UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
FACULDADE DE SAÚDE PÚBLICA

POTENCIAL DA UTILIZAÇÃO DE SENSORIAMENTO REMOTO PARA COMPLEMENTAR INSPEÇÕES DE VEÍCULOS DO CICLO DIESEL NO ESTADO DE SÃO PAULO

André Kuniyoshi

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação Ambiente, Saúde e Sustentabilidade, da Faculdade de Saúde Pública, da Universidade de São Paulo, para obtenção do título de Mestre em Ciências tendo como linha de Pesquisa a Gestão Ambiental e Sustentabilidade Urbana.

Orientador: Profº Dr. João Vicente de Assunção

Versão Corrigida

SÃO PAULO
2022

POTENCIAL DA UTILIZAÇÃO DE SENSORIAMENTO REMOTO PARA COMPLEMENTAR INSPEÇÕES DE VEÍCULOS DO CICLO DIESEL NO ESTADO DE SÃO PAULO

André Kuniyoshi

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação Ambiente, Saúde e Sustentabilidade, da Faculdade de Saúde Pública, da Universidade de São Paulo, para obtenção do título de Mestre em Ciências tendo como linha de Pesquisa a Gestão Ambiental e Sustentabilidade Urbana.

Orientador: Profº Dr. João Vicente de Assunção

Versão Corrigida

SÃO PAULO
2022

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

Catalogação da Publicação

Ficha elaborada pelo Sistema de Geração Automática a partir de dados fornecidos pelo(a) autor(a) Bibliotecária da FSP/USP: Maria do Carmo Alvarez - CRB-8/4359

Kuniyoshi, André
POTENCIAL DA UTILIZAÇÃO DE SENSORIAMENTO REMOTO PARA COMPLEMENTAR INSPEÇÕES DE VEÍCULOS DO CICLO DIESEL NO ESTADO DE SÃO PAULO / André Kuniyoshi; orientador João Vicente de Assunção. -- São Paulo, 2022.
92 p.

Dissertação (Mestrado) -- Faculdade de Saúde Pública da Universidade de São Paulo, 2022.

1. Emissões veiculares. 2. Poluição atmosférica. 3. Sensoriamento remoto veicular. 4. Inspeção Veicular. I. de Assunção, João Vicente, orient. II. Título.

FOLHA DE APROVAÇÃO

Nome: KUNIYOSHI, André

Título: Potencial da Utilização de Sensoriamento Remoto para Complementar Inspeções de Veículos do Ciclo Diesel no Estado de São Paulo

Dissertação apresentada a Faculdade de Saúde Pública da Universidade de São Paulo para obtenção do título de Mestre em Ciências.

Aprovado em: _____

Banca Examinadora

Prof. Dr. _____

Instituição: _____

Julgamento: _____

Prof. Dr. _____

Instituição: _____

Julgamento: _____

Prof. Dr. _____

Instituição: _____

Julgamento: _____

DEDICATÓRIA

À minha esposa Karina, à Lana, Milka e Jake, com amor e gratidão por todo o apoio, compreensão, felicidade e incentivo durante todo o processo deste trabalho, e a toda minha família, que fez parte de toda a minha trajetória até aqui.

AGRADECIMENTOS

À minha esposa Karina, por me incentivar, motivar, alegrar e sempre estar ao meu lado em todos os momentos da minha vida.

À Faculdade de Saúde Pública, pela oportunidade de desenvolver este trabalho, assim como a todos os meus professores, por sempre estarem dispostos a me ajudar durante a minha trajetória.

Ao meu orientador Prof. Dr. João Vicente de Assunção, pela oportunidade e confiança em me aceitar como seu aluno, assim como pelo seu apoio, direcionamento e paciência durante todo o processo.

A CETESB, por permitir que eu realizasse o Mestrado Profissional, e também por fornecer dados importantes para o desenvolvimento do projeto.

Aos gerentes Borsari e Renato, e ao meu colega Evandro, pelo apoio e incentivo.

Ao meu colega Antônio Bruni, pelo incentivo, ensinamentos e direcionamento na definição do trabalho.

RESUMO

KUNIYOSHI, A. **Potencial da Utilização de Sensoriamento Remoto para Complementar Inspeções de Veículos do Ciclo Diesel no Estado de São Paulo**. 2022. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Faculdade de Saúde Pública, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2022.

As emissões de poluentes atmosféricos causam um grande problema à saúde. A maior parte da poluição gerada no Estado de São Paulo é proveniente de veículos automotores, que são responsáveis pela emissão de 96% do CO, 73% de HC, 62% de NO_X e 40% de $MP_{10,}$ sendo os veículos diesel os maiores responsáveis pelas emissões de MP e NO_X no Estado. No Brasil, as medidas tomadas pelo PROCONVE, que visam a mitigação da poluição causada por veículos, se mostram eficazes para homologação de veículos novos, porém requerem que a continuidade do trabalho seja realizada com inspeções dos veículos em uso. A tecnologia de sensoriamento remoto, desenvolvida no final dos anos 1980, tem sido amplamente utilizada para de monitoramento de frotas, assim como em programas de Inspeção e Manutenção em diversos locais do mundo. Os resultados alcançados são satisfatórios e, de forma geral, indicam grandes reduções nos níveis de emissão de poluentes. Estudos apontam que as emissões de NO_X foram as que tiveram menores reduções reais entre fases das regulamentações. O Estado de São Paulo possui controle de poluentes de veículos do ciclo diesel em uso através de fiscalizações por opacidade, Escala de Ringelmann e sistema SCR. O sistema de sensoriamento remoto mostra-se como um bom complemento ao que é realizado atualmente. Foram propostos dois sistemas de legislação de inspeções veiculares que contemplam o SR como ferramenta de seleção dos veículos diesel. Além disso, foi mostrado como poderiam ser escolhidos limites para *high* e *low emitters*, assim como procedimentos para escolha dos pontos de instalação do sistema.

Palavras chaves: sensoriamento remoto, high emitters, poluição atmosférica, saúde ambiental

ABSTRACT

KUNIYOSHI, A. **Potential of the Use of Remote Sensing to Complement Inspections of Diesel Vehicles in the State of São Paulo**. 2022. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Faculdade de Saúde Pública, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2022.

Emissions of air pollutants cause a big health problem. Most of the pollution generated in the State of São Paulo comes from motor vehicles, which are responsible for the emission of 96% of CO, 73% of HC, 62% of NO_X, and 40% of PM10, with diesel vehicles being the biggest responsible for the emissions of PM and NO_X in the state. In Brazil, the actions taken by PROCONVE, aimed at mitigating pollution caused by vehicles, prove to be effective for the approval of new vehicles but require that the continuity of the work be carried out by inspections of in-use vehicles. Remote sensing technology, developed in the late 1980s, has been widely used for fleet monitoring, as well as in Inspection and Maintenance programs in many locations around the world. The results achieved are satisfactory and, in general, indicate large reductions in pollutant emission levels. Studies show that NO_X emissions were the ones that had the smallest real reductions between phases of regulations. The State of São Paulo controls in-use diesel vehicles pollutants by inspections of opacity, Ringelmann Scale, and SCR system. The remote sensing system proves to be a good complement to what is currently performed. Two systems of procedures for diesel vehicle inspections were proposed, which include the SR as a tool for the selection of diesel vehicles. In addition, it was shown how limits for high and low emitters could be chosen, as well as procedures for selecting the system installation points.

Keywords: remote sensing, high emitters, air pollution, environmental health

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO 16
OBJETIVOS 27
2.1 Objetivo Geral 27
2.2 Objetivos Específicos 27
REVISÃO BIBLIOGRÁFICA 28
3.1 Programas de Inspeção e Manutenção (I/M) 28
3.1.1 Brasil 28
3.1.2 Estados Unidos 32
3.1.3 China 34
3.1.4 Europa 35
3.1.5 Hong Kong 36
3.1.6 Japão 37
3.1.7 Ontario 37
3.2 Programa para Melhoria da Manutenção de Veículos Diesel - PMMVD 38
3.3 Sensoriamento Remoto Veicular 39
3.3.1 Funcionamento de um Equipamento de Sensoriamento Remoto 40
3.3.2 Utilização de SR - Casos e resultados 44
3.4 Equipamentos de Sensoriamento Remoto veicular 50
3.4.1 Equipamento RSD5000 50
3.4.2 Equipamento EDAR 52
MATERIAL E MÉTODOS 54
4.1 Metodologia 54
4.2 Processo de Aquisição de Dados 55
4.3 Cálculo da opacidade 56
4.4 Tratamento e Interpretação dos Dados 56

RESULTADOS E DISCUSSÕES 58
5.1 Escolha do equipamento a ser utilizado em São Paulo 58
5.1.1 Poluentes Analisados 58
5.1.2 Posição Sistema de Sensoriamento Remoto 59
5.1.3 Equipamentos adicionais 62
5.2 Legislação de I/M com Utilização de SR em São Paulo 62
5.2.1 Sistema de SR e I/M em São Paulo 63
5.2.2 Limites para de emissões para as propostas de legislação 67
5.3 Escolha dos Locais de Instalação dos Equipamentos de SR 73
5.3.1 Avaliação da Qualidade do Ar na RMSP 74
5.3.2 Avaliação do Fluxo de Veículos Diesel 77
5.4 Análise dos Veículos Fiscalizados Atualmente 78
CONCLUSÕES 81
REFERÊNCIAS 83

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Médias anuais das concentrações de $MP_{2,5}$ no ano de 2019 na RMSP.....19
Figura 2 - Evolução das médias móveis do 4º maior valor diário (máxima de 8 horas) de O_3 no ano de 2019 - RMSP.....20
Figura 3 - Concentrações Médias Anuais de NO_2 no ano de 2019 – RMSP.....21
Figura 4 - Emissões Relativas por tipo de fonte no ano de 2019 - RMSP 22
Figura 5 - Evolução dos limites do PROCONVE para emissões de veículos pesados 23
Figura 6 - Evolução da Frota Circulante de Caminhões separados por fases do PROCONVE 2006 - 2019.....23
Figura 7 - Evolução da Frota Circulante de Ônibus separados por fases do PROCONVE 2006 - 2019.....24
Figura 8 - Comparação das médias de emissões de CO (%) para diferentes idades de veículos e situação da inspeção veicular.....30
Figura 9 - Comparação das médias das emissões de HC (ppm) para diferentes idades de veículos e situação da inspeção veicular 30
Figura 10 - Ganhos ambientais causados pela I/M-SP entre os anos do programa.....32
Figura 12 - Estados dos EUA que possuem programas de I/M em atividade no ano de 2021.33
Figura 13 - Representação dos adesivos utilizados para identificação dos veículos na Alemanha.....36
Figura 11 - Estrutura do Programa PMMVD da CETESB 38
Figura 14 - Relação das concentrações dos poluentes em função do tempo e em razão de CO2 40
Figura 15 - Esquema de funcionamento do equipamento de SR Cross Road.....41
Figura 16 - Equipamentos pertencentes ao SR Cross Road 42
Figura 17 - Composição do sistema de SR top down.....43
Figura 18 - Captura de tela do software do EDAR 44
Figura 19 - Principais equipamentos de sensoriamento remoto utilizados atualmente.....46
Figura 20 - Montagem típica de um sistema da Opus RSD 51
Figura 21 - Principais componentes do equipamento EDAR.....52
Figura 22 - Posição inferior traseira do escapamento em veículo leve 60
Figura 23 - Posição superior traseira do escapamento em ônibus.....60
Figura 24 - Instalação do equipamento sistema *top down* em uma ponte 61
Figura 25 - Unidades operacionais do PMMVD no Estado de São Paulo 66

Figura 26 - Distribuição de opacidade observada por fase do PROCONVE 69
Figura 27 - Distribuição de coeficientes de absorção dos veículos da fase P4 70
Figura 28 - Distribuição de coeficientes de absorção dos veículos da fase P5 70
Figura 29 - Distribuição de coeficientes de absorção dos veículos da fase P7 71
Figura 30 - Médias de concentração de MP_{10} na RMSP no ano de 2021 74
Figura 31 - Médias de concentração de $MP_{2,5}$ na RMSP no ano de 2021 75
Figura 32 - Médias de concentração de NO_X na RMSP no ano de 2021 75
Figura 33 - Distribuição das concentrações de MP_{10} por hora, mês e dias da semana em 2021 76
Figura 34 - Distribuição das concentrações de $MP_{2,5}$ por hora, mês e dias da semana em 2021 76
Figura 35 - Distribuição das concentrações de NO_X por hora, mês e dias da semana em 2021 76
Figura 36 - Distribuição dos anos modelo dos veículos autuados durante Operação Inverno 2021 78
Figura 37 – Distribuição no diagrama Boxplot dos anos modelo dos veículos autuados na Operação Inverno 2021 79
Figura 38 - Distribuição dos veículos autuados na Operação Inverno de 2021 com relação às fases do PROCONVE 79

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Metas intermediárias e finais para médias de concentrações anuais e de 24 horas de MP_{10} e $MP_{2,5}$ segundo a OMS 17
Quadro 2 - Metas e recomendação final para concentração de O_3 em 8 horas segundo a OMS 17
Quadro 3 - Metas e recomendação final para médias de concentrações anuais e de 24 horas de NO_2 18
Quadro 4 - Padrões da Qualidade do Ar - CONAMA nº 491/2018 18
Quadro 5 - Utilização de equipamentos de SR nos estados dos EUA 33
Quadro 6- Limites de emissão para o programa de SR da China 35
Quadro 7 - Utilização de sensoriamento remoto no mundo 46
Quadro 8 - Informações dos artigos de revisão bibliográfica 49

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Número de veículos inspecionados entre 2017 e 2018 segundo fase do PROCONVE.....68
Tabela 2 - Limites de coeficientes de absorção [m^{-1}] e opacidade (%) para cada fase do PROCONVE a serem utilizados como aproximação inicial 72

ANEXOS

ANEXO A - MÉDIAS DE CONCENTRAÇÃO DE MP_{10} NA REDE DE MONITORAMENTO DA CETESB NA RMSP EM 2021 89
ANEXO B - MÉDIAS DE CONCENTRAÇÃO DE $MP_{2,5}$ NA REDE DE MONITORAMENTO DA CETESB NA RMSP EM 2021 90
ANEXO C - MÉDIAS DE CONCENTRAÇÃO DE NO_X NA REDE DE MONITORAMENTO DA CETESB NA RMSP EM 2021 91
ANEXO D - TABELA DE PONTOS E RESULTADOS DE NÃO CONFORMIDADE DE 2019 DA CETESB 92

APÊNDICES

APÊNDICE A – ROTEIRO PARA IMPLANTAÇÃO DE SENSORIAMENTO REMOTO COMO COMPLEMENTO DE I/M 93

SIGLAS UTILIZADAS

AQG -	Recomendação Da Qualidade Do Ar
ARLA 32 -	Agente Redutor de NO_X Líquido Automotivo
CAA -	*Clean Air Act*
CETESB -	Companhia Ambiental Do Estado De São Paulo
CIVA -	Centros De Inspeção Veicular Ambiental
CO -	Monóxido De Carbono
CO2 -	Dióxido De Carbono
CONAMA -	Conselho Nacional Do Meio Ambiente
COV -	Compostos Orgânicos Voláteis
DEF -	Fluido De Escapamento Diesel (ARLA 32)
DETRAN - RJ -	Departamento De Trânsito Do Rio De Janeiro
DIAL -	Absorção Diferencial Lidar
DPF -	Filtro de Partículas Diesel
DVTEC -	Centro Designado de Teste de Emissões Veiculares
EDAR -	*Emission Detection And Reporting*
EPA -	*Environmental Protection Agency* (Agência de Proteção Ambiental dos EUA)
EUA -	Estados Unidos da América
FEEMA -	Fundação Estadual De Engenharia Do Meio Ambiente
HC -	Hidrocarbonetos
HEAT -	*Hager Environmental & Atmospheric Technologies*
I/M -	Programas De Inspeção E Manutenção
ICCT -	*International Council On Clean Transportation*
MP10 -	Material Particulado Inalável - 2um (Diâmetro Equivalente <10um)
MP2,5 -	Material Particulado - 2,5 Um (Diâmetro Equivalente < 2,5 Um)
NDIR -	Sensor Infravermelho Não Dispersivo
NDUV -	Sensor Ultravioleta Não Dispersivo
NH_3 -	Amônia
NO -	Óxidos de Nitrogênio
NO_2 -	Dióxido de Nitrogênio
NO_X -	Monóxido de Nitrogênio
O_3 -	Ozônio
OBD -	Sistema de Diagnóstico a Bordo

OMS -	Organização Mundial Da Saúde
PBT -	Peso Bruto Total
PCPV -	Plano de Controle de Poluição Veicular
PEMS -	*Portable Emissions Measurement Systems*
PMMVD -	Programa Para Melhoria Da Manutenção De Veículos Diesel
PROCONVE -	Programa De Controle De Poluição Do Ar Por Veículos Automotores
RMSP -	Região Metropolitana De São Paulo
SCR -	Sistema De Redução Catalítica Seletiva
SR -	Sensoriamento Remoto
TRUE -	*The Real Urban Emissions*
UFESP -	Unidade Fiscal Do Estado De São Paulo
VSP -	*Vehicle Specific Power* [potência instantânea por unidade de massa do veículo]

INTRODUÇÃO

A preocupação com as questões ambientais tem se tornado assunto cada vez mais estudado e discutido no mundo todo. Segundo levantamento realizado na plataforma de pesquisa científica *Science Direct*, para a palavra chave "*air pollution*" houve um aumento de 4 vezes nos resultados entre os anos de 2011 e 2021.

Todos os anos, milhões de mortes são atribuídas à poluição do ar, mundialmente. Estima-se que no ano de 2017, os poluentes material particulado secundário ($MP_{2,5}$) e ozônio (O_3) contribuíram com 4,9 milhões de mortes e 147 milhões de anos de vida saudável perdidos (HEI, 2019). Dentre os países com maior mortalidade atribuída à poluição do ar em 2017, o Brasil ficou na 9ª colocação, com cerca de 66 mil mortes (HEI, 2019).

O O_3, que possui como um de seus precursores os óxidos de nitrogênio (NO_X), está presente em duas camadas da atmosfera – a estratosfera e a troposfera. Na estratosfera, quilômetros acima da superfície da Terra, o O_3 forma uma camada de proteção, que filtra os raios ultravioletas do Sol (MCKEE, 1994). O_3 troposférico é formado na camada mais baixa da atmosfera, onde pessoas e o ecossistema como um todo são expostos. Uma vez que o O_3 troposférico não é emitido diretamente pelas fontes de poluição, e sim formado na atmosfera após várias reações químicas, ele é considerado como um poluente secundário (MCKEE, 1994). Dentre os efeitos causados por esse poluente estão o agravamento dos sintomas de asma, de deficiência respiratória, assim como de outras doenças pulmonares (enfisemas, bronquites, etc.) e cardiovasculares (arteriosclerose), redução da capacidade pulmonar, desenvolvimento de asma e redução na expectativa de vida (MMA, 2019a).

O $MP_{2,5}$, assim como o O_3, possui como um de seus precursores o NO_X, que é altamente prejudicial para a saúde humana, podendo causar arteriosclerose, inflamação de pulmão, agravamento de sintomas de asma, aumento das internações hospitalares e podem levar à morte (MMA, 2019a). Um agravante para essa situação, é que além de formação secundária, o $MP_{2,5}$ pode ter como fonte direta as emissões veiculares.

Outros poluentes atmosféricos emitidos pelos veículos em uso também são nocivos à saúde humana, como é o caso da exposição ao monóxido de carbono, que pode causar morte, insuficiência cardíaca, mudanças comportamentais, dentre outros problemas cardíacos (Hitchcock et. al. 2014).

A Organização Mundial da Saúde - OMS possui recomendações de limites de concentração atmosférica ideais para os poluentes $MP_{2,5}$, O_3, NO_X, visando mínimos efeitos nocivos na saúde humana. Há duas formas de medição desses limites, sendo um deles a

concentração anual e o outro da concentração em 24 horas, para evitar picos de concentração de poluentes, que podem causar excessos de morbidades e mortalidades. No entanto, a fim de ajudar os países no progresso da redução da concentração dos poluentes, a OMS desenvolveu metas intermediárias maiores, para que haja uma evolução progressiva (WHO, 2021). O Quadro 1 apresenta as metas intermediárias (IT-1, IT-2, IT-3 e IT-4), assim como a Recomendação da Qualidade do Ar (AQG, da sigla em inglês), para concentrações anuais e de 24 horas de material particulado MP_{10} e $MP_{2,5}$.

Quadro 1 - Metas intermediárias e finais para médias de concentrações anuais e de 24 horas de MP_{10} e $MP_{2,5}$ segundo a OMS

	Médias anuais		Médias 24 horas	
	MP_{10} µg /m3	$MP_{2,5}$ µg /m3	MP_{10} µg /m3	$MP_{2,5}$ µg /m3
IT-1 (fase 1)	70	35	150	75
IT-2 (fase 2)	50	25	100	50
IT-3 (fase 3)	30	15	75	37,5
IT-4 (fase 4)	20	10	50	25
Recomendação da qualidade do ar	15	5	45	15

Fonte: Adaptado de WHO (2021)

O Quadro 2 apresenta a meta intermediária e a AQG para o O_3, para médias diárias de 8 horas.

Quadro 2 - Metas e recomendação final para concentração de O_3 em 8 horas segundo a OMS

	O_3 µg/m3 (Média diária em 8 horas)
IT-1 (fase 1)	100
IT-2 (fase 2 1)	70
Recomendação da qualidade do ar	60

Fonte: Adaptado de WHO (2021)

O Quadro 3 apresenta as metas intermediárias e a AQG para o NO_2, para concentrações médias anuais e de 24 horas.

Quadro 3 - Metas e recomendação final para médias de concentrações anuais e de 24 horas de NO_2

	Média anual NO_2 µg /m3	Média 24 horas NO_2 µg /m3
IT-1 (fase 1)	40	120
IT-2 (fase 2)	30	50
IT-3 (fase 3)	20	-
Recomendação da qualidade do ar	10	25

Fonte: Adaptado de WHO (2021)

Com base nos valores guia recomendados pela Organização Mundial da Saúde no ano de 2005, a Resolução CONAMA nº 491, de 19 de novembro de 2018, estabeleceu padrões de qualidade do ar, conforme mostrado no Quadro 4.

Quadro 4 - Padrões da Qualidade do Ar - CONAMA nº 491/2018

Poluente Atmosférico	Período de Referência	PI-1	PI-2	PI-3	PF	
		mg/m³	m/m³	mg/m³	mg/m³	ppm
Material Particulado - MP_{10}	24 horas	120	100	75	50	-
	Anual¹	40	35	30	20	-
Material Particulado - $MP_{2,5}$	24 horas	60	50	37	25	-
	Anual¹	20	17	15	10	-
Dióxido de Enxofre - SO_2	24 horas	125	50	30	20	-
	Anual¹	40	30	20	-	-
Dióxido de Nitrogênio - NO_2	1 hora²	260	240	220	200	-
	Anual¹	60	50	45	40	-
Ozônio - O_3	8 horas³	140	130	120	100	-
Fumaça	24 horas	120	100	75	50	-
	Anual¹	40	35	30	20	-
Monóxido de Carbono – CO	8 horas³	-	-	-	-	9
Partículas Totais em Suspensão - PTS	24 horas	-	-	-	240	-
	Anual⁴	-	-	-	80	-
Chumbo - Pb5	Anual¹	-	-	-	0,5	-

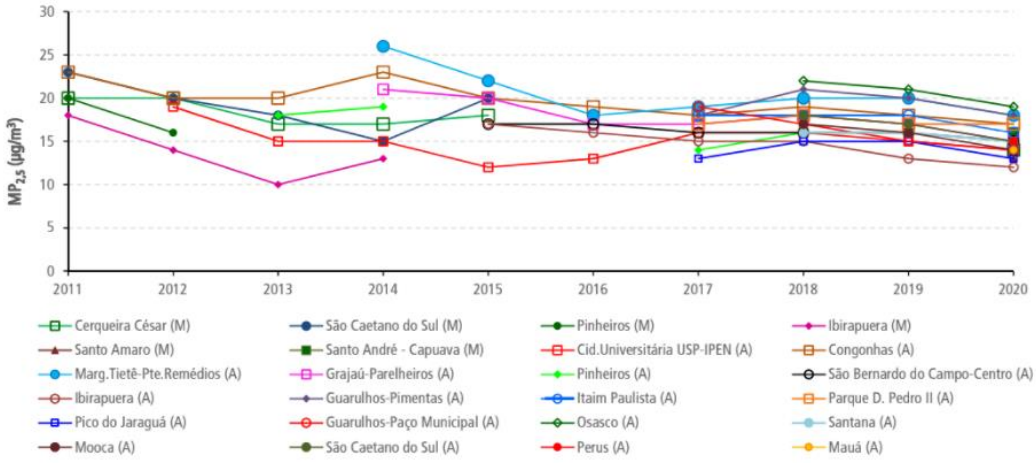
1 - média aritmética anual
2 - média horária
3 - máxima média móvel obtida no dia
4 - média geométrica anual
5 - medido nas partículas totais em suspensão
Fonte: BRASIL (2018b)

Baseado nas recomendações da OMS, o Governo do Estado de São Paulo estabeleceu limites específicos para cada poluente, regulamentados no Decreto Estadual nº 59.113, de 23 de abril de 2013 (SÃO PAULO, 2013). Foram estabelecidas metas intermediárias (MI) e padrão

final (PF) para cada poluente, sendo a Companhia Ambiental do Estado de São Paulo - CETESB responsável pela publicação das concentrações atmosféricas anuais, comparando com as metas estabelecidas. Atualmente, o estado de São Paulo encontra-se na fase MI2, de acordo com o estabelecido pela CETESB, baseado em estudo técnico e convalidação do Conselho Estadual do Meio Ambiente - CONSEMA.

