⁽²⁾
Índice de cetano calculado mínimo 45 ⁽²⁾

Fonte: IBAMA (2011)

onde:

- 1) Somente especificado para o óleo diesel de uso em motores marítimos cujo valor mínimo é 60°C.
- (2) Quando não for disponível o motor CFR, será aceitável o índice de cetano calculado pelo método ASTM D.976, como aproximação. Em caso de desacordo prevalecerá o método ASTM D.613.
- (3) De acordo com o especificado no Reg. Técnico 01/80 de 22.01.80, para as regiões em épocas do ano, apenas mudando 9º para 6°C na região Sul, no inverno.

Quadro 2 - Especificações óleo diesel padrão para ensaios de consumo e emissões

Características	Unidades	Até dez/92	A partir de jan/93	Métodos
Destilação >> P. I. E >> 10 % >>50 % >>90 % >>PFE	°C	160–190 190–220 245–280 330–360 Max:390	160–190 190–220 245–280 330–360 Max:390	MB-45
Enxofre total	% massa	Max. 0,7	0,2-0,5	MB-106
Ponto de fulgor	°C	Min. 50	Min. 55	MB-48
Viscosidade a 37.8 °C	e St	2,0-4,0	2,5-3,5	MB-293
Cinzas	% massa	Max. 0,02	Max. 0,02	MB-47
Índice de cetano	-----	48-58	48-54	ASTMD-976
Carbono aromático	% V	15-25	15-25	ASTMD-3238
C.F.P. P	°C	Max.-5	Max.-5	EM166 ou IP 309
Densidade a 20/4 graus	–	0,830-0,845	0,835-0,845	MB-104
°C				
Corrosividade ao cobre 3h a 50 °C	–	Max. 2	Max. 2	MB-287
Resíduo de carbono dos 10 % finais de dest.	% massa	Max. 0,25	Max. 0,25	MB-290
Água e sedimentos	% V	Max. 0.05	Max. 0,05	MB-38
Cor ASTM	–	Max. 3,0	Max. 3,0	MB-351
ASPECTO	–	límpido	límpido	visual

Fonte: IBAMA (2011)

2.3.3 Classificação Proconve quanto ao tipo de veículos

O Proconve, nas suas atribuições, classifica os veículos automotores em:

- Veículos leves;
- Veículos pesados.

Veículos leves: é o veículo automotor, com massa total máxima de 3.856 kg e massa do veículo em ordem de marcha de até 2.720 kg, projetado para o transporte de até 12 passageiros, ou seus derivados, para o transporte de carga.

Veículos pesados: são os veículos automotores para o transporte de passageiros e/ou carga, com massa total máxima maior que 3.856 kg ou massa do veículo em ordem de marcha maior que 2.720 kg, projetado para o transporte de passageiros e/ou carga, como é o caso dos ônibus e caminhões.

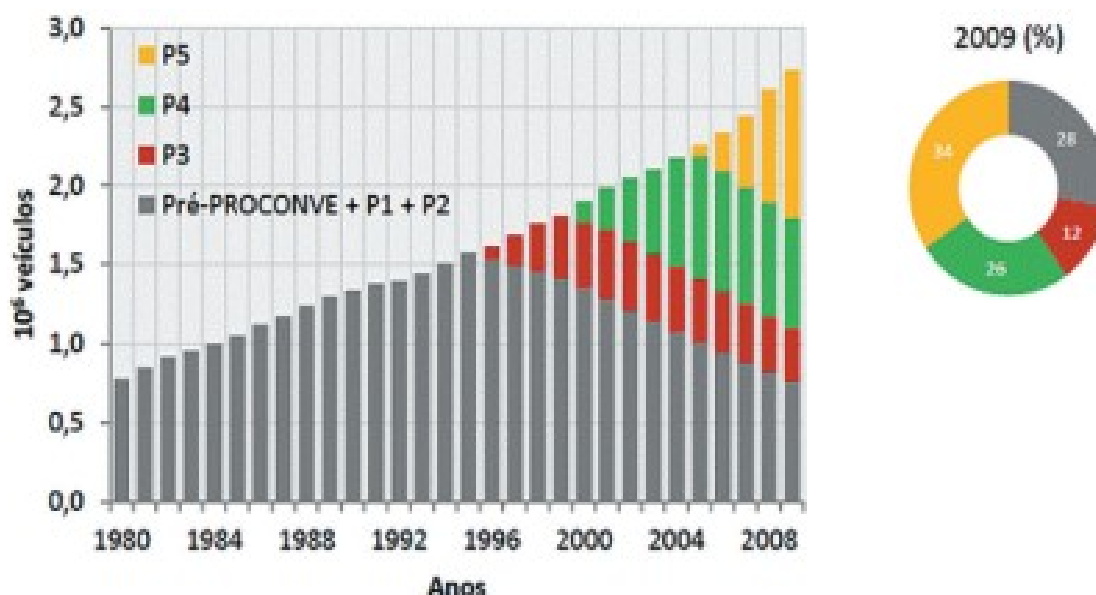
Devido à classificação dos tipos de veículos promovida pela Proconve, o controle de emissões utilizado pela linha pesada se distingue em relação à linha leve.

2.4 Controle de emissões para veículos pesados

O controle das emissões gasosas pelo escapamento de veículos pesados teve seu início em 1993, com a introdução gradativa dos limites de emissões, distinguindo-se por fases ao longo dos anos. Em 1993, foi implantada a Fase P-3, em 1994, a Fase P-4, em 1998, a Fase P-5, e em 2004, a Fase P-6.

O Gráfico 1 apresenta a evolução da frota estimada de veículos do ciclo Diesel por fase do Proconve no ano de 2009.

Gráfico 1 - Evolução da frota de veículos diesel por fase



Fonte: IBAMA (2011)

Nos anos 1990, a União Europeia implementou as normas EURO para as preocupações ambientais dos europeus, criando o padrão EURO, que limita as emissões de veículos. Na União Europeia, as emissões de NO_x, THC, NMHC, CO e PM, são regulamentados para a maioria dos tipos de veículos. Para cada tipo de

veículo, aplicam-se diferentes padrões. A implantação iniciou com o Euro I a Euro VI, respectivamente.

A Tabela 1 mostra os padrões europeus. Os limites são definidos em massa por energia (g/kWh).

Tabela 1 - Padrão europeu para emissões de gases

	<i>CO</i> (g/kWh)	<i>HC</i> (g/kWh)	<i>NO_x</i> (g/kWh)	<i>PM</i> (g/kWh)
Euro I	4,5	1,1	8,0	0,61
Euro II	4	1,1	7,0	0,15
Euro III	2,1	0,66	5,0	0,13
Euro IV	1,5	0,46	3,5	0,02
Euro V	1,5	0,46	2,0	0,02
Euro VI	1,5	0,13	0,4	0,01

Fonte: Resitoglu, Altinisik e Keskin (2014)

Desde 2012, está vigente o padrão P7 imposta pelo Proconve. O padrão P7 corresponde à norma europeia Euro 5 para ônibus e caminhões no Brasil, que objetiva reduzir 60% de óxido de nitrogênio e 80% das emissões de material particulado em relação ao Euro 3, ambos prejudiciais à saúde.

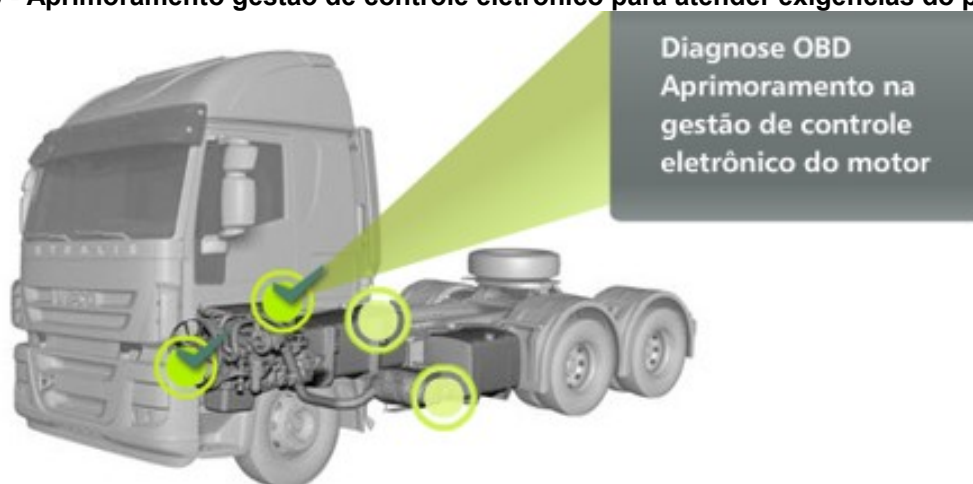
De forma genérica, a mudanças implementadas que atendem o padrão Proconve, P7 Euro 5, são apresentadas nas Figuras 9, 10, 11 e 12. As imagens são ilustrativas pois cada veículo conta com suas características específicas.

Figura 9 - Alterações no motor para atender exigências do padrão P7



Fonte: Blog Iveco (2022)

Figura 10 - Aprimoramento gestão de controle eletrônico para atender exigências do padrão P7



Fonte: Blog Iveco (2022)

Figura 11 - Melhorias na produção do diesel para atender exigências do padrão P7



Fonte: Blog Iveco (2022)

Figura 12 - Alterações no sistema de tratamento de gases pós exaustão para atender exigências do padrão P7



Fonte: Blog Iveco (2022)

Em 16 de novembro de 2018, o CONAMA aprovou a nova fase do Proconve: o P8, ou Euro 6, através da Resolução n. 490, que foi publicada no diário em 21 de novembro de 2018. A resolução estabelece novos limites máximos de emissão de gases para atender as necessidades de controle de poluição do ar, que pode ser reduzida em até 90%. As datas para adoção desta etapa começam em 2022 para novos modelos de ônibus e caminhões (NTU, 2018). O controle de emissão de NO_x e PM de veículos a diesel do padrão de emissão Euro 6, poderá reduzir em 56% em relação ao Euro 5 (XIE, 2017).

A Tabela 2 apresenta os novos limites máximos de emissão para veículos pesados de uso rodoviário, proposto pela Resolução n. 490 da fase Proconve P8 (CONAMA, 2018).

Tabela 2 - Limites máximos de emissão de poluentes para veículos pesados de uso rodoviário, da Fase Proconve P8

Ciclo	CO (mg/kWh)	THC ⁽¹⁾ (mg/kWh)	NMHC ⁽²⁾ (mg/kWh)	CH ₄ ⁽²⁾ (mg/kWh)	NO _x (mg/kWh)	NH ₃ ⁽³⁾ ppm	MP Massa (mg/kWh)	NP Número #/kWh
WHSC ⁽¹⁾	1.500	130	-	-	400	10	10	8,0 x 10 ¹¹
WHTC ⁽¹⁾	4.000	160	-	-	460	10	10	6,0 x 10 ¹¹
WHTC ⁽¹⁾	4.000	-	160	500	460	10	10	-
OCE (WNTE) ⁽¹⁾	2.000	220	-	-	600	-	16	-
CR/ISC	6.000	240	240	750	690	-	-	-

Fonte: Ministério do Meio Ambiente (BRASIL, 2022)

A diferença entre as tecnologias Euro 5 e Euro 6 (P7 e P8) baseia-se na redução significativa das emissões de gases poluentes. Os NO_x , tem uma redução expressiva de 80% em comparação ao Euro 5. No caso da emissão de HC, o sistema P8 estabelece um limite de 0,09 gramas para cada cavalo de potência do motor por hora de funcionamento. A adoção do Proconve 7 (Euro 5) determinou inovação das fábricas, assim como o Proconve 8 (Euro 6) exige adequação tecnológica de motores veiculares. Duas tecnologias empregadas ao Proconve 7 também serão utilizadas na nova fase. Trata-se da Redução Catalítica Seletiva (SCR) e da Recirculação de Gases de Exaustão (EGR).

Ribas *et al.* (2016) comentam que os restritos limites de emissões de MP e de NO_x , impostos aos fabricantes de motores do ciclo Diesel, têm estimulado o desenvolvimento de soluções para o pós-tratamento de gases emitidos por esse tipo de motor.

Em meados de 1990, o carburador estava sendo substituído pela injeção eletrônica, proporcionando na câmara de combustão do motor uma dosagem mais precisa de combustível. Com o auxílio da ignição eletrônica, foi possível obter um melhor controle da queima e a redução das emissões de gases. Esse controle permitiu o uso do catalisador nos veículos leves.

Somente em meados dos anos 2000, a injeção de diesel com controle eletrônico foi incluída nos veículos pesados e, dois anos depois, adotou-se o catalisador, de forma generalizada, na categoria de veículos pesados movidos a motor de combustão diesel.

2.5 Catalisadores

O conversor catalítico automotivo é um dispositivo adaptado ao tubo de gases de escape de um motor a combustão interna e com capacidade de converter gases tóxicos (CO, HC, NO_x) em outros menos nocivos (CO_2 , H_2O , N_2) (MOSCHOVI *et al.*, 2021). Atualmente, esses dispositivos catalíticos se diferenciam para a linha de veículos leves e pesados.

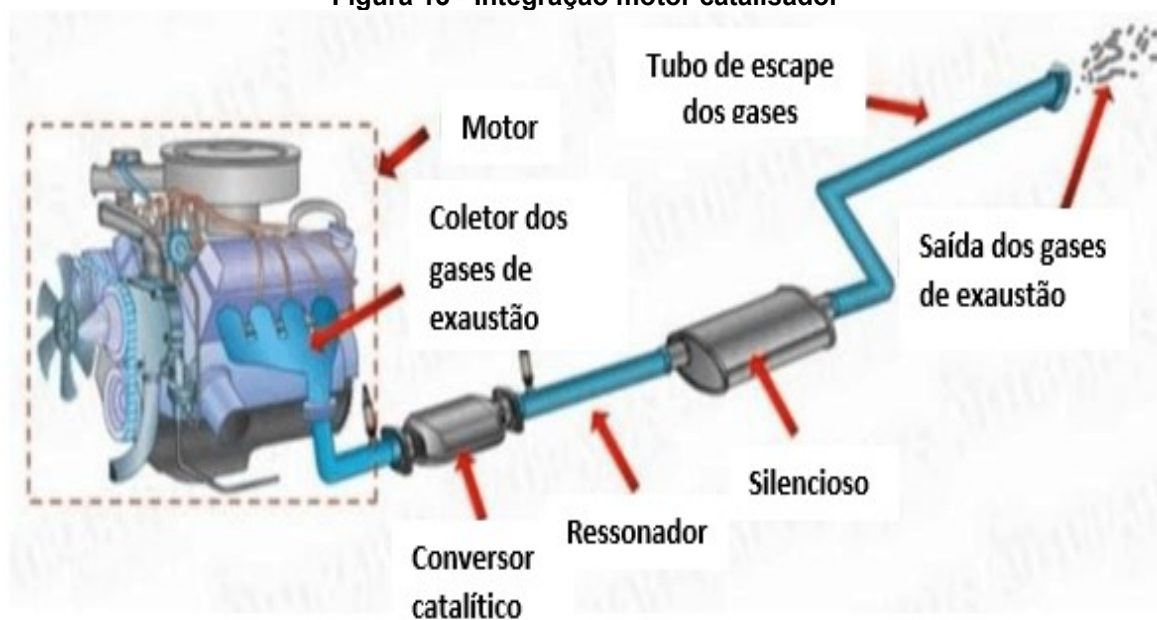
2.5.1 Dados históricos

- Meados de 1950 nos EUA: o primeiro catalisador automotivo de oxidação foi patenteado pelo Engenheiro francês Eugene Houdry.
- Em 1975 nos EUA: os primeiros catalisadores automotivos de oxidação chegam ao mercado americano, na forma de pellets.
- Em meados de 1980: surgem nos EUA os catalisadores em substratos (colmeias) cerâmicos e metálicos.
- Em 1981 nos EUA e no Canadá: surgem os catalisadores automotivos de três vias, que além de converterem CO e HC, como os catalisadores de oxidação, também convertem o NO_x .
- Em 1986: Europa e Japão começam a utilizar os catalisadores automotivos.
- Em 1992: com a introdução do Proconve, o Brasil inicia a utilização de catalisadores automotivos.
- Em 2001: a China inicia a utilização dos catalisadores automotivos.

2.5.2 Caracterização dos catalisadores

Para Woodford e Chris (2022), um conversor catalítico é uma ampla caixa de metal, posicionada na parte inferior do veículo, que possui dois tubos conectados a ela. Um dos tubos (a entrada do conversor) é conectado ao motor, que transporta os gases quentes e poluídos dos cilindros do motor para o conversor. O segundo tubo (saída do conversor) é conectado ao escapamento, onde é feita a exaustão dos gases. A Figura 13 ilustra um modelo de integração entre motor, catalisador e outros dispositivos que integram o sistema de tratamento de gases pós-combustão.

Figura 13 - Integração motor catalisador



Fonte: Lokhesh, Kumar e Veladri (2018)

Em um congresso realizado na AFEEVAS, os catalisadores automotivos foram definidos como tecnologias efetivas para reduzir o conteúdo de substâncias poluentes no gás de escape de veículos automotores a combustão interna (BLUMRICH, 2018).

A UMICORE, fabricante de catalisadores automotivos e especialista em controle de emissões da América do Sul, define os catalisadores como um equipamento de tratamento dos gases da exaustão de alta eficiência e que reduz de forma significativa as emissões dos veículos automotores.

Fator importante que impulsiona o crescimento do mercado global de catalisadores automotivos é o aumento da conscientização sobre a necessidade de

redução da poluição e regulamentações rigorosas e padrões de emissão por parte de governos de vários países (GLOBAL”, 2021).

2.5.3 Estrutura dos catalisadores

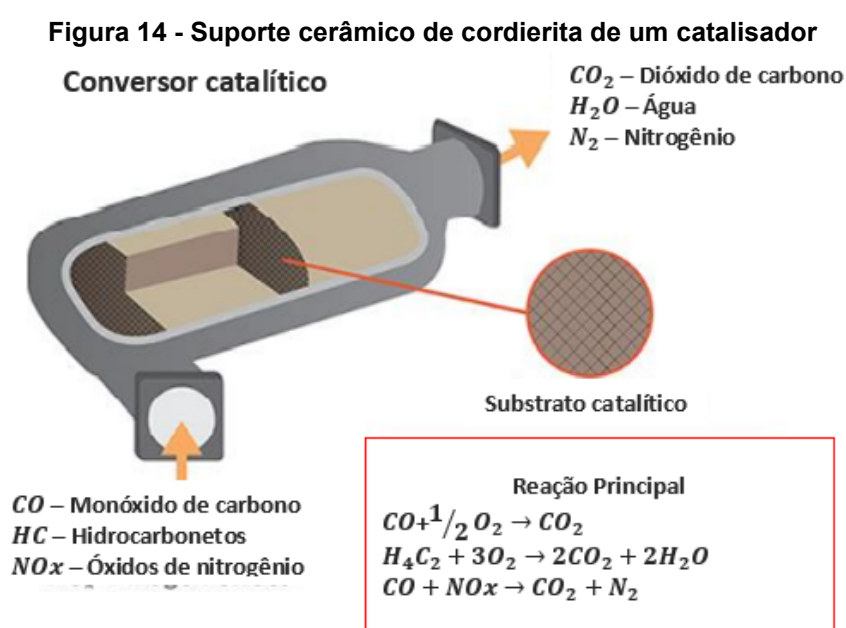
Estruturalmente, os catalisadores automotivos são constituídos por um bloco em forma de colmeia contendo canais com seção de aproximadamente 1 mm^2 , por onde passam os gases de exaustão do motor do veículo (BAIA *et al.*, 2020).

Segundo Karim e Ting (2021), os conversores catalíticos automotivos consistem em um monólito contendo PGM, um invólucro externo de aço e uma manta de fibra. O invólucro de aço externo protege o monólito e a manta de fibra entre o invólucro de aço e o monólito atua como um amortecedor.

O PGM é um grupo de metais formado por *platinum*, *palladium*, *rhodium* (SHIN *et al.*, 2015). As partículas de PGM's estão amplamente dispersas na camada de revestimento, com diâmetros de 1 a 10 nm (DING *et al.*, 2020).

O monólito, composto principalmente por material cerâmico, se apresenta em forma de colmeia contendo canais com seção de aproximadamente 1 mm^2 , por onde passam os gases de exaustão do motor do veículo.

A Figura 14 apresenta um bloco cerâmico de cordierita, inserido em uma carcaça metálica utilizado como suporte dos catalisadores.



Fonte: Moschovi *et al.* (2021)

A Tabela 3 apresenta os valores aproximados de PGM na produção de catalisadores automotivos.

Tabela 3 - Composição dos metais nobres na confecção de catalisadores

Metal	Quantidade (g/Kg)
Platina	1,89
Paládio	0,29
Ródio	0,10

Fonte: Adaptado de Batista e Dutra (2013)

Por meio dos gases de escape, o motor eleva a temperatura do catalisador, atingindo sua eficiência térmica em torno de 400 ° a 750 °, o que é adequado para seu ótimo desempenho (PONTÓN; PEÑA, 2018). O equipamento em bom funcionamento pode reduzir até 98% dos gases (NO_x, CO e HC) (BRANCO; BRANCO; BLUMRICH, 2016).