A Figura 1 apresenta concentrações de $MP_{2,5}$, ao longo dos anos na Região Metropolitana de São Paulo - RMSP, segundo o Relatório da Qualidade do Ar 2019 (CETESB, 2020).

Figura 1 - Médias anuais das concentrações de $MP_{2,5}$ no ano de 2019 na RMSP

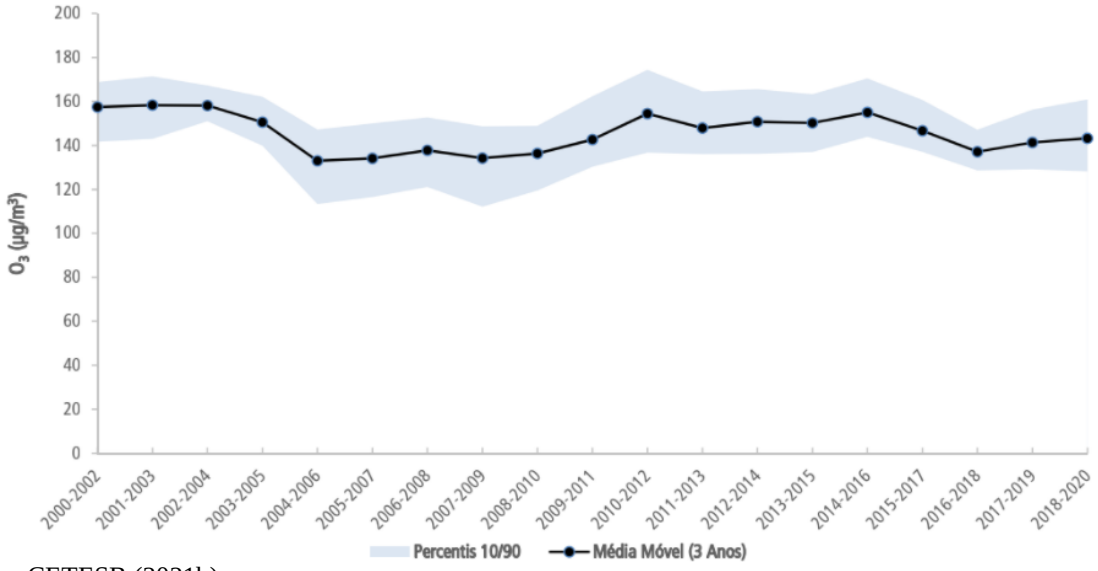


Fonte: CETESB (2021b)

Nota-se pela Figura 1, que as médias anuais de concentração de $MP_{2,5}$ na RMSP foram, em grande parte, acima do padrão final (10µg/m^3), estabelecido pelo Decreto Estadual nº 59.113, de 23 de abril de 2013 (SÃO PAULO, 2013).

A Figura 2 apresenta os valores das médias móveis de três anos, do 4º maior valor de concentrações de O_3 de cada ano, na RMSP. A área de hachura em azul apresenta o intervalo entre os percentis 10 (limite inferior) e 90 (limite superior) (CETESB, 2021).

Figura 2 - Evolução das médias móveis do 4º maior valor diário (máxima de 8 horas) de O_3 no ano de 2019 - RMSP

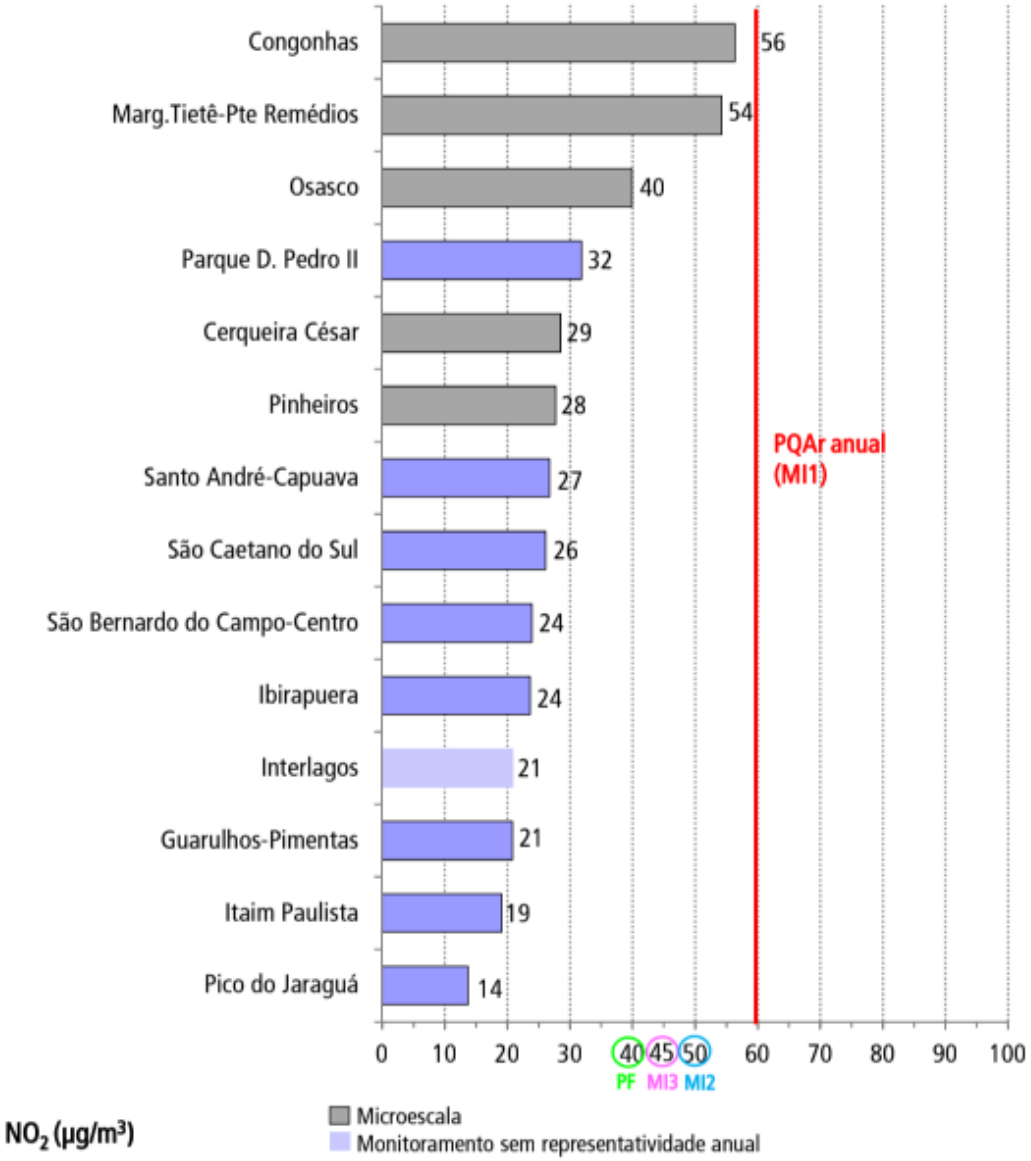


Fonte: CETESB (2021b)

Observa-se na Figura 2 que as médias de concentração de O_3, ao longo dos anos, têm se mantido constantes e acima do menor valor recomendado pela OMS (60µg/m^3) (WHO, 2021).

A Figura 3 mostra as concentrações médias anuais de NO_2 na RMSP. Em destaque estão o padrão de qualidade do ar do Estado de São Paulo (MI1), vigente no momento de elaboração do relatório, e os padrões MI2, MI3 e PF (padrão final).

Figura 3 - Concentrações Médias Anuais de NO_2 no ano de 2019 – RMSP



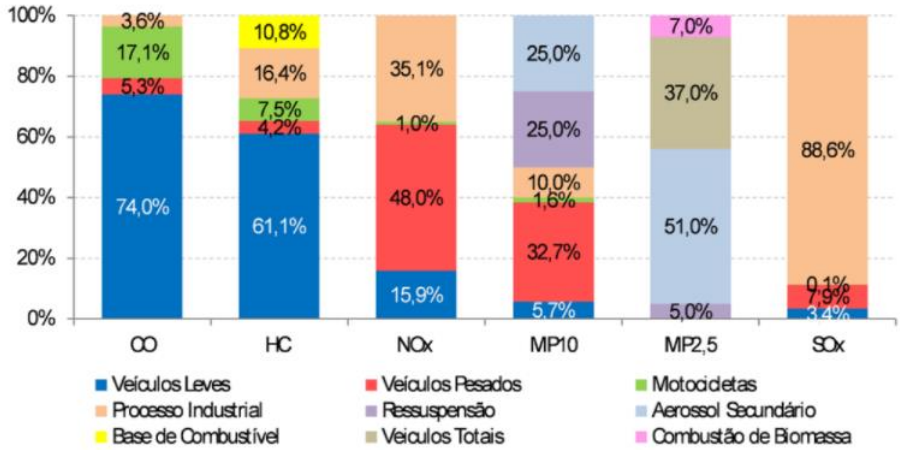
Fonte: CETESB (2021b)

Observa-se na Figura 3 que a maioria das estações de monitoramento da CETESB apresentou valores médios anuais abaixo do padrão final (PF) recomendado. No entanto, aquelas que ficaram acima desse valor estão localizadas próximas de vias de tráfego (CETESB, 2021a), o que indica a alta contribuição dos veículos nas altas concentrações atmosféricas de NO_2.

No estado de São Paulo, as principais fontes de poluição atmosférica são: veículos, processos industriais, bases de combustíveis, ressuspensão de partículas e aerossóis secundários (Cetesb, 2021b). Dentre essas fontes de poluição, os veículos representam a maior contribuição relativa direta para os poluentes monóxido de carbono (CO), hidrocarbonetos (HC), óxidos de

nitrogênio (NO_X) e MP_{10}, na RMSP. De acordo com a Figura 4, cerca de 96% do CO, 73% de HC, 65% de NO_x e 40% de MP_{10} foram provenientes de emissões diretas veiculares.

Figura 4 - Emissões Relativas por tipo de fonte no ano de 2019 - RMSP



Fonte: CETESB (2021)

Nota 1: MP_{10} - Contribuição conforme estudo de modelo receptor para partículas inaláveis (CETESB, 2002). A contribuição dos veículos (40%) foi rateada entre todos os veículos de acordo com os dados de emissão disponíveis (**Tabela 14**).

Nota 2: $MP_{2,5}$ - Contribuição conforme estudo de modelo receptor para partículas inaláveis finas realizado em Cerqueira César em 1996/1997, sendo a contribuição dos veículos apresentada de forma global (CETESB, 2002).

Nota 3: As emissões de HC provenientes do abastecimento dos veículos nos postos de combustível foram incorporadas nos veículos leves (CETESB, 2019b).

Fonte: CETESB (2021b)

Bruni (2018) explica que a crise econômica vivida pelo Brasil desde o ano de 2014 faz os proprietários de veículos deixarem suas manutenções preventivas em segundo plano, o que agrava ainda mais a situação da frota veicular circulante.

Diante dos críticos cenários de poluição atmosférica que o Brasil vem apresentando há anos, o Conselho Nacional do Meio Ambiente – CONAMA - elaborou o Programa de Controle de Poluição do Ar por Veículos Automotores – PROCONVE em 1986 (BRASIL, 1986), que consiste em determinar limites de emissão de cada poluente de veículos homologados para comércio no país, a fim de controlar a emissão de poluentes e a criação de programas de inspeção e manutenção para veículos automotores em uso.

Um ponto importante a ser observado é que o PROCONVE é dividido de acordo com a classificação dos veículos com relação ao seu Peso Bruto Total – PBT. Dessa forma, as fases caracterizadas por “L” referem-se a veículos leves e “P” aos pesados (MMA, 2019b), enquanto o número associado corresponde à fase, ou seja, quanto maior, mais avançado e mais restritos os limites para emissão de poluentes.

A Figura 5 apresenta a evolução das exigências do PROCONVE, desde a fase P1 à P8, aprovada no ano de 2018, com início previsto para 2022 (BRASIL, 2018).

Figura 5 - Evolução dos limites do PROCONVE para emissões de veículos pesados

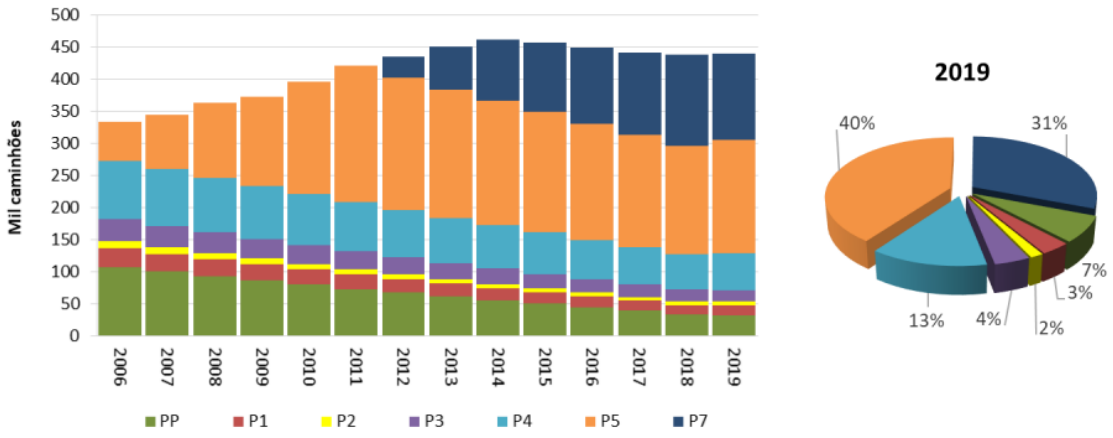
Fase	Resolução CONAMA	Ciclo de Ensaio	CO g/kwh	HC g/kwh	NMHC g/kwh	Nox g/kwh	PARTÍCULAS g/kwh	NH3	CH4 g/kwh	Opacidade com carga (ELR) m^{-1}	Opacidade sem carga m^{-1}	NP Número #/kWh	FUMAÇA k2
P1	18/86	Fumaça em carga											2,5
P2	08/93	13 MODOS	11,2	2,45		14,4	n.a.						
P3			4,9	1,23		9,0	0,7 e 0,4						
P4			4	1,1		7	0,25 e 0,15				0,83 e 1,19		
P5	315/02	ESC e ELR	2,1	0,66		5	0,1 e 0,13			0,8			
		ETC	5,45		0,78	5	0,16 e 0,21		1,6				
P6	315/02	ESC	1,5	0,46		3,5	0,02			0,5			
		ETC	4		0,55	3,5	0,03		1,1				
P7	403/08	ESC	1,5	0,46		2	0,02	25		0,5			
		ETC	4		0,55	2	0,03	25	1,1				
P8	490/18	WHSC	1,5	0,13		0,4	0,01	10			0,4	$8,0 \times 10^{11}$	
		WHTC	4	0,16		0,46	0,01	10				$6,0 \times 10^{11}$	
		WHTC	4		0,16		0,01	10	0,5				
		OCE (WNTE)	2	0,22		0,6	0,016						
		CR/ISC	6	0,24	0,24	0,69			0,75				

Fonte: Adaptado de BRASIL (2018) e CETESB (2018)

Nota-se que, a cada fase, houve redução dos limites dos poluentes que podem ser emitidos por veículos novos, homologados para serem comercializados no Brasil. A exemplo, houve redução de cerca de 50% para emissões de MP e 80% para NO_X, em veículos pesados entre as fases P7 e P8 do PROCONVE.

Estima-se que no ano de 2019 a frota de caminhões circulante no Estado de São Paulo, pertencente à fase P7 do PROCONVE, corresponda a 31% (CETESB, 2020), como pode ser observado na Figura 6.

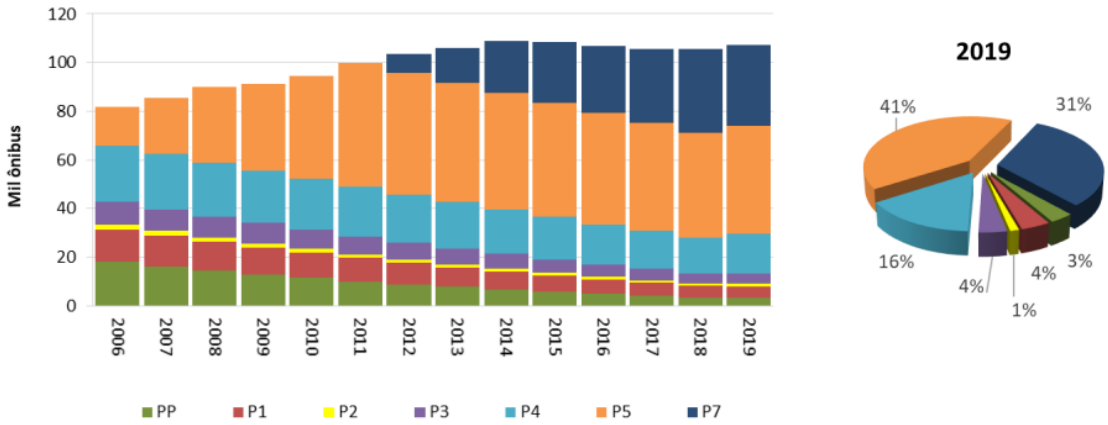
Figura 6 - Evolução da Frota Circulante de Caminhões separados por fases do PROCONVE 2006 - 2019



Fonte: CETESB (2020)

De forma análoga, os ônibus urbanos da fase P7 do PROCONVE correspondem a 31% do total de ônibus circulantes no Estado de São Paulo, como observado na Figura 7.

Figura 7 - Evolução da Frota Circulante de Ônibus separados por fases do PROCONVE 2006 - 2019



Fonte: CETESB (2020)

Assim, espera-se que as medidas adotadas pelo PROCONVE sejam eficazes, uma vez que veículos homologados para menores emissões estão cada vez mais presentes na frota circulante do Estado de São Paulo. Atualmente nesse estado, os veículos já em uso não são obrigados a passar por inspeção veicular para verificação das emissões de poluentes após homologados para comercialização no país. Um programa de inspeção veicular é importante para garantir que os padrões de emissão previstos pelo PROCONVE estão sendo respeitados mesmo durante seu uso, após o processo de homologação (BRANCO, 2012; Kleefeld, J. B., Dallmann, T., 2018).

Atualmente no estado de São Paulo, as únicas ações vigentes que têm como objetivo verificar o estado de manutenção dos veículos em uso são as fiscalizações de fumaça preta, opacidade e de ARLA 32 (Agente Redutor de NO_X Líquido Automotivo).

A fiscalização de fumaça preta para veículos em uso, no Estado de São Paulo, é visual, utilizando-se a Escala de Ringelmann, enquanto a opacidade é medida com um opacímetro, segundo regulamentado pelo Decreto Estadual 54.487 de 26 de junho de 2009 (SÃO PAULO, 2009). Nota-se que ambos os métodos implicam em medição direta do poluente para verificação de conformidade ambiental de veículos diesel. Cerca de 150.000 veículos são inspecionados com a Escala de Ringelmann durante a Operação Inverno (CETESB, 2020), e aproximadamente 100 pela opacidade durante todo o ano (CETESB, 2018).

Em complemento ao sistema de fiscalização de fumaça preta e de opacidade realizadas pela CETESB, há o Programa para Melhoria da Manutenção de Veículos Diesel - PMMVD, previsto pelo Decreto Estadual 54.487/09 (SÃO PAULO, 2009), que visa a melhoria da qualidade do ar, por meio do incentivo às ações de manutenção dos veículos movidos a diesel. Nesse programa, aqueles que sofreram uma penalidade por fumaça preta ou opacidade em excesso podem ter 70% do valor reduzido, caso sejam aprovados em um teste de opacidade em uma das unidades operacionais capacitadas do PMMVD.

Segundo o Relatório da Operação de Fiscalização de ARLA 32 da CETESB de 2017 (CETESB, 2017), ações para verificação da correta utilização do sistema de redução catalítica seletiva - SCR foram iniciadas no Estado de São Paulo, a fim de controlar seu uso e, portanto, reduzir os níveis de NO_X emitidos por veículos diesel. Essas fiscalizações buscam fraudes como adulteração do fluido ARLA 32 e sistemas que enganam o sistema de disgnóstico a bordo - OBD do veículo. Durante o ano, cerca de 100 veículos são fiscalizados quanto às adulterações do sistema SCR como um todo (CETESB, 2016, CETESB, 2017; CETESB, 2018).

Uma outra forma para avaliação das emissões da frota veicular, que tem se mostrado muito eficaz, é o de sensoriamento remoto, desenvolvido na década de 1980 por D. Stedman e seus colaboradores na Universidade de Danver (Bishop et al., 1989). Essa técnica utiliza espectroscopia de absorção para medição dos poluentes nas plumas emitidas pelos veículos em uso (Dallmann, 2018) e permite a avaliação dos veículos automotores na própria via, de maneira rápida e de baixo custo (Bruni, 2018).

Dessa forma, nas últimas décadas o sensoriamento remoto veicular tem sido amplamente utilizado em diversos países, tanto para avaliação da frota, quanto para complementar programas de inspeção e manutenção veicular (Organ et al., 2019; Bernard et al., 2019).

Estudos realizados pela iniciativa TRUE (*The Real Urban Emissions*) em Londres e Paris mostraram que as emissões de veículos em uso eram diferentes dos testes laboratoriais, apresentando maiores problemas nas emissões de NO_X de veículos movidos a diesel (Dallmann et al., 2019; Kleefeld, J. B., Dallmann, T., 2018). Nos EUA, a utilização de sensoriamento remoto anual avalia mais de 1.000.000 de veículos e é utilizada tanto para fins de identificação de grandes emissores (*high emitters*), quanto para fins de pesquisa e monitoramento da frota. Alguns países em desenvolvimento também utilizam o sensoriamento remoto, mesmo que em menor escala, tanto para fins de pesquisa como no caso da Argentina e do Chile, quanto para identificação de possíveis fraudes, como a China (Dallmann, 2018).

O Brasil não possui nenhum programa específico que utilize o sensoriamento remoto para monitoramento da frota de veículos em uso circulante. Apesar disso, alguns estudos já foram realizados em São Paulo, mostrando o potencial da tecnologia para identificação de *high emitters* de veículos leves e sua eficácia em complementar programas de inspeção veicular (Bruni, 2018).

Branco et al. (2012) correlacionaram os resultados obtidos nos Centros de Inspeção Veicular Ambiental (CIVA) com medições realizadas com equipamento de sensoriamento remoto em aproximadamente 2 milhões de veículos, entre os anos de 2007 e 2012. Uma de suas conclusões foi a de que essa tecnologia é indispensável para complementar programas de controle da poluição veicular, para verificação de eficácia do programa e complementação das fiscalizações de veículos em uso.

Assim, sabendo-se dos danos causados pela poluição atmosférica e que os veículos do ciclo diesel são uma das principais fontes de tais emissões, e que programas de inspeção de veículos em uso não são realizadas na maior parte do Brasil, e que ainda a tecnologia de sensoriamento remoto é de suma importância para avaliação e monitoramento da frota circulante, este trabalho tem o objetivo de propor medidas e procedimentos para utilização de dispositivos de sensoriamento remoto como ferramentas de seleção e avaliação para uma programa de inspeção veicular em São Paulo.

Além disso, o produto deste trabalho será a elaboração de um roteiro com a descrição dos procedimentos necessários para a implantação de equipamentos de sensoriamento remoto como complemento de inspeções veiculares em São Paulo. Esse roteiro é apresentado no Apêndice A.

OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

- Propor medidas e procedimentos para implantação de um sistema de sensoriamento remoto como meio de inspecionar os veículos do ciclo diesel no Estado de São Paulo, em complemento a um programa de I/M

2.2 Objetivos Específicos

- Revisar a tecnologia envolvida nos equipamentos de sensoriamento remoto
- Analisar o potencial da tecnologia para identificação de *high* e *low emitters*
- Propor procedimentos para identificação de locais de inspeção e todas as variáveis locais envolvidas

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Programas de Inspeção e Manutenção (I/M)

Programas de Inspeção e Manutenção (I/M) são aqueles que requerem inspeções periódicas nos sistemas de controle de emissões dos motores veiculares. Dessa forma, visam identificar e mitigar veículos que estejam emitindo poluentes acima de um limite estabelecido, com o intuito de melhorar a qualidade do ar (EPA, 2021). Assim que os veículos poluidores são identificados, eles precisam passar por manutenção para tornarem-se aptos novamente à circulação em vias públicas. Os I/M passaram a ser instaurados em 1970 nos Estados Unidos, após identificação de discrepâncias entre as emissões de veículos em uso com os homologados (Easley, 2011). O estado de Nova Jersey foi o primeiro a implementar um programa de I/M, no qual eram inspecionados anualmente somente veículos com fabricação superior ou igual a 1968, porém sem a verificação de fraudes (EPA, 2002).

Nesta seção vamos apresentar alguns dos principais programas de I/M em atividade no mundo. Vale destacar que, apesar de o programa de inspeção e manutenção da cidade de São Paulo não estar vigente, foi descrito seu funcionamento e os principais ganhos ambientais causados, uma vez que o objeto de atuação deste trabalho é o estado de São Paulo.

Destacamos aqui os programas de I/M do estado do Rio de Janeiro, dos Estados Unidos, da China, da Europa, Hong Kong e de Ontario. Pode-se enfatizar que Hong Kong e alguns estados dos EUA possuem a tecnologia de SR como uma das etapas do processo de inspeção. Deve-se dar devida atenção também às zonas de baixa emissão da Alemanha, que se trata de um outro programa controle das emissões de locais estratégicos do país.

3.1.1 Brasil

A Resolução CONAMA nº 418, de 25 de novembro de 2009, prevê a implementação de Programas de Inspeção e Manutenção I/M pelos órgãos ambientais responsáveis, a fim identificar as irregularidades de veículos em uso, tendo como referências as especificações originais dos fabricantes, as exigências do PROCONVE e as falhas de manutenção e alterações do projeto original que causem aumento na emissão de poluentes (CONAMA, 2009).

Segundo a Resolução CONAMA nº 418, cabe ao órgão estadual de meio ambiente a responsabilidade pela execução do Programa de Inspeção e Manutenção de Veículos em Uso - I/M, conforme definido no Plano de Controle de Poluição Veicular - PCPV. Além disso, municípios com mais de 3 milhões de habitantes também podem implantar seus próprios programas de I/M.

Após a extinção do programa de inspeção veicular da cidade de São Paulo, somente o Estado do Rio de Janeiro possui um programa de I/M para avaliação das emissões veiculares em atividade no país.

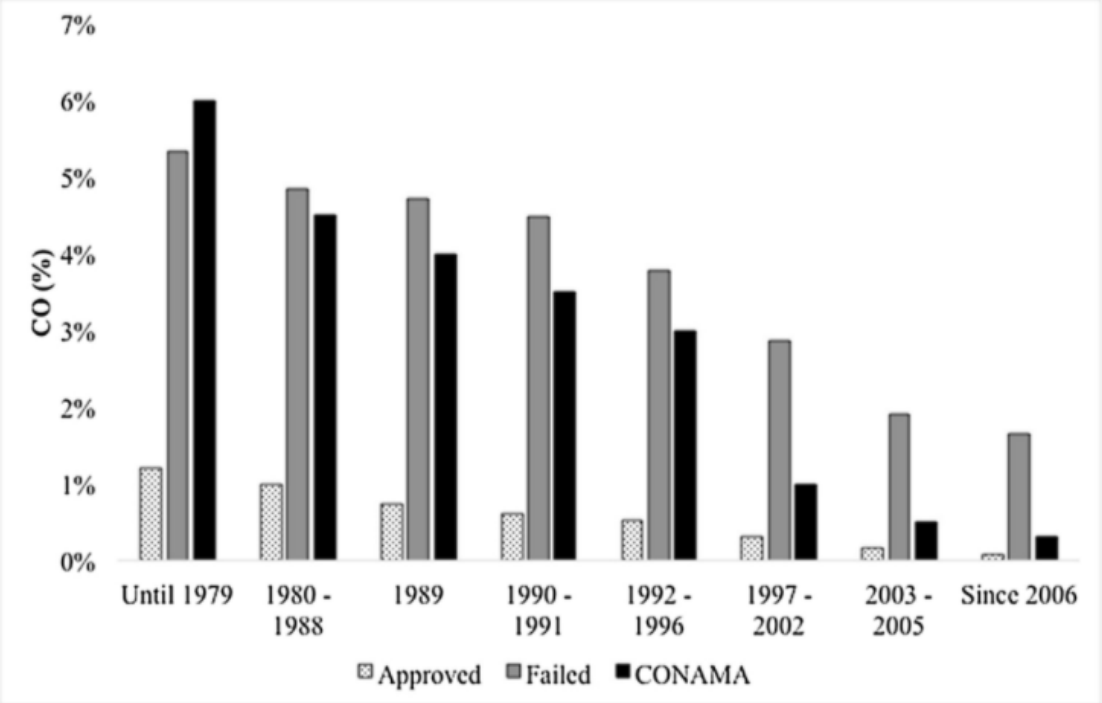
3.1.1.1 Rio de Janeiro

O Programa de Inspeção e Manutenção de veículos em uso do estado do Rio de Janeiro, em atendimento a Lei Estadual nº 2539 de 1996, iniciou-se no ano de 1997 por meio de um convênio de cooperação técnica entre a extinta Fundação Estadual de Engenharia do Meio Ambiente - FEEMA e o Departamento de Trânsito do Rio de Janeiro - DETRAN-RJ (DETRAN, 2021). Nesse contexto, o procedimento de inspeção veicular é realizado em duas etapas, a inspeção visual e a avaliação de gases (CONAMA 2009, CONEMA 2017). A inspeção visual verifica se o veículo está apto a ser avaliado quanto à emissão de gases. Os principais componentes verificados nesta etapa são: vazamento de fluidos, emissão excessiva de fumaça, funcionamento irregular do motor, deterioração no sistema de escapamento ou tampa do tanque de combustível ausente. Quanto à medição de gases, para veículos leves do ciclo Otto é utilizado um analisador de gases, enquanto para veículos do ciclo diesel são utilizados opacímetros.

Em 2019 houve uma modificação no procedimento dos testes de emissões, passando a ser realizados nas ruas, com veículos sendo escolhidos de forma aleatória (Ventura et al., 2020).

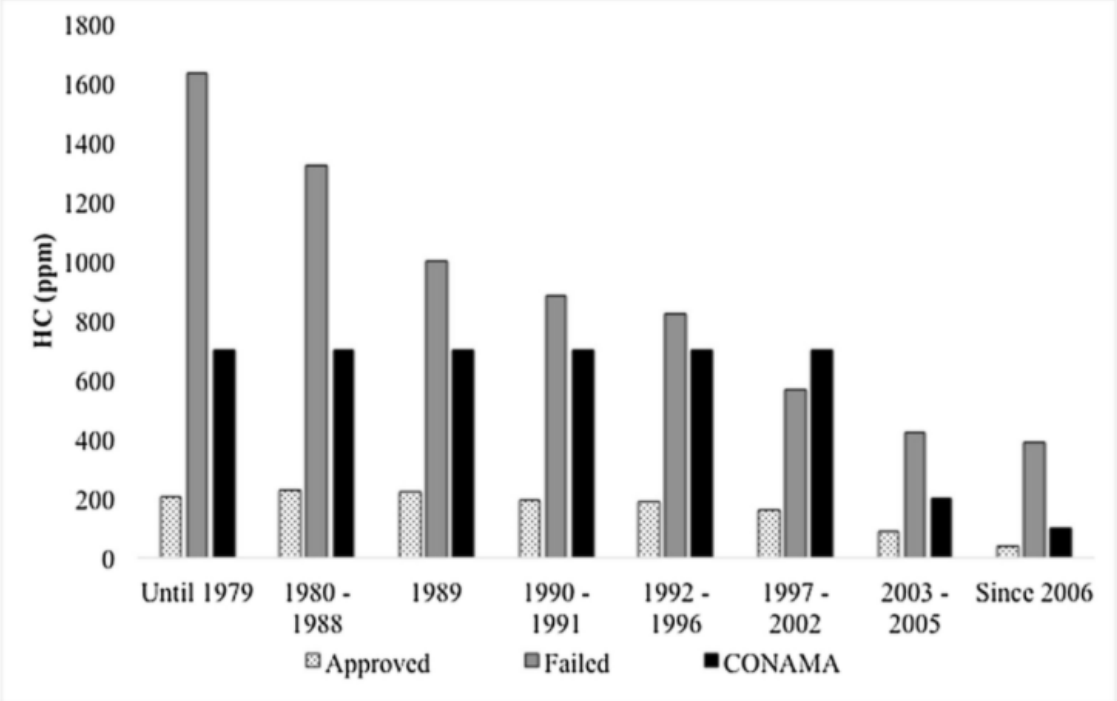
Ventura et al. (2020) ressaltam a importância do programa de I/M do Rio de Janeiro para redução dos níveis de emissões de veículos em uso. Segundo eles, entre os anos de 2014 e 2017, cerca de 29% dos veículos leves avaliados foram reprovados, sendo 6% durante a inspeção visual e 23% por níveis de gases emitidos acima dos limites legais definidos pelo CONAMA. Além disso, pelos dados apresentados, nota-se que veículos mais antigos tendem a emitir maiores concentrações de gases poluentes do que veículos mais novos. Pelas Figuras comparativas 8 e 9, observa-se que veículos fabricados a partir de 2006 poluem consideravelmente menos que os de anos anteriores.

Figura 8 - Comparação das médias de emissões de CO (%) para diferentes idades de veículos e situação da inspeção veicular



Fonte: Ventura et al. (2020)

Figura 9 - Comparação das médias das emissões de HC (ppm) para diferentes idades de veículos e situação da inspeção veicular



Fonte: Ventura et al. (2020)

Nesses anos, as condições de manutenção dos veículos leves Rio de Janeiro influenciaram o aumento dos níveis de emissões de CO e HC em até cinco vezes, quando comparados aos limites estabelecidos (Ventura et al., 2020).

3.1.1.2 São Paulo

Em atendimento à Resolução CONAMA 18/86, a cidade de São Paulo implantou seu Programa de Inspeção e Manutenção (I/M-SP) conforme estabelecido pela LEI Nº 14.717, de 17 de abril de 2008 (Bruni, 2018; Branco, 2015). O I/M-SP teve seu fim decretado em janeiro do ano de 2014 e não voltou a funcionar desde então.

A implantação do I/M-SP foi gradual, começando com a inspeção obrigatória somente dos veículos diesel em 2008. No ano seguinte, os veículos leves do ciclo Otto fabricados entre os anos de 2003 e 2008 precisavam ser inspecionados. A partir do ano de 2010, todos os veículos registrados na cidade de São Paulo eram obrigados a passar pela inspeção ambiental (Bruni, 2018).

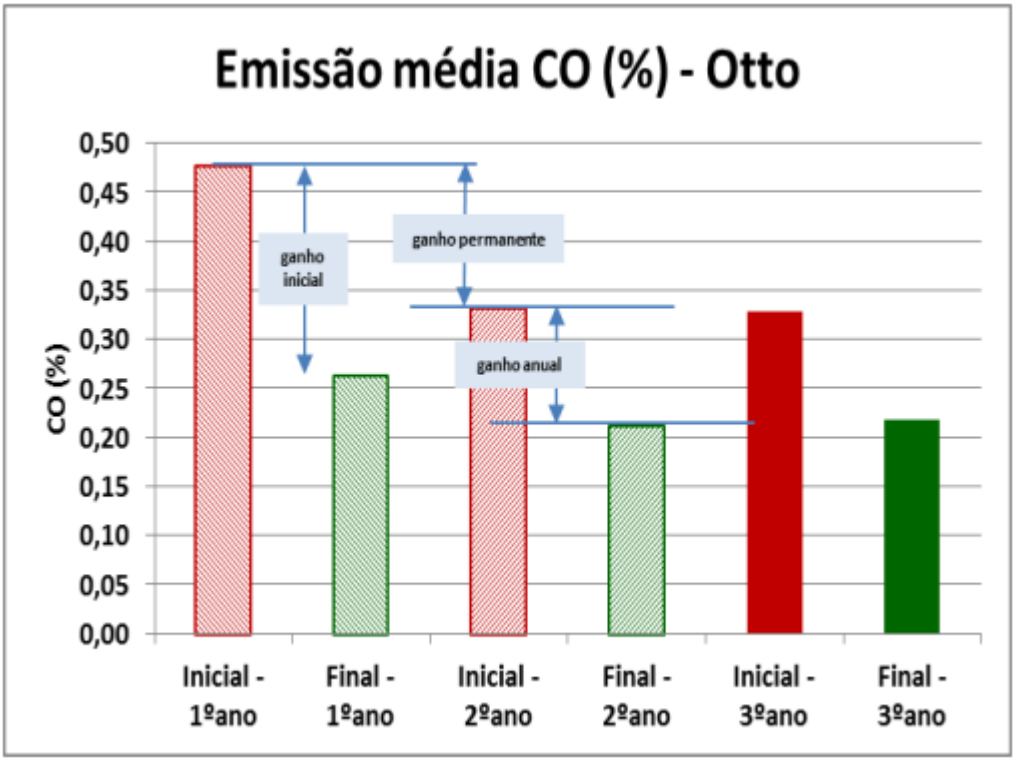
As inspeções do I/M-SP eram anualmente obrigatórias a partir do segundo ano do licenciamento do veículo (Branco, 2015) e compostas por três etapas: inspeção visual, análise de gases e análise de ruído (Branco, 2015). De forma parecida ao realizado pela I/M do Rio de Janeiro, a inspeção visual do I/M-SP verificava itens que poderiam comprometer a qualidade do teste de emissões, como sistema de escapamento danificado, fumaça branca ou azulada, funcionamento irregular do motor, ausência de catalisador em veículos homologados com esse equipamento, dentro outros (Ventura et al., 2020; Branco 2015).

Caso aprovado na inspeção visual, o veículo passaria por avaliação da emissão de gases. Eram medidos os gases CO e HC para veículos do ciclo *Otto* e opacidade dos veículos do ciclo diesel.

A terceira etapa do processo era a avaliação de ruído, para veículos previamente selecionados pelos agentes de inspeção. No final de todas as etapas, caso o veículo falhasse em alguma delas, o proprietário deveria fazer os reparos necessários e realizar a inspeção novamente, até ser aprovado em todas.

Os ganhos ambientais com a implantação e funcionamento do I/M-SP possuíam vertente permanente (Branco, M. 2015) que pode ser observada na Figura 10. Nela é possível observar que as médias anuais de emissões de CO foram reduzidas gradualmente, indicando uma tendência de incorporação cultural da realização de manutenções preventivas nos veículos.

Figura 10 - Ganhos ambientais causados pela I/M-SP entre os anos do programa



Fonte: Environmentality (2012)

Outros ganhos ambientais mensuráveis são apresentados por Cardinale e Branco (2013), que concluíram que o I/M-SP produziu benefício ambiental estimado, até o ano de 2012, em 50% para CO, 40% para HC e 30% para material particulado emitidos.

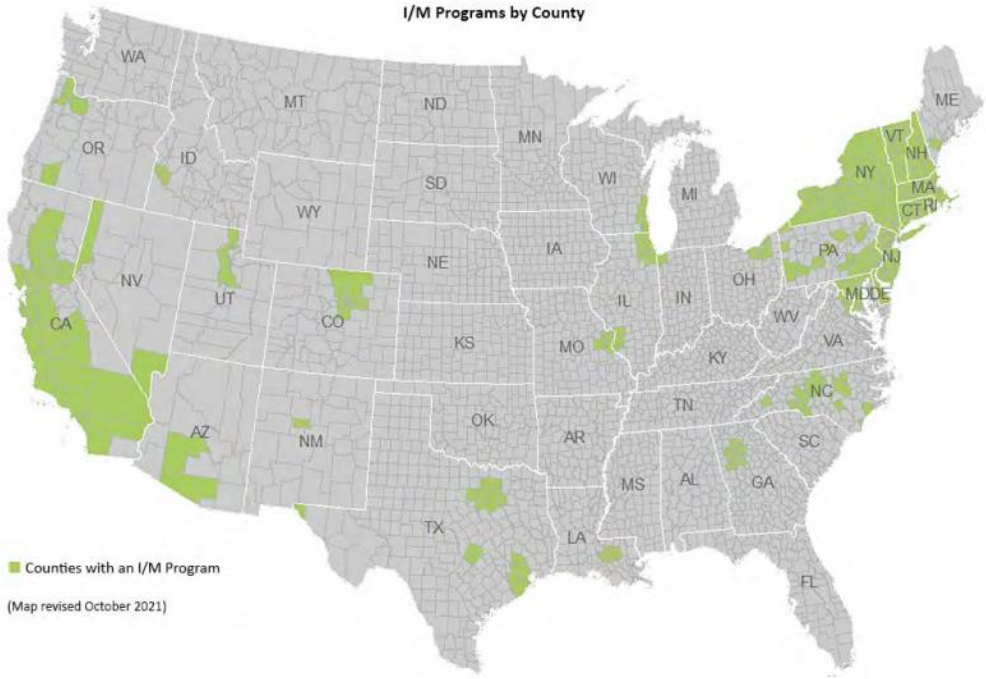
3.1.2 Estados Unidos

Atualmente, os programas de I/M dos EUA seguem os critérios de cada estado, que possuem seus próprios programas baseados nas regras da CAA (*Clean Air Act*), lei federal que rege a qualidade do ar nos EUA (EPA, 2021).

Para os programas de I/M dos EUA foram estabelecidos dois níveis de inspeção, o Básico (“*Basic*”) e o Melhorado ("*Enhanced*"). O nível Básico se faz necessário em locais onde a classificação da qualidade do ar, referente às concentrações de ozônio, é Moderada, além de contar com população maior que 200.000 habitantes no ano de 1990. Programas de I/M Básicos requerem inspeções somente de veículos leves, de certos anos de fabricação e avaliação com veículo parado. O programa Melhorado é necessário onde a qualidade do ar é classificada como Séria, Severa ou Extrema, além de ter uma população maior que 200.000 no ano de 1980 (EPA, 2021). Programas de I/M Melhorados requerem inspeções anuais de veículos e negam renovação de licenças para aqueles que falharem nos requerimentos das inspeções.

A Figura 11 mostra os estados onde são conduzidos programas de I/M nos EUA, segundo relatório do EPA de 2021.

Figura 11 - Estados dos EUA que possuem programas de I/M em atividade no ano de 2021



Fonte: EPA (2021)

Os programas de I/M dos EUA funcionam com três tipos de inspeção: a visual, a de emissões pelo tubo de escapamento e o diagnóstico do OBD. No ano de 2018, 68 milhões de veículos foram inspecionados no país, sendo 3,5 milhões (5%) reprovados no teste. No entanto, 75% desses que falharam, fizeram o reparo e conseguiram ser aprovados no teste seguinte (EPA, 2021).

Dos estados que possuem programas de I/M nos EUA, alguns possuem a utilização de sensoriamento remoto, para diferentes finalidades, como “monitoramento”, “pesquisa”, identificação de “*high emitter*” e “*low emitter*”, como mostrado no

Quadro 5, adaptada de Bernard et al. (2019).

Quadro 5 - Utilização de equipamentos de SR nos estados dos EUA

Estado	Monitoramento	Pesquisa	*High emitter*	*Low emitter*
Arizona	o			
California	o	o		

Colorado	○	○		○
Connecticut	○			
DC	○			
Delaware	○			
Georgia	○	○		
Illinois	○	○		
Indiana	○		○	
Maryland	○			
Massachusetts	○		○	
Nevada	○			
New York	○			
Ohio	○			○
Pennsylvania	○			
Rhode Island	○			
Tennessee	○			○
Texas	○		○	
Virginia	○	○	○	○

Fonte: Adaptado de Bernard et al. (2019)

3.1.3 China

No ano de 2017, a China criou o primeiro regulamento de inspeção veicular com uso de sensoriamento remoto no mundo. Esse programa aplica-se para todos os veículos movidos a diesel, tanto leves quanto pesados e possui limites de emissões para opacidade, escala de Ringelmann e NO. Um veículo é considerado em desconformidade caso seja flagrado pelo equipamento de SR emitindo poluentes acima do estipulado. Se identificado como não-conforme para opacidade ou Escala de Ringelmann, ao menos duas vezes dentro de um

intervalo de seis meses, o mesmo é penalisado. No caso de não conformidade para o poluente NO, o veículo deve ser reparado e levado a um centro de inspeção (Yang, L. et al., 2019).

Os limites estipulados para o programa de sensoriamento remoto veicular da China estão constantes no Quadro 6:

Quadro 6- Limites de emissão para o programa de SR da China

Poluente	Limite
Opacidade	30%
Escala de Ringelmann	Nível I (20%)
NO	1500 ppm

Fonte: Yang, L. et al. (2019)

Em 23 de junho de 2020, o Ministro de Transporte (MOT), o Ministro da Ecologia e do Meio Ambiente, e a Administração Estatal de Regulamentação do Mercado estabeleceram o programa de inspeção e manutenção veicular federal da China. Nesse programa, veículos movidos a diesel e a gasolina devem passar por inspeção periódica de emissões em estações de medição, identificadas como I. Quando as emissões veiculares ultrapassam os padrões permitidos, o proprietário é notificado, e é solicitado que repare seu veículo em uma das oficinas credenciadas pelo governo. Assim que reparado, o veículo deve passar por reinspeção em uma das estações I, para que possa circular normalmente pelas vias do país (ICCT, 2020).

Os veículos que não apresentarem o selo de conformidade ambiental de emissões são multados conforme a legislação vigente.

O sucesso desse programa vai depender de muitos fatores, como o compartilhamento de dados veiculares entre as províncias, qualidade do *complience* e fiscalização para identificar possíveis fraudes, capacidade de manutenção das estações e do trabalho conjunto das autoridades que estão responsáveis pelo progresso do programa (ICCT, 2020).

3.1.4 Europa

A União Europeia possui seus requerimentos básicos para implementação de programas de I/M regulamentados pelas diretivas 2014/45/EU. No entanto, cada país se adequa a essa legislação, dependendo das condições locais de emissão e poluição atmosférica. Como são os casos da Suécia, que verifica as emissões de CO e HC dos veículos, enquanto a Alemanha incorporou a inspeção do OBD (Posada, 2015).

Desde o ano de 2008 a Alemanha possui zonas de baixa emissão (*low-emission zones*), que são locais onde são permitidas as circulações de veículos com baixa emissão de poluentes. Para comprovação das emissões é colocado um adesivo no veículo, que pode ser vermelho, amarelo ou verde, conforme mostrado na Figura 12.