2.5.4 Catalisadores veiculares da linha pesada a diesel

O diesel, combustível utilizado em motores de combustão para automóveis pesados, desperta questões pertinentes a essa tecnologia. Se influencia na qualidade do ar, nos cumprimentos dos limites de emissões, quais seriam os comportamentos dos motores diesel no futuro e como os níveis de óxido de nitrogênio podem ser reduzidos ainda mais. Os motores diesel desempenham um papel importante na sociedade moderna, pois são amplamente utilizados em caminhões, ônibus, navios e automóveis de passageiros, devido ao seu consumo de combustível relativamente baixo e grande confiabilidade (JOHANSEN, 2015).

Em relação às emissões, uma combinação eficaz entre o gerenciamento de temperatura e o tratamento de gases de escape baseado em catalisadores SCR, pode reduzir as emissões de óxido de nitrogênio (“Bosch Mobility Solutions”).

Segundo Zhang *et al.* (2021), muitos países apontam claramente que a aplicação de equipamentos de redução catalítica seletiva (SCR) deveria ser totalmente implementada, com objetivo de reduzir as emissões de gases prejudiciais.

Segundo Donadel (2010), os sistemas de pós-tratamento de gases de escapamento para veículos a diesel devem operar em condições diferentes daquelas encontradas para os catalisadores de três vias, utilizados em veículos a gasolina. Nos

veículos diesel, as emissões de CO, HC, NO_x e MP devem ser convertidas em atmosfera rica em oxigênio.

No Brasil, desde 2012, por força dos limites de emissão mais rigorosos estabelecidos pela Resolução Conama n. 403/2008, os veículos pesados produzidos no país contam com o Sistema de Redução Catalisadora SCR (IBAMA, 2011).

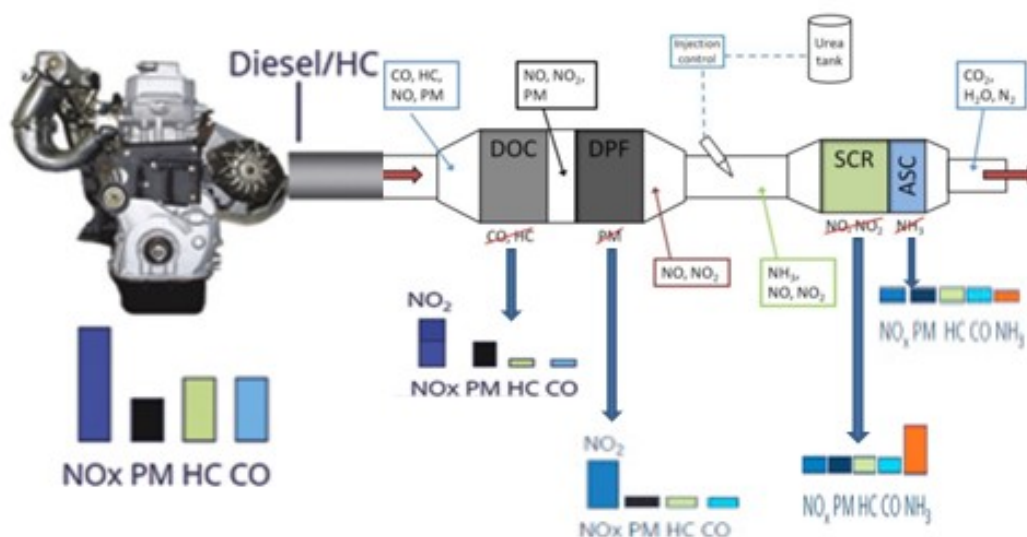
Os sistemas de tratamento de gases de escape dos motores a combustão interna diesel, diferente dos sistemas a gasolina, que possuem um único conversor catalítico instalado entre o motor e o escapamento, podem ter várias unidades individuais instaladas, por ocasião de apresentar maior volume de gases de escape (WOODFORD; CHRIS, 2022).

Para Johansen (2015), os caminhões terrestres que usam combustíveis com baixo teor de enxofre e um sistema de catalisador sequencial, possuem previsão contendo:

- Catalisador de oxidação de diesel a montante (DOC);
- Filtro de partículas de diesel catalisado (cDPF);
- Catalisador de remoção de NO_x SCR;
- Catalisador de deslizamento de amônia (ASC).

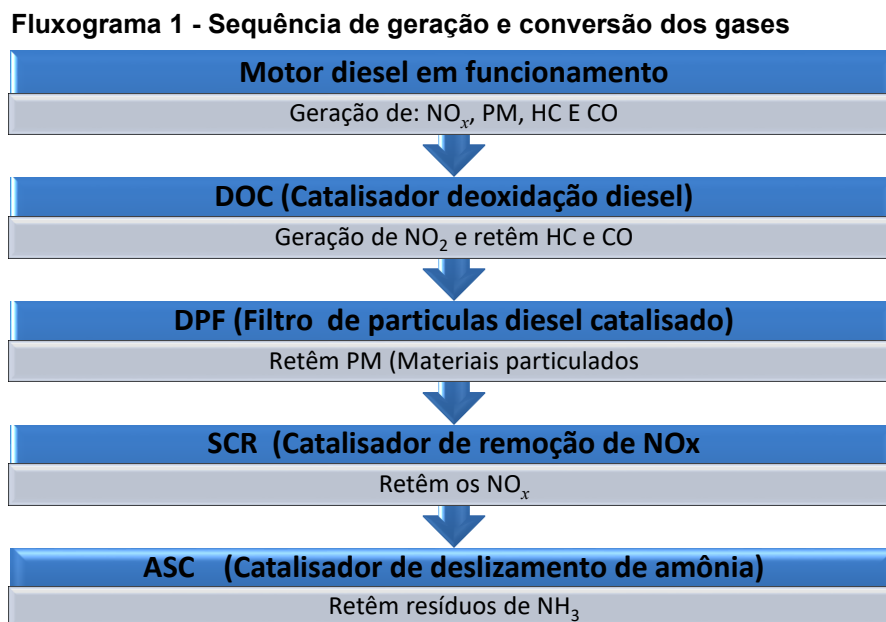
A Figura 15 apresenta a sequência para o tratamento pós-combustão de motor diesel e as conversões desejadas.

Figura 15 - Sequência pós combustão de motor diesel e as conversões química desejadas



Fonte: Xie (2017)

O Fluxograma 1 destaca as reações dos gases, ocasionadas durante a passagem do sistema de pós exaustão.



Fonte: Autoria própria (2022)

A técnica catalítica SCR é, atualmente, considerada a forma mais promissora de diminuir o NO_x ; a técnica do DOC é empregada para diminuir o CO e emissões de HC; o DPF é frequentemente utilizado para reduzir PM; e o dispositivo ASC elimina toda a sobra de NH_3 , evitando que possa ser queimada no meio ambiente.

Para Herbst *et al.* (2010), “um desafio particular é integrar todos esses componentes no espaço muito limitado no compartimento do motor de um veículo”.

Cada sistema de pós-tratamento de gases de exaustão pode ser utilizado de forma combinada ou individual (ELHAG; ARSLAN, 2018).

2.5.5 Catalisador de oxidação diesel (DOC)

Para Ehag e Arslan (2018), o DOC é um escapamento sistema de pós-tratamento (EAS) que promove a oxidação de gases de escape de saída do motor usando oxigênio.

“O DOC é um dispositivo de pós-tratamento, que reduz as emissões da fração orgânica solúvel (SOF) de PM, CO e HC de forma eficaz. Porém, não oxida a fração de

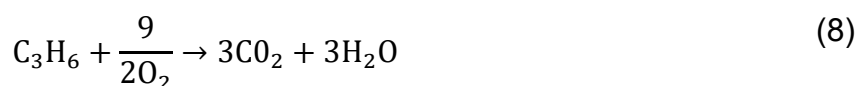
fuligem do PM” (NEHA; PRASAD; SINGH, 2020). Em geral, o DOC é utilizado junto com o catalisador SCR.

Os catalisadores de oxidação diesel se utilizam de um filtro de fluxo contínuo como suporte para os catalisadores de oxidação propriamente ditos, os quais são capazes de oxidar CO e os HC presentes nos gases de exaustão, e ainda reduzir a emissão de MP pela oxidação da fração orgânica solúvel e dos compostos adsorvidos no mesmo.

Os DOC apresentam uma estrutura “favo de mel”, de material cerâmico ou metal. Além dessa estrutura de transporte, consiste em uma mistura de óxido (camada de revestimento), composta de Al_2O_3 , CeO_2 , ZrO_2 e catalisadores ativos de metais nobres, como Pt, Pd e Rh, (RESITOGLU; ALTINISIK; KESKIN, 2014).

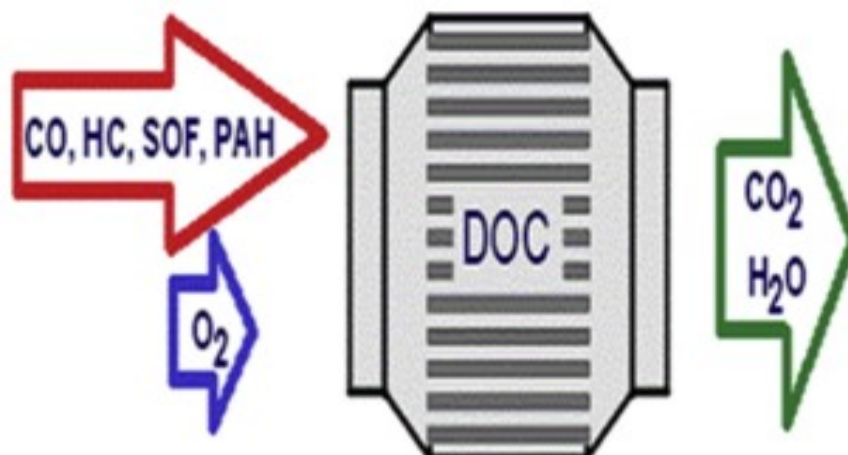
"Uma função adicional importante do DOC é aumentar a temperatura do filtro para cerca de 600°C por uma injeção de diesel suplementar, temperatura na qual a reação de combustão fuligem-oxigênio é rápida - garantindo assim a remoção total da fuligem (regeneração ativa)" (JOHANSEN, 2015).

Estudos mostram que esses catalisadores podem oxidar de 30 a 80% dos HC gasosos, e de 40 a 90% do CO presente na exaustão diesel, dependendo do tipo de máquina e da composição da exaustão. Além disso, podem remover de 30 a 50% do MP total. As reações padrão que ocorrem em DOCs estão representadas pelas equações 7, 8 e 9 (NEHA; PRASAD; SINGH, 2020).



A Figura 16 apresenta Diagrama esquemático do catalisador de oxidação de diesel (DOC).

Figura 16 - Esquemático do catalisador de oxidação de diesel (DOC)



Fonte: Neha, Prasad e Singh (2020)

2.5.6 Filtro catalítico de partículas para motores diesel (cDPF)

O Filtro Catalítico cDPF é, atualmente, utilizado apenas em veículos movidos a diesel no Brasil. Essa tecnologia também possui função catalítica. Os filtros retêm as partículas e as convertem em CO_2 e água, purificando os gases de exaustão e permitindo que o componente seja regenerado para novas filtrações. Um aumento da quantidade de emissões pode causar condição de entupimento severas do DPF. “Assim, para superar esses efeitos adversos, o DPF tem que se regenerar periodicamente, oxidando a fuligem presa no DPF” (NEHA; PRASAD; SINGH, 2020).

Dentro do DPF, o acumulado de fuligem é queimado em temperaturas elevadas (cerca de $600^\circ C$) para deixar apenas algumas cinzas, efetivamente atualizando o filtro, pronto para absorver mais gases poluídos do motor (ELHAG; ARSLAN, 2018).

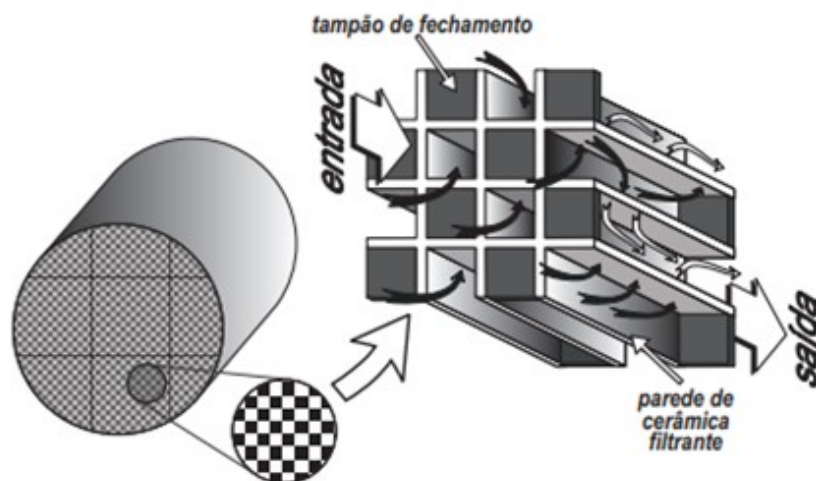
Segundo Johansen (2015), três diferentes mecanismos de combustão de fuligem são usados:

- Regeneração passiva de fuligem por NO_2 ;
- Combustão por contato direto de fuligem do catalisador;
- Regeneração ativa de fuligem com O_2 a cerca de $600^\circ C$.

Estes filtros trazem uma grande quantidade de canais com paredes de 0,3 a 0,4 mm de espessura e 15 a 50 canais por cm^2 . Os canais adjacentes estão fechados (por tampões) em extremos opostos. Os gases devem atravessar as paredes porosas

onde ficam retidas as partículas. Os filtros conseguem reter partículas entre 0,01 e 0,1 mm, como apresentado na Figura 17 (MANAVELLA, 2012).

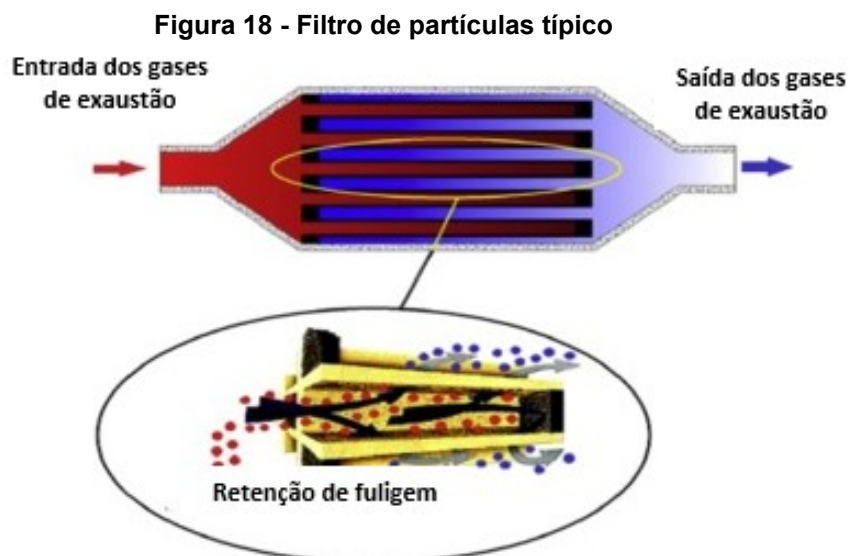
Figura 17 - Filtro catalítico de partículas



Fonte: Manavella (2012)

Estes filtros são capazes de remover o material particulado presente nos gases e, simultaneamente, reduzir os gases poluentes através de reações catalíticas que ocorrem na presença do catalisador (DONADEL, 2010).

Segundo Neha, Prasad e Singh (2020), o DPF é uma estrutura cilíndrica, geralmente construído de cordierita ou carboneto de silício monólito de estrutura parecida a de um favo de mel, ou seja, possui um grande número de pequenos canais paralelos entre si colocados na direção longitudinal do sistema de exaustão, com uma eficiência de aprisionamento de mais de 95%. A Figura 18 demonstra o funcionamento típico de um cDPF.



Fonte: Neha, Prasad e Singh (2020)

2.5.7 Catalisador de redução seletiva (SCR)

Utilizado em motores diesel Euro 5, principalmente de alta litragem, o Catalisador SCR é responsável em transformar o NO_x em nitrogênio e água. Quando o motor está exposto a cargas maiores, a quantidade de NO_x produzida aumenta drasticamente. Para prevenir o NO_x , a tecnologia SCR é implementada (DEMIRKIRAN *et al.*, 2016b).

Segundo Resitoglu, Altinisik e Keskin (2014), o SCR é uma tecnologia utilizada para reduzir as emissões de NO_x , em especial, para veículos diesel de alta carga. Por causa da baixa temperatura de exaustão, não tem sido amplamente utilizado para veículos comerciais leves. A redução é obtida injetando no SCR uma solução aquosa obtida da mistura de 33% de ureia e 67% de água pura. Ao injetar a solução no sistema de escape, com temperatura entre 170 e 200°C, a ureia se decompõem em NH_3 e CO_2 devido a 2 processos:

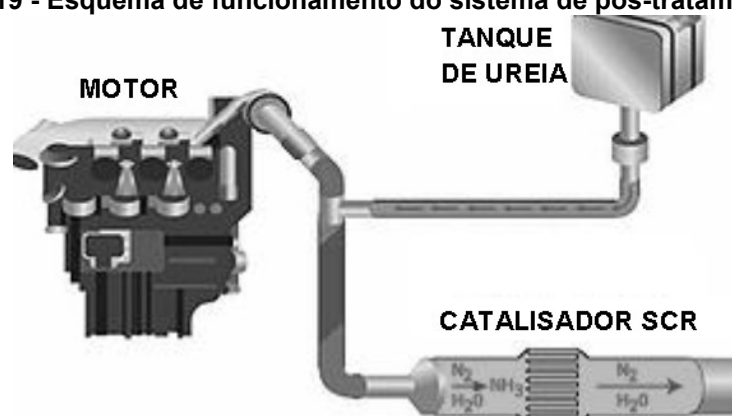
- Hidrólise: O vapor de água é o agente para a decomposição;
- Termólise: A alta temperatura dos gases é o agente para a decomposição.

Existem dois tipos de SCR: Seletivo de Amônia Redução catalítica (Amônia-SCR) e Hidrocarbonetos Redução catalítica seletiva (HC-SCR). O princípio dos dois tipos de SCR são semelhantes, mas o reagente adicionado ao escapamento antes de

passar pelo catalisador é diferente (PHUGOT *et al.*, 2018). A temperatura superior a 200°C é condição para um funcionamento eficiente do SCR (MANAVELLA, 2012). Para Way *et al.* (2009), a eficiência máxima de conversão é obtida a 350 C“.

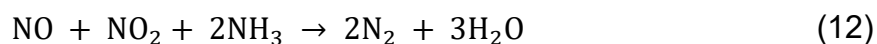
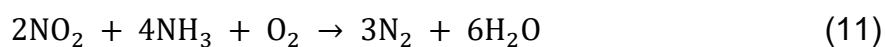
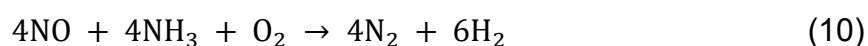
O amoníaco é tóxico, e para evitar a sua queima na atmosfera, acontece o processo de redução no interior do catalisador a uma temperatura entre 200 e 450°C, com os NO_x liberando N₂ e H₂O. A Figura 19 mostra um sistema SCR típico.

Figura 19 - Esquema de funcionamento do sistema de pós-tratamento SCR



Fonte: Silva (2014)

Conforme verificado nas equações químicas 10, 11 e 12, a amônia (NH₃) converte o NO_x em N₂ e vapor de água H₂O. Como resultado, a poluição do ar ocasionada pelo NO_x diminuirá (DEMIRKIRAN *et al.*, 2016a).



2.5.8 Ativação dos catalisadores

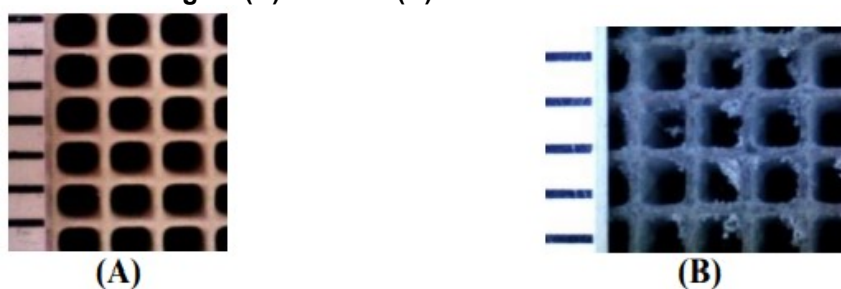
A ativação do catalisador ocorre diante de um valor mínimo de temperatura, ocasionada pelo acesso dos gases na entrada do dispositivo catalítico. A falta da temperatura mínima que se encontra entre 170°C e 200°C, para o processo de ativação do catalisador SCR, não reduzirá os gases NO_x por ineficiência de reação

química entre os metais nobres do catalisador, os gases pós exaustão e a ureia líquida injetada na entrada do dispositivo catalítico. A falta da mínima temperatura pode ocorrer pelos seguintes motivos:

- Dispositivos SCR, COD e filtro cDPF apresentando fissuras internas ou externas;
- Dispositivos SCR, COD e filtro cDPF entupido por fuligem
- Falha no controle de mistura a/c;
- Baixo poder de queima do combustível na câmara de combustão;
- Vazamentos da tubulação;
- Baixa reação química (exotérmica) do COD e SCR.