Figura 12 - Representação dos adesivos utilizados para identificação dos veículos na Alemanha

Fonte: The German Emissions Sticker (2021)

Veículos com adesivo vermelho são aqueles com alto grau de emissão de poluentes e não podem entrar em nenhuma das zonas de baixa emissão. Além disso, não podem ser comercializados. O adesivo amarelo permite a circulação somente na zona de Neu-Ulm na Bavaria, enquanto o verde permite que o veículo trafegue por toda a extensão territorial.

3.1.5 Hong Kong

Hong Kong possui, desde setembro de 2014, um programa de controle de emissões veiculares, que utiliza a tecnologia de sensoriamento remoto para otimizar o processo de inspeção. Os veículos são constantemente monitorados através de equipamentos de SR, que identificam aqueles que apresentam emissões de gases excessivas. Caso algum veículo apresente emissões acima dos limites legais, o proprietário terá que levá-lo a um teste em dinamômetro em um Centro Designado de Teste de Emissões Veiculares (DVETC, sigla de *Designated Vehicle Emission Testing Centre*) dentro do período de 12 dias. Caso essa exigência não seja cumprida, há o cancelamento da licença do veículo (HONG KONG, c2021).

Organ et al. (2019) analisaram esse programa e coletaram 2.144.422 dados do SR entre 6 de janeiro de 2012 e 30 de dezembro de 2016. Desses, 1.206.762 foram validados para a investigação do artigo. Após análise, verificou-se que houve redução dos fatores de emissão em 40,5% de HC, 45,3% em CO e 29,6% em NO para veículos movidos a gasolina. As reduções para veículos movidos a gás liquefeito de petróleo - GLP foram de 48,4% em HC, 41,1% em

CO e 58,7% em NO. Os dados mostram que o programa foi efetivo para redução das emissões para esses dois tipos de veículos.

3.1.6 Japão

O programa de Inspeção e Manutenção de veículos em uso do Japão, chamado de *Shaken*, é de responsabilidade do Ministério da Terra, Infraestrutura, Transporte e Turismo (MLIT), e pode ser realizado por organizações de inspeção autorizadas por este Ministério (Hirota e Minato, 2001).

As inspeções de emissões veiculares, assim como as de segurança, são conduzidas após três anos da compra do veículo e, subsequentemente, a cada dois anos para veículos leves e a cada um ano para pesados (JAPÃO, 2022).

Quanto às emissões, são avaliadas as concentrações dos gases CO e HC, assim como ruído veicular.

Para a realização da inspeção compulsória veicular do Japão é preciso pagar uma taxa, o que incentiva os proprietários a trocarem de carro antes da primeira inspeção (Nakamoto & Kagawa, 2018). Dessa forma, há uma consequente renovação de frota.

3.1.7 Ontario

No Canadá, os programas de I/M são de responsabilidade de cada província. Entretanto, Ontario é a única que possui esse programa em atividade, uma vez que British Columbia encerrou as atividades obrigatórias de inspeção das emissões veiculares em dezembro de 2014 (CBC News, 2014).

O programa de I/M em Ontario teve início em 1999 e, a partir de 2019 passou a ser aplicado somente a veículos pesados. O I/M possui duas formas de atuação, sendo uma delas o teste na estrada, e a outra a inspeção anual (Posada et al., 2015).

O teste na estrada pode ser realizado por qualquer agente de fiscalização, caso acredite que o mesmo esteja emitindo poluentes excessivos, ou possua algum dispositivo de fraude (Ontario, 2021). Caso o veículo falhe nessa inspeção, o proprietário é autuado (Posada et al., 2015).

A inspeção anual é realizada de em três etapas: a pré-inspeção, na qual é avaliada a condição geral do veículo, garantindo um teste de emissões confiável e seguro; o teste de opacidade, que verifica se o veículo está emitindo poluentes dentro dos limites legais; e a verificação do OBD (somente para veículos com massa entre 4.500kg e 6.350kg), que

identifica a operação regular dos mecanismos de controle de emissões de poluentes (Ontario, 2021).

Em Ontario, há uma proposta de atualização da regulamentação do programa de I/M da província, que se inicia em março de 2022. Nesse novo cenário, há redução dos limites de opacidade para veículos mais novos, de 20% para 10%, inspeção do OBD para veículos a partir de modelos de 2016 e inspeção dos sistemas DPF (*Diesel Particulate Filter*) e DEF (*Diesel Exhaust Fluid*) (Registry, R. O., 2021).

3.2 Programa para Melhoria da Manutenção de Veículos Diesel - PMMVD

O PMMVD é um programa relacionado à redução das emissões de poluentes por veículos diesel atuante no Estado de São Paulo. Apesar de não ser especificamente um programa de I/M, por não ser compulsório e nem contínuo, possui uma boa estrutura e tem como fundamento a melhoria da manutenção dos veículos diesel.

Segundo consta no site da CETESB, o PMMVD é estruturado conforme **Erro! Fonte de referência não encontrada.**.

Figura 13 - Estrutura do Programa PMMVD da CETESB

Fonte: CETESB (2022)

As atribuições de cada uma das entidades representadas na **Erro! Fonte de referência não encontrada.** são as seguintes:

- CETESB: estabelece os pré-requisitos e exigências a serem atendidas pelos participantes do PMMVD.

- Controladoras: administram e monitoram as unidades operacionais, garantindo que os pré-requisitos previstos no regulamento do programa sejam cumpridos.

- Unidades Operacionais: consistem de oficinas mecânicas e organismos de inspeção que atendem os requisitos exigidos para participação no programa, e que estão autorizados a realizar teste de opacidade conforme resolução CONAMA n°418/09 com emissão de RMO.

- Auditoras: auditam as unidades operacionais, verificando o atendimento dos requisitos estabelecidos pelo PMMVD.

Todas as vezes que um veículo a diesel é multado por emissão de fumaça preta no Estado de São Paulo (Decreto Estadual 8.468/76 e suas alterações), recebe uma multa no valor de 60, 120, 240 ou 480 UFESP (Unidade Fiscal do Estado de São Paulo), dependendo da situação. Caso seja a primeira multa nos últimos 12 meses, o proprietário pode solicitar redução de 70% do valor dessa multa, desde que realize uma inspeção em uma das unidades operacionais do PMMVD e comprove que seu veículo está em boas condições de emissão de poluentes.

As unidades operacionais estão vinculadas às Controladoras para fins administrativos e passam por auditorias de terceira parte anualmente.

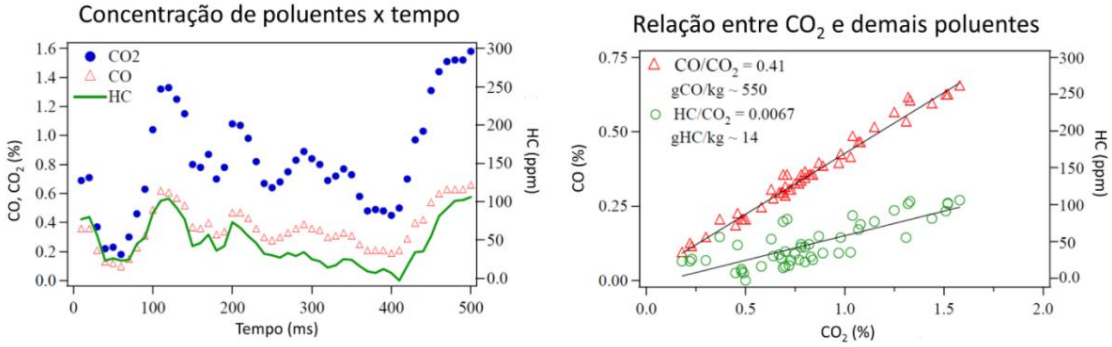
3.3 Sensoriamento Remoto Veicular

Os equipamentos de sensoriamento remoto analisam as emissões veiculares em condições normais de funcionamento, não interferindo no trânsito local e, dessa forma, sendo capazes de realizar muitas medições por dia. O método utilizado para medição das emissões dos veículos é a espectroscopia por absorção, que consiste em quantificar a energia de um feixe de luz absorvida pela pluma de poluentes, convertendo esse valor em concentração de determinado poluente.

Como as concentrações dos poluentes observados pelos equipamentos de SR variam em função do tempo, pois há efeitos de turbulência e da altura do tubo de escapamento, por exemplo, sua distribuição temporal é aleatória. No entanto, quando representadas as

concentrações em razões de CO_2, a distribuição é linear (Branco, 2021), conforme mostrado na Figura 14.

Figura 14 - Relação das concentrações dos poluentes em função do tempo e em razão de CO2



Fonte: Branco et al (2021)

Observa-se no gráfico à esquerda da Figura 14 que as concentrações de CO, CO_2 e HC possuem comportamento aleatório em função do tempo. No entanto, no gráfico à direita é possível observar que a correlação entre as concentrações de CO e HC em relação a CO_2 são lineares. Assim, os resultados obtidos com os equipamentos de SR são as concentrações de cada poluente em relação a CO_2. As razões de gCO/kg e gHC/kg presentes no gráfico à direita da Figura 14 correspondem às emissões de tais poluentes por kg de combustível queimado.

Com as razões de concentração entre os poluentes e CO2, é possível obter dados importantes, como a razão entre as massas de poluente e combustível queimado, através da seguinte equação (Branco, 2021):

$$\frac{poluente\ (g)}{combustível\ (kg)} = \frac{M_{pol}\left(\frac{g}{mol}\right) x \frac{Poluente(\%)}{CO2(\%)}}{\left(1+\frac{CO(\%)}{CO2(\%)}+3*\frac{HCpropano(\%)}{CO2(\%)}\right)*\left(\frac{kg(combustível)}{mol}\right)} \qquad \text{eq. 1}$$

Onde: M_{pol} = massa molar do poluente

Kg(combustível)/mol = 0,0140 para gasolina pura e óleo diesel;

0,0150 para gasool E22 (referência para aveículos flex)

3.3.1 Funcionamento de um Equipamento de Sensoriamento Remoto

Atualmente existem dois principais equipamentos de sensoriamento remoto utilizados para verificação de emissões de poluentes veiculares. Um deles é o *cross road* (lateral da via), que utiliza uma fonte de luz e espelhos nas laterais da pista para identificação dos poluentes, e a outra é a *top-down* (em cima da via), que utiliza um laser e refletores para a avaliação. O sistema *cross road* possui as opções “caminho aberto” (*open path*) e de “extração” (*extractive*) como métodos de avaliação dos gases emitidos pelos veículos. O primeiro refere-se ao método

de avaliação sem contato direto com os poluentes, enquanto o segundo requer uma coleta de amostra da pluma emitida, para posterior medição em um analisador de gases.

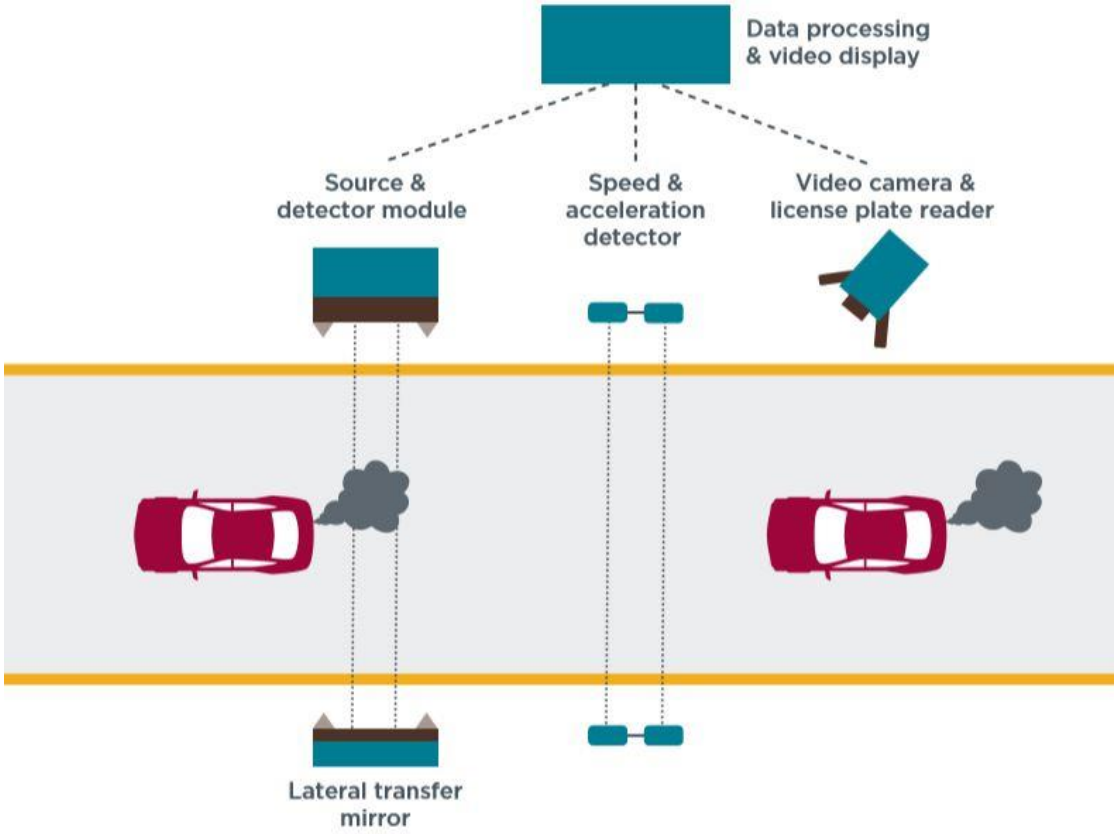
Como o método de caminho aberto é mais comum e eficiente, este projeto não levará em consideração a avaliação por extração em suas análises.

3.3.1.1 Sistema Cross Road

Os equipamentos de sensoriamento remoto do tipo *cross roa*d utilizam feixes e detectores de luz em uma das laterais da via e espelhos do outro lado. A luz emitida é refletida pelo conjunto de espelhos, e por fim, tendo sua intensidade medida pelos detectores. A atenuação da intensidade é diretamente proporcional à concentração de alguns poluentes. Assim, quando um veículo passa entre esses equipamentos, a pluma de gases emitida pelo seu escapamento tem seus poluentes identificados pelo equipamento. (Mazzoleni et al., 2010)

A concentração de poluentes atribuída ao veículo é a diferença entre as medições realizadas nos momentos anteriores (poluição de fundo) e posteriores à passagem do mesmo, conforme ilustrado pela Figura 15.

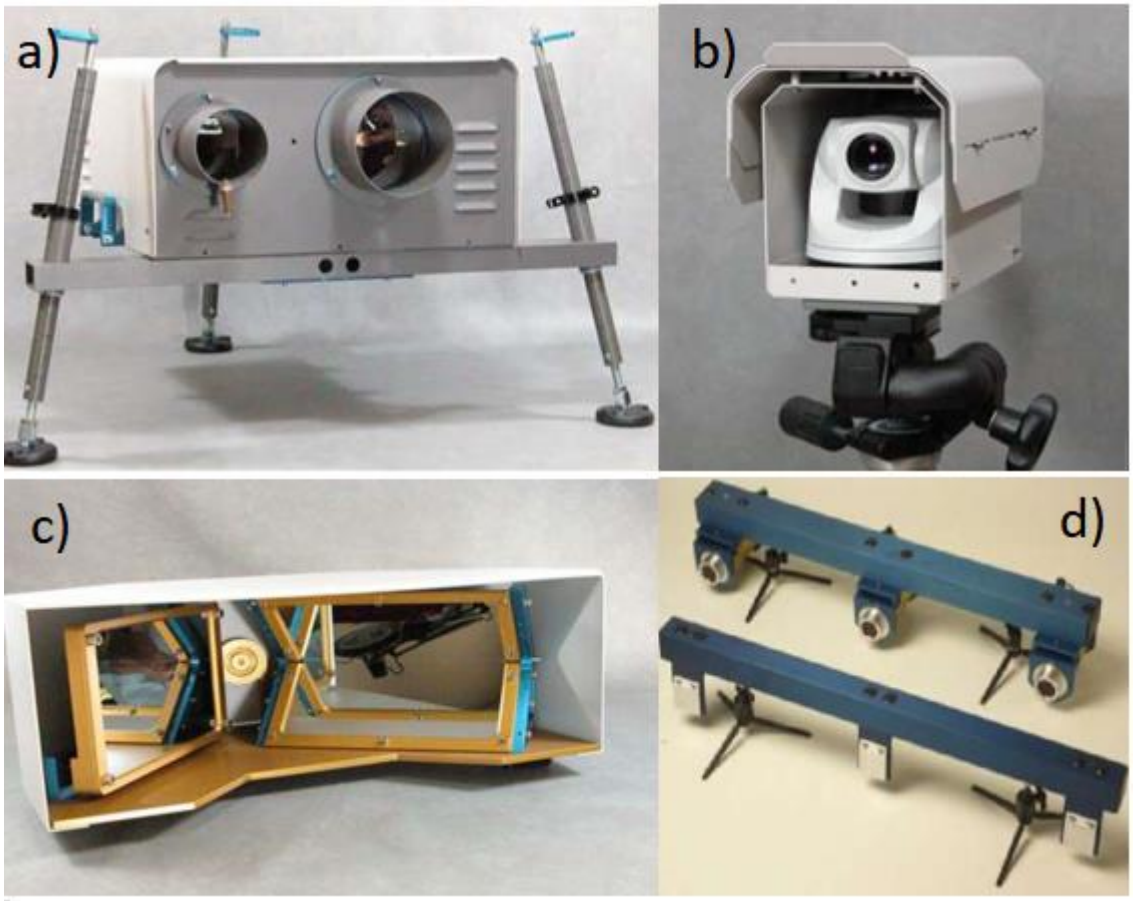
Figura 15 - Esquema de funcionamento do equipamento de SR Cross Road



Fonte: Kleefeld, J. B., Dallmann, T. (2018)

Conforme mostrado na imagem acima, o sistema de medição *cross road* possui uma câmera para captura e identificação das placas dos veículos; detector de aceleração e velocidade; feixe e detector de luz; conjunto de espelhos e um computador para processamento dos dados. A Figura 16 mostra os equipamentos do sistema *cross road* com mais detalhes.

Figura 16 - Equipamentos pertencentes ao SR Cross Road



Fonte: Opus Global. a) analisador de gases b) câmera para identificação de placas c) espelhos de reflexão do feixe de luz d) sistema de medição de aceleração e velocidade

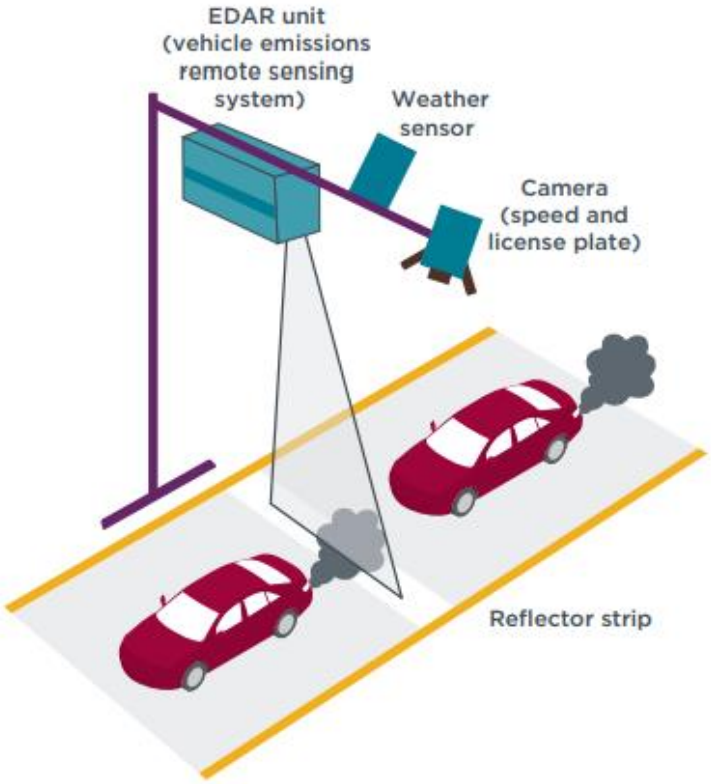
3.3.1.2 Sistema Top Down

O sistema *top down*, do equipamento *Emission Detection and Reporting* (EDAR), foi desenvolvido pela *Hager Environmental & Atmospheric Technologies* (HEAT LLC) e consiste em um sistema de laser infravermelho, com novos recursos incorporados, o que tornou apto a aplicações diferentes (Ropkins et al., 2017).

Esse sistema *top down* de sensoriamento remoto é alocado acima da pista de tráfego, e o laser emitido é refletido por uma faixa refletora localizada sobre o asfalto. O feixe de laser de 20000 Hz sofre uma atenuação quando atravessa a pluma de poluentes. Assim, como a medida da atenuação sofrida é proporcional às concentrações de poluentes, tem-se as medições de poluentes locais.

As medições das concentrações de poluentes antes das passagens dos veículos são utilizadas como poluentes de fundo. Dessa forma, as concentrações das emissões veiculares são atribuídas às diferenças das medidas posteriores e anteriores da passagem de cada veículo (Kleefeld, J. B., Dallmann, T., 2018). A Figura 17 apresenta os componentes do sistema *top down*.

Figura 17 - Composição do sistema de SR top down

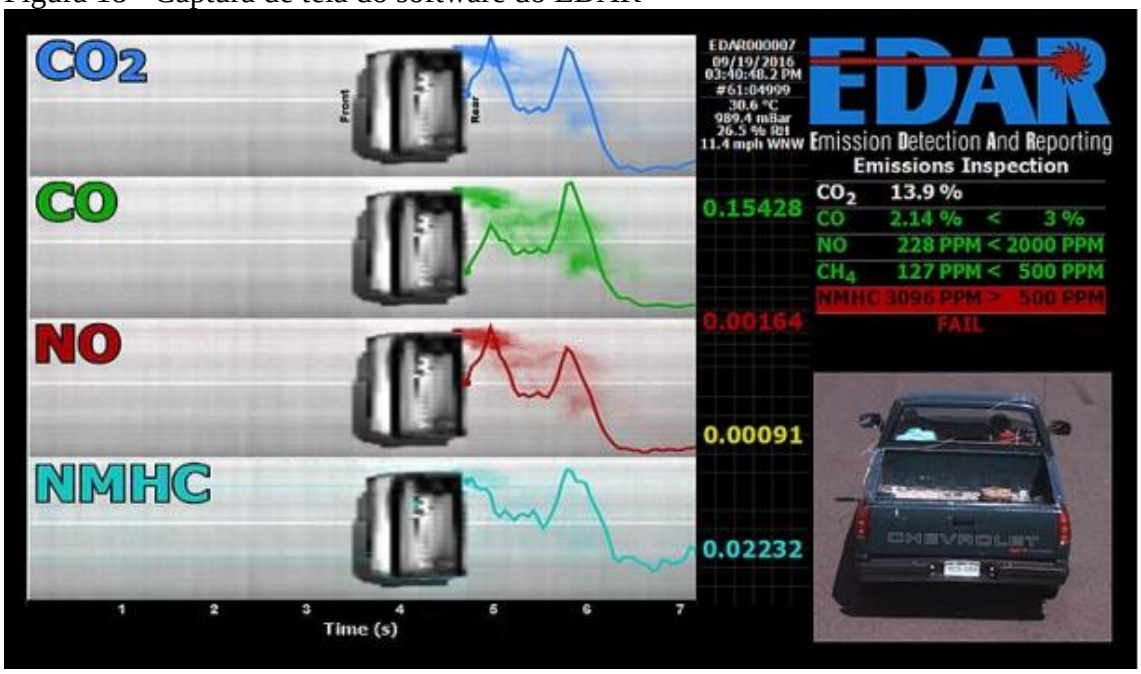


Fonte: Kleefeld, J. B., Dallmann, T. (2018)

Conforme observado na Figura 17, esse sistema *top down* utiliza um laser infravermelho, uma faixa refletora sobre o asfalto, assim como um sensor de temperatura e uma câmera, que captura velocidade, aceleração e captura a placa do veículo.

A posição do laser emissor desse sistema é muito vantajosa com relação aos sistemas *cross road*, uma vez que independe da posição dos escapamentos para realizar as medições, além de ser capaz de registrar imagens do veículo e da pluma de poluentes, conforme mostrado na Figura 18.

Figura 18 - Captura de tela do software do EDAR



Fonte: Gruening et al. (2019)

O sistema EDAR já foi utilizado em diversos estudos de caso, para verificação do perfil de emissão da frota circulante (Dallmann et al., 2019, Gruening et al., 2019) e também em avaliações comparativas com outros métodos mais convencionais, como o *Portable Emissions Measurement Systems* (PEMS) (Ropkins et al., 2017).

3.3.2 Utilização de SR - Casos e resultados

Bruni (2018) realizou um estudo aprofundado sobre a utilização de dispositivo de sensoriamento remoto, objetivando definir critérios baseados em medições para identificação de veículos automotores do ciclo Otto com elevadas emissões de CO, HC e NO. Foram utilizados dados obtidos pela empresa *Remote Sensing do Brasil*, no período de 14/11/2007 a 25/02/2010, em 36 locais da cidade de São Paulo, com total de 1.956.083 medições, e dados obtidos pela Controlar S/A no ano de 2009 (1.185.869 medições) e em 2010 (2.514.111 medições). O equipamento de SR utilizado foi o RSD4600. Foram então criadas três bases de dados, a das medições com o equipamento de SR, os dados das inspeções em veículos Otto e utilitários de 2009 e os de 2010. Como resultado, obteve-se que para os poluentes CO e HC, as fases do PROCONVE apresentaram grande impacto em suas reduções. Já para o NO, houve um pequeno aumento nas fases L4 e L5. Com base nos dados obtidos, foram calculados valores de emissão para identificação de *high emitter*s, para cada fase do PROCONVE, através do método EM (método iterativo para aproximação da função de verossimilhança). Esse método

possibilita a identificação de *low emitters*, podendo liberar veículos das inspeções. Assim, a taxa de inspeção poderia ser menor, pois reduziria custos do processo.

Huang et al. (2018) analisaram mais de 400 mil dados de emissões de veículos diesel, captados por um equipamento de sensoriamento remoto em Hong Kong entre os anos de 2014 e 2016. O foco do trabalho está em indicar as tendências de emissões dos veículos diesel e identificar potenciais *high emitters*. As medições foram realizadas em 158 locais de Hong Kong, sempre utilizando 2 equipamentos em um mesmo local, para confirmação e validação do dado coletado. Foi utilizado o equipamento ETC-S420, que possui um sensor infravermelho não dispersivo (NDIR) e ultravioleta (NDUV). Aproximadamente 161 mil dados foram validados, o que corresponde a uma grande parcela dos veículos diesel da região. Como resultado, obteve-se que o CO emitido foi maior para veículos com motores maiores, para todos os anos. Quanto ao HC e NO, as emissões foram maiores para veículos fabricados anteriores ao ano de 2006. Entre os anos de 1998 e 2004 houve um aumento inesperado das emissões dos três poluentes, em especial para veículos com motores maiores que 6001 cc. 77%, 54% e 30% do total de emissões de CO, HC e NO, respectivamente, foram emitidos por 10% dos veículos. Isso indica que o sensoriamento remoto seria eficiente para identificar os *high emitters* de CO e HC.

Bernard et al. (2019) listaram os principais equipamentos de SR utilizados atualmente, apresentados na Figura 19.

Figura 19 - Principais equipamentos de sensoriamento remoto utilizados atualmente

Tipo	Posição	Fornecedor	Equipamento	Medição	Poluentes
Caminho aberto	*Cross road*	universidade de Denver	FEAT	Feixe de luz com refletor	CO, HC, CO2, NO, NO2, NH3, SO2, opacidade
	Cross road	Opus	RSD 4600 e mais antidos	Feixe de luz com refletor	CO, HC, CO2, NO, opacidade
			RSD 5000		CO, HC, CO2, NO, NO2, NH3, opacidade
	Cross road	Environmental Technology Consultants	R-series S650	Feixe de luz com refletor	CO, HC, CO2, NO, NO2
	Cross road; Top down	Dopler Eco Technologies	DPL7000 Series	Feixe de laser com refletor	CO, HC, CO2, NO, opacidade
	Top down	HEAT LLC	EDAR	Curtina de laser com refletor	CO, total e especiada HC, CO2, NO, NO2, opacidade
	Top down	Anhui Baolong		Feixe de luz com refletor	CO, HC, CO2, NO, NO2, NH3, SO2, opacidade
Extração	*Amostra top down*	Universidade da California, Berkeley		Amostra de pluma de escapamento	CH4, NO, NO2, NH3, BC, PM, PN, tamanho de PN
	Amostra top down	CARB	Portable Emissions Acquisition System (PEAQS)	Amostra de pluma de escapamento	Black carbon e NO2
	Amostra top down em Shed	Universidade de Denver	OHMS	Amostra de pluma de escapamento	CO, CO2, HC, NO, NO2, N2O, PM, PN e black carbon
	Amostra roadside	Universidade Técnica Tcheca		Amostra de pluma de escapamento	CO, CO2, NO2, PM e PN
	Amostra roadside	Universidade de Munster		Amostra de pluma de escapamento	CO2, NOX, PN
	Plume chaser	Universidade de Heldelberg	ICAD	Amostra de pluma de escapamento	NO, NO2, CO2
	Plume chaser	Universidade de Birmingham	SNIFFER	Amostra de pluma de escapamento	NO, NO2, CO2
	Plume chaser	CARB	Mobile Measurement Platform (MMP)	Amostra de pluma de escapamento	CO, HC, CO2, NOx, PM, PN, black carbon

Fonte: Bernard et al. (2019)

Além disso, Bernard et al. (2019) listaram também os países que utilizam a tecnologia de sensoriamento remoto no mundo, mostrados na Quadro 7.

Quadro 7 - Utilização de sensoriamento remoto no mundo

País	Tecnologia				Tipo de Veículo					Finalidade					Tamanho frota
	C	T	F	M	PC	LDV	HDV	MC	OFF	P	MO	H	L	MS	
Alemanha	o		o	o	o	o	o	o		o	o	o		o	10.000-100.000
Argentina	o				o	o	o	o			o				10.000-100.000
Austrália	o				o	o	o			o	o				10.000-100.000
Áustria	o				o	o	o			o	o	o			10.000-100.000
Bulgária	o				o	o	o	o			o	o			10.000-100.000
Canadá	o	o	o		o	o	o			o	o	o		o	10.000-100.000
Chile	o				o	o	o	o			o				10.000-100.000
China	o	o		o	o	o	o			o		o			> 1.000.000
Colômbia	o				o	o	o	o			o				10.000-100.000
Coréia	o				o							o			> 1.000.000

Dinamarca	o				o	o	o			o	o	o			10.000-100.000
Eslovênia				o	o	o	o			o					< 10.000
Espanha	o				o	o	o	o		o	o	o			> 1.000.000
Estados Unidos	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	> 1.000.000
Finlândia				o			o			o					< 10.000
França	o	o			o	o	o	o		o	o				100.000 - 1.000.000
Gana	o				o	o	o	o		o	o				10.000-100.000
Hong Kong	o				o	o	o			o	o	o		o	> 1.000.000
Índia	o				o	o	o	o		o	o				> 1.000.000
Irã	o				o	o	o			o	o	o			10.000-100.000
Japão	o				o	o	o	o			o				100.000 - 1.000.000
México	o		o	o	o	o	o	o		o	o	o	o		100.000 - 1.000.000
Nova Zelândia	o				o	o	o								100.000 - 1.000.000
Reino Unido	o	o		o	o	o	o	o		o	o			o	100.000 - 1.000.000
República Tcheca			o		o	o	o	o	o	o					10.000-100.000
Suécia	o		o		o	o	o			o	o				10.000-100.000
Suíça	o				o	o	o	o		o	o			o	100.000 - 1.000.000

C: *Cross road*
T: *Top-down*
F: Método de extração de um local fixo
M: Método de extração de um local móvel (carro)
PC: Carro de passageiro
LCV: Veículo comercial leve
HDV: Veículo pesado
MC: Motocicletas
OFF: Equipamento *off road*
P: Pesquisa
MO: Monitoramento de emissões da frota
H: Identificação de *high emitter*
L: Identificação de *low emitter*
MS: Identificação de grupos de *high emitters* para *Market Surveillance*
Fonte: Bernard et al. (2019)

Kleefeld e Dallmann (2018) analisaram os resultados obtidos pela ação da iniciativa TRUE (*The Real Urban Emissions*) sobre as emissões dos veículos em uso de Londres. Os dados foram obtidos através de um equipamento de sensoriamento remoto, Opus AccuScan RSD5000, que coletou mais de 100.000 dados de emissões na Grande Londres, em nove pontos diferentes, entre os anos de 2017 e 2018. Foram obtidos dados de carros de passageiros, veículos comerciais leves, táxis, ônibus, caminhões e motocicletas. O objetivo do trabalho era mapear a situação real e atual da frota circulante de Londres e fornecer dados para posteriores tomadas de decisão governamentais. Como resultado, obteve-se que as emissões de NOx de veículos diesel são 6 vezes maiores que os de veículos movidos a gasolina. As emissões de NOx de veículos diesel das fases Euro 5 e 6 são cerca de 5 a 6 vezes maiores que suas respectivas emissões laboratoriais. As emissões de CO aparentam aumentar conforme o veículo fica mais velho E filtros de MP mostraram ser eficientes para redução da emissão desse poluente pelos veículos. No estudo, os táxis movidos a diesel apresentaram padrão de emissões de NOx maiores que os mesmos modelos de veículos de passageiros, enquanto as emissões de

NOx dos ônibus apresentaram cerca de 65% de redução comparados com os mesmos tipos de veículos dos anos de 2012 e 2013. Veículos diesel das fases EURO 5 e anteriores são responsáveis pela emissão de mais de 60% do NOx da Grande Londres, e provavelmente serão excluídos da circulação central da cidade.

Dallmann et al. (2019) conduziu outra análise da iniciativa TRUE, agora em Paris, com o objetivo de mapear o estado das emissões da frota circulante e munir a população, pesquisas e governo com dados para estudos e tomadas de decisões futuras. Mais de 180 mil dados de emissões foram coletados em 22 dias no verão do ano de 2018 em três locais diferentes. A maioria dos dados foram de veículos de passageiros e comerciais leves. Mas foram incluídos também ônibus, motocicletas, ciclomotores e veículos pesados. As emissões de NOx de veículos movidos a gasolina apresentaram redução significativa com a evolução das restrições, porém veículos diesel apresentaram pouca evolução entre as fases Euro 2 e Euro 5. Ficou evidente, pelo estudo, que veículos diesel da fase Euro 6 emitem 4,8 vezes mais NOx que veículos movidos a gasolina da mesma fase. As emissões de MP dos veículos diesel das fases EURO 5 e 6 apresentaram grande redução e estão no mesmo nível de veículos movidos a gasolina.

Zhan et al. (2020) avaliaram o efeito da deterioração dos veículos em suas emissões de poluentes. O estudo foi realizado em Los Angeles, em 7 campanhas entre os anos de 1999 e 2015. Para a realização dessa pesquisa, foi utilizado um equipamento de sensoriamento remoto e a amostra alvo foi veículos leves movidos a gasolina. Para veículos dos anos de 1985 a 1993, as emissões de CO e HC se mantiveram constantes com a deterioração do veículo, enquanto emissão de NO apresentaram linearidade com relação à idade do veículo. Veículos dos anos de 1994 a 2003 apresentaram deterioração das emissões dos três poluentes de forma linear com a idade. Por último, veículos dos anos de 2004 a 2014 não apresentaram deterioração das emissões com a idade.

Pujadas et al. (2016) apresentaram os resultados de campanhas de medições realizadas em Madri entre os anos de 2014 e 2015, utilizando-se o equipamento de sensoriamento remoto RSD4600. O objetivo do trabalho foi o de analisar as tendências de emissões da frota local, após anos de transformação com a entrada dos veículos da fase EURO 5. Foram coletados mais de 190.000 dados de veículos e suas respectivas emissões de NO/CO2, HC/CO2 e CO/CO2. Os resultados mostraram que as emissões de NO não foram reduzidas para veículos diesel com o passar do tempo. Além disso, observaram que a maior parte dos *high emitters* encontrados correspondem a veículos diesel.

Hassani et al. (2021) realizaram um estudo no Irã, no qual foi realizada uma correlação entre os veículos identificados como *high emitter* em programas de I/M e sensoriamento remoto. A relação se mostrou fraca, o que indica uma motivação para utilização em conjunto dessas duas formas de avaliação. No entanto, identificou-se alta correlação entre a idade do veículo e *high emitters*. Durante a realização de coleta de dados, foi utilizado um equipamento RSD4600. Nos 14 dias de campanha, foram coletados 24.000 dados veiculares.

No ano de 2018, o estado de Connecticut, nos EUA, realizou um estudo para avaliação do desempenho de seu programa de I/M, em conformidade com requerimentos do EPA (*Environmental Protection Agency*), previsto na legislação 40CFR §51.351 e §51.371. Para o estudo, foi utilizado o equipamento de sensoriamento remoto EDAR, da empresa HEAT (*Hager Environmental & Atmospheric Technologies*). Durante o período de 6 dias, do mês de agosto de 2018, foram coletados 55.118 dados de veículos. Após tratamentos dos dados, restaram aptos a serem estudados 20.775 dados veiculares. Como resultado, obteve-se que 1,9% da amostra foi considerada *high emitter*, ou seja, estavam emitindo acima de 500 ppm de HC, 3% CO ou 2000 ppm NO. A conclusão do estudo foi de que o programa de inspeção e manutenção do estado é eficaz, não houve evidência de fraude dos veículos no programa e que os veículos a diesel foram os principais responsáveis pelas maiores emissões de NO.

3.3.2.1 Resumo dos artigos

Com base nos artigos da revisão bibliográfica realizada, elaborou-se o Quadro 8, com informações úteis e que podem embasar explicações futuras.

Quadro 8 - Informações dos artigos de revisão bibliográfica

País	Ano	Equipamento	Gases medidos	Velocidades (km/h)	Aceleração ((km/h)s^{-1})	VSP (kW/t)	Fonte
Austrália	2009-2019	RSD4600	CO, HC, MP, NO	2 a 84	-22,32 a 15,84	-60 a 73	Smit, R. (2021)
Brasil (SP)	2009-2010	RSD 4600	CO, HC, NO	15 a 50	-2 a +3		Bruni (2018)
Espanha (Madri)	2014-2015	RSD4600	CO, HC, NO	NI	NI	NI	Pujadas et al. (2016)
EUA (Chicago)	1997-2006	NI	CO, HC, NO	12,9 a 64,4	0 a 12,9	> 3	Slott (2007)
EUA (Connecticut)	2018	EDAR	CO, HC, NO	NI	NI	3 a 32	Connecticut (2019)
EUA (Denver)	1996-2007	NI	CO, HC, NO	16,1 a 48,3	-1,6 a 9,7	> 3	Slott (2007)
EUA (Los Angeles)	1999-2015	NI	CO, HC, NO	NI	NI	2 a 25	Zhan et al. (2020)

País	Ano	Equipamento	Gases medidos	Velocidades (km/h)	Aceleração ((km/h)s^{-1})	VSP (kW/t)	Fonte
EUA (Los Angeles)	1999-2005	NI	CO, HC, NO	20,9 a 32,2	0 a 8	> 3	Slott (2007)
EUA (Phoenix)	1998-2006	NI	CO, HC, NO	32,2 a 80,1	0 a 20,9	> 3	Slott (2007)
França (Paris)	2018	EDAR	CO, CO_2, HC, MP, NO, NO_2	NI	NI	NI	Dallmann et al. (2019)
Hong Kong	2014-2016	ETC-S420	CO, HC, NO	7 a 90	> 0		Huang et al. (2018)
Inglaterra (Londres)	2017-2018	RSD5000	CO, MP. NO_x	NI	NI	NI	Kleefel e Dallmann (2018)
Irã	2021	RSD4600	CO, HC, NO	7 a 90		2 a 22	Hassani et al. (2021)

3.4 Equipamentos de Sensoriamento Remoto veicular

A tecnologia de sensoriamento remoto para identificação das emissões veiculares foi desenvolvida no final da década de 1980 pela Universidade de Denver, nos EUA. No ano de 1992 seu primeiro modelo passou a ser comercializado pela empresa *Environmental System Products, Inc. - ESP* (Bruni, 2018).

Com o passar dos anos, novas tecnologias foram incorporadas ao sensoriamento remoto veicular e outras empresas surgiram neste mercado. Atualmente, conforme levantado pelo estudo de Bernard et al. (2019), os principais equipamentos de SR para aplicação veicular são: FEAT (Universidade de Denver); RSD4600 e RSD5000 (Opus); R-series-S650 (*Environmental Technology Consultants*); DPL 7000 Series (*Dopler Echo Technologies*); EDAR (HEAT LLC).

Os equipamentos de SR mais utilizados nos estudos apresentados na revisão bibliográfica sistematizada deste projeto foram o RSD4600 e o EDAR. Dessa forma, nas próximas seções serão detalhados cada um destes equipamentos. Vale ressaltar que, apesar de o RSD4600 ser o mais presente nos artigos estudados, será apresentado o RSD5000, por se tratar de uma tecnologia mais recente, com novas funcionalidades em relação ao seu antecessor.

3.4.1 Equipamento RSD5000

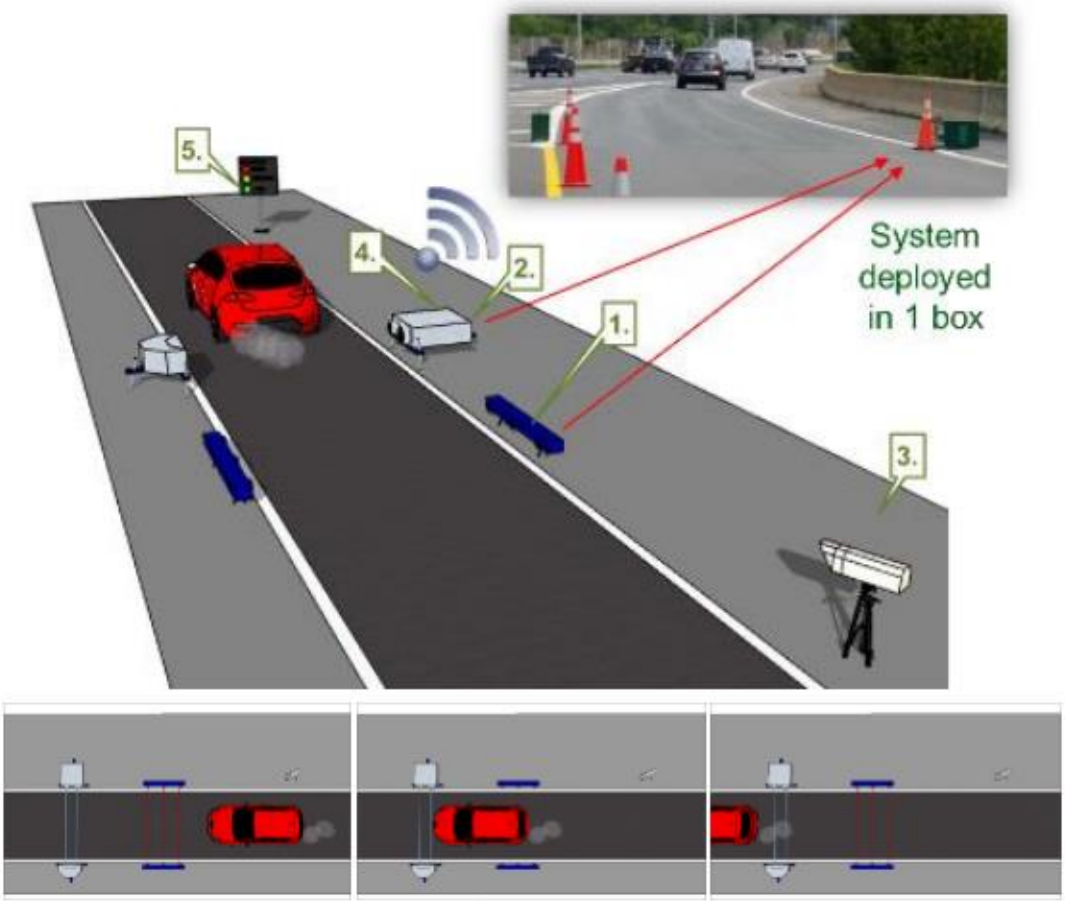
O RSD 5000 é a versão mais recente da Opus AccuScan™ Remote Sensing Device (RSD). Esse equipamento é um SR que utiliza o sistema *cross road* e utiliza feixes de luz infravermelho (IR) e ultravioleta (UV) para identificação dos poluentes emitidos pelos veículos. Os principais componentes do sistema do RSD5000 são:

- Analisadores de emissões
- Câmeras de identificação das placas dos veículos

- Sistemas de medição de aceleração e velocidade

Uma montagem típica do sistema de do Opus RSD é mostrada na Figura 20.

Figura 20 - Montagem típica de um sistema da Opus RSD



Fonte: Opus (a)

Na Figura 20, os equipamentos representados são os seguintes:

- 1: sistema de medição de velocidade e aceleração
- 2: Módulos medidores dos gases
- 3: Câmera de identificação das placas
- 4: Módulo de comunicação
- 5: Painel de LED informativo ao condutor

O equipamento RSD 5000 é capaz de medir as concentrações de CO, CO_2, HC, NO, NO_2, amônia (NH3), e MP. Este último não é medido diretamente, porém sua concentração é estimada através de uma correlação com a opacidade medida. Assim, é realizada a razão entre

cada poluente com relação a CO_2, e depois aplicada a relação estequiométrica para cálculo das concentrações em (g/kg de combustível queimado) e em (g/km), fazendo as considerações adequadas.

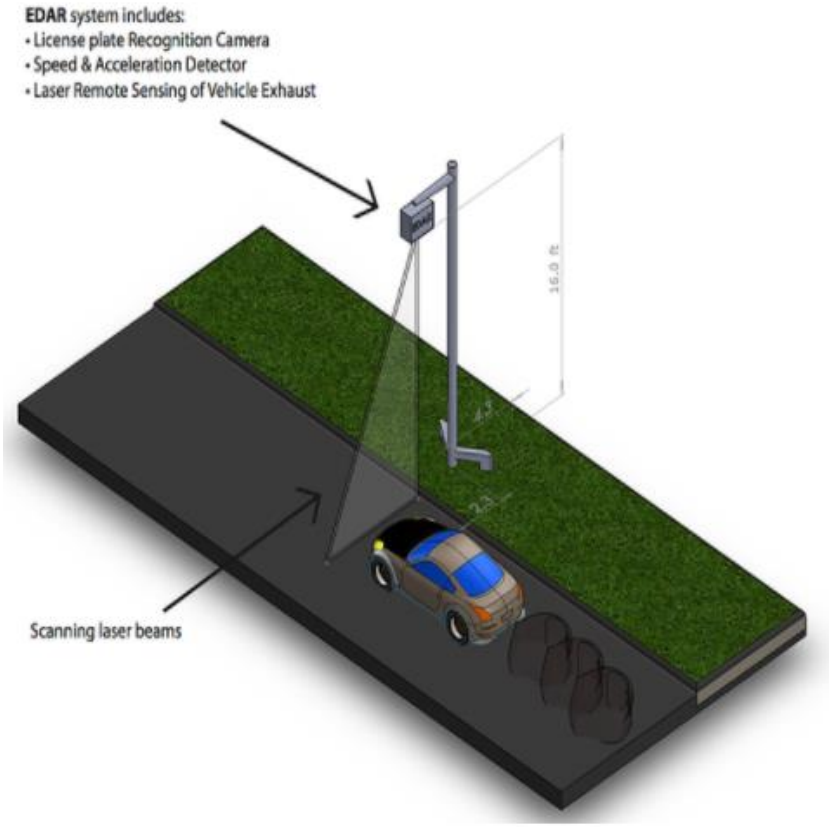
Cada veículo que passa pelo sistema é medido cerca de 100 vezes dentro de um intervalo de 0,5s (200Hz). Todas as informações relacionadas às medições, como concentrações de poluentes, aceleração, velocidade, condições do tempo e placa do veículo são transmitidas em tempo real à plataforma de análise dos dados através de rede 4G/5G (Opus).