Um catalisador em bom estado apresenta eficiência superior a 90% ou 95%. Quando a eficiência cai por abaixo de 65%, com o veículo rodando a velocidade constante, entre 50 km/h e 80 km/h, o catalisador é considerado defeituoso (MANAVELLA, 2012). A Figura 20 destaca duas colmeias de catalisadores, onde a colmeia (A) ilustra um catalisador virgem, e a colmeia (B), um catalisador usado. Os aspectos típicos foram obtidos por uma microscopia óptica apresentado na obra de Batista e Dutra (2013).

Figura 20 - Aspectos típicos, obtidos por microscopia óptica, de catalisadores automotivos virgem (A) e usado (B). Escala lateral em mm



Fonte: Adaptado Batista e Dutra (2013)

Para Pontón e Peña (2018), um ponto a ser observado e que pode indicar um perfeito funcionamento ou uma deficiência de um catalisador, é a diferença de temperatura entre a entrada e a saída do catalisador.

Se a temperatura de saída for, no mínimo, 10% superior a entrada, o catalisador está funcionando corretamente, mas se a diferença for maior que 70°C, há

um problema no catalisador. Se a temperatura for mais baixa na saída em relação a entrada, o catalisador também não estará funcionando e pode ter um desgaste do filtro, catalisador entupido e quebra da carcaça.

Os catalisadores podem perder sua atividade catalítica devido ao resultado de um ou vários fenômenos, cujo efeito resultante é a redução dos sítios cataliticamente ativos (BATISTA; DUTRA, 2013).

Sabendo-se que o desempenho do catalisador diminui em função de seu uso, diversos aspectos estruturais contribuem para uma melhor compreensão do fenômeno da desativação (AUGUSTO, 2010). Os principais aspectos são:

- Espessura das paredes;
- Número de canais por seção reta (densidade de células);
- Área frontal aberta (*open frontal area* - OFA);
- Área superficial geométrica (*geometric surface area* - GSA);
- Diâmetro hidráulico (Dh) são parâmetros geométricos que influenciam o desempenho e a durabilidade do catalisador.

A desativação do catalisador pode ocorrer por uma série de razões, tanto químicas como físicas. Geralmente, pode-se dividi-lo em sinterização de suporte, sinterização de metal, transformação de fase, coque, incrustação e envenenamento (NEYESTANAKI *et al.*, 2003).

Fatores simultâneos, como o elevado fluxo de gases, a alta temperatura de operação, a exposição contínua a contaminantes e os choques eventuais, muitas vezes intensos, em sua estrutura, são possíveis causas da desativação dos catalisadores automotivos. O estudo da caracterização e parâmetros operacionais pode contribuir para uma melhor compreensão do fenômeno da desativação, assim como, de suas implicações na emissão de gases veiculares. Um catalisador automotivo pode ser desativado de forma permanente ou temporária.

Segundo Tabarelli (2012), a desativação catalítica, pode ser definida como um fenômeno no qual a estrutura ou estado do catalisador é alterado, levando a perda dos sítios ativos, diminuindo o seu desempenho.

Ainda conforme Tabarelli (2012), a desativação de um catalisador não significa a sua destruição, pois o equipamento catalítico dependendo do fenômeno,

pode ser regenerado ou reativado. A desativação pode ocorrer por envelhecimento, envenenamento ou destruição e pode ter origem térmica, química ou mecânica.

Para Manavella (2012), os catalisadores com substrato cerâmico sofrem um processo de envelhecimento térmico e outro químico. O processo de envelhecimento se manifesta como uma queda do índice de eficiência de conversão. Em um sistema funcionando corretamente, o processo de envelhecimento pode ter uma duração comparável à vida útil do veículo.

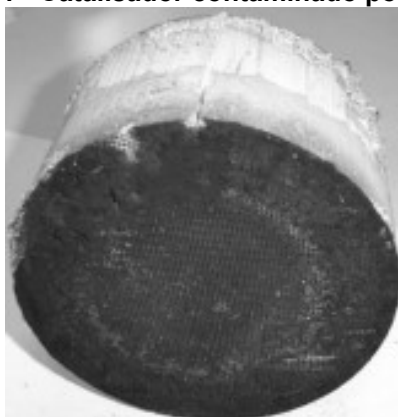
A desativação térmica ocorre quando há falhas no sistema de alimentação e de ignição da mistura ar-combustível. O excesso de combustível não queimado na câmara de combustão acaba sendo queimado dentro do catalisador, o que provoca temperaturas excessivamente altas entre 800 e 900°C, desativando-o permanentemente (BRANCO; BRANCO; BLUMRICH, 2016).

A desativação química é resultante da interação de contaminantes ao sistema catalítico, como fósforo e zinco, constituintes de óleos lubrificantes, dentre outros. Nesse tipo de desativação, é possível ocorrer o envenenamento dos sítios catalíticos (SÁ *et al.*, 2011). Para Neyestanaki *et al.* (2003), em alguns casos o veneno pode reagir diretamente com o site ativo, resultando na formação de novos compostos.

A desativação mecânica trata de perdas de atividade do catalisador por dano em sua conformação monolítica (quebra por impacto, por exemplo) ou perda de material catalítico por abrasão ou por descolamento, ou seja, relaciona-se à fratura por choque térmico, fratura por impacto e desgaste por atrito.

Os filtros catalíticos cDPF, demasiadamente carregado de partículas, podem provocar danos ao motor em função de contrapressão excessiva, ou até ser ele próprio danificado devido à alta temperatura interna, que pode chegar a 1000°C (MANAVELLA, 2012). A Figura 21 delimita um catalisador totalmente contaminado.

Figura 21 - Catalisador contaminado por fuligem



Fonte: Adaptado de Silva, Viana e Mohallem (2009)

Woodford e Chris (2022) afirmam que um ponto muito importante sobre os conversores catalítico é a necessidade do uso de combustíveis livres de chumbo, pois este elemento atua como um “veneno” para o catalisador e impede este de atuar como deveria.

2.5.9 Influência das variáveis na eficiência catalítica

As principais variáveis que influenciam na eficiência da redução catalítica são: temperatura, gases, quantidade de ureia líquida injetada e mistura a/c. Um sistema típico de tratamento dos gases possui sensores integrados. A função desses sensores é realizar a monitoração das variáveis e enviar sinais elétricos para um sistema de controle eletrônico dedicado. Os sinais dessas variáveis podem ser visualizados apenas em oficinas especializadas.

O sistema eletrônico é utilizado, além de outras funções, para o controle de mistura a/c, que influencia na temperatura dos gases na sujeira dos filtros e na injeção de ureia em um sistema com catalisador SCR.

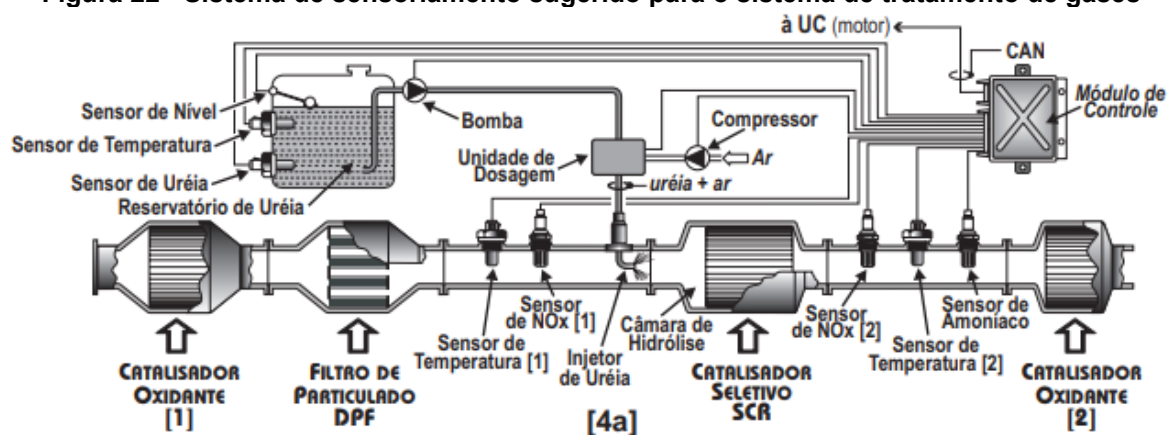
Assumindo a função de interface entre as variáveis e o sistema eletrônico, os sensores que podem ser encontrados nos sistemas de pós-tratamento de gases pós exaustão são:

- Sensor de temperatura;
- Sensor de oxigênio de banda larga (de relação ar/combustível);
- Sensor sonda Lambda;
- Sensor diferencial de pressão;

- Sensor de NO_x ;
- Sensor de amônia.

A Figura 22 apresenta um modelo sugerido para o tratamento de gases pós exaustão. O objetivo é mostrar de forma ampla a disposição dos elementos sensores, que podem ser encontrados nas aplicações de mercado.

Figura 22 - Sistema de sensoriamento sugerido para o sistema de tratamento de gases



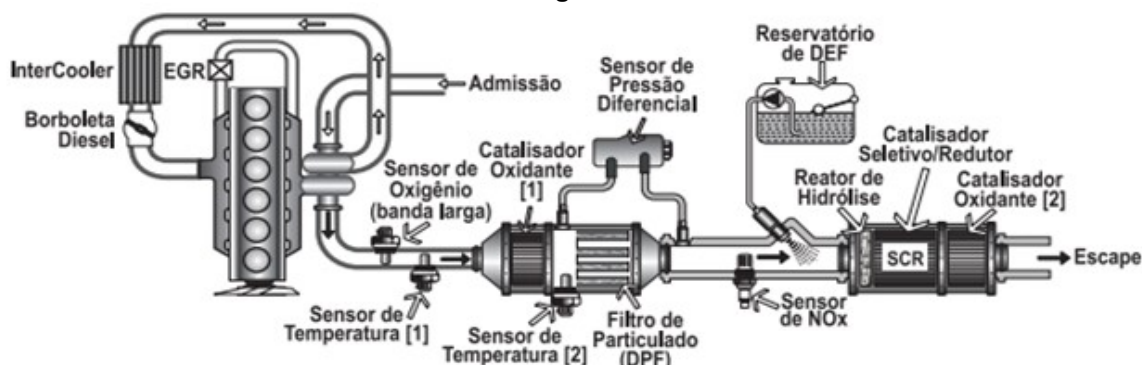
Fonte: Manavella (2018b)

Segundo Manavella (2018b), a função de cada sensor que ilustram a Figura 22 é:

- Sensor de temperatura (1): controlar a janela de máxima eficiência de conversão do catalisador seletivo, que está na faixa de 200°C a 450°C.
- Sensor de temperatura (2): monitorar a temperatura dos gases de saída do catalisador SCR com o objetivo de avaliar o seu funcionamento.
- Sensores de NO_x (1) e (2): O objetivo é o ajuste correto da dosagem de ureia na proporção estequiométrica e obter: máxima eficiência de conversão de NO_x e níveis mínimos de amoníaco na saída do catalisador SCR. O sensor de NO_x pode estar integrado com o sensor de O_2 de banda larga (WEGO) num único dispositivo que fornece simultaneamente, a concentração de oxigênio e dos óxidos de nitrogênio. Estes sensores são utilizados pelo monitor de NO_x para o cálculo da eficiência de conversão;
- Sensor de amoníaco: permite avaliar a eficiência de conversão do catalisador SCR e evitar a emissão indesejada de amoníaco.

A Figura 23 ilustra um sistema de controle de gases de exaustão utilizando sensor de oxigênio banda larga, ao invés de um sensor de NO_x , e um sensor diferencial de pressão que mede o diferencial de pressão entre a entrada e saída do filtro.

Figura 23 - Sistema de tratamento utilizando sensores diferencial de pressão e sensor de oxigênio



Fonte: Manavella (2018b)

A informação do sensor diferencial de pressão é utilizada para determinar a necessidade da regeneração ativa do DPF. A opção de se utilizar sensor de O_2 no lugar do sensor de NO_x , deve-se ao cálculo da quantidade de NO_x obtido no projeto do catalisador, das condições de funcionamento do motor e do fluxo de gases de escape.

2.5.10 Influência da relação ar/combustível nos catalisadores

Os padrões mundiais para a redução das emissões de gases, exigem que os processos de combustão sejam controlados de forma mais eficaz. Estudos afirmam que o controle da relação a/c é um dos métodos que se apresenta como eficientes para a redução dos gases de exaustão, nocivos ao meio ambiente.

Para fazer o veículo se movimentar e funcionar corretamente, uma quantidade exata de ar deve ser misturada com uma quantidade apropriada de combustível no motor. A referência de mistura entre ar-combustível é chamada de estequiometria. Para motores diesel, esta relação se apresenta em 15,2: 1, o que significa 15,2 partes de ar para 1 parte de combustível (“Sonda Lambda - MTE-THOMSON”, 2021). Para Pulkrabek (2014), se o combustível for insuficiente para total

combustão, a mistura é pobre; caso a mistura estiver com excesso de combustível, a mistura é considerada rica.

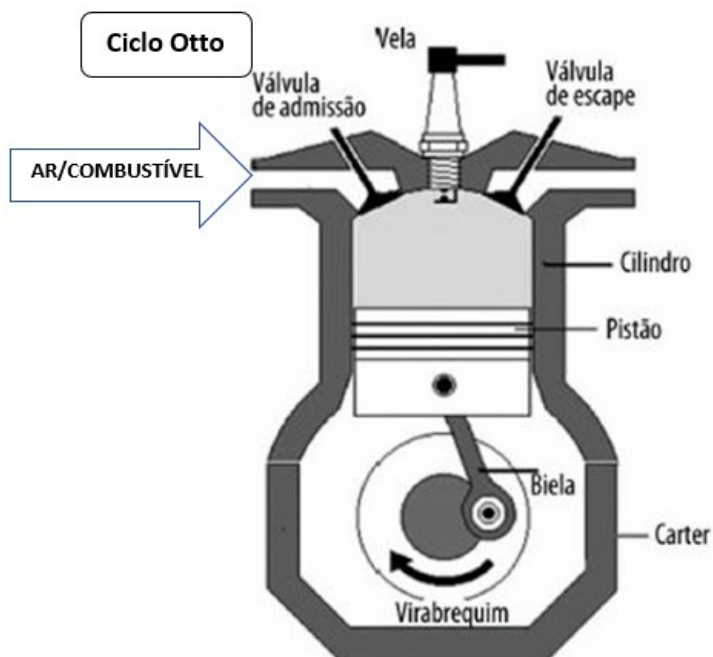
Os dispositivos utilizados para auxiliar no controle dessa relação são os sensores de oxigênio, que transmitem detalhes do processo a unidade de controle eletrônico (EUC) (ZHANG *et al.*, 2018). O sensor de oxigênio, também chamado de sensor lambda, determina a concentração de oxigênio nos sistemas de escapamento dos veículos automotores em relação a sua existência no meio ambiente. Envia sinais elétrico ao sistema de gerenciamento eletrônico do motor para que se possa realizar correções na mistura a/c.

A emissão de poluentes também está diretamente ligada ao valor de lambda. As emissões de poluentes podem ser reduzidas com o uso de catalisadores, mas eles dependem diretamente do valor lambda para o perfeito funcionamento. Quando a mistura a/c é rica, o combustível não é todo consumido e é expelido pelo escape em forma de HC e CO. Em contrapartida, uma mistura pobre afeta a potência do motor (PEREIRA, 2015).

Os sensores de oxigênio mais utilizados atualmente são: o EGO (*Exhaust Gas Oxygen*), também conhecido como sonda lambda de banda estreita (*Narrow Band Lambda Sensor*), e o sensor de oxigênio UEGO (*Universal Exhaust Gas Oxigen*), também chamado de sonda lambda linear ou sensor lambda de banda larga (*Wideband Lambda Sensor*).

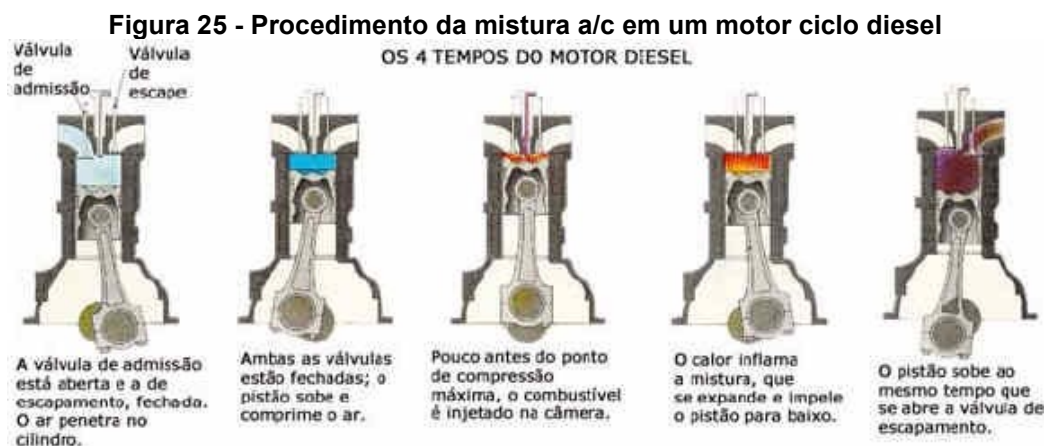
Para os motores do ciclo OTTO quatro tempos, a mistura de ar combustível é realizada antes do acesso a câmara de combustão, visto que utilizam combustível de baixa volatilidade, como a gasolina e o álcool. Para a ignição, necessitam de centelha produzida pelo sistema elétrico. A Figura 24 exemplifica como ocorre a mistura a/c em um motor ciclo Otto.

Figura 24 - Procedimento da mistura a/c em um motor ciclo Otto



Fonte: Adaptado de Homa e Jorge (2010)

Para os motores do ciclo diesel quatro tempos, a mistura a/c é realizada em separado na câmara de combustão. A inflamação do combustível injetado sob pressão na câmara de combustão ocorre pela compressão de ar e consequente elevação da temperatura. A Figura 25 exemplifica como ocorre a mistura a/c em um motor ciclo diesel.



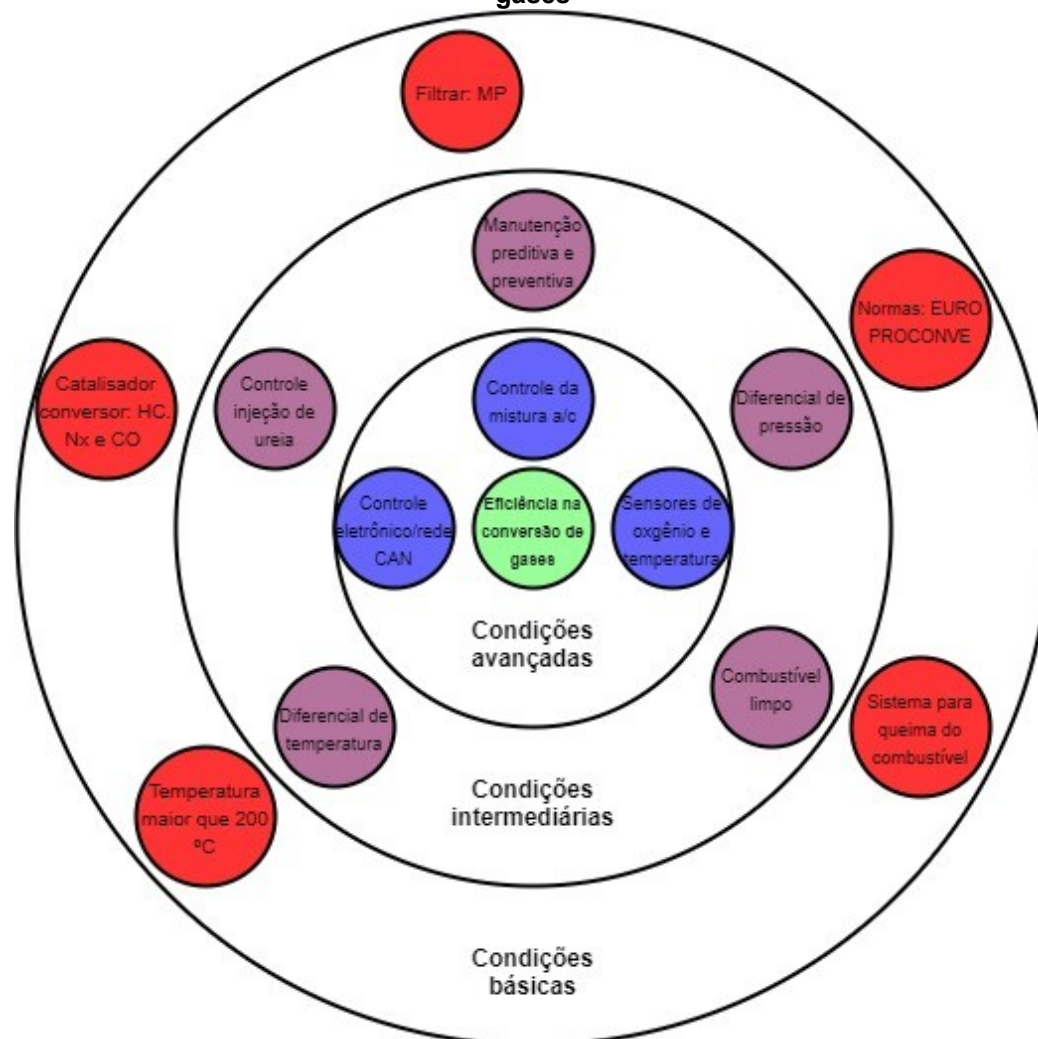
Fonte: Admin-Oleo (2022)

3 ESTADO DA TÉCNICA

A função de um sistema de conversão catalítica é filtrar os MP (materiais particulados) e converter os gases nocivos provenientes da queima de combustível fóssil (diesel) dos motores de combustão interna, em gases que não agridam o meio ambiente e seres vivos. Este capítulo, apresenta as condições ideais das grandezas físicas envolvidas e os dispositivos eletrônicos utilizados que com a integração auxiliam no sensoriamento das variáveis.