3.4.2 Equipamento EDAR

O chamado EDAR, desenvolvido e fabricado pela empresa *Heat Environmental & Atmospheric Technologies* (HEAT), é um sistema *top down* de SR que utiliza um feixe de laser para identificação das concentrações de poluentes através da absorção infravermelha. Ele utiliza o método espectroscópico de Absorção Diferencial Lidar (DIAL) para as medições.

Assim como o equipamento RSD 5000, o EDAR possui três principais componentes, como mostrado na Figura 21:

Figura 21 - Principais componentes do equipamento EDAR



Fonte: HEAT (c2019a)

Como mostrado na Figura 21, os principais componentes do sistema EDAR são:

- Analisadores dos gases
- Sistema de medição de velocidade e aceleração
- Câmera para identificação das placas dos veículos

Segundo a própria empresa HEAT, o EDAR é capaz de medir qualquer molécula que esteja no estado gasoso, como CO, CO_2, HC, NO, NO2 e MP. Essas medições são reportadas nas unidades [g/kg de combustível queimado], [ppm], [g/km] e razão de poluente por CO_2.

Por se tratar de um sistema *top down*, o EDAR é efetivo para utilização independentemente da posição do escapamento em relação ao veículo. Além disso, o sistema é capaz de identificar a temperatura do gás emitido em relação à temperatura ambiente, podendo, dessa forma, caracterizar se o veículo está operando em temperatura normal de funcionamento, ou frio. Essa característica é importante, pois elimina o risco de identificação de *high emitter* por conta de o catalisador estar frio.

MATERIAL E MÉTODOS

4.1 Metodologia

Segundo a definição de metodologia científica de Antonio Carlos Gil (Gil, 2002), esta pesquisa é Descritiva, Aplicada, Qualitativa, com procedimentos de Pesquisa Bibliográfica e Documental.

Essa pesquisa é caracterizada como descritiva sob ponto de vista objetivo, pois descreve o funcionamento dos sistemas de sensoriamento remoto e tenta encontrar uma relação entre eles e programas de I/M para o Estado de São Paulo. Dessa forma, a pesquisa é aplicada, pois se preocupa em colocar em prática o conhecimento gerado, e qualitativa por chegar a conclusões baseada nas análises de dados levantados.

A pesquisa bibliográfica sistematizada foi realizada na plataforma Science Direct, com o termo de pesquisa [*vehicle emissions remote sensing*]. Por se tratar de uma técnica desenvolvida há mais de 30 anos, existem muitos estudos publicados sobre o tema. Dessa forma, foi preciso filtrar os dados, para pesquisas dos últimos 10 anos e fazer uma seleção pelos títulos. Assim, foram excluídos aqueles trabalhos que não utilizaram o SR, e priorizados os que estudaram sistemas de I/M.

A pesquisa documental foi realizada através dos relatórios da CETESB, publicações do Simpósio Internacional de Engenharia Automotiva - SIMEA, artigos do *International Council on Clean Transportation* - ICCT, arquivos da Prefeitura de São Paulo e legislações ambientais vigentes.

A CETESB realizou, entre os anos de 2017 e 2018, cerca de 60 comandos de fiscalização de opacidade em veículos do ciclo diesel, em empresas de ônibus urbano da RMSP, e em rodovias com o auxílio da Polícia Militar Rodoviária, totalizando 503 medições. Todas elas foram feitas com opacímetro de fluxo parcial, modelo NA-9000, com capacidade de medição de opacidade de 0% a 99% e coeficiente de absorção de 0 a 9,99m^{-1}. Todos os dados das medições de opacidade ficam armazenados em um software específico do opacímetro e podem ser exportados em formato CSV.

Além disso, a CETESB realiza anualmente a chamada Operação Inverno, evento no qual são intensificadas as fiscalizações de veículos diesel em todo o Estado de São Paulo, de forma a garantir a melhoria da qualidade do ar nos meses em que há dificuldade de dispersão dos poluentes. Dessa forma, são realizados “Megacomandos”, eventos nos quais agentes da CETESB fiscalizam veículos do ciclo diesel com a Escala de Ringelmann, ao mesmo tempo, em pontos diferentes do Estado. No ano de 2021 os Megacomandos aconteceram nos dias 08 de

junho e 10 de agosto. Durante as fiscalizações, são constatados 3 principais dados para cada ponto: número total de veículos diesel; veículos diesel irregulares e a quantidade de veículos constatados (identificados pela placa).

Sabendo-se que a CETESB possui o armazenamento de informações dos veículos inspecionados, tanto por opacidade quanto pela Escala de Ringelmann, viu-se a possibilidade de analisar a distribuição dos níveis de opacidade da frota circulante, assim como verificar a eficácia dos métodos atuais de inspeção utilizados.

A opacidade da frota circulante é importante para uma primeira aproximação dos limites a serem utilizados por sistemas de sensoriamento remoto, enquanto a verificação da eficácia dos métodos justificaria uma possível mudança de procedimento, para passar a adotar equipamentos de SR como um possível método de inspeção.

A escolha dos locais de inspeção de veículos diesel com SR depende de alguns fatores, como fluxo de veículos, condições das vias e qualidade do ar local. Dessa forma, para analisar as regiões da RMSP com maior potencial de uso dessa tecnologia, foram utilizados os dados do Relatório do Índice de Não Conformidade da Frota de Veículos Diesel circulante na Região Metropolitana de São Paulo - 2020, assim como das estações de monitoramento da CETESB, disponíveis pelo sistema QUALAR. Nesse sistema são disponibilizados dados de concentrações atmosféricas de poluentes, assim como meteorológicas, de 62 estações medidoras distribuídas na RMSP, interior e litoral do Estado de São Paulo.

4.2 Processo de Aquisição de Dados

A CETESB forneceu os dados das inspeções por opacidade realizadas nos comandos dos anos de 2017 e 2018. Os dados contidos nas 503 medições de opacidade continham variáveis de interesse como os coeficientes de absorção e ano de fabricação dos veículos. Esses dados são importantes, pois podem caracterizar a frota pelas fases do PROCONVE pertencentes e servir como dados de entrada para propostas de legislação futuras.

Obteve-se também através da CETESB alguns dados dos veículos autuados durante os Megacomandos de fiscalização da Operação Inverno de 2021. Ao todo, mais de 1600 dados foram processados, contendo informações como município de origem do veículo, ano modelo, marca e modelo do veículo, assim como a data de autuação. Todos os veículos autuados constantes nesse banco de dados foram identificados através do método da Escala de Ringelmann.

4.3 Cálculo da opacidade

Os equipamentos utilizados pela CETESB durante os comandos de fiscalização de opacidade são os opacímetros de fluxo parcial. Os dados das medições dos opacímetros foram fornecidos pela CETESB e possuem como resultados “APROVADO”, “REPROVADO” e a opacidade, que está na unidade [m^{-1}] do coeficiente de absorção. Além disso, o bando de dados possui informações de ano de fabricação do veículo, limites de opacidade e rotação definidos pela legislação e rotações de marcha lenta e de corte alcançados durante os testes.

De acordo com o critério utilizado pela Prefeitura de São Paulo para avaliação da eficácia do seu programa de I/M, a opacidade é a medida da extinção de luz (absorção + difração) em uma coluna de fumaça, dada pela equação 1:

$$\frac{I}{I_0} = e^{-kL} = \left(1 - \frac{N}{100}\right) \qquad \text{(equação 2)}$$

Onde: I_0 = Intensidade da luz incidente

I = Intensidade da luz com fumaça

N = Opacidade (%)

k = Coeficiente de absorção (m-1)

L = Comprimento de medição (m)

Com os dados de coeficientes de absorção (k) obtidos pelas fiscalizações da CETESB, e utilizando-se a equação 1, obteve-se as opacidades N (%) de cada veículo inspecionado.

Essa transformação é importante, uma vez que alguns equipamentos de SR fornecem a opacidade (%) como parâmetro.

4.4 Tratamento e Interpretação dos Dados

Foram coletados os dados de MP_{10}, $MP_{2,5}$ e NO_X de todas as estações de monitoramento automáticas localizadas na RMSP. No total foram consideradas 30 estações e obtidos dados horários de 01 a 31 de janeiro de 2021, somando-se mais de 250 mil medições. O arquivo foi armazenado em formato CSV, tratado e explorado através da linguagem *Python*, sob a plataforma gratuita do *Colab*, pertencente ao *Google Research*.

Para análises dos dados de qualidade do ar, foram utilizadas a biblioteca *Pandas*, para ajuste do banco de dados, a *Seaborn* para elaboração dos gráficos e a *Folium* para junção das informações de poluentes com a geolocalização da estação.

Com relação aos dados das inspeções de opacidade, primeiramente foi realizada a limpeza do banco de dados e a eliminação de dados de opacidade faltantes. Após essa etapa, foram elaborados histogramas e diagramas do tipo *Boxplot* para visualizar a distribuição dos resultados dos testes, segmentados por fases do PROCONVE.

Os dados veiculares resultantes das multas lavradas durante a Operação Inverno de 2021 foram analisadas também com a linguagem *Python*. Nesse caso, foram elaborados histogramas e diagramas do tipo *Boxplot* para avaliação dos anos de fabricação dos veículos autuados.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 Escolha do equipamento a ser utilizado em São Paulo

Como a frota alvo deste trabalho é a de veículos do ciclo diesel, todas as características inerentes ao equipamento a ser escolhido devem condizer com as peculiaridades dessa categoria. Assim, os principais pontos a serem analisados antes da escolha são descritos a seguir.

5.1.1 Poluentes Analisados

Conforme previsto pela Resolução CONAMA nº 418, de 25 de novembro de 2009, e suas alterações (BRASIL, 2009), assim como o praticado nos centros de inspeção veicular da cidade de São Paulo entre os anos de 2008 e 2014, os limites de emissões para veículos do ciclo diesel referem-se somente a opacidade e ao ruído de escapamento.

Segundo divulgado pelo Relatório de Emissões Veiculares da CETESB de 2019, veículos a diesel representam cerca de 16% da frota circulante no Estado de São Paulo, porém são responsáveis pelas emissões veiculares de cerca de 88% de NOx e 94% de MP no Estado (CETESB, 2020). Medidas mais restritivas referentes a esses poluentes entrarão em vigor em 2022, de acordo com a Resolução CONAMA nº 490/2018, o que é muito importante para o controle das emissões de poluentes veiculares a serem homologados, como também exigirá um controle dos órgãos ambientais responsáveis proporcionalmente eficaz. Esse é o papel exercido pelos programas de I/M e demais ações de controle de veículos em uso.

De acordo com o Relatório de Qualidade do Ar do Estado de São Paulo de 2020 (CETESB, 2021), cerca de 50% do NO_X, assim como 37% de MP, emitidos na RMSP são provenientes de veículos movidos a diesel.

Diversos trabalhos indicam as emissões de NOx de veículos em uso como sendo as que mais precisam de especial atenção, devido às divergências entre os valores esperados e os medidos identificados em situação de uso (Borken-Kleefeld & Dallmann, 2018; Dallmann et al., 2019; Pujadas et al., 2016).

O NO_X, combinado com compostos orgânicos voláteis (COV) e radiação solar, é um precursor de ozônio (O_3) troposférico (Monks et al., 2015). O O_3 pode causar problemas pulmonares crônicos, como asma, obstrução crônica pulmonar, especialmente em crianças e idosos, podendo até levar à morte (HEI, 2019). Além disso, o NO_X reage com compostos atmosféricos, formando material particulado fino ($MP_{2,5}$) (Fuzzi et al., 2015), que pode causar acidente vascular cerebral, doença isquêmica do coração, doença pulmonar obstrutiva crônica,

câncer de pulmão e, mais recentemente, diabetes (HEI, 2019). Estima-se que a poluição por $MP_{2,5}$ tenha causado a morte prematura de aproximadamente 3 milhões de pessoas em 2017, enquanto, no mesmo ano, a exposição prolongada ao ozônio provocou cerca de 500 mil mortes (HEI, 2019).

Por conta da característica de formação de gás NO_X em motores de combustão interna, ou seja, a altas temperaturas e pressões, atualmente não há metodologia de medição direta desse poluente em ações de fiscalização de veículos em uso. A reprodução fica a cargo de avaliações em laboratórios de emissão, que acontecem somente durante a homologação dos veículos para comércio no país.

Dessa forma, considerando que os veículos movidos a diesel são um dos grandes responsáveis pela poluição atmosférica com relação a NO_X e MP, e que estes poluentes são causadores de diversas doenças e mortes prematuras, faz-se necessário o controle e fiscalização, em veículos em uso, tanto de NO_X quanto de MP.

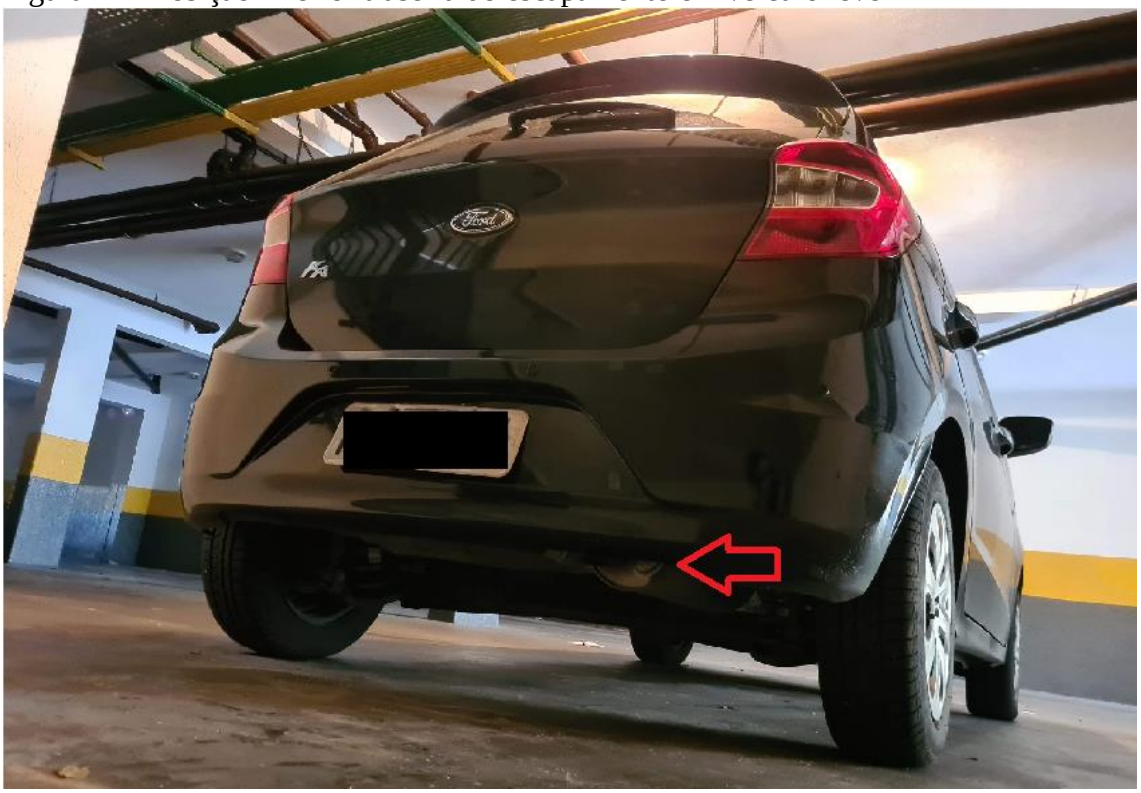
Atualmente, os dois equipamentos aqui abordados (RSD 5000 e EDAR) são capazes de medir tanto o NO_X quanto o MP emitidos pelos veículos em condições normais de circulação.

5.1.2 Posição Sistema de Sensoriamento Remoto

Os veículos comercializados no Brasil não possuem uma padronização com relação à posição dos seus tubos de escapamento. Esse fato é facilmente observado andando pelas ruas do país.

Há veículos que possuem o sistema de escapamento na parte inferior traseira, como é o caso dos veículos leves e da maioria dos caminhões, enquanto há aqueles que o utilizam na parte superior traseira, como é o caso dos ônibus. As Figuras 22 e 23 exemplificam essa diferença.

Figura 22 - Posição inferior traseira do escapamento em veículo leve



Fonte: Elaborada pelo autor

Figura 23 - Posição superior traseira do escapamento em ônibus

Fonte: Elaborada pelo autor

Segundo Kleefeld e Dallmann (2018), a única condição para que o equipamento de SR funcione corretamente é que o feixe de luz do sistema atravesse a pluma de poluentes emitida

pelo veículo. Dessa forma, os sistemas de SR *cross road* enfrentam certa dificuldade para avaliar diferentes tipos de veículos, devido às diferentes disposições dos tubos de escapamento da frota. Por outro lado, sistemas de SR *top down*, por se tratar de um feixe de laser disposto na vertical, que atua sobre toda a extensão da via, independem da posição do escapamento dos veículos, podendo ser utilizados para toda a frota, sem necessidade de ajustes (Kleefeld, J. B., Dallmann, T., 2018). Essa característica possibilita ao equipamento ser utilizado em vias de mais de uma pista, o que não é possível com sistemas *cross road*. A Figura 24 mostra a instalação de um sistema *top down* em uma ponte, numa via de mais de uma pista.

Figura 24 - Instalação do equipamento sistema *top down* em uma ponte

Fonte: HEAT (c2019b)

Dessa forma, de acordo com a heterogeneidade das posições dos escapamentos adotadas pelos veículos do ciclo diesel no Estado de São Paulo e, adicionalmente, ser mais flexível quanto às condições da via a ser utilizado, o sistema mais adequado para o Estado é o do tipo *top down*.

5.1.3 Equipamentos adicionais

Para uma correta avaliação dos poluentes emitidos pela frota circulante, é preciso, além das medições de cada poluente em questão, informações como velocidade, aceleração e dados de registro do veículo. Todas essas informações possibilitam caracterizar as emissões por categoria, fases do PROCONVE, modelo do veículo, o que auxilia programas de I/M terem uma abordagem mais precisa.

Os equipamentos adicionais básicos fornecidos tanto para o RSD 5000, quanto para o EDAR, possuem as mesmas funcionalidades. Ambos possuem medidores de aceleração e velocidade e câmeras para identificação das placas dos veículos.

O EDAR possui um sensor de temperatura, que identifica se o veículo está operando em temperatura normal de funcionamento ou está na condição de "partida a frio". Essa análise é importante para evitar a caracterização equivocada de *high emitters*.

Um estudo realizado na Austrália, utilizando-se o equipamento RSD 5000, experimentou um sensor de temperatura para IR para identificação do modo de operação do veículo (Smit, R. et al., 2021).

O sensor de temperatura mostra-se ser importante para o descarte de medições de veículos em funcionamento a frio, garantindo uma melhor precisão nas avaliações e com resultados com maior acurácia.

5.2 Legislação de I/M com Utilização de SR em São Paulo

O Plano de Controle de Poluição Veicular do Estado de São Paulo (2020 - 2022) prevê a implantação de um programa de inspeção veicular ambiental de forma obrigatória, compulsória e vinculada ao sistema de licenciamento do veículo (CETESB, 2021). Segundo consta no PCPV 2020-2021 de Estado de São Paulo, a estratégia inicial consiste em instaurar a obrigatoriedade de inspeção veicular ambiental para veículos do ciclo diesel, pertencentes à RMSP.

Adicionalmente, há um Projeto de Lei do Estado de São Paulo (PL nº 1187/2009), que prevê a implementação de inspeção veicular ambiental para todo o Estado. No entanto, até o momento de publicação deste trabalho, o PL não foi aprovado.

Uma abordagem correta da implementação de sistemas de SR para complementação dos programas de I/M deve pressupor, no mínimo, dois principais fatores: o funcionamento do sistema de I/M a ser adotado e os limites para cada poluente no programa.

Este trabalho se limitará a descrever a proposta do funcionamento entre dados obtidos do SR e os centros de inspeção, assim como seus benefícios, deixando para trabalhos futuros o detalhamento dos centros, como previsão de tamanho, custos inerentes ao processo e fluxos de trabalhos.

5.2.1 Sistema de SR e I/M em São Paulo

Nesta sessão serão abordadas 2 diferentes formas de integração dos sistemas de SR a um possível programa de I/M em São Paulo. Ambas as propostas são baseadas em legislações vigentes (Yang, L. et al., 2019; HONG KONG, c2021) e trabalhos realizados tanto em São Paulo quanto em outros países (Bruni, 2018; Branco, 2021; Yang, L. et al., 2019).

5.2.1.1 Integração do SR a um programa de I/M em São Paulo

Segundo a revisão bibliográfica sistematizada feita, a China e Hong Kong são os únicos países que, atualmente, utilizam SR para identificação de *high emitters* e para seleção dos veículos que devem ser avaliados em um centro de inspeção do programa de I/M (Yang, L. et al., 2019; HONG KONG, c2021). Conforme mencionado, em Hong Kong apenas os veículos movidos a gasolina ou GLP e identificados como *high emitters* pelo SR devem passar por inspeção no dinamômetro nos laboratórios de emissões veiculares, para verificação da conformidade. No entanto, enquanto Hong Kong possui uma frota veicular registrada de cerca de mais de 800.000, o Estado de São Paulo possui cerca de 30.000.000 de veículos registrados. Com relação aos veículos diesel, Hong Kong possui cerca de 140.000 registros, enquanto São Paulo cerca de 5.000.000 (Transport Department of Hong Kong, 2017; BRASIL, 2021). Quando utilizada a metodologia de veículos circulantes no Estado de São Paulo, esse número cai para cerca de 1.000.000, porém ainda muito acima da frota de Hong Kong.

Para avaliação de cerca de 98% da frota de veículos do ciclo diesel em Hong Kong, foi preciso mais de 400.000 medições realizadas em 2 anos de avaliações contínuas, 14 equipamentos de SR e 158 locais de inspeções (Huang et al., 2018).

A RMSP conta com uma frota circulante de veículos diesel de 450.000, segundo dados da CETESB. Dessa forma, de modo a garantir um programa de inspeção ambiental de veículos diesel, nos mesmos moldes do realizado em Hong Kong, cobrindo mais de 90% da frota diesel circulante, começando pela RMSP, seria necessário um esforço cerca de 3 vezes maior que o realizado pelo estudo de Huang et al. (2018).

Para se ter uma base de comparação, segundo consta do Relatório da Operação Inverno da Cetesb de 2019, em uma operação com 42 pontos de fiscalização distintos, são observados

cerca de 60 mil veículos diesel, em um período de 5 horas consecutivas. Desse total, alguns há veículos com registros em outros estados ou regiões de fora da RMSP, o que reduziria ainda mais o número total.

Sabendo-se que para um modelo eficaz e justo de I/M através da identificação de *high emitters*, levando-se em conta somente veículos diesel registrados na RMSP, é preciso que a totalidade da frota alvo seja inspecionada pelo equipamento de SR, e que segundo as condições atuais, isso é inviável por conta dos custos inerentes aos recursos humanos e materiais, faz-se necessária uma abordagem diferente do implantado em Hong Kong.

Programas de I/M precisam de, além de eficácia na redução das emissões de poluentes veiculares, apelo social com relação a seus benefícios. Assim, é importante que as inspeções com o SR sejam educativas, e de alguma forma reduzam custos do processo para a população (Branco, 2021).

Alguns estudos apontam a identificação de veículos *low emitters* como uma boa forma de caracterização de parte da frota, a fim de reduzir custos aos proprietários desses veículos (Bruni, 2018), assim como menor investimento em infraestrutura dos centros de inspeção.

Dessa forma, entende-se que a obrigatoriedade de inspeção somente para veículos que foram caracterizados como *high emitters* pelo SR é inviável para o Estado de São Paulo, mesmo que considerando somente a RMSP como início do programa de I/M, e que a utilização dessa tecnologia somente para identificar *low emitters* pode trazer benefícios com relação às emissões veiculares, porém não utiliza a totalidade do potencial do sistema de SR.

Assim, propõe-se que o programa de I/M de veículos do ciclo diesel do Estado de São Paulo se inicie pela RMSP e que possua centros de inspeção que avaliem anualmente toda a frota, assim como previsto pelo PCPV 2020-2022 e como era realizado pelo I/M da cidade de São Paulo. No entanto, caso o veículo seja identificado *low emitter*, com critérios a serem definidos, estará isento da inspeção anual.