O Gráfico 2 ilustra as condições necessárias para que se possa obter a eficiência na conversão dos gases com o auxílio de catalisadores e filtro. As condições estão divididas em básicas, intermediárias e avançadas.

Gráfico 2 - Condições necessárias para que se possa obter a eficiência na conversão dos gases



Fonte: Autoria própria (2022)

Segundo Fernandes (2007), a vida útil do catalisador automotivo é variável, principalmente devido às altas temperaturas a que é submetido e pela interferência de contaminantes do combustível. Tendo como referência os dados fornecidos pelo Gráfico 2, a proposta desse trabalho será desenvolver e implementar um sistema de monitoramento capaz de verificar o desempenho de um catalisador SCR. As variáveis a serem verificadas pelo sistema embarcado são:

- Eficiência de um catalisador SCR em função da temperatura;
- Eficiência de um catalisador SCR em função da redução de gases NO_x .

A redução de NO_x acontece no catalisador SCR e para estar funcionando normalmente, o dispositivo deve apresentar uma diferença de temperatura entre seus extremos.

3.1 Temperatura dos gases de escape

A eficiência de um sistema pós exaustão depende, além de outros fatores, de valores mínimos de temperatura, para que seja possível o processo de catálise e regeneração do filtro DPF. Inicialmente, a temperatura pode ser obtida através do próprio processo de exaustão, com uma mistura mais rica, injeção de combustível no escapamento e reações exotérmicas entre os gases e os metais suportados no interior do catalisador.

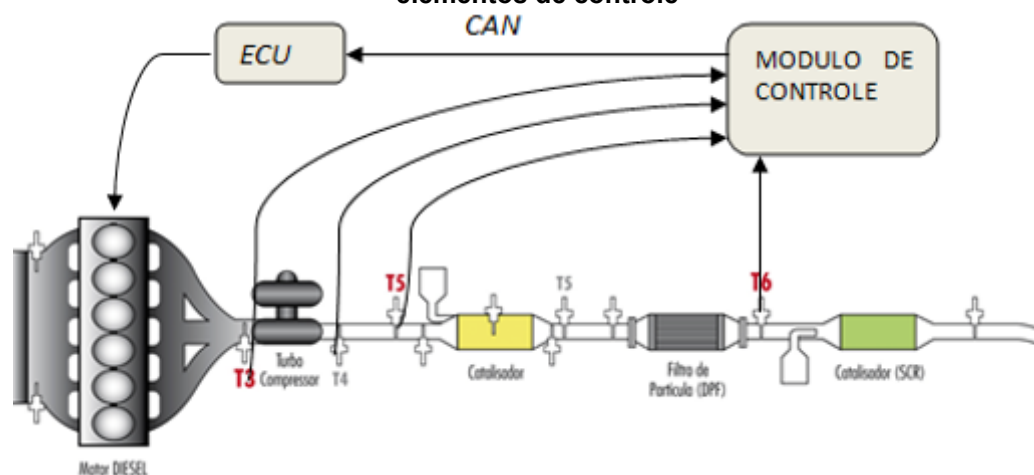
Para que os valores de temperatura sejam corrigidos ao longo do processo, é necessário a integração entre elementos sensores e dispositivos eletrônicos de controle. Usualmente, os mais comuns são:

- Sensor de temperatura;
- Modulo de controle;
- ECU.

3.2 Sensor de temperatura

Os sensores de temperatura, conhecidos como EGTS, (*Exhaust Gas Temperature* - Temperatura dos Gases de Exaustão), detectam a temperatura nos gases do escapamento, convertem em Voltagem (V) e expedem sinal elétrico a um módulo de controle, que através de uma rede CAN, envia dados à ECU (*Engine Control Unit* - Unidade de Controle do Motor). A ECU atua no controle a/c influenciando nas emissões dos gases de exaustão (EGTS - MTE-THOMSON, 2021). A Figura 26 representa uma sugestão de funcionamento, não simbolizando um modelo de aplicação a algum sistema.

Figura 26 - Sistema de tratamento de gases de exaustão, com sensores EGT atuando como elementos de controle



Fonte: Adaptado EGTS- MTE-THOMSON (2021)

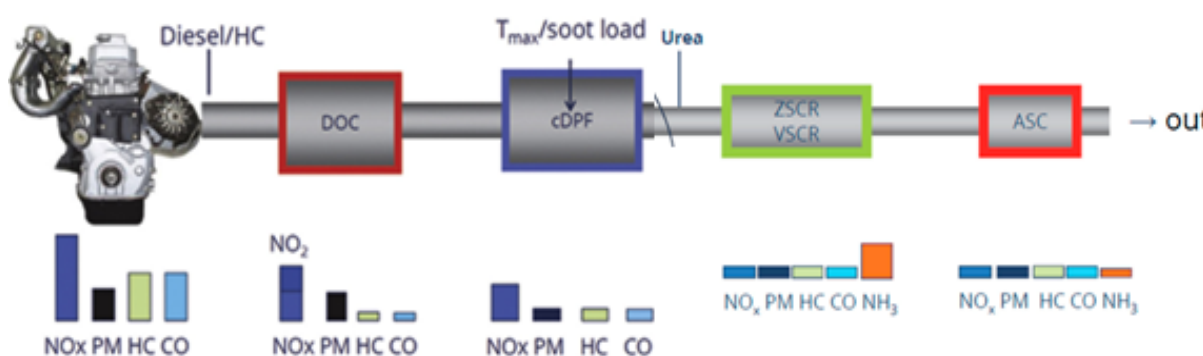
Na abordagem, a variável de temperatura tem grande relevância, pois conforme comentado nas referências bibliográficas, um catalisador pode ser ativado ou desativado diante de um range de temperatura. O valor mínimo é necessário para que o dispositivo inicie a conversão catalítica, mas a ultrapassagem do valor máximo pode ocasionar um mal funcionamento, até mesmo sua desativação definitiva. Ficou também evidenciado pelas referências bibliográficas que a temperatura na entrada de um catalisador não se demonstra na mesma proporção na saída, quando o dispositivo se apresenta em estado ótimo de funcionamento.

Problemas com o processo de tratamento dos gases podem ocorrer devido à ampla faixa de temperatura de operação e mudanças bruscas de temperatura. O washcoat pode ser fraturado e/ou separado do monolito por ação de contração e

expansão térmicas repentinas. Dependendo da temperatura, pode-se também observar a ocorrência de volatilização da fase ativa.

Outro processo decorrente da temperatura é a sinterização que ocasiona a perda da superfície ativa via modificação estrutural. A sinterização é um processo irreversível que pode consistir em crescimento de cristaltos metálicos em catalisadores (NEYESTANAKI *et al.*, 2003). A Figura 27 traz um sistema de pós exaustão.

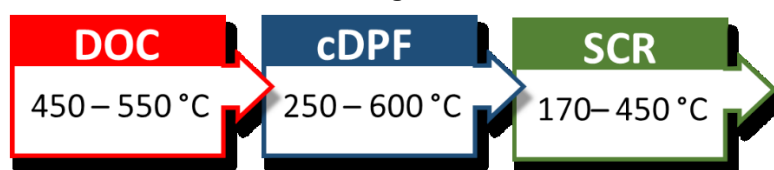
Figura 27 - Sistema de pós exaustão e o a redução dos gases



Fonte: Adaptado de Johansen (2015)

A Figura 28 apresenta os valores de temperatura necessários para o desempenho do sistema apresentado pela Figura 27.

Figura 28 - Valores de temperatura necessários para o desempenho do sistema de tratamento dos gases



Fonte: Autoria própria (2022)

O catalisador DOC pode atingir a temperatura de 550°C devido à mistura rica e reação de CO e HC serem exotérmicas, o que quimicamente produz calor. O cDPF pode atingir a temperatura de até 600°C, com o auxílio do DOC que recebe uma injeção suplementar de diesel quando necessário. Devido às reações químicas dos metais nobres no interior do SCR, a temperatura pode atingir até 450°C.

O sensor de temperatura dos gases de escape (sensor EGT) é responsável por enviar sinais de grandeza elétrica para a ECU, sinalizando o funcionamento da reação química que só acontece em função da temperatura. Para EGTS - MTE-

THOMSON (2021), falha ou defeito de um sensor EGT, além de acarretar um maior consumo de combustível e sobreaquecer o motor pode:

- Realizar regeneração desnecessária reduzindo a vida útil do filtro de PM;
- Obter perdas de energia se o sensor não estiver detectando o nível de saturação do filtro;
- Deterioração do turbocompressor, componentes CAT, SCR e DPF;
- Aumento dos níveis de poluição de CO, NO_x e HC.

3.2.1 Característica dos Sensores de Temperatura

Especificamente, os sensores utilizados nos sistemas de pós-tratamento devem atender às especificações OBD, que estabelecem, dentre outros requerimentos, o tempo de resposta e faixa de temperatura (MANAVELLA, 2012). Os sensores de temperatura mais comuns utilizados nos sistemas de pós-tratamento são:

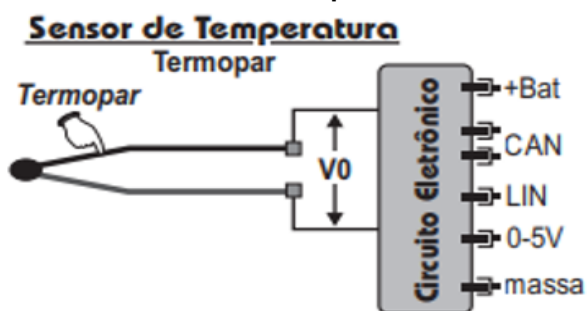
- Sensor de termopar;
- Sensor RTD (resistivo).

3.2.2 Sensor termopar

Um termopar pode ser utilizado para medir diretamente a diferença de temperaturas ou para medir uma temperatura absoluta, colocando uma junção a uma temperatura conhecida (THOMAZINI; ALBUQUERQUE, 2020). Na realização prática do termopar, 2 condutores de diferentes materiais são soldados, formando a junção quente que estará em contato com os gases de escape. Os extremos livres constituem a junção fria, dentre as quais é medida a tensão resultante.

A Figura 29 reitera o exemplo de um termopar específico para sistemas de pós-tratamento automotivo, no qual o circuito eletrônico mede a tensão V_0 e a transforma em sinais utilizados em sistemas automotivos. As principais vantagens são: alta temperatura suportada (até 1700OC) e rápida resposta.

Figura 29 - Conexão de um termopar a um sistema eletrônico



Fonte: Manavella (2012)

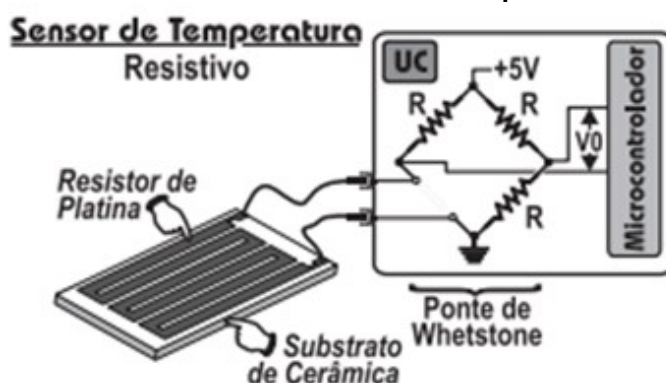
3.2.3 Sensor resistivo RTD

Para Thomazini e Albuquerque (2020), as termorresistências, ou RTD (*Resistance Temperature Detectors*), são sensores de temperatura cujo princípio de funcionamento baseia-se na variação da resistência elétrica do elemento condutor em função da temperatura.

A termoresistência de platina é a mais utilizada, por conta de mostrar melhor estabilidade e precisão. A sua curva é padronizada conforme a norma DIN - IEC 751 - 1985. Convencionou-se chamá-la de Pt-100 por possuir uma resistência de 100 Ω a 0°C.

As termoresistências podem ser conectadas ao sistema de condicionamento de sinal. A Figura 30 demonstra um sensor RTD saída 2 fios, conectado a uma ponte de *Wheatstone* (condicionamento do sinal elétrico) que, por sua vez, é conectado a um microcontrolador.

Figura 30 - RTD saída 2 fios conectado a uma ponte de Wheatstone



Fonte: Adaptado de Manavella (2012)

3.3 Método de avaliação na redução dos gases NO_x

O método utilizado para avaliar a redução de gases realizado pelo catalisador SCR é a utilização de sensores de NO_x .

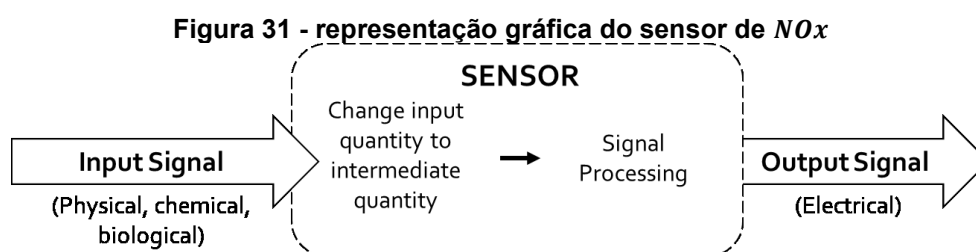
3.3.1 Sensor de NO_x

O sensor de NO_x tem como princípio de funcionamento a célula de *Nerst*. A célula é formada por um elemento de óxido de zircônia e dois eletrodos de metais nobres como platina e ródio.

Os sensores de NO_x têm por objetivo o ajuste correto da dosagem de ureia na proporção estequiométrica, para obter máxima eficiência de conversão de NO_x e níveis mínimos de amoníaco na saída do catalisador SCR. O sensor de NO_x pode estar integrado com o sensor de O_2 de banda larga (WEGO) em um único dispositivo que fornece, simultaneamente, a concentração de oxigênio e dos óxidos de nitrogênio. O gás NO_x é formado, basicamente, de 90% de NO e 10% de NO_2 (MANAVELLA, 2018a).

Os sensores de NO_x medem a concentração de oxigênio e óxido de nitrogênio na composição do gás de escape.

O sensor é um transdutor de uma fonte de energia para outra fonte de energia. Quando o sinal de entrada é aplicado com a ajuda do sensor, ele será convertido para outras fontes de energia. Essas mudanças podem ser físicas, biológicas ou químicas (SRIVASTAVA, 2021). A Figura 31 ilustra a representação gráfica do sensor.



Fonte: Adaptado de Srivastava (2021)

A Figura 32 apresenta um sensor de NO_x utilizado em caminhões diesel da Mercedes Bens.

Figura 32 - Sensor de NO_x utilizado em caminhões diesel



Fonte: NO_x sensor; *Nitrogen sensor for Benz /Audi/BMW/ sensors for scr system (2022)*

Os gases de escapamento entram pelos orifícios do sensor de NO_x e passam por três câmaras:

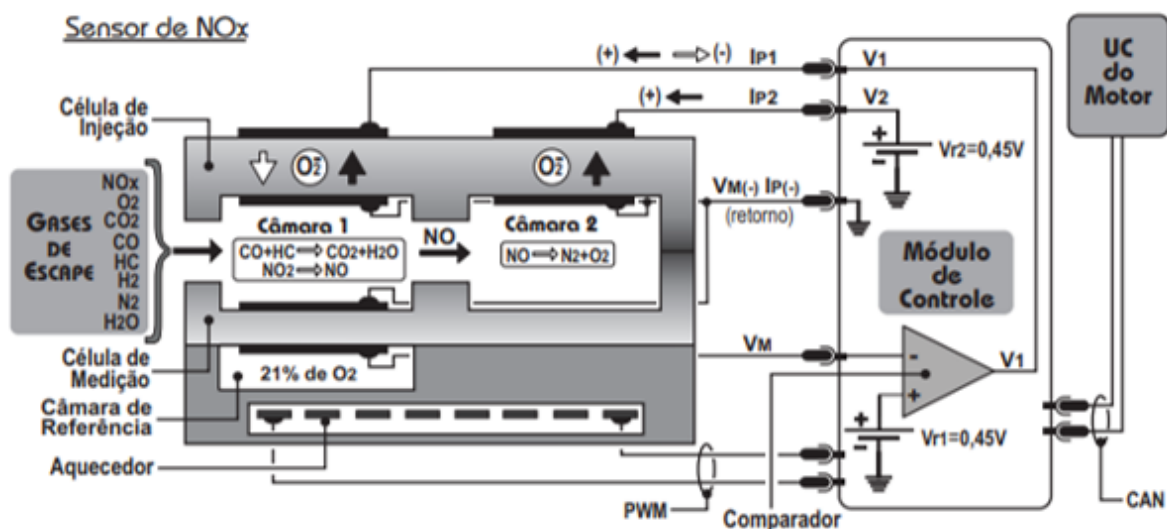
Primeira câmara: Através de um processo de oxirredução, o NO_x (NO₁, NO_s, ...NO_n) é reduzido para NO e o restante do oxigênio da mistura é removido, restando apenas o gás NO.

Segunda câmara: Pela ação catalítica do ródio associado a uma corrente elétrica aplicada aos eletrodos, o equilíbrio químico do NO é rompido e reduzido a N₂ + O₂.

Terceira câmara: Esta encontra-se preenchida com ar atmosférico, portanto, contém cerca de 21% de oxigênio e serve de referência para a medição da quantidade de oxigênio presente na segunda câmara.

A diferença de íons de oxigênio entre as duas câmaras gera uma diferença de potencial entre os eletrodos de platina. Dessa forma, é possível calcular a quantidade de oxigênio presente na segunda câmara determinando a quantidade de NO_x presente nos gases de escape (MANAVELLA, 2012).

A Figura 33 aponta o esquema elétrico sensor de NO_x. Basicamente, é constituído por uma célula de medição e uma outra de bombeamento (injeção) de duas câmaras nas que se difundem os gases de escape em forma constante: câmara 1 com eletrodos de platina (oxidante), câmara 2 com eletrodos de ródio (reduzidor) e câmara 3 com o gás O₂ de referência (21%).

Figura 33 - Esquema elétrico do sensor de NO_x 

Fonte: Adaptado de Manavella (2012)

As funções do módulo de controle são: medir a tensão V_m da célula de medição e as correntes I_{p1} e I_{p2} ; gerar as tensões de V_1 e V_2 de controle das câmaras da célula de injeção ou bombeamento; controlar o aquecedor do sensor. Disponibilizar as informações do sensor na rede CAN.

4 MATERIAIS E METODOS

Para o efetivo tratamento dos gases pós-combustão, é necessário que o catalisador esteja em atividade. Sensores são dispostos no catalisador para que, através dos sinais elétricos desses dispositivos, possa-se avaliar a eficiência da redução catalítica.

Este capítulo apresenta os materiais e dois métodos que podem ser utilizados para a validação do sensor de monitoramento proposto nesta Tese. Os métodos são:

- Método de validação teórica;
- Método de validação teste *in loco*;
- Método de validação em laboratório.

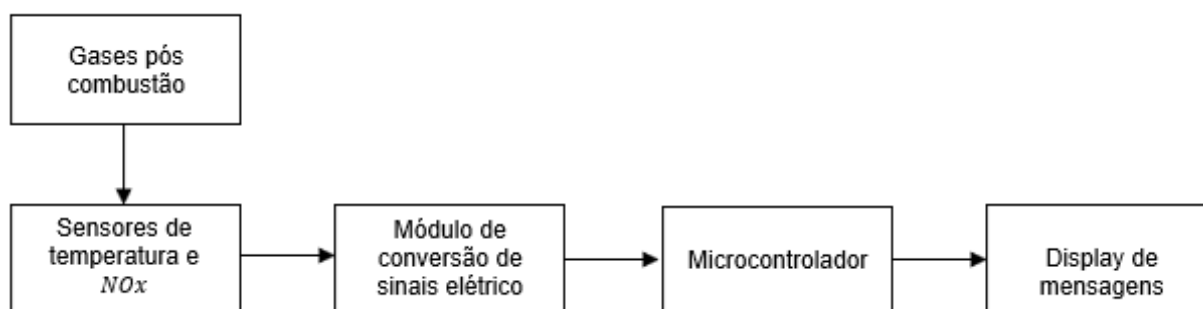
4.1 Método de validação teórica

Para o método de validação teórica, foi utilizada as equações matemáticas desenvolvidas. Gráficos foram desenvolvidos representando a variação do sinal elétrico em função da temperatura e do nível de gás NO_x , possível em um sistema de pós combustão.

4.2 Método de validação *in loco*

O método *in loco* se caracteriza utilizando o sensor de monitoramento diretamente no catalisador, quando este está exposto aos gases de pós-combustão, refletindo uma situação real de funcionamento. O sensor é constituído a partir da integração de sensores de gás NO_x , sensores de temperatura, módulos de conversão de sinais elétricos dos sensores, microcontrolador e display LCD. O Desenho 1 apresenta o diagrama de blocos com a sequência do processo de monitoramento, que tem como objetivo sinalizar em um display LCD, mensagens gráficas que sinalizam o funcionamento do catalisador automotivo.

Desenho 1 - Sequência do processo de monitoramento do catalisador



Fonte: Autoria própria (2022)

O sensor poderá auxiliar o condutor na estimativa do desempenho e da vida útil do catalisador SCR, através da interpretação das mensagens gráficas apresentadas pelo *display* LCD. As mensagens poderão sugerir diante de interpretações operacional do veículo, a aplicação de soluções de manutenções como: preventiva, corretiva e até mesmo a substituição do catalisador.

Os gases NO_x não são tratados nos dispositivos catalíticos instalados antes do catalisador SCR, e o combustível adulterado contribui para a geração desses gases, podendo também ser uma opção de avaliação dessas fontes de energia. Outra variável a ser avaliada é a temperatura interna do catalisador SCR.

Para implementar o projeto desenvolvido diretamente no sistema de escoamento dos gases pós combustão, torna-se necessário realizar a aquisição de materiais que sejam compatíveis com o ambiente inóspito apresentados pelos gases pós combustão.

4.2.1 Materiais

A Tabela 4 apresenta os materiais a serem utilizados na implementação do sistema de monitoramento *in loco*.

Tabela 4 - Materiais utilizados na implementação do sistema de monitoramento

Material	Tipo	Quantidade (unidade)
Catalisador	SCR	1
Sensor	Temperatura EGTS	2
Sensor	NO_x	2
Modulo conversor	A/D (Analógico/Digital)	1
Display	LCD 16 x 4	1
Microcontrolador eletrônico	Analógico/Digital	1

Fonte: Autoria própria (2022)

4.2.2 Catalisador SCR

O catalisador SCR é responsável por transformar o NO_x em nitrogênio e água. O dispositivo é formado por uma capa de proteção metálica e elemento cerâmico revestido não integralmente por metais nobres. Internamente, o catalisador pode atingir um valor de 450°C , devido à reação exotérmica dos gases quentes com os metais que revestem o suporte cerâmico do catalisador. A Figura 34 traz um catalisador SCR utilizado em caminhões.

Figura 34 - Catalisador típico para caminhões diesel



Fonte: Adaptado de Perim (2022)

4.2.3 Sensor de temperatura EGTS

O EGTS é um sensor de temperatura RTD que pode controlar altíssimas temperaturas do escapamento dos veículos. O sensor escolhido para esse trabalho apresenta uma tecnologia comprovada de película fina tipo Sanduíche, entre um substrato cerâmico e uma camada fina de vidro, que oferece vantagens significativas. O RTD de filmes finos de platina de última geração fornece maior proteção contra tensões ambientais e mecânicas, ao mesmo tempo em que oferece melhores tempos de resposta levando menos de 11 milissegundos para saltar 300°C . A Tabela 5 apresenta informações a respeito do sensor RTD.

Tabela 5 - Informações sensor RTD

Tipo de tecnologia	RTD cerâmico
Montagem	de inserção com rosca
Outras características	em inox, isolado, em vidro
Aplicações	de processo, em ambiente, para gases de escape, para indústria automotiva
Temperatura	Máximo 900°C (1.652°F) mínimo -40°C (-40°F).

Fonte: Adaptado de Directindustry (2022)

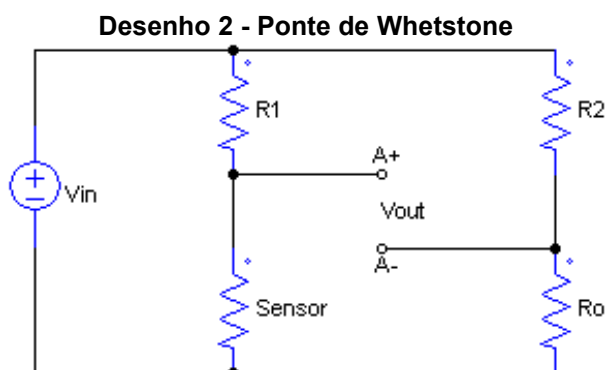
O sensor atua como um transdutor, gerando um sinal elétrico em função da variação de temperatura. A Figura 35 ilustra um sensor de temperatura utilizado nos sistemas de escapamento pós exaustão.

Figura 35 - Sensor EGTS RTD para gases de escape



Fonte: Directindustry (2022)

O sinal elétrico fornecido pelo sensor é analógico e precisa ser condicionado. Para condicionar esse sinal, o dispositivo foi conectado a uma ponte de Whetstone, como ilustrado pelo Desenho 2.



Fonte: Autoria própria (2022)

O sensor é um dispositivo resistivo e, no circuito do Desenho 1, é considerado um resistor que pode sofrer variações no seu valor de resistência em função da temperatura. Conforme a configuração do circuito, os três resistores, em conjunto com o sensor de temperatura, apresentam igual valor e a tensão V_{out} é zero (ponte balanceada). Na medida em que a temperatura aumenta, o sensor aumenta a sua resistência, provocando o desbalanceamento da ponte. Com isto, a tensão V_{out} passa a apresentar um valor diferente de zero, entre 0 e 5 V, que posteriormente será conectada a uma entrada analógica do dispositivo eletrônico composto por um microcontrolador.

4.2.4 Sensor de NO_x

O sensor de NO_x é um dispositivo utilizado para avaliar a concentração de óxidos de nitrogênio. O sensor é confeccionado com os materiais cerâmico de óxido de zircônia e eletrodos de metais nobres como platina e ródio. O sensor já se apresenta com um módulo eletrônico que condiciona o sinal elétrico.

O dispositivo atua como um transdutor, gerando um sinal elétrico em função da variação dos gases. A Figura 36 ilustra o sensor de NO_x .

Figura 36 - Sensor de NO_x



Fonte: Volvo (2022)

As especificações são:

- Inseridos diretamente nos gases de exaustão;

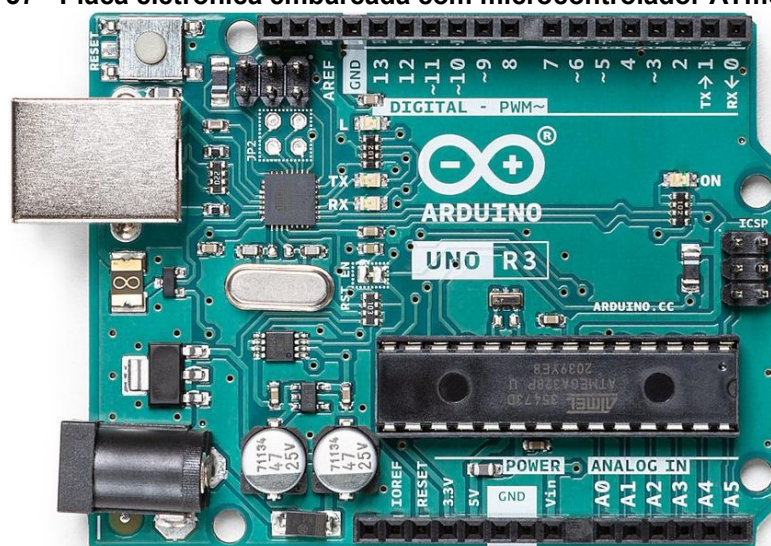
- Alta resposta e saída estável por longos períodos;
- Circuito eletrônico integrado embarcado;
- Curva do sinal de saída linear;
- Proteção externa em aço inoxidável;
- Tensão de alimentação 12 Vcc;
- Dimensões: 830 x 38 mm.

4.2.5 Microcontrolador eletrônico

Para o condicionamento e aquisição dos sinais será utilizado um dispositivo eletrônico implementado com um microcontrolador. O microcontrolador servirá de plataforma para um código fonte com linguagem de programação específica, que terá a função de processar as informações coletadas no processo de redução de emissões do catalisador através dos sensores de NO_x e de dos sensores de temperatura, e registrar informações decifráveis a nível operacional com o auxílio do display LCD.

Os microcontroladores são circuitos integrados eletrônicos que reúnem em um só dispositivos: a unidade de processamento, as memórias e um conjunto de periféricos de entrada e saída. Isto facilita o desenvolvimento de produtos eletrônicos, pois com um único componente é possível desenvolver aplicações bastante complexas (ALMEIDA; MORAES; SERAPHIM, 2016). A Figura 37 apresenta uma placa eletrônica embarcada por microcontrolador ATmega 328P.

Figura 37 - Placa eletrônica embarcada com microcontrolador ATmega328P

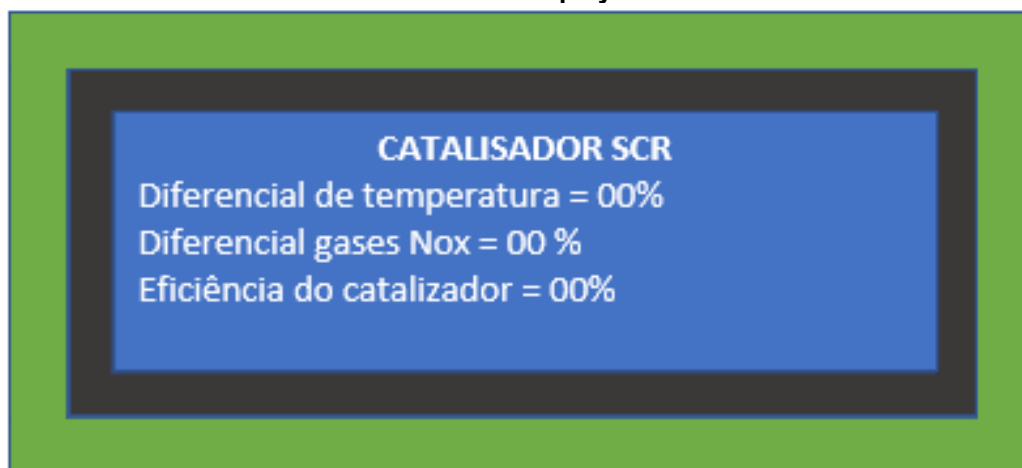


Fonte: Arduino - Home (2022)

4.2.6 Display LCD

O dispositivo utilizado para apresentar as grandezas monitoradas pelos sensores será um display LCD. O Desenho 3 ilustra o modelo de display utilizado no trabalho.

Desenho 3 - Display LCD



Fonte: Aatoria própria (2022)

As especificações do display LCD são:

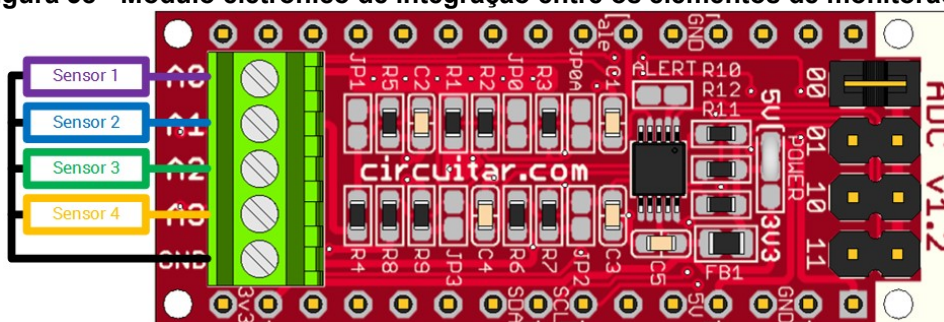
- Display LCD 20 linhas e quatro 4 colunas;
- Cor dos caracteres: brancos;
- Tensão de operação: 5 Vcc;
- Dimensões: 98 x 60 x 20 mm.

4.2.7 Modulo de conversão A/D

Para a integração dos sinais dos sensores ao sistema de aquisição de sinais, será integrado ao sistema eletrônico um modulo de conversão de sinais A/D (Analógico Digital). Esse modulo estabiliza os sinais entre 0 e 5 V. A estabilidade dos sinais elétricos auxilia o código fonte implementado a tratar e processar os sinais elétrico.

A Figura 38 destaca o modulo eletrônico de conversão que realiza a integração entre os elementos sensores que integram o sistema de monitoração do catalisador.

Figura 38 - Modulo eletrônico de integração entre os elementos de monitoração

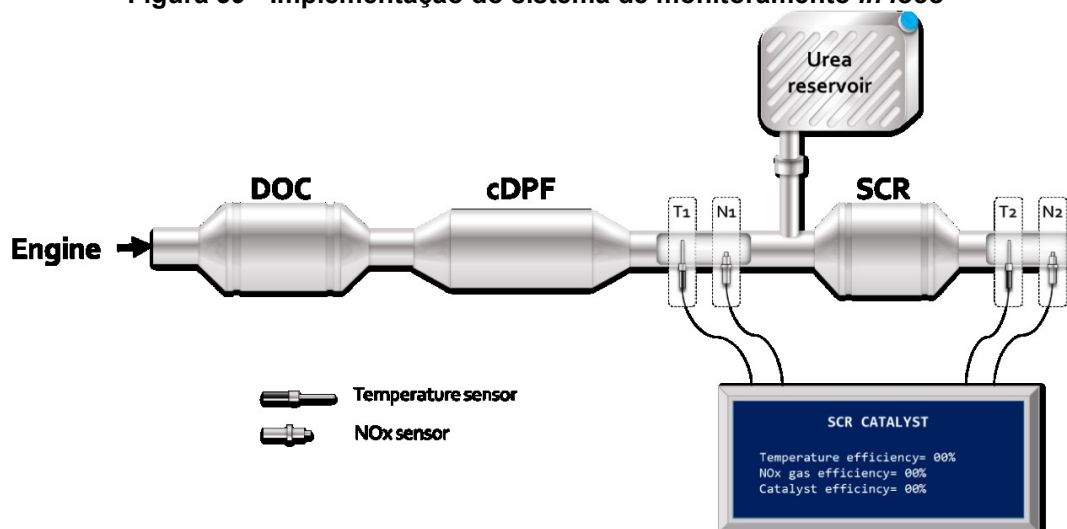


Fonte: Circuitar - Modular Electronics (2022)

4.2.8 Montagem do aparato experimental

Na Figura 39, verifica-se proposta de sensoriamento *in loco* que poderá ser utilizado no sistema de tratamento de gases provenientes da exaustão em motores diesel.

Figura 39 - Implementação do sistema de monitoramento *in loco*



Fonte: Autoria própria (2022)

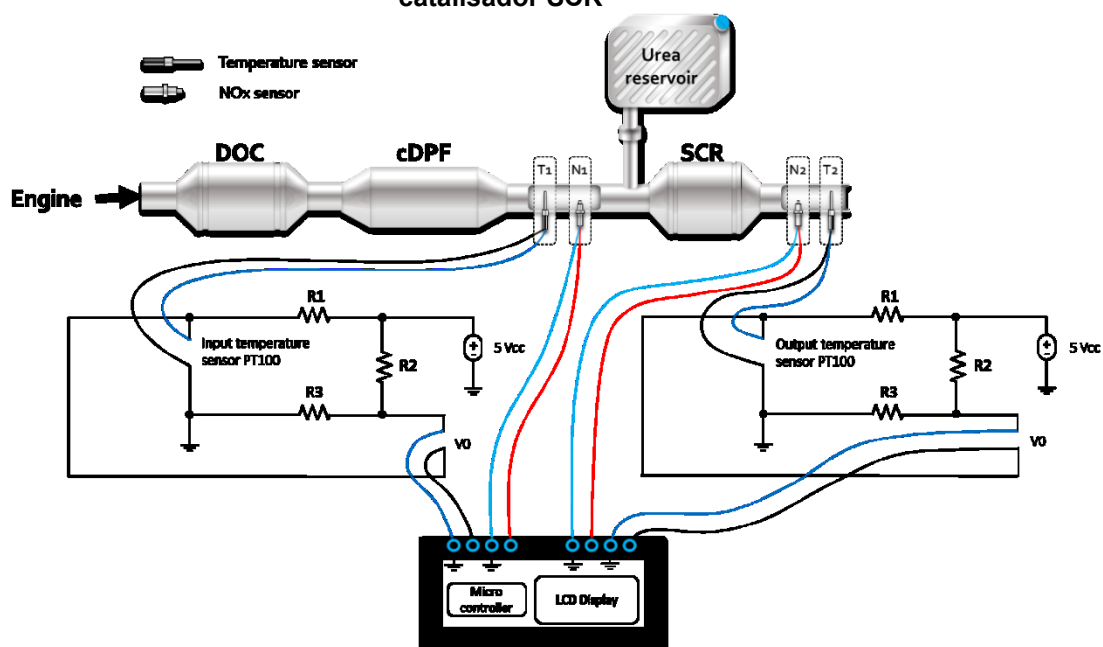
Na Figura 39, é possível visualizar a integração dos sensores de NO_x , de temperatura e o dispositivo eletrônico para o condicionamento e aquisição de dados ao sistema de tratamento de gases pós exaustão. O método de monitoramento segue os seguintes passos:

- Apresentar a informação se o catalisador está ativo por temperatura de entrada dos gases;

- Apresentar a informação em porcentagem o diferencial de temperatura entre os extremos do catalisador SCR;
- Apresentar a informação se o sensor de NO_x está identificando uma variação dos gases NO_x em relação a entrada e saída dos gases no catalisador SCR.

A Figura 40 demonstra o diagrama elétrico do sensor de monitoramento da temperatura e do sensor sensores de NO_x , utilizados na análise do desempenho do catalisador SCR.

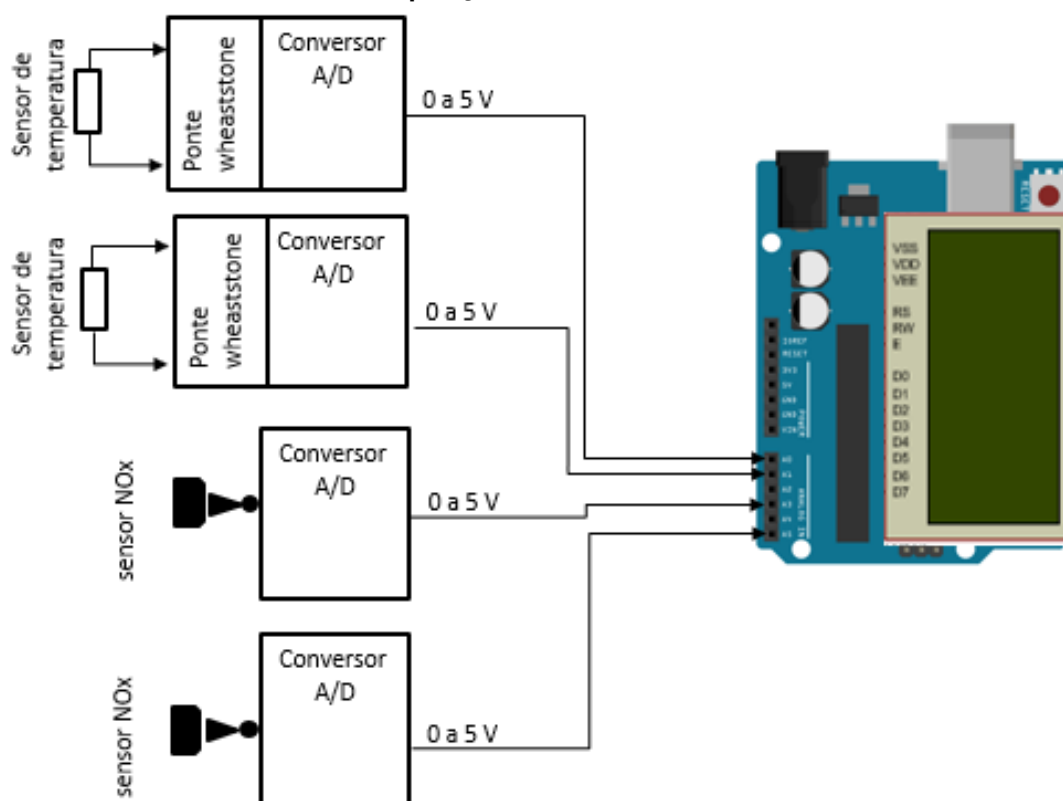
Figura 40 - Integração dos componentes eletrônicos no sistema de monitoramento do catalisador SCR



Fonte: Autoria própria (2022)

A Figura 41 reitera a integração entre o módulo eletrônico para condicionamento de sinais elétrico dos sensores e o sistema de aquisição desses sinais.