Quanto aos veículos diesel identificados como *high emitters*, por mais de duas vezes em um intervalo de 6 meses, estes deverão fazer a manutenção em seu veículo e comparecer em um centro de inspeção dentro de um período de 30 dias. No caso de não comparecimento, sua licença deverá ser bloqueada imediatamente. Essa abordagem é parecida com a realizada segundo legislação da China (Yang, L. et al., 2019).

Os demais veículos que não foram avaliados, ou que foram, mas não se enquadraram em nenhuma dessas classificações (*high* ou *low emitters*), deverão comparecer à inspeção anual normalmente.

Com esse modo de atuação, nenhum veículo deve ficar totalmente isento de inspeção, enquanto aqueles mais poluidores devem fazer a reparação de forma mais rápida e os menos poluidores ficam isentos de inspeção anual. Assim, alguns proprietários poderão se sentir encorajados em fazer manutenções preventivas e passar pelos equipamentos de SR para se isentar da inspeção anual, enquanto a identificação de *high emitters* funciona como uma fiscalização dos mais poluidores.

A cultura de manutenção preventiva, um dos objetivos mais importantes de programas de I/M, será intensificada com o uso de SR com caracterização de *low emitters* para isenção de inspeção anual obrigatória, como também para prevenir a identificação de *high emitter* e ter que realizar inspeção dentro do período estipulado. Além disso, com a redução do número de veículos desregulados haverá um grande ganho ambiental, a princípio na RMSP e depois em todo o Estado de São Paulo.

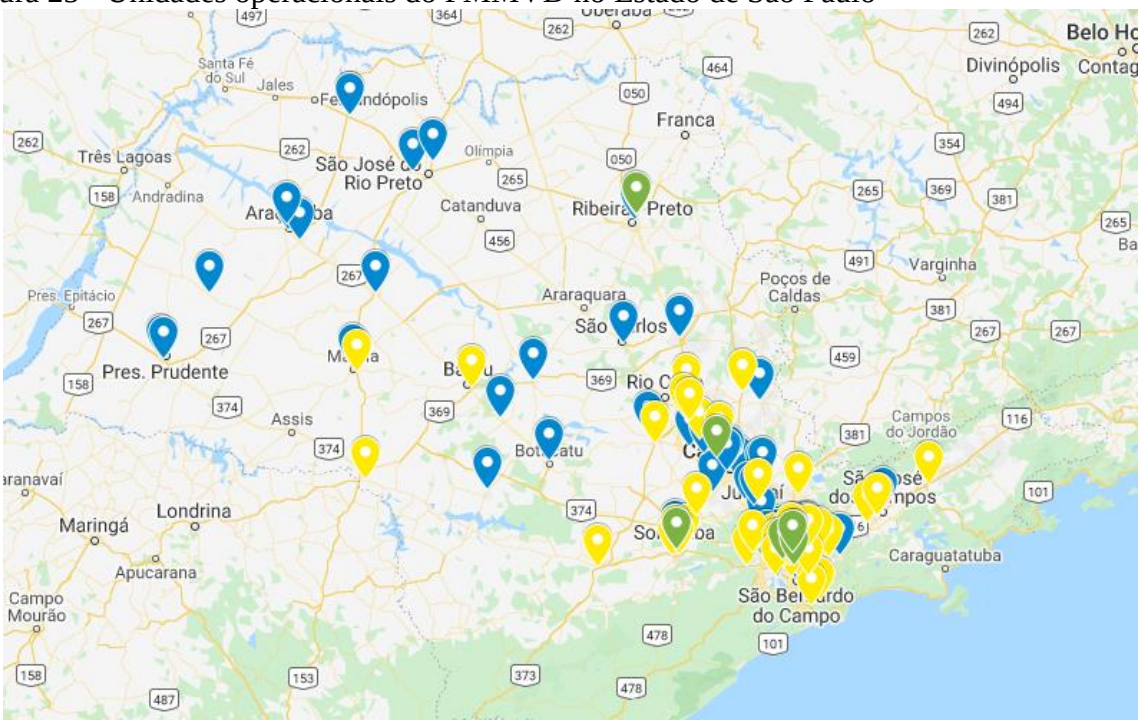
Da maneira descrita, o órgão ambiental responsável pode introduzir essa tecnologia com poucos equipamentos, a princípio, para e evoluir as inspeções de forma gradual. Assim, haverá tempo para obter uma familiaridade com a tecnologia, educação da população e recursos financeiros por parte do Governo.

5.2.1.2 Integração do sistema de SR ao PMMVD

Tomando como base a legislação da China, do ano de 2017 (Yang, L. et al., 2019), pode-se fazer algo parecido no Estado de São Paulo, já que este possui uma estrutura pronta, de oficinas privadas capacitadas para realização de inspeções veiculares em veículos do ciclo diesel. Tal estrutura faz parte do PMMVD, que tem como objetivo a melhoria da qualidade do ar, através da redução dos níveis de emissões atmosféricas provenientes de veículos a diesel.

Atualmente existem mais de 100 unidades operacionais participantes do PMMVD, que são capacitadas a realizarem inspeções nos veículos diesel de acordo com procedimento descrito no Decreto Estadual nº 54.487/2009. A Figura 25 ilustra a distribuição dessas unidades no território estadual.

Figura 25 - Unidades operacionais do PMMVD no Estado de São Paulo



Fonte: CETESB (2022)

Nota-se pela Figura 25 que as unidades operacionais do PMMVD estão espalhadas por todo o estado, porém com maior concentração principalmente na RMSP.

De acordo com o Decreto Estadual 54.487/2009, há duas formas oficiais de requisição dos laudos fornecidos pelas empresas participantes do PMMVD. Uma delas tem a finalidade de redução do valor da multa de fumaça preta, e a outra é comprovação de conformidade, caso o veículo tenha recebido uma notificação por desconformidade em momento de fiscalização com opacímetro.

Entre os anos de 2014 e 2018, cerca de 7000 pedidos de redução (média de 1400/ano) dos valores das multas por fumaça preta foram encaminhados à CETESB com laudos realizados nas unidades capacitadas do PMMVD (CETESB, 2021a). Salienta-se que essas multas foram geradas, majoritariamente, pela fiscalização através da Escala de Ringelmann, que é eficaz somente para veículos diesel mais antigos.

As notificações por desconformidade são geradas para veículos diesel, em momentos de fiscalização nos quais não é possível realizar a medição de opacidade, por decorrência de falha em algum dos requisitos verificados na pré-inspeção. Segundo dados fornecidos pela CETESB, entre os anos de 2017 e 2019 foram inspecionados cerca de 428 veículos em comandos de fiscalização. Nesses comandos realizam-se testes de opacidade e de ARLA 32.

A inspeção com opacímetro verifica o grau de opacidade emitido pelo veículo. Esse método de medição é complementar à Escala de Ringelmann, sendo mais eficaz para veículos mais novos. No entanto, uma equipe de fiscalização é capaz de realizar cerca de 5 a 6 inspeções por comandos de meio período. Essa quantidade de veículos fiscalizados é ínfima com relação à frota alvo, de cerca de 450.000 veículos diesel circulantes na RMSP, o que não é eficiente do ponto de vista de redução dos níveis de emissão e da conscientização da população.

Dessa forma, propõe-se a criação de uma legislação, análoga à realizada na China em 2017 e de acordo com o sugerido por Branco (2021), em que se utilize equipamentos de SR, estrategicamente localizados, de forma a inspecionar os veículos diesel em situação real de uso. Caso um veículo seja flagrado por duas vezes em um intervalo de seis meses, emitindo poluentes acima dos níveis estipulados pela legislação, o mesmo deverá ser devidamente reparado e comparecer a uma das unidades operacionais da rede capacitada do PMMVD dentro de um período de 30 dias. Se o veículo não comparecer ou não for capaz de atingir os níveis adequados durante as inspeções nas unidades operacionais, o mesmo sofrerá uma penalidade, vinculada ao licenciamento do veículo.

Esse método de legislação proposto é uma boa opção para São Paulo, uma vez que o Estado já possui uma estrutura de empresas de inspeção veicular ambiental capacitadas e que funcionam em conformidade com as diretrizes da CETESB. Inicialmente, pode-se utilizar poucos equipamentos de SR e alterna-los de localização, para aumentar a heterogeneidade da frota analisada. Dessa forma, os custos iniciais com instalação e recursos humanos não seriam elevados, porém haveria um alto ganho ambiental.

Caso essa metodologia fosse executada, um único instrumento, em poucos dias de funcionamento, poderia ser capaz de inspecionar mais veículos com relação à opacidade do que os órgãos ambientais já realizaram até hoje, desde a regulamentação da utilização do opacímetro como forma de avaliação de veículos diesel em 2009.

5.2.2 Limites para de emissões para as propostas de legislação

Como foram propostos dois formatos de legislação para inclusão de SR em programas de I/M de São Paulo, há de se propor ao menos dois limites diferentes. A ideia é começar um programa pouco restritivo, porém eficaz, e aumentar a rigorosidade das exigências conforme a frota é renovada e a cultura de manutenção preventiva for instaurada na sociedade.

5.2.2.1 Limites para identificação de *high emitters* e *low emitters*

A identificação de *high emitters* e *low emitters* está intrinsecamente ligada ao perfil da frota da região analisada. Dessa forma, não é possível tal caracterização sem um estudo prévio, com dados relevantes e suficientes para chegarmos a uma conclusão. No entanto, segundo alguns estudos (Bruni, 2018; Branco, 2021) e aplicação de legislação (HONG KONG, c2021), nota-se que é eficaz limitar as emissões de poluentes dividindo os veículos pelas fases do PROCONVE pertencentes.

Apesar de não termos dados primários referentes às emissões de veículos diesel circulantes no Estado de São Paulo, para uma correta caracterização de *high* e *low emitters*, podemos utilizar alguns dados divulgados para uma primeira aproximação.

Branco et al. (2021) sugeriu uma boa aplicação inicial, que é a de caracterizar 10% da frota mais poluidora como *high emitter* em veículos leves e a partir daí definir os limites. Podemos expandir esse conceito para os veículos pesados. Dessa forma, como mostrado também por Branco et al. (2021), para veículos da fase P7 do PROCONVE, admitindo-se 10% de veículos reprovados, o limite de emissão para NO_2 seria cerca de 8,6 g/kWh. Esse limite é consideravelmente alto para veículos da fase P7, no qual o limite para homologação de NO2 é de 2 g/kWh. Isso mostra o quanto há de poluentes excedentes na frota de veículos em uso, segundo dados obtidos pelo estudo de Branco et al. (2021).

Com relação à opacidade, após levantamento e tratamento dos dados pela CETESB, foi utilizada a equação 1 para conversão dos resultados dos coeficientes de absorção [m^{-1}] em opacidade (%). A Tabela 1 apresenta a quantidade de veículos inspecionados com relação à opacidade entre os anos de 2017 e 2018, segundo fases do PROCONVE pertencentes. Ressalta-se que a fase P6, apesar de ter sido prevista, de fato não existiu por fatores técnicos relacionados aos parâmetros dos combustíveis comercializados no país.

Tabela 1 - Número de veículos inspecionados entre 2017 e 2018 segundo fase do PROCONVE

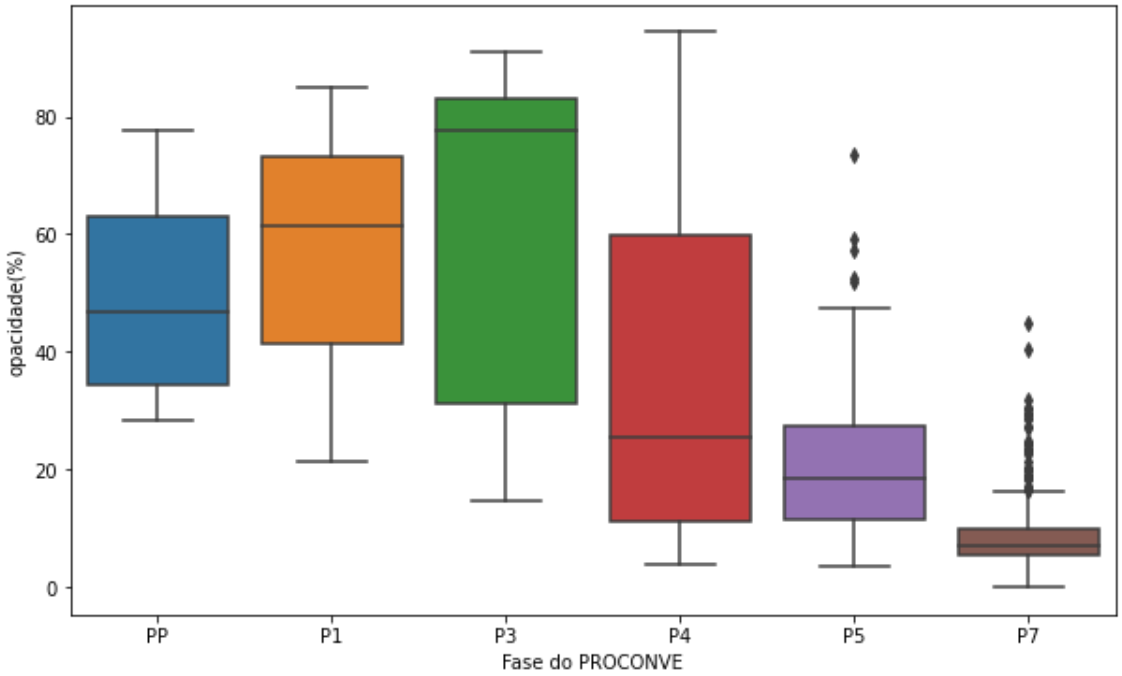
Fase do PROCONVE	Nº de Veículos inspecionados
P7	259
P5	121
P4	24
P3	6
P2	0
P1	3
PP	6

Fonte: Elaborado pelo autor com dados fornecidos pela CETESB

Os dados da Tabela 1 representam os veículos que, de fato, realizaram o teste de opacidade. Ou seja, não foram reprovados nos critérios de pré-inspeção. Nota-se que há dados significativos apenas para as fases P4, P5 e P7.

A Figura 26 - Distribuição de opacidade observada por fase do PROCONVE apresenta as distribuições dos resultados de opacidade, segmentados por fases do PROCONVE dos veículos.

Figura 26 - Distribuição de opacidade observada por fase do PROCONVE

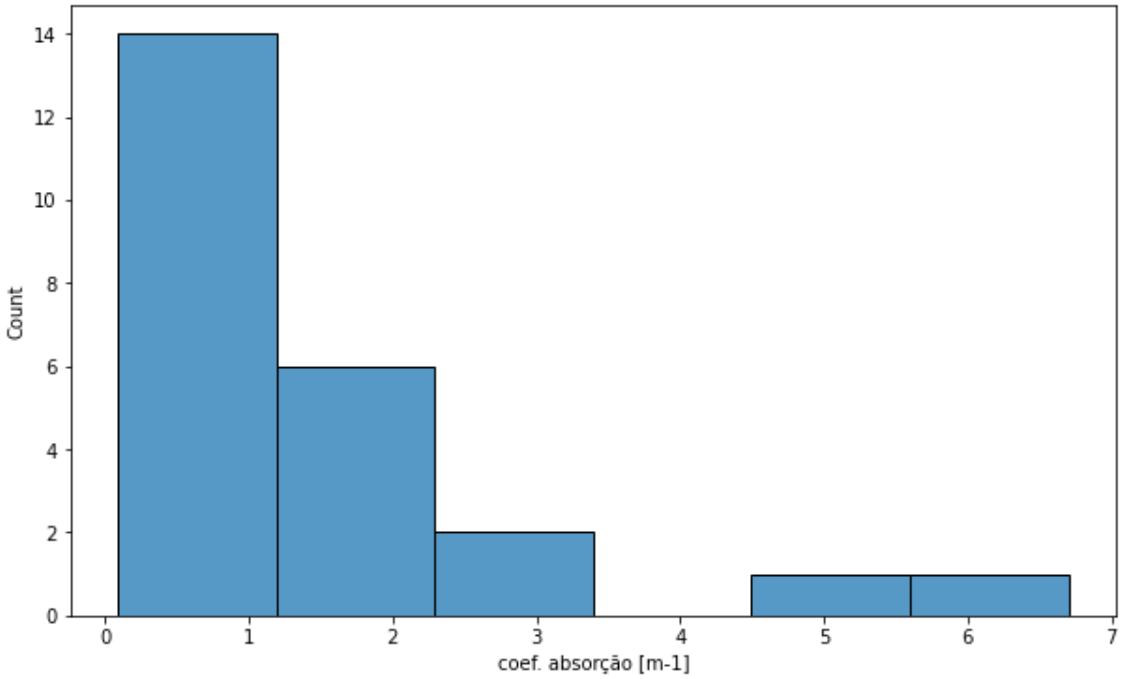


Fonte: Elaborado pelo autor com dados fornecidos pela CETESB

O aumento dos níveis de opacidade observado entre as fases PP e P3 do PROCONVE, conforme mostrado na Figura 26, não deve ser considerado, pois conforme tabela 1, essas fases apresentaram amostras muito pequenas para uma avaliação estatística relevante.

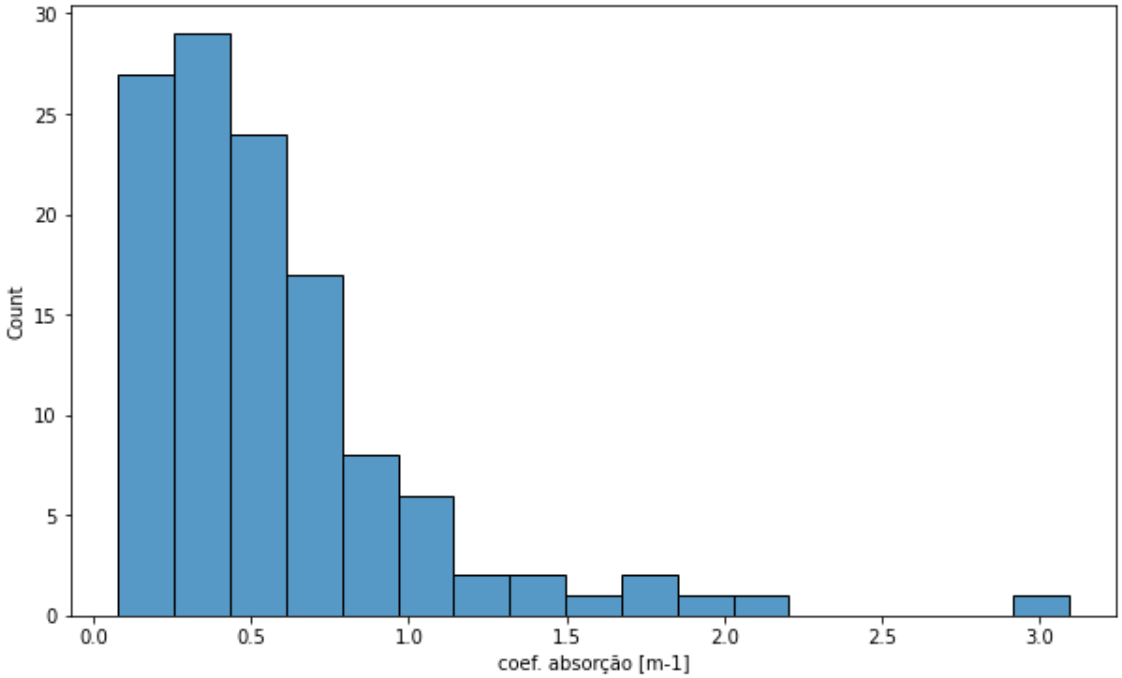
As distribuições de coeficientes de absorção [m^{-1}] das fases P4, P5 e P7, observados durante as inspeções de opacidade dos anos de 2017 e 2018, são avaliadas com mais detalhes nas Figuras 27, 28 e 29.

Figura 27 - Distribuição de coeficientes de absorção dos veículos da fase P4



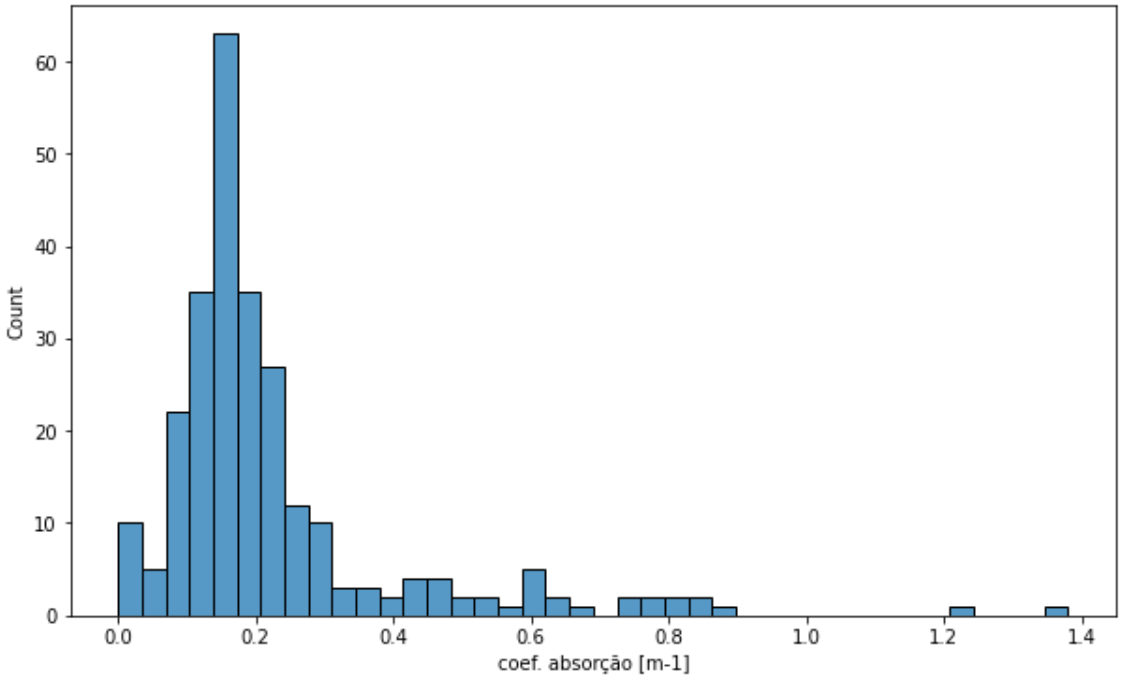
Fonte: Elaborado pelo autor com dados fornecidos pela CETESB

Figura 28 - Distribuição de coeficientes de absorção dos veículos da fase P5



Fonte: Elaborado pelo autor com dados fornecidos pela CETESB

Figura 29 - Distribuição de coeficientes de absorção dos veículos da fase P7



Fonte: Elaborado pelo autor com dados fornecidos pela CETESB

De acordo com a amostra de veículos inspecionada entre os anos de 2017 e 2018, nota-se que 50% dos resultados de coeficiente de absorção ficaram entre os valores de 0,13 m^{-1} e 0,24 m^{-1}, o que está dentro do estipulado pela legislação (CONAMA 403/08). Caso fossem escolhidos 10% dos mais poluidores para comparecerem à inspeção, o valor limite seria de 0,47 m^{-1}, equivalente a 5,44% de opacidade. Entretanto, esses valores são menores que os limites máximos para veículos do ciclo diesel da fase P7 do PROCONVE, que é de 1,35 m^{-1} para veículo turboalimentado, acima de 350 m de altitude.

Para as fases P5 e P4, configurando 10% da frota como reprovada, teríamos limites de emissão de 1,06 m^{-1} (opacidade de 36,60%) e 2,52 m^{-1} (opacidade de 66,05%), respectivamente.

Nota-se que utilizando-se 10% dos veículos mais poluidores de cada fase do PROCONVE, tomando como base inspeções de opacidade realizadas de acordo com procedimento do Decreto Estadual 54.487/09, teríamos um limite de opacidade menor do que o mais máximo permitido pela CONAMA (CONAMA 08/93; CONAMA 315/02; CONAMA 403/08). No entanto, vale ressaltar que como a utilização do opacímetro consiste em uma técnica diferente do SR, o mais correto seria a realização de estudo similar, porém com dados do próprio SR.