Figura 41 - Integração entre os elementos sensores, módulos de conversão A/D e o sistema de aquisição de sinais



Fonte: Autoria própria (2022)

4.2.9 Modo de funcionamento

Os sensores de temperatura $T1$ e $T2$, como ilustrado pela Figura 40, tem função de fornecer sinais elétricos que correspondam aos valores de temperatura nos extremos do catalisador SCR.

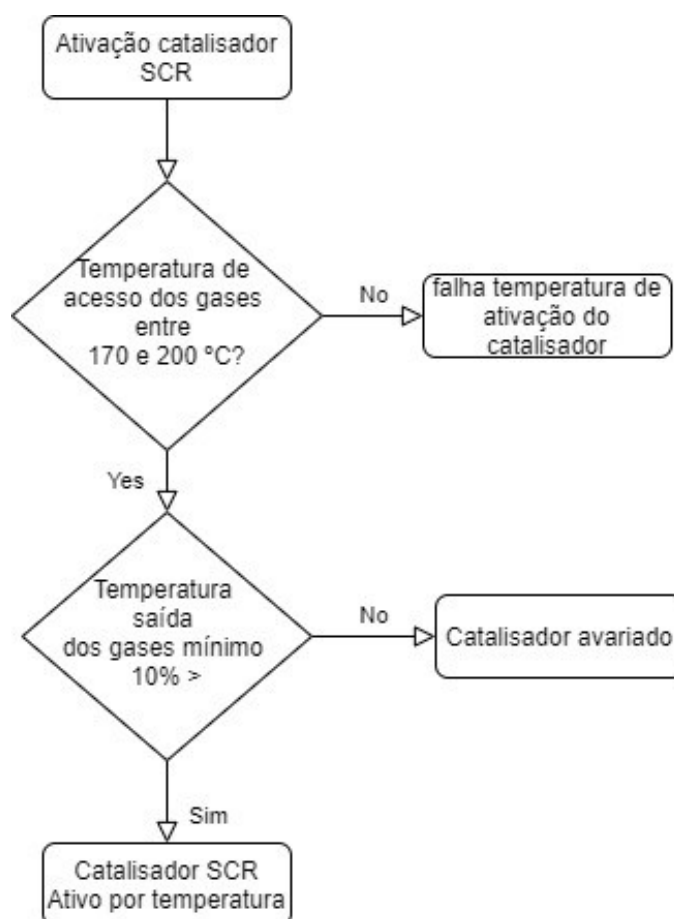
Um código fonte em linguagem de programação específica foi elaborado para o tratamento das informações disponibilizadas pelos sensores. O objetivo do código fonte é comparar os sinais elétricos dos sensores com os valores de referência obtidos em literaturas. Informações gráficas são geradas em tempo real no display LCD, apresentando a eficiência do catalisador que deverá ser considerado pelo condutor do veículo. Um *loop* de leitura, realizado pelo código fonte, com mensagens no *display* LCD, apresenta a seguinte sequência:

- Para $T1 \geq 170 \text{ }^\circ\text{C}$, temperatura de início de ativação atingida;
- Se $T1 = T2$ catalisador em falha;
- Se $T1 \neq T2$ catalisador em falha;

- Se $T1$ $T2$ no mínimo 10%, o catalisador está ativo.

O Fluxograma 4 demonstra a sequência do *scan* realizado pelo código fonte, para o monitoramento da temperatura.

Fluxograma 2 - Scan do código fonte para monitoramento da temperatura

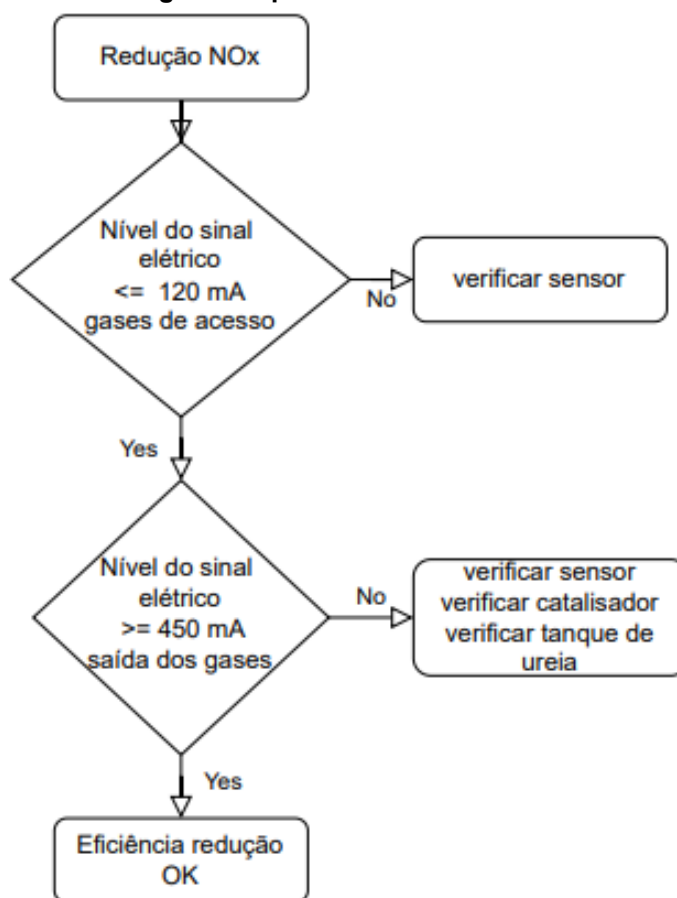


Fonte: Autoria própria (2022)

Para os sensores de NO_x , a avaliação segue a seguinte metodologia:

- Se $N1 = N2$ catalisador em falha;
- Se $N1 \neq N2$ ($\neq 95\%$) catalisador ativo.

O Fluxograma 5 demonstra a sequência do *scan* realizado pelo código fonte, para o monitoramento da redução dos gases NO_x .

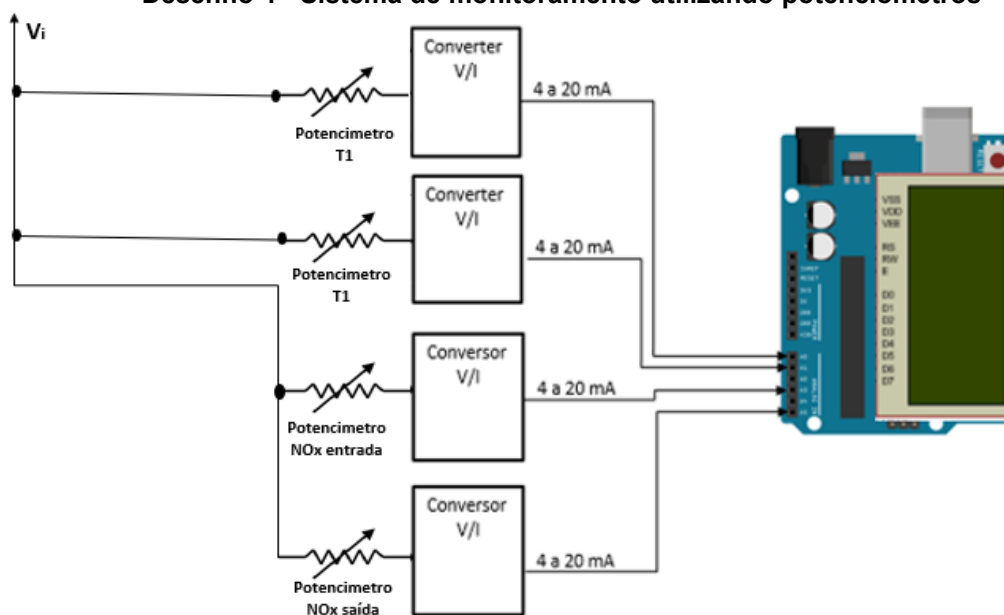
Fluxograma 3 - Scan do código fonte para monitoramento do sensor de gás NO_x

Fonte: Autoria própria (2022)

4.3 Método de validação em laboratório

No método *in loco*, a eficiência da redução catalítica será confirmada em função da variação dos sinais elétricos dos sensores dispostos no catalisador SCR. Para confirmar a validação do sensor de monitoramento dos gases em laboratório, não estará à disposição o catalisador e o motor a combustão para a geração dos gases. Dessa forma, foi utilizado potenciômetros que podem substituir os sensores. Manipulando manualmente o eixo dos potenciômetros, é possível obter uma variação de sinal elétrico na saída desse dispositivo. Um sinal elétrico é injetado diretamente no sistema eletrônico para o tratamento do sinal. As mensagens serão geradas no display LCD tendo como referência a amplitude deste sinal. O Desenho 4 ilustra o sistema de monitoramento com potenciômetros substituindo os sensores.

Desenho 4 - Sistema de monitoramento utilizando potenciômetros



Fonte: Autoria própria (2022)

4.4 Simulações

As simulações foram realizadas com o objetivo de registrar os valores teóricos e valores práticos utilizando dois métodos:

- Simulações matemática;
- Simulações em bancada de teste.

4.5 Simulações Matemática

A simulação matemática do sensor para monitoramento do desempenho do catalisador utilizado em escapamentos de veículos será realizada através de equações implementadas a partir das variáveis que podem detectadas no catalisador SCR. As equações auxiliarão na identificação teórica das variáveis: temperatura, gases NO_x e tensão elétrica gerada pelos sensores.

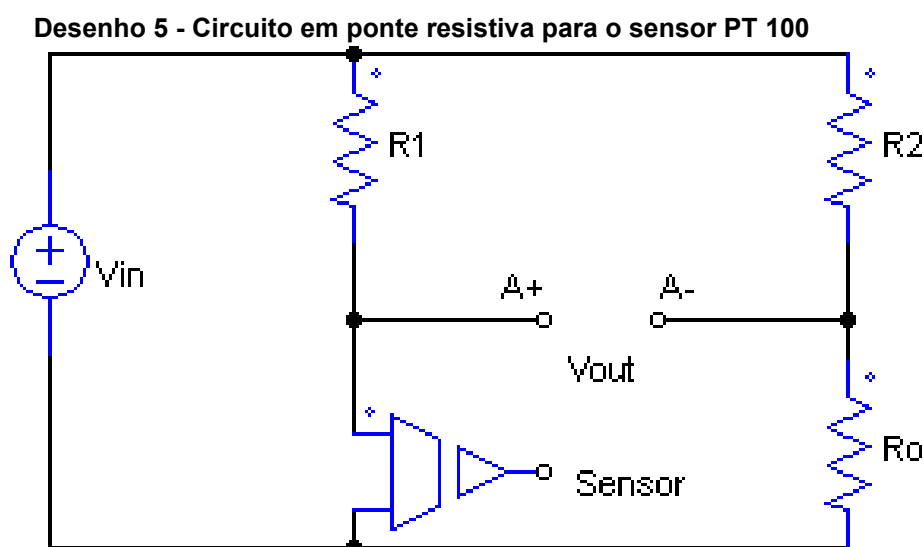
4.5.1 Simulação teórica da temperatura do catalisador SCR

Através de cálculos matemáticos que envolvem os valores dos resistores da ponte resistiva, valor de resistência do sensor de temperatura e do valor de ddp

(tensão elétrica), proveniente do desbalanceamento da ponte resistiva, ocasionado pela variação da resistência do sensor PT100 em função da temperatura, é possível obter a temperatura teórica nos extremos do catalisador.

O Desenho 5 representa o circuito elétrico da ponte resistiva com o sensor PT 100 inserido. O sensor PT100 é um detector de temperatura de resistência (RTD) que muda sua resistência dependendo da temperatura ambiente. Ao ocorrer a variação do valor de resistência do sensor, ocorre o desbalanceamento da ponte resistiva, e uma ddp V_{out} é estimulada na ponte de wheatstone.

O valor de ddp é um sinal de grandeza elétrica imputada na entrada do dispositivo eletrônico de aquisição de sinais. O sinal elétrico é uma variável que será convertida em um valor de temperatura, através do código fonte embarcado no microcontrolador e apresentado pelo *display* LCD para o monitoramento e diagnóstico.



Fonte: Autoria própria (2022)

Para que a ponte esteja balanceada (apresente nível de ddp igual a zero em V_{out}), o sensor PT 100 deve apresentar 100 ohms a uma temperatura de 0 °C. O valor de resistência do sensor pode sofrer alterações em função da temperatura e ocasionar o surgimento de uma ddp em V_{out} (entre A_+ e A_-). Para se obter a resistência do sensor PT100 em função da temperatura, é apresentada a Equação 13.

$$R_s = R_o(1 + \alpha * T) \quad (13)$$

onde:

R_s = Resistência interna do sensor em função da variável T;

R_o = Valor do range mínimo do sensor PT 100;

T = Temperatura dos gases interno do catalisador;

α = Coeficiente de temperatura do sensor PT 100 (0,00385 IEC 60751).

Para identificar a temperatura em função da resistência R_s do sensor PT 100, basta isolar a variável T da equação 13, dando origem a Equação 14.

$$T = \frac{\frac{R_s}{R_o} - 1}{\alpha} \quad (14)$$

A Tabela 6 apresenta uma simulação teórica relacionando o valor da resistência ôhmica do sensor, em função da temperatura dos gases de entrada do catalisador SCR. Para essa simulação, foram utilizados valores hipotéticos de temperatura com range entre 0°C e 400°C, apenas com a finalidade de confirmar o aumento da resistência interna do sensor em função da temperatura, como apresentado nas literaturas e conforme a norma IEC 60751 (DIN EN 60751).

Tabela 6 - Variação da resistência elétrica do sensor PT 100 em função de valores hipotéticos de temperatura

T (temperatura dos gases de entrada do catalisador) °C	R_s (resistência interna do sensor PT 100) Ω
0	100
20	107,6
50	119
100	138
150	157
200	176
250	195
300	214
350	233
400	252

Fonte: Autoria própria (2022)

Para que o catalisador SCR se apresente como ativo, é necessário um diferencial de temperatura dos gases entre a entrada e a saída do dispositivo. O monitoramento desse diferencial é obtido com a instalação de dois sensores PT 100 nos extremos do dispositivo. Esse diferencial é resultado da reação exotérmica no

interior do catalisador, e deve ser, no mínimo, 10% maior na saída dos gases. Um valor contrário acusa uma falha ou defeito no dispositivo catalítico. A Equação 15 foi implementada com o objetivo de se obter esse diferencial.

$$D_t = \left(\left(\frac{T_s}{T_e} \right) - 1 \right) * 100 \quad (15)$$

onde:

D_t = Diferencial da temperatura do catalisador;

T_e = Temperatura dos gases na entrada do catalisador;

T_s = Temperatura dos gases na saída do catalisador.

A temperatura dos gases do catalisador pode também ser conhecida através do método da identificação da ddp V_{out} coletada na ponte resistiva. Identificando a variável R_s (resistência do sensor PT 100), pelos métodos apresentados, é possível identificar a ddp na saída V_{out} da ponte. Importante observar que: $V_{out} = V_{A+} - V_{A-}$.

Os valores de R_1 , R_2 , R_0 e V_{in} são valores considerados constantes na equação. A identificação da ddp V_{out} , na ponte resistiva do Desenho 5, pode ser obtida pela Equação 16.

$$V_{out} = V_{in} \left(\frac{R_s}{R_1 + R_s} - \frac{R_0}{R_2 + R_0} \right) \quad (16)$$

Para que seja possível conhecer a temperatura em função de V_{out} , é necessário reescrever a equação 16, isolando R_s . A Equação 17 apresenta a forma reescrita da equação 16.

$$R_s = R_1 \frac{[(R_2 + R_0)V_{out} + (R_0 * V_{in})]}{V_{in}(R_2 + R_0) - [(R_2 + R_0)V_{out}] - (R_0 * V_{in})} \quad (17)$$

Isolando R_s , utiliza-se a equação 16, para conhecer a temperatura em função da ddp V_{out} .

4.5.2 Simulação teórica do sensor dos gases NO_x

Cvejic *et al.* (2016) publicaram que sensores de NO_x devem ser capazes de operar em temperaturas acima de $600^\circ C$, quando utilizados para validar a otimização dos catalisadores.

A avaliação da eficiência do catalisador SCR em relação dos gases NO_x será baseada na resposta elétrica dos sensores, instalados na entrada e na saída dos gases no catalisador, com o propósito de realizar um cálculo de eficiência na redução dos gases. Para um estado ótimo de redução das emissões de gases NO_x , o sinal elétrico de saída do sensor de NO_x deve apresentar um valor estequiométrico de 450 mV. Para uma redução de baixa eficiência, o valor apontado é de 120 mV, que é o valor que pode ser identificado pelo sensor na entrada do catalisador logo após a combustão. A Equação 18 traz o cálculo implementado para identificar o valor em porcentagem da redução de gases NO_x , em relação a entrada e a saída dos gases em um catalisador SCR diesel.

$$Eficiência_{\%} = \frac{(ddp_{gás_saída} - ddp_{gás_entrada})}{span} * 100 \quad (18)$$

onde:

$ddp_{gás_saída}$ = Valor de tensão elétrica em mV apresentado pelo sensor de saída dos gases no catalisador;

$ddp_{gás_entrada}$ = Valor constante de 120 mV;

$span$ = Range teórico do sensor de medição dos gases NO_x . Para a equação 18, o valor será a constante de 330.

Outra possibilidade de análise da eficiência da redução dos gases NO_x em um catalisador SCR é avaliar o sinal de ddp fornecido pelo sensor instalado na saída do catalisador SCR, tendo como referência o valor desejado de 450 mV. O cálculo, é apresentado pela Equação 19.

$$Eficiência_{\%} = \frac{ddp_{gás_saída}}{ddp_{desejado}} * 100 \quad (19)$$

onde:

$ddp_{gás_saída}$ = Valor de tensão elétrica em mV apresentado pelo sensor de saída dos gases no catalisador;

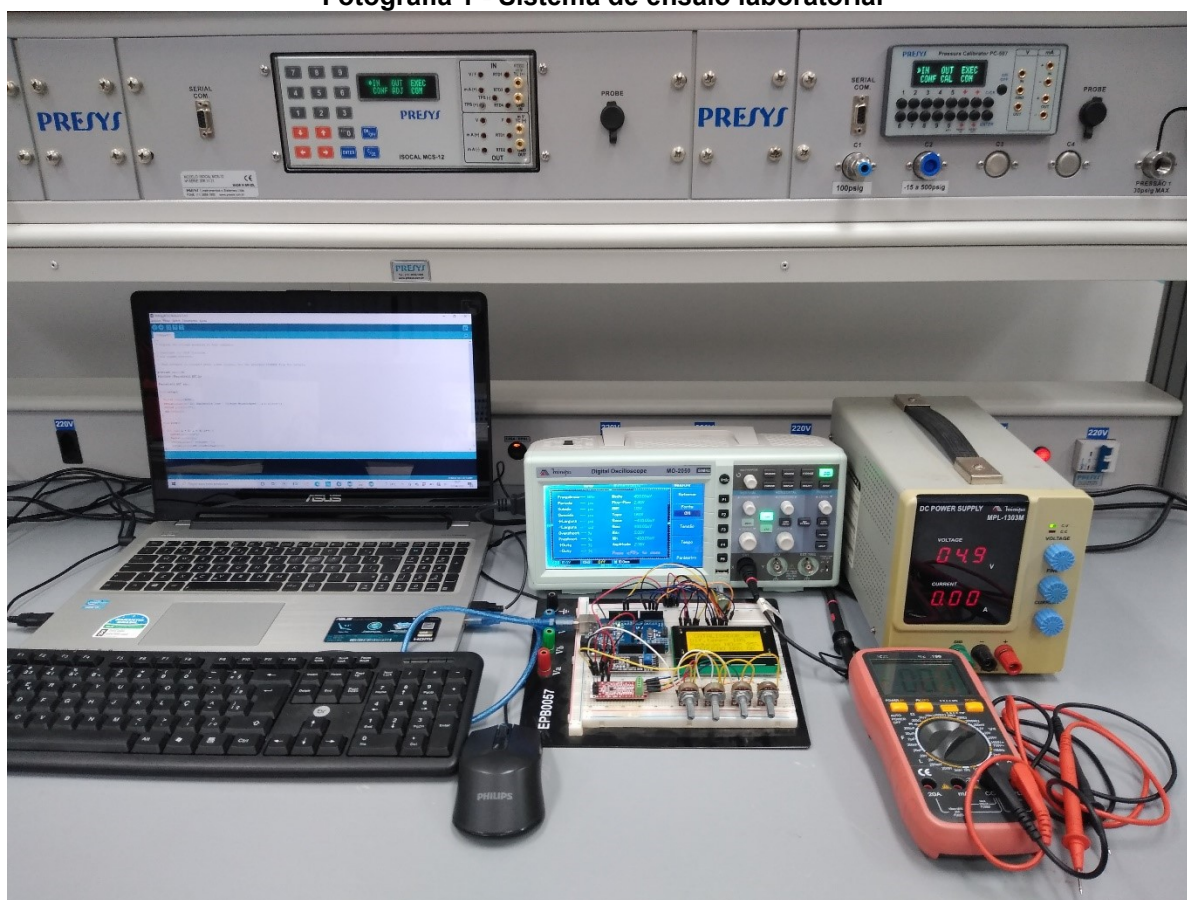
$ddp_{desejado}$ = Valor constante de 450 mV.

4.6 Simulações em bancada de teste

Para análise de resultados experimentais, foi utilizado o laboratório de automação e instrumentação cedido gentilmente pelo SENAI da cidade de Rio do Sul - SC. O sistema de ensaio foi implementado com o auxílio de uma bancada de calibração para instrumentos, osciloscópio, fonte de bancada assimétrica, multímetro, notebook. Os sinais elétricos para análise foram gerados com o auxílio de potenciômetros em substituição aos sensores.

Para processar as informações dos sensores de temperatura e de NO_x , foi desenvolvido um código fonte em linguagem de programação C que, posteriormente, foi embarcado no microcontrolador. A Fotografia 1 apresenta o sistema de ensaio utilizado para registrar as mensagens gráficas em função dos sinais elétricos gerados pelos potenciômetros.

Fotografia 1 - Sistema de ensaio laboratorial



Fonte: Autoria própria (2022)

5 RESULTADOS

Os resultados foram registrados utilizando dois métodos diferentes, cujo objetivo é validar as equações matemáticas desenvolvidas e a funcionalidade do protótipo que foi elaborado com a integração de dispositivos eletrônicos e dos potenciômetros substituindo os sensores.

A substituição dos sensores pelos potenciômetros é válida, pois todo o processo de monitoração do catalisador está resumido na análise de sinais de grandeza elétrica que pode ser simulada pelos potenciômetros.

5.1 Resultado do modelo matemático sensor de temperatura

Para o sensor PT100, as grandezas resistência ôhmica e ddp foram geradas através de cálculos matemáticos, em função das temperaturas postadas arbitrariamente, com um range entre 100°C e 300°C com variação de 10°C.

Para os valores de temperatura impostos, os valores de resistência elétrica do sensor PT100 foram registrados com o auxílio da equação 13. Utilizando os valores calculados de resistência elétrica, foi calculado os valores de ddp na saída da ponte resistiva utilizando a equação 16.

É importante observar que o sensor PT100 está inserido na ponte resistiva e a variação da resistência elétrica, em função da temperatura influencia o sinal de ddp V_{out} da ponte resistiva. A Tabela 7 apresenta os valores de resistência elétrica calculada do sensor PT100 e da variação da ddp V_{out} , em função da temperatura que foi inserida arbitrariamente na tabela.

Tabela 7 - Cálculo dos valores de resistência elétrica e ddp, em função da temperatura (continua)

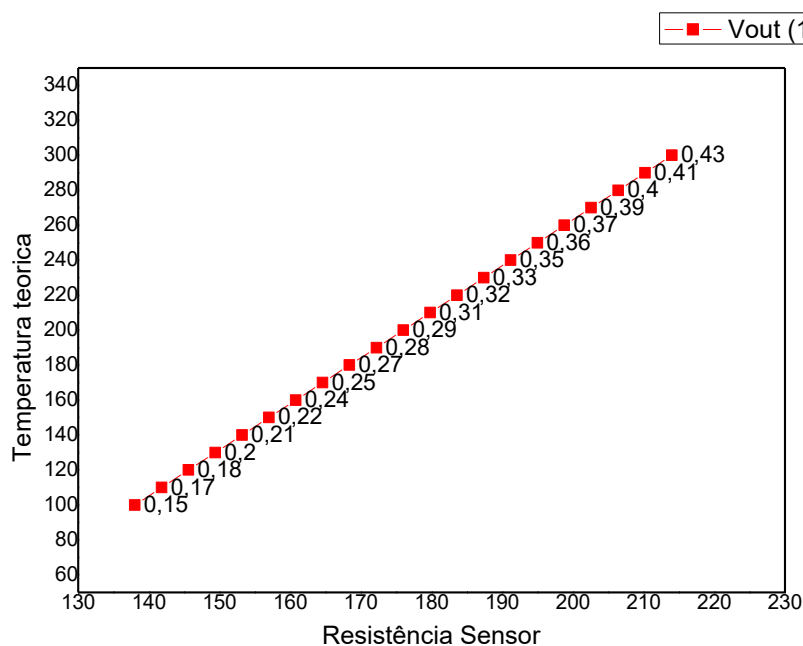
Temperatura teórica dos gases	Resistencia elétrica calculada do sensor	ddp V_{out} calculada
100	138	0,15
110	141,8	0,17
120	145,6	0,18
130	149,4	0,20
140	153,2	0,21

Tabela 7 - Cálculo dos valores de resistência elétrica e ddp, em função da temperatura (conclusão)

Temperatura teórica dos gases	Resistencia elétrica calculada do sensor	ddp V_{out} calculada
150	157	0,22
160	160,8	0,24
170	164,6	0,25
180	168,4	0,27
190	172,2	0,28
200	176	0,29
210	179,8	0,31
220	183,6	0,32
230	187,4	0,33
240	191,2	0,35
250	195	0,36
260	198,8	0,37
270	202,6	0,39
280	206,4	0,40
290	210,2	0,41
300	214	0,43

Fonte: Autoria própria (2022)

O Gráfico 3 ilustra a curva V_{out} gerada pela ponte de wheatstone em função das variações de temperatura e resistência elétrica do sensor de temperatura, conforme apresentado pela Tabela 7. A evolução da curva é diretamente proporcional a temperatura e resistência elétrica do sensor.

Gráfico 3 - Curva V_{out} em função da variação de temperatura e resistência elétrica do sensor

Fonte: Autoria própria (2022)

5.2 Resultado modelo matemático sensor de NO_x

Pela revisão teórica dos sensores, o sensor inicia a sua leitura com uma ddp de 120 mV quando os gases NO_x ainda não sofreram nenhuma redução catalítica. Quando o catalisador apresenta uma alta eficiência na redução, o sinal de ddp apresentado pelo sensor deve ser de 450 mV . A Tabela 8 elucida uma simulação do sensor cujo objetivo é validar a equação 18. Os valores de ddp foram inseridos arbitrariamente a partir de 120 mV com variação de 30 mV até o valor considerado ideal de 450 mV .

Tabela 8 - Simulação de eficiência da redução dos gases NO_x utilizando a equação 18 (continua)

Valor medido sensor NO_x (mV)	Eficiência calculada (%)
120	0,00
150	9,09
180	18,18
210	27,27
240	36,36
270	45,45

Tabela 8 - Simulação de eficiência da redução dos gases NO_x utilizando a equação 18 (conclusão)

Valor medido sensor NO _x (mV)	Eficiência calculada (%)
300	54,55
330	63,64
360	72,73
390	81,82
420	90,91
450	100

Fonte: Autoria própria (2022)

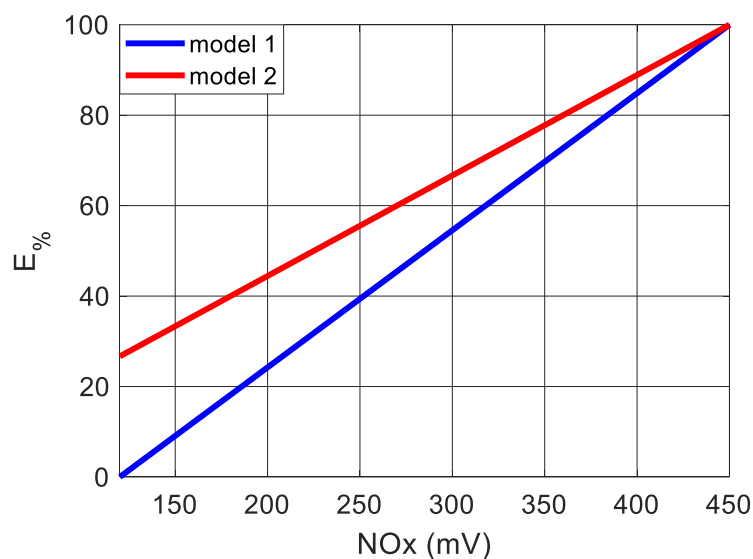
A Tabela 9 apresenta os resultados obtidos, utilizando a equação 19, com os mesmos valores medidos utilizados na Tabela 8.

Tabela 9 - Simulação de eficiência da redução dos gases NO_x utilizando a equação 19

Valor medido sensor NO _x (mV)	Eficiência calculada (%)
120	26,67
150	33,33
180	40,00
210	46,67
240	53,33
270	60,00
300	66,67
330	73,33
360	80,00
390	86,67
420	93,33
450	100,00

Fonte: Autoria própria (2022)

Os resultados obtidos e demonstrados nas tabelas 8 e 9, trazem valores diferentes. Porém, ao gerar gráficos referentes aos valores apresentados pelas tabelas, pode-se observar que a curva de cada tabela assume a mesma evolução e são diretamente proporcionais ao valor em *mV* obtidos pelo sensor NO_x, instalado na saída dos gases no catalisador. O Gráfico 4 demonstra a evolução da curva gerada pela tabela 8 e 9.

Gráfico 4 - evolução da curva gerada pela tabela 8 e 9

Fonte: Autoria própria (2022)

5.3 Resultados protótipo de ensaio

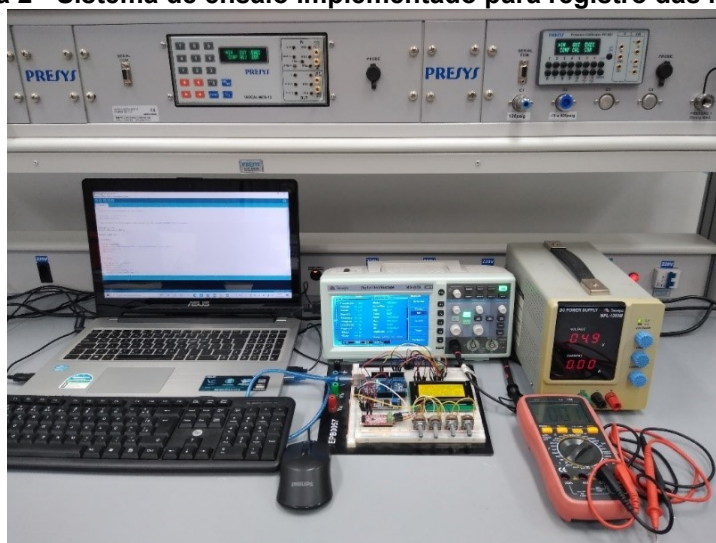
O sistema de ensaio para as simulações práticas foi realizado em laboratório. O objetivo é se aproximar de situações reais que poderiam acontecer diretamente no sistema de escapamento de um veículo.

Para a obtenção dos dados, em uma placa protoboard, foi implementado um circuito eletrônico composto por:

- Display LCD 16 x4;
- Placa eletrônica Arduino;
- Cabos para conexões elétricas;
- Potenciômetros;
- Modulo conversor A/D.

Como a função dos sensores de temperatura e de gases NO_x é gerar um sinal elétrico para ser processado pela lógica do código fonte embarcado no microcontrolador, esses dispositivos foram substituídos por potenciômetros que podem realizar a mesma função nessa etapa laboratorial. A Fotografia 2 apresenta o sistema de ensaio utilizado.

Fotografia 2 - Sistema de ensaio implementado para registro das mensagens

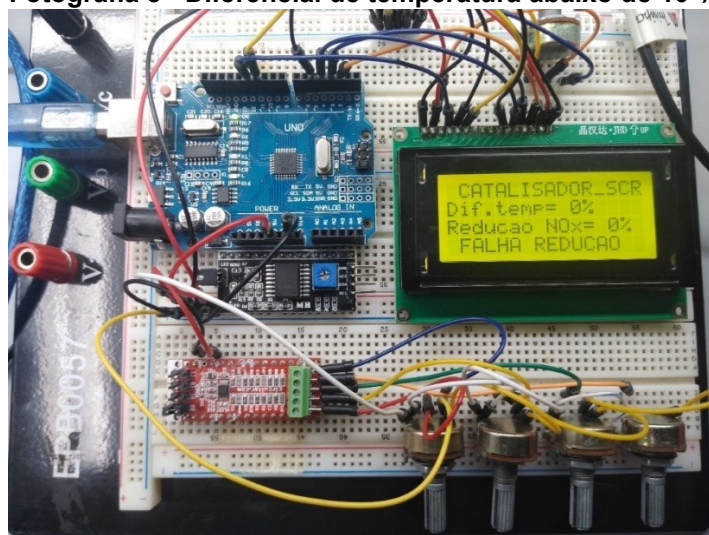


Fonte: Autoria própria (2022)

5.3.1 Mensagens gráficas

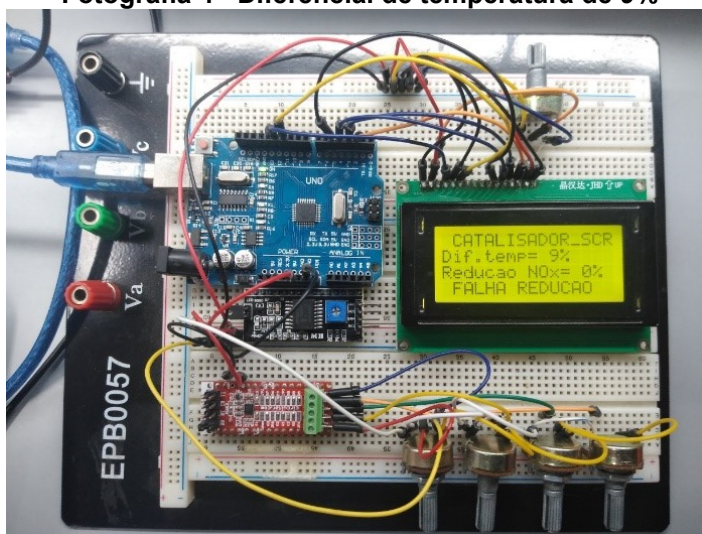
Manipulando os potenciômetros, foi possível inserir nas entradas da placa de aquisição de sinais (Arduino), sinais elétricos, em substituição aos sensores. A Fotografia 3 apresenta a mensagem gráfica gerada no display com um diferencial de temperatura abaixo de 10% entre os extremos do catalisador.

Fotografia 3 - Diferencial de temperatura abaixo de 10 %



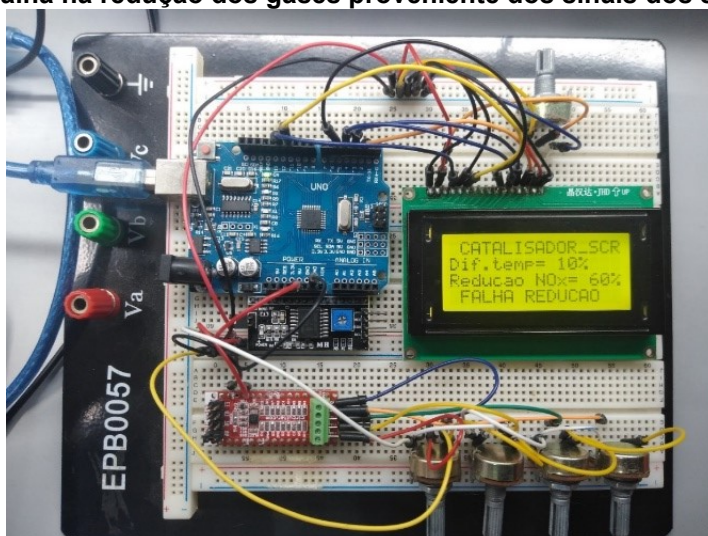
Fonte: Autoria própria (2022)

A Fotografia 4 demonstra um diferencial de temperatura de 9% entre os extremos do catalisador.

Fotografia 4 - Diferencial de temperatura de 9%

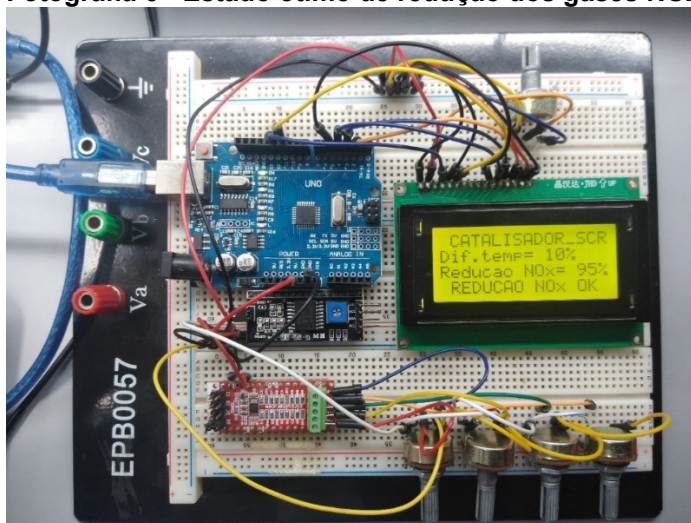
Fonte: Autoria própria (2022)

A Fotografia 5 destaca um valor diferencial de 10% entre os extremos do catalisador. Esse valor ativa o catalisador. Porém, o display apresentou uma falha na redução dos gases, pois foi inserido na entrada da placa eletrônica de aquisição de sinais, um sinal elétrico proveniente dos sensores de gás NO_x , abaixo de 450 mV, que é o valor de estado ótimo de níveis mínimos do gás. Com essa informação, é possível interpretar que o catalisador não está reduzindo totalmente os gases e essa falha pode estar ocorrendo por fim da vida útil do catalisador, avarias, falta de composto a base de ureia ou possível falha dos sensores.

Fotografia 5 - Falha na redução dos gases proveniente dos sinais dos sensores de NO_x 

Fonte: Autoria própria (2022)

A Fotografia 6 apresenta um estado ótimo de redução dos gases NO_x .

Fotografia 6 - Estado ótimo de redução dos gases NOx

Fonte: Autoria própria (2022)

Com os dados apresentados pela simulação em laboratório, foi possível validar o desenvolvimento do sistema de monitoramento proposto nesta Tese. A variável grandeza elétrica, mais especificamente a ddp, se apresentou como objeto de análise suficiente para dar origem a informações de fácil interpretação, representadas pelas mensagens gráficas disponibilizadas no Display LCD.

Os potenciômetros utilizados em substituição aos sensores não comprometeram negativamente o tratamento dos dados realizados pelo microcontrolador carregado com o código fonte, pois um dos objetivos específicos deste trabalho é analisar as variações dos sinais elétrico proveniente dos sensores. De fato, a variação foi obtida com os potenciômetros.

6 CONCLUSÕES

Durante o desenvolvimento deste trabalho, foi possível constatar evidências que reforçam a importância do tema escolhido, no que tange: proteção ambiental, saúde humana, eficiência, atualização tecnológica, envolvimento de setores políticos estaduais e federais, evolução tecnológica da indústria automobilística, embasamento científico e desenvolvimento de um novo produto que possa atuar como ferramenta auxiliar no controle de emissões veiculares.

Órgãos governamentais, sinalizam que a frota brasileira da linha pesada, vem aumentando devido o transporte de cargas ser em sua maioria rodoviária, e utilizam como combustível o óleo diesel que durante a sua combustão, oferece, além da realização de um trabalho mecânico, a geração de emissões de gases contaminantes.

Referências bibliográficas, apresentam resultados de um sistema pós combustão que não estão contemplados com dispositivos catalíticos para a redução de emissões. Os níveis observados são preocupantes para a saúde respiratória da população, e a integração de dispositivos catalisadores ao sistema de escapamento dos gases em veículos tornou-se fator primordial no auxílio a redução das emissões.

Como pode ser verificado no desenvolver geral deste trabalho, a utilização adequada do catalisador pode reduzir os níveis de liberação de óxido de nitrogênio (NO_x), material particulado (MP), dióxido de carbono (CO_2) compostos orgânicos voláteis (COV), entre outros compostos poluentes. Porém, todo o tipo de sistema seja ele orgânico ou desenvolvido com envolvimento de técnicas humana, carece de um sistema de acompanhamento, seja ele intuitivo ou tecnológico que possa exercer um papel de sensoriamento cujo objetivo final, é o monitoramento do funcionamento e eficiência do sistema.