Assim, para essa aproximação inicial, com relação à opacidade, o mais correto seria indicar comparecimento em centro de inspeção os veículos que fossem flagrados com emissão

acima do limite estabelecido pela legislação já existente, ajustados para a altitude local, conforme a Tabela 2:

Tabela 2 - Limites de coeficientes de absorção [m^{-1}] e opacidade (%) para cada fase do PROCONVE a serem utilizados como aproximação inicial

Fase do PROCONVE	Coef. Absorção [m^{-1}] até 350m	Opacidade (%) até 350m	Coef. Absorção [m^{-1}] acima de 350m	Opacidade (%) acima de 350m	Limite de NO_X (g/kWh)
PP	2,1	59	2,8	70	-
P1	2,1	59	2,8	70	-
P2	2,1	59	2,8	70	-
P3	2,1	59	2,8	70	-
P4	2,1	59	2,8	70	-
P5	1,3	43	1,75	53	-
P7	1,0	35	1,35	44	8,6
P8	0,4	16	0,4	16	-

Fonte: Elaborada pelo autor

A Tabela 2 mostra os limites propostos, tanto na medida do coeficiente de absorção quanto em opacidade, por uma questão de facilidade caso algum equipamento futuro siga a medição pelo coeficiente. Outra utilidade dessa tabela é a comparação do que é exigido pelas resoluções CONAMA, que é o coeficiente de absorção, em relação ao medido na maioria dos equipamentos de SR. O limite para NO_X de 8,6 g/kWh proposto para os veículos da fase P7 considera o estudo realizado por Branco et al. (2021).

Com relação aos limites para identificação de *low emitters*, estes devem ser cuidadosamente estudados através de dados adquiridos pelos equipamentos de SR em estudos iniciais. Essa cautela deve-se ao fato de que sempre há um risco de veículos identificados como *low emitters* não serem aprovados em um teste no centro de inspeção do I/M. Esse risco é análogo ao encontrado para identificação de *high emitters* pelo Bruni (2018) e incorre em um acréscimo de poluentes emitidos pelos veículos erroneamente avaliados [EPA 420-p-98-008]. A avaliação correta deve levar em consideração os riscos de falsos positivos para *low emitters*, seus consequentes prejuízos ambientais e também os ganhos de se utilizar essa técnica, como maior aprovação e educação da sociedade e menores gastos com centros de inspeção. Ou seja, uma avaliação de custo benefício é estritamente necessária para este caso.

5.2.2.2 Limites para identificação de *high emitters* em programa conjunto com o PMMVD

A proposta de programa que une a tecnologia de SR com a estrutura do PMMVD já consolidada pela CETESB, parte do princípio da identificação dos *high emitters*.

Nesse caso, o modelo de identificação é o mesmo realizado para opacidade apresentado no item 5.2.2.1. A única diferença é que, como as unidades operacionais do PMMVD não possuem dinamômetros, ou equipamento PEMS em sua maioria, a identificação de *high emitter* para NO_X surtiria efeito. Sendo assim, os limites de opacidade e coeficiente de absorção inicialmente propostos, para cada fase do PROCONVE, seriam os constantes na Tabela 2.

Vale ressaltar que esses limites seriam recalculados após aquisição de dados do próprio equipamento de SR em estudo inicial.

5.3 Escolha dos Locais de Instalação dos Equipamentos de SR

Os locais a serem escolhidos para instalação dos equipamentos de SR devem ser criteriosamente escolhidos, levando-se em consideração as seguintes características (Bruni, 2018; Connecticut, 2019):

- Pista com pequena inclinação positiva;
- Não deve pertencer a áreas residenciais;
- Os veículos devem estar em condição de carga moderada e dentro de limites de velocidades próprias para o método;
- A via deve possuir tráfego suficientemente alto;
- Condições ambientais: temperatura entre 7°C e 49°C, umidade entre 5% e 95%, luz consistente, altitude entre -305m e 3048m.

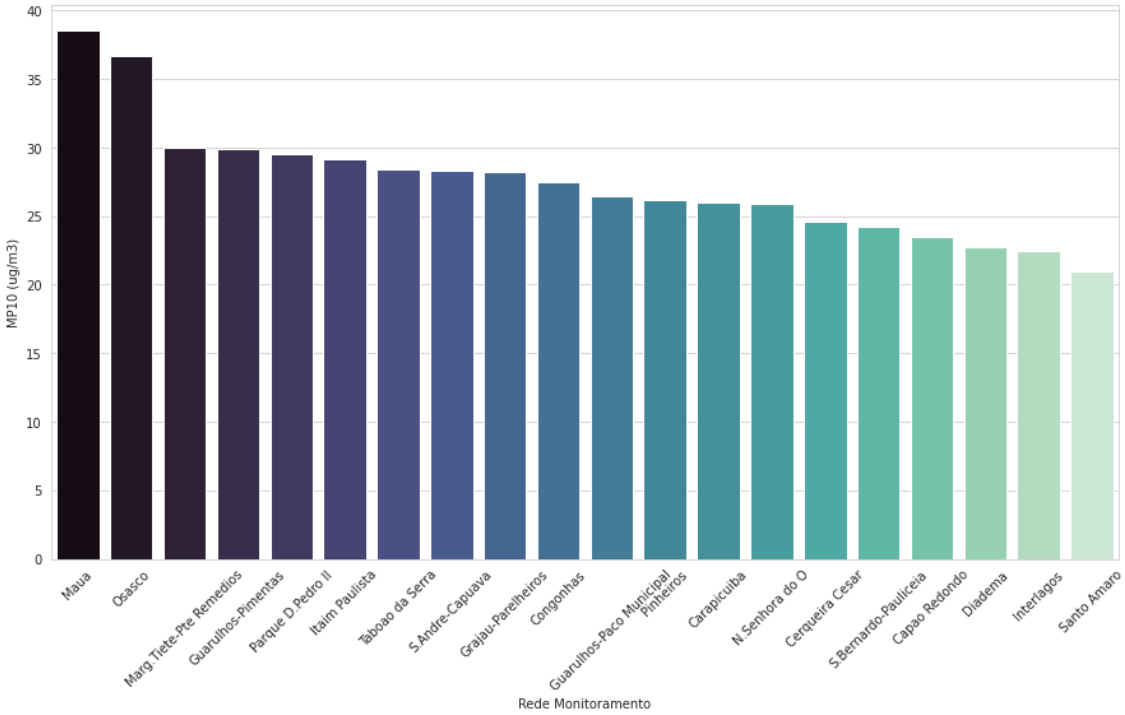
Com relação aos critérios de escolha dos locais acima mencionados, há outros dois fatores de suma importância para a escolha de início de um programa: a qualidade ambiental local e o fluxo de veículos. O primeiro é essencial para identificar a região onde se deve começar e voltar os esforços de um programa, enquanto o segundo ajuda a priorizar os locais que possuem maiores concentrações de veículos da frota alvo.

Dessa forma, um dos primeiros fatores avaliados será a qualidade do ar nas regiões da RMSP, segundo dados secundários obtidos pelo sistema QUALAR, da rede de monitoramento da CETESB.

5.3.1 Avaliação da Qualidade do Ar na RMSP

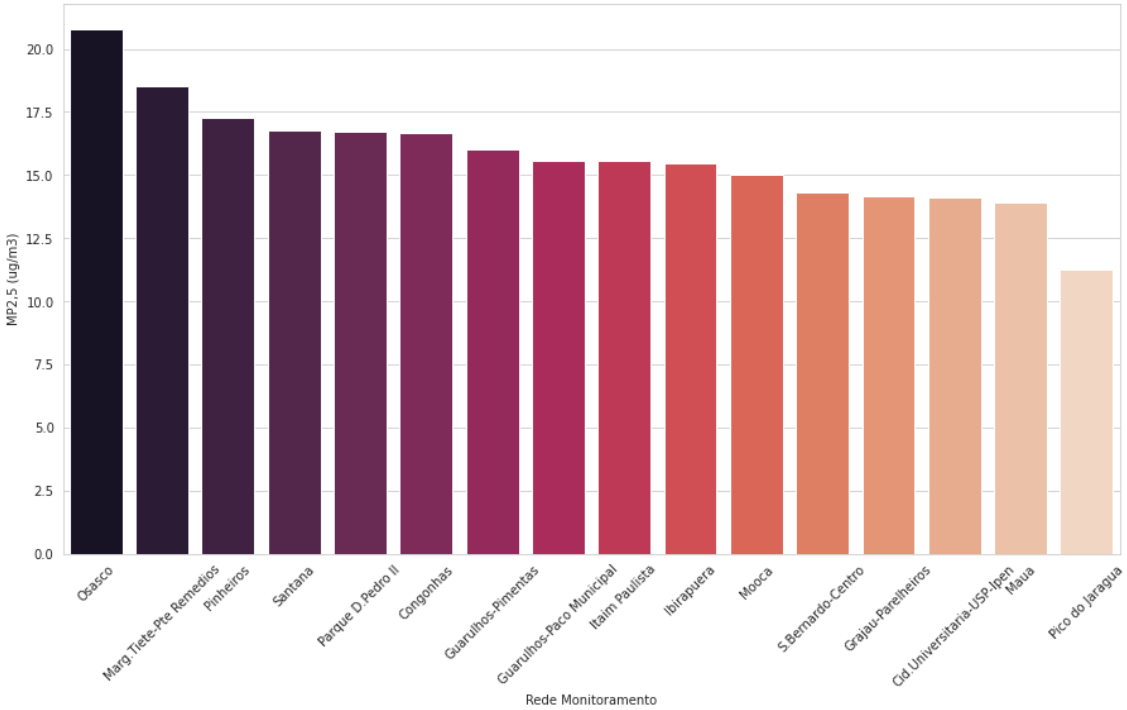
As concentrações médias dos poluentes MP_{10}, $MP_{2,5}$ e NO_X para o ano de 2021 foram plotadas em diagramas de Pareto, representadas nas Figuras 30, 31 e 32. Nelas, fica evidente que, dentro da RMSP, os locais com maiores problemas com relação à material particulado são: Osasco, Pinheiros, Mauá e Marginal Tietê. Nota-se também que o maior problema de Mauá foi com relação a MP_{10}, enquanto para Pinheiros foi o $MP_{2,5}$. Com relação ao poluente NO_X, os locais com maiores concentrações foram: Congonhas, Osasco e Marginal Tietê. Para o prosseguimento do estudo, portanto, serão considerados como mais críticos as seguintes regiões: Osasco, Pinheiros, Mauá, Marginal Tietê e Congonhas.

Figura 30 - Médias de concentração de MP_{10} na RMSP no ano de 2021



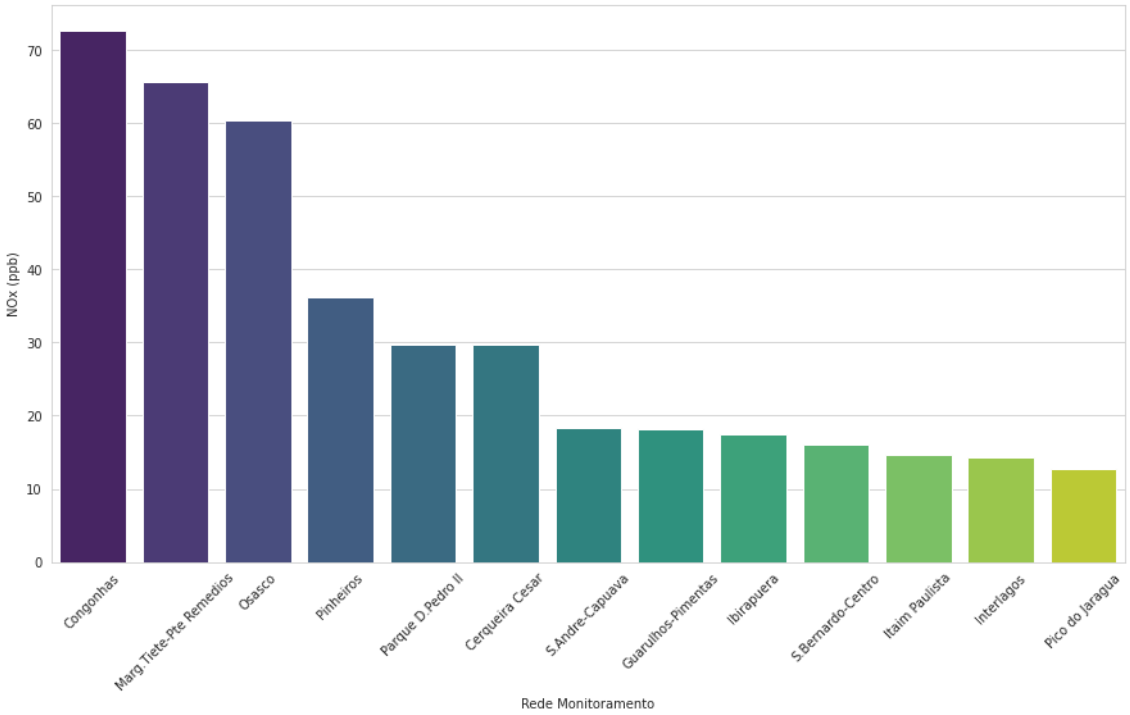
Fonte: Elaborado pelo autor com dados do sistema QUALAR da CETESB

Figura 31 - Médias de concentração de $MP_{2,5}$ na RMSP no ano de 2021



Fonte: Elaborado pelo autor com dados do sistema QUALAR da CETESB

Figura 32 - Médias de concentração de NO_X na RMSP no ano de 2021

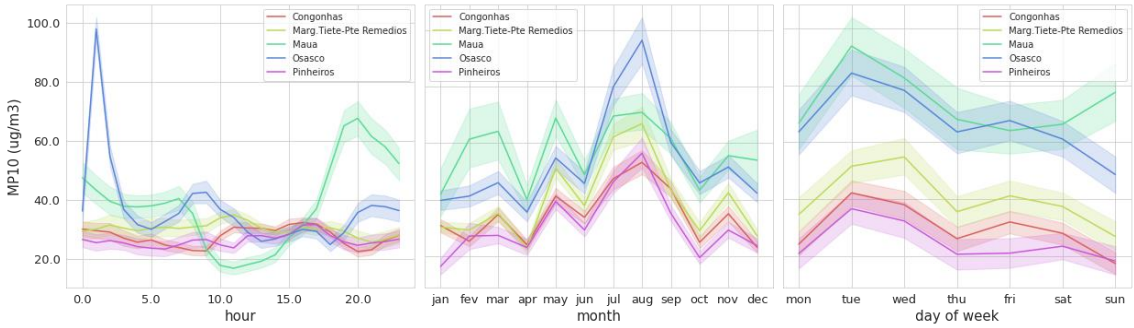


Fonte: Elaborado pelo autor com dados do sistema QUALAR da CETESB

O entendimento do perfil de circulação dos veículos dos locais analisados é importante para a otimização dos recursos a serem utilizados durante o programa. Assim, foram traçados gráficos, representados nas Figuras 33, 34 e 35, que indicam os horários, dias da semana e

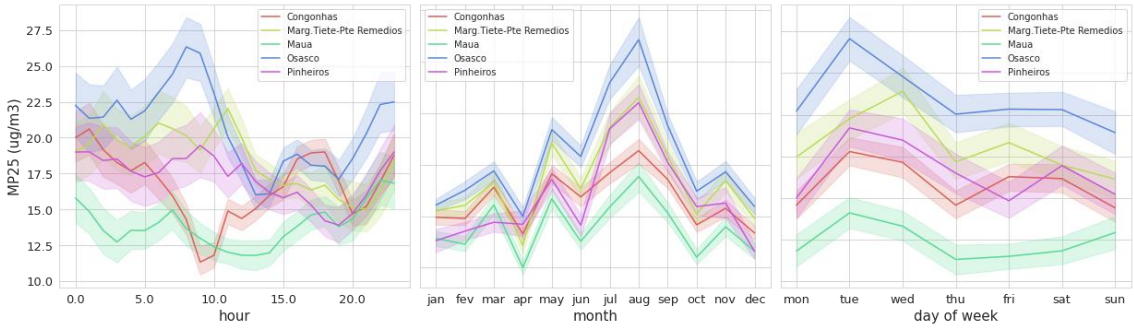
meses mais críticos para cada poluente analisado, nos locais com maiores concentrações de poluentes, segundo análise prévia dos gráficos de Pareto.

Figura 33 - Distribuição das concentrações de MP_{10} por hora, mês e dias da semana em 2021



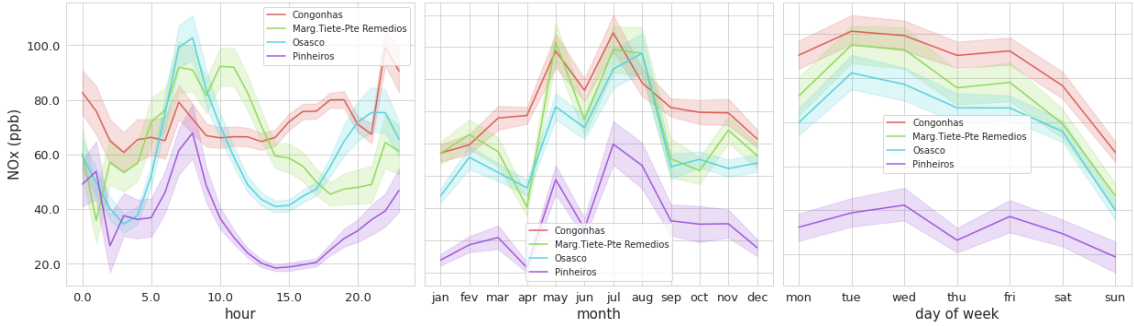
Fonte: Elaborado pelo autor com dados do sistema QUALAR da CETESB

Figura 34 - Distribuição das concentrações de $MP_{2,5}$ por hora, mês e dias da semana em 2021



Fonte: Elaborado pelo autor com dados do sistema QUALAR da CETESB

Figura 35 - Distribuição das concentrações de NO_X por hora, mês e dias da semana em 2021



Fonte: Elaborado pelo autor com dados do sistema QUALAR da CETESB

Na Figura 33 é possível observar que Mauá e Osasco possuem perfis de poluição atmosférica opostas durante as horas do dia. Enquanto Osasco possui um pico de MP_{10} medido durante as manhãs, Mauá apresenta as maiores concentrações durante a noite. Os outros locais avaliados possuem concentrações de MP_{10} mais constantes durante os dias. Com relação à variação das concentrações entre os meses, o comportamento é parecido e conforme o esperado, ou seja, maiores entre os meses de maio a setembro. Quanto aos dias da semana, há

menor concentração de poluentes aos finais de semana, no geral. No entanto, Mauá possui aumentos aos domingos, em média.

A Figura 34 mostra comportamentos parecidos de Osasco e Mauá, quando comparados aos respectivos com relação a MP_{10}, enquanto em Congonhas há uma redução das concentrações de $MP_{2,5}$ no período da manhã.

As concentrações atmosféricas de NO_X são maiores entre os meses de maio e setembro e menores aos finais de semana, como mostrado na Figura 35. Há de se observar também que Congonhas é a única das regiões estudadas que possui constância das concentrações de NO_X durante as horas do dia.

Assim, observa-se que a análise temporal das concentrações atmosféricas é importante para subsidiar a escolha de um local para utilização de equipamentos de SR. Em primeira análise, tem-se que os perfis de inspeção por SR seriam diferentes para os locais estudados.

Os mapas que unem as localizações das estações de monitoramento da qualidade do ar da CETESB com as respectivas médias de concentração de poluentes se encontram no ANEXO I. Nos mapas é possível identificar que a região da Zona Leste de São Paulo é a que menos possui verificação da qualidade do ar.

5.3.2 Avaliação do Fluxo de Veículos Diesel

O fluxo de veículos do ciclo diesel é outro fator importante na determinação dos pontos de fiscalização. Os resultados obtidos pelo levantamento do índice de não conformidade da frota realizado pela CETESB em 2020 mostram que esse fluxo pode variar muito, de local para local, conforme ANEXO II. Segundo os dados apresentados, os pontos avaliados que possuem maior fluxo de veículos diesel são: Marginal Tietê; Rodovia Presidente Dutra Km 211 (Guarulhos); Rodovia dos Bandeirantes (Caieiras); Rodovia Castello Branco, km29-30 (Barueri).

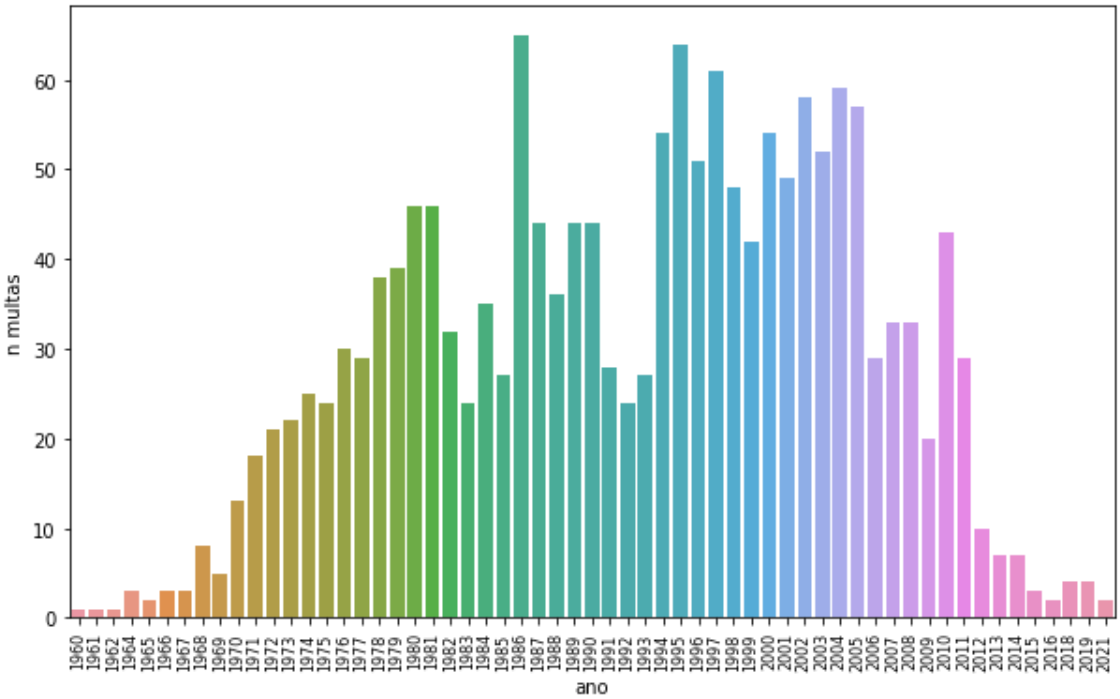
Há de se destacar outros dois pontos de atenção, segundo a tabela do ANEXO II. A Av. Jacu Pêssego, no ano de 2019 apresentou 11,6% dos veículos diesel da amostra em desconformidade, enquanto na Av. Salim Farah Maluf o resultado foi de 7,73%. Ambos os pontos pertencem à Zona Leste da cidade de São Paulo, onde há menos monitoramento da qualidade do ar na RMSP. Além disso, apesar de não possuírem os maiores fluxos de veículos da RMSP, se encontram em áreas urbanizadas, o que é mais prejudicial para a sociedade do que as emissões veiculares nas rodovias (CETESB, 2020).

5.4 Análise dos Veículos Fiscalizados Atualmente

Os comandos de fiscalização dos dias 08 de junho e 10 de agosto da Operação Inverno de 2021 fiscalizaram mais de 80 mil veículos, o que culminou em mais de 1.600 veículos autuados, em um total de 84 pontos de fiscalização. Somente os dados dos veículos autuados são armazenados, então não é possível traçar o perfil da frota circulante nos locais, porém pode-se ter uma visão geral do tipo de veículo mais flagrado pela Escala de Ringelmann.

Para uma visão geral do perfil da frota autuada, o histograma da Figura 36 mostra a distribuição dos anos modelo dos veículos autuados. É possível observar que os veículos mais antigos autuados são de 1960, enquanto os mais novos são de 2021. Esses são os casos extremos