Neste contexto de sensoriamento de um sistema, os resultados coletados através de simulações teóricas e de bancada, provenientes do projeto desenvolvido, se mostra capaz de auxiliar, de maneira inicial, os condutores de veículos a estimular ações preventivas e corretivas do dispositivo catalisador que pode se encontrar desativado.

A desativação dos catalisadores automotivos pode advir de um processo temporal, ou seja, após cumprir o seu ciclo de vida útil. Porém, outros fatores podem

acelerar esse processo, que pode ser evitado com a implementação do sistema de sensoriamento proposto nesta tese.

A partir de 2023, os novos veículos pesados produzidos no Brasil movidos a óleo diesel deverão contemplar, no sistema de tratamento dos gases pós-combustão, um sistema de monitoramento com sensores integrados. No Brasil, segundo fontes do IBGE, o ciclo de vida dos veículos da linha pesada é considerado alto devido ao custo de aquisição. O sistema de sensoriamento, poderá vir de encontro a uma frota já existente que não contempla algum tipo de atualização tecnológica que tenha como finalidade, mitigar as emissões dos gases pós combustão.

Como contribuição acadêmica, este trabalho poderá fomentar o interesse pelo tema que não dispõem de literatura vasta principalmente no Brasil. O intuito, é ser fonte inspiradora para novos trabalhos tendo em vista que os trabalhos acadêmicos devem acompanhar as atualizações tecnológicas.

Como dificuldade encontrada, necessário pontuar a impossibilidade de implementação do projeto desenvolvido, diretamente em um sistema de pós combustão de um veículo. Barreiras impostas pela pandemia, contribuíram para que fosse realizado apenas simulações teóricas com auxílio de equações desenvolvidas e de bancada em laboratório, encontrando como alternativa eficaz, a substituição dos sensores por potenciômetros que manipulados manualmente, podem produzir uma variação de sinal elétrico simulando os sensores.

6.1 Continuidade e melhorias futuras do trabalho

Para a continuidade desse trabalho, o autor sugere a implantação do sistema de monitoramento diretamente no catalisador e realização de medições com o veículo estacionado e em movimento, com intuito de coletar informações em função do funcionamento do motor de combustão, tipos de combustível e os diferentes solos que os caminhões podem trafegar.

Como melhorias futuras, o autor desse trabalho sugere a implementação de um banco de dados sendo alimentado pelas variáveis em estudo. O banco de dados poderá ser útil como ferramenta auxiliar na elaboração de gráficos, sendo possível analisar a evolução das curvas das variáveis, utilizando-se de uma metodologia de análise temporal.

6.2 Súmula curricular

Com os resultados parciais da tese foi possível gerar um artigo para publica o em periódico com JCR: 3.251:

FERREIRA, Jessimon; ANDRADE, Dana I.; FUZIKI, Maria E. K.; ALMEIDA, Lariana N. B.; COLPINI, Leda M. S.; LENZI, Giane G.; TUSSET, Angelo M. Catalytic systems in the reduction of nitrogen oxide emissions in diesel-powered trucks. **Sustainability**, v. 14, p. 6662, 2022. <https://doi.org/10.3390/su14116662>

REFERÊNCIAS

- ADMIN-OLEO. **Fabricação de motores:** óleo diesel para geradores. [s.d.]. Disponível em: <http://www.oleodieselparageradores.com.br/tag/fabricacao-de-motores>. Acesso em: 16 maio 2022
- ALMEIDA, R. M. A.; MORAES, C. H. V.; SERAPHIM, T. F. P. **Programação de sistemas embarcados:** desenvolvendo software para microcontroladores em linguagem C. 1. ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2016.
- AO, C. *et al.* Theoretical investigation of chemical reaction kinetics of CO₂ and vinyl radical under catalytic combustion. **Fuel**, v. 305, p. 121566, dez. 2021.
- Arduino - Home.** Disponível em: <https://www.arduino.cc>. Acesso em: 22 maio 2022.
- AUGUSTO, K. S. Determinação de parâmetros geométricos de catalisadores automotivos novos e usados por análise de imagens. **Catalisador**, p. 7 pag., 2010.
- BAIA, R. T.; et al. Caracterização tecnológica de catalisadores automotivos desativados visando o aproveitamento de Pt, Td e Rh. **Tecnologia em metalurgia, Materiais e Mineração**, v. Vol. 17, n. no4, p. 6 pag., 2020.
- BATISTA, C. H.; DUTRA, A. J. B. Caracterização de catalisadores automotivos novos e usados visando à reciclagem dos metais. **Revista Matéria**, v. 18, n. 4, p. 1451-1458, 2013.
- BLOG Iveco. **Entenda o que é a Proconve P8 - Sustentabilidade.** 11 jan. 2022. Disponível em: <https://www.blogiveco.com.br/entenda-o-que-e-a-proconve-p8>. Acesso em: 10 jun. 2022
- BLUMRICH, S. H. A química no controle das emissões veiculares. *In:* CONGRESSO DE ATUAÇÃO RESPONSÁVEL, 2018. Disponível em: <https://congressoar.com.br>. Acesso em: 14 fev. 2021.
- BOSCH Mobility Solutions. Disponível em: <https://www.bosch-mobility-solutions.com/en>. Acesso em: 12 dez. 2021.
- BRANCO, G. M.; BRANCO, F. C.; BLUMRICH, S. **Umicore, automotive catalysts.** Americana, São Paulo: [s.n.], 2016.
- BRUNETTI, FRANCO. **Motores de combustão interna.** 2.ed. São Paulo: Blucher, 2018. v. 1.
- BRUNI, A. C.; *et al.* **Emissões veiculares no estado de São paulo.** São Paulo: CETESB, 2017. Disponível em: https://cetesb.sp.gov.br/veicular/wp-content/uploads/sites/6/2017/11/EMISS%C3%95ES-VEICULARES_09_nov.pdf . Acesso em: 2 nov. 2021.

IBGE (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística). **Cidades**. cidades.ibge.gov.br. Disponível em: <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/pesquisa/22/28120?tipo=grafico&indicador=28130> . Acesso em: 5 jun. 2022.

CIRCUITAR. **Modular electronics**. Disponível em: <https://www.circuitar.com/> . Acesso em: 22 maio 2022.

CVEJIN, K.; *et al.* Impedancemetric NO sensor based on YSZ/perovskite neodymium cobaltite operating at high temperatures. **Sensors and Actuators B: Chemical**, p. 612-624, 2016.

DEMIRKIRAN, I.; *et al.* A design to improve Selective Catalytic Reduction for diesel engines. *In*: SOUTHEASTCON 2016. **Proceedings [...]**, Norfolk, VA: IEEE, mar. 2016a. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7506641> . Acesso em: 17 dez. 2021

DEMIRKIRAN, I.; *et al.* **A design to improve selective catalytic reduction for diesel engines**. *In*: SOUTHEASTCON 2016. Norfolk, VA, IEEE, 30 abr. 2016b. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7506641> . Acesso em: 13 fev. 2021.

DING, Y.; *et al.* Highly efficient recovery of platinum, palladium, and rhodium from spent automotive catalysts via iron melting collection. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 155, p. 104644, abr. 2020.

DIRECTINDUSTRY.com. Disponível em: <https://www.directindustry.com>. Acesso em: 22 maio 2022.

DONADEL, K. **Processamento e caracterização de filtros cerâmicos catalíticos obtidos a partir de fibras naturais de sílica amorfa**. Doutorado - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2010.

EGTS - MTE-THOMSON. Disponível em: <https://www.mte-thomson.com.br/produtosmte/egts>. Acesso em: 16 maio 2022.

ELHAG, M. A. A.; ARSLAN, M. S. **Modeling diesel oxidation catalyst upstream and downstream exhaust gas temperatures using LSTM RNN**. *In*: INTERNATIONAL CONFERENCE ON CONTROL ENGINEERING AND INFORMATION TECHNOLOGY, 6., Istanbul, **Proceedings [...]**, Turkey: IEEE, 25 out. 2018.

ENERGY and Air Pollution - World Energy Outlook 2016 Special Report. p. 266, 2016.

FERNANDES, D. M. **Estudo da influência da temperatura na desativação de catalisadores automotivos comerciais**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) - Rio de Janeiro: Universidade do Estado do Rio de Janeiro, 2007.

FOGAÇA, J. R. V. **Combustão completa e incompleta**. Disponível em: <https://www.manualdaquimica.com/fisico-quimica/combustao-completa-incompleta.htm>. Acesso em: 4 fev. 2020

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

GLOBAL automotive catalyst market (2020-2028) - Size, share and analysis report. **Focus on Catalysts**, v. 2021, n. 10, p. 2, out. 2021.

GÓMEZ, A.; *et al.* Comparison of real driving emissions from Euro VI buses with diesel and compressed natural gas fuels. **Fuel**, v. 289, p. 119836, abr. 2021.

GREGÓRIO, J. M. P. **Desenvolvimento de um motor alternativo de combustão interna de pistões opostos**. Covilhã: Universidade da Beira Interior, 2017.

HAO, H.; *et al.* Compression ignition of low-octane gasoline: Life cycle energy consumption and greenhouse gas emissions. **Applied Energy**, v. 181, p. 391-398, nov. 2016.

HERBST, K.; *et al.* Challenges in applied oxidation catalysis. **Catalysis Today**, p. 297-302, 17 nov. 2010.

HOMA, JORGE M. **Aeronaves e motores: conhecimentos técnicos**. [s.l.] ASA, 2010.

IBAMA (Instituto Brasileiro do Meio Ambiente). **Manual-Programa de controle da poluição do ar por veículos automotores**. Brasília: Ibama/Diqua, 2011. Disponível em: https://www.ibama.gov.br/phocadownload/veiculosautomotores/manual%20proconve%20promot_portugues.pdf. Acesso em: 10 mar. 2021.

JOHANSEN, K. Multi-catalytic soot filtration in automotive and marine applications. **Catalysis Today**, v. 258, part 1, p. 2-10, dez. 2015.

KARIM, S.; TING, Y.-P. Recycling pathways for platinum group metals from spent automotive catalyst: a review on conventional approaches and bio-processes. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 170, p. 105588, jul. 2021.

KARPLUS, V. J.; *et al.* Should a vehicle fuel economy standard be combined with an economy-wide greenhouse gas emissions constraint? Implications for energy and climate policy in the United States. **Energy Economics**, v. 36, p. 322-333, mar. 2013.

KEBEDE, L.; TULU, G.; LISINGE, R. T. Diesel-fueled public transport vehicles and air pollution in Addis Ababa, Ethiopia: effects of vehicle size, age and kilometers travelled. **Atmospheric Environment: X**, p. 100144, nov. 2021.

LOKHESH KUMAR, N.; VELADRI, K. Modification of Muffler design to increase exit velocity. **IOP Conference Series: Materials Science and Engineering**, v. 455, p. 12109, 19 dez. 2018.

MAJIDI-JIRANDEHI, A. A.; SOLEYMANI, M. M.; DEHGHANI, H. Determine the useful life of catalytic converter and standard revision of technical inspection centers. **Automotive Science and Engineering**, p. 6, set. 2021.

MANAVELLA, H. J. **Emissões Automotivas**. São Paulo, SP: HM Autotrônica, 2012.

MANAVELLA, H. J. **Monitor do Sensor dos Gases de Escape de veículos equipados com motores do ciclo Diesel. Reparação automotiva**, nov. 2018b. Disponível em: <https://www.oficinabrasil.com.br/> . Acesso em: 14 mar. 2021

MANAVELLA, H. J. **SCR catalisador seletivo redutor realiza a neutralização das emissões de óxido de nitrogênio**. Oficina Brasil, jan. 2018a. Disponível em: <https://www.oficinabrasil.com.br>. Acesso em: 19 maio 2021.

MARDANI, A.; *et al.* Carbon dioxide (CO₂) emissions and economic growth: a systematic review of two decades of research from 1995 to 2017. **Science of The Total Environment**, v. 649, p. 31-49, fev. 2019.

MARTINS, J. **Motores de combustão interna**. 2. ed. Braga (POR): Publindústria, 2004.

MATHIYAZHAGAN, K.; SENGUPTA, S.; POOVAZHAGAN, L. A decision making trial and evaluation laboratory approach to analyse the challenges to environmentally sustainable manufacturing in Indian automobile industry. **Sustainable Production and Consumption**, v. 16, p. 58-67, out. 2018.

MELO, C. A. D.; JANNUZZI, G. D. M.; MELLO SANTANA, P. H. Why should Brazil to implement mandatory fuel economy standards for the light vehicle fleet? **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 81, p. 1166-1174, jan. 2018.

MENDES, D. Redução na emissão de poluentes pela frota brasileira. **Redução na emissão de poluentes pela frota brasileira é comemorado pelo Proconve**, 10 jul. 2016.

MOHANKUMAR, P.; *et al.* A review of micromachined sensors for automotive applications. **Measurement**, v. 140, p. 305-322, jul. 2019.

MOSCHOVI, A. M.; *et al.* Recycling of Critical Raw Materials from Hydrogen Chemical Storage Stacks (PEMWE), Membrane Electrode Assemblies (MEA) and Electrocatalysts. **IOP Conference Series: Materials Science and Engineering**, v. 1024, n. 1, p. 012008, 1 jan. 2021.

NEHA; PRASAD, R.; SINGH, S. Catalytic abatement of CO, HCs and soot emissions over spinel-based catalysts from diesel engines: An overview. **Journal of Environmental Chemical Engineering**, abr. 2020.

NEYESTANAKI, A. K.; *et al.* Deactivation of postcombustion catalysts, a review. **Fuel**, p. 395-408, 2003.

NTU (Associação Nacional das Empresas de Transportes Urbanos). **As mudanças no Proconve e os impactos para o transporte coletivo**. ed. 36, 2018. Disponível em: <https://www.ntu.org.br/novo/NoticiaCompleta.aspx?idArea=10&idNoticia=1093>. Acesso em 12 fev. 2022.

PALECZEK, A.; *et al.* The heterostructures of CuO and SnOx for NO2 detection. **Sensors**, v. 21, n. 13, p. 4387, 26 jun. 2021.

PEREIRA, B. S. **Controle da mistura ar/combustível em um motor a combustão interna: sistema em malha fechada**. Dissertação (Mestrado em Ciências) - Universidade de São Paulo, São Paulo, 2015.

PERIM Peças. **Catalisador SCR Volvo Ônibus B7R EURO 5**. Disponível em: <https://perimpecas.com.br/index.php?produto=487279%7CCATALISADOR-SCR-VOLVO-ONIBUS-B7R-EURO-5> . Acesso em: 22 maio 2022.

PHUGOT, S.; *et al.* Effect of diesel - biodiesel - ethanol fuel blends on low temperature NOX reduction activity over a lean NOX catalyst. *In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON ENGINEERING SCIENCE AND INNOVATIVE TECHNOLOGY (ESIT)*, 3., 2018. **Proceedings [...]**, North Bangkok, Thailand, Thailand: IEEE, 2018.

POLICARPO, N. A.; *et al.* Road vehicle emission inventory of a Brazilian metropolitan area and insights for other emerging economies. **Transportation Research Part D: Transport and Environment**, v. 58, p. 172-185, jan. 2018.

PROCONVE. **Emissão veicular**. Disponível em: <https://cetesb.sp.gov.br/veicular/proconve>. Acesso em: 10 maio 2022.

PULKRABEK, W. W. **Engineering fundamentals of the internal combustion engine**. 2. ed. University of Wisconsin: Platteville: Pearson, 2014.

RANGEL, E. **Motor a combustão**: veja a evolução e o impacto desta máquina. 2018. Disponível em: <https://fluxoconsultoria.poli.ufrj.br/blog/projetos-mecanicos/motor-a-combustao>. Acesso em: 13 abr. 2020.

RESITOGU, I. A.; ALTINISIK, K.; KESKIN, A. The pollutant emissions from diesel-engine vehicles and exhaust aftertreatment systems. **Clean Technologies and Environmental Policy**, p. 15-27, jun. 2014.

RIBAS, W. F.; *et al.* Influência do combustível (diesel e biodiesel) e das características da frota de veículos do transporte coletivo de Curitiba, Paraná, nas emissões de NOx. **Engenharia Sanitaria e Ambiental**, v. 21, p. 9, set. 2016.

ROBALINO PONTÓN, S.; FLORES PEÑA, F. J. **Eficiencia térmica de los catalizadores**. jul. 2018.

SÁ, R. A. B.; *et al.* **Manutenção e combustível adequados: garantia da durabilidade de emissões? Parte 2 - Novas Evidências**, 2011. Disponível em: <https://www.cetem.gov.br/> . Acesso em: 21 fev. 2021

SANTIAGO, J. L.; *et al.* Estimates of population exposure to atmospheric pollution and health-related externalities in a real city: The impact of spatial resolution on the accuracy of results. **Science of The Total Environment**, p. 152062, nov. 2021.

SHIN, D.; *et al.* A biological cyanide production and accumulation system and the recovery of platinum-group metals from spent automotive catalysts by biogenic cyanide. **Hydrometallurgy**, v. 158, p. 10-18, dez. 2015.

SILVA, R. A.; VIANA, M. M.; MOHALLEM, N. D. S. Caracterização textural, morfológica e estrutural de catalisadores automotivos novos e usados. **Cerâmica**, v. 55, p. 170-176, jun. 2009.

SILVA, T. O. B. **Inventário da emissão do material particulado proveniente de diesel e biodiesel brasileiro: estudo em um banco de provas de motores**. Dissertação (Engenharia Ambiental) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2014.

SILVEIRA, F. L. DA. **Máquinas térmicas à combustão interna de Otto e de Diesel**. 2002.

SONDA Lambda - MTE-THOMSON. Disponível em: <https://www.mte-thomson.com.br/sonda-lambda>. Acesso em: 15 maio 2022.

SRIVASTAVA, S. Study of gas sensor detection for NOX gas: a review. **Materials Today: Proceedings**, v. 37, p. 3709-3712, 2021.

SUKORUN. **Nox sensor**. Nitrogen sensor for Benz /Audi/BMW/ sensors for scr system. Disponível em: <https://www.sukorun.com/product/nox-sensor>. Acesso em: 16 maio 2022

TABARELLI, T. R. E. **Síntese e caracterização de catalizadores de céria e zircônia suportado em alumina para aplicação na combustão de metano**. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2012.

THOMAZINI, D.; ALBUQUERQUE, P. U. B. DE. **Sensores industriais: fundamentos e aplicações**. 9. ed. São Paulo: Erica, 2020.

TRUCKS & buses. fuels and technologies, 27 ago. 2020. Disponível em: <https://www.iea.org/fuels-and-technologies/trucks-buses>. Acesso em: 8 dez. 2021

URNS, S. R. **Introdução a combustão: conceitos e aplicações**. 3. ed. Porto Alegre: AMGH, 2013.

UFPEL. **Apostila de motores á combustão interna**. 2013. Disponível em: <https://wp.ufpel.edu.br/mlaura/files/2013/01/Apostila-de-Motores-a-Combust%C3%A3o-Interna.pdf>. Acesso em: 10 fev. 2020.

VARELLA, C. A. A.; SANTOS, G. S. **Noções básicas de motores diesel**: apostila. 1. ed. Seropédica (RJ), 2010.

VOLVO Peças. **Peças e acessórios para caminhões e ônibus**. Disponível em: https://www.volvopecas.com.br/?gclid=Cj0KCQjwvqeUBhCBARIsAOdt45b4ZI-LxXz0WYBS-htiZRul-Xs99ybKVELM1Wqm-3ANIX_HmytWTHgaAjBEEALw_wcB . Acesso em: 22 maio 2022.

WANG, D.; YANG, Y.; SONG, C. **Preparation of metal-incorporated SAPO-34 catalysts and their catalytic performance in selective catalytic reduction of nitric oxide**. nov. 2020. p. 11.

WAY, P.; *et al.* SCR performance optimization through advancements in aftertreatment packaging. *In*: SAE WORLD CONGRESS & EXHIBITION, **Proceedings [...]**, United States: SAE International, 20 abr. 2009.

WOODFORD, C. **Conversores catalíticos**. Disponível em: <https://www.explainthatstuff.com/catalyticconverters>. Acesso em: 11 maio 2022.

XIE, Y. **On the performance of oxidation catalysts and SCR catalysts in the presence of alkali compounds representative of biofuel contaminants**: from the commercial catalysts to the active phase. These (Doctorat de Genié Chimique) - Paris: Université Pierre et Marie Curie, 2017.

ZHANG, M.; *et al.* Poisoning mechanisms of Mn-containing additives on the performance of TiO₂ based lambda oxygen sensor. **Sensors and Actuators B: Chemical**, v. 267, p. 565-569, 15 ago. 2018.

ZHANG, Z.; *et al.* The effects of Fe₂O₃ based DOC and SCR catalyst on the combustion and emission characteristics of a diesel engine fueled with biodiesel. **Fuel**, v. 290, 15 apr. 2021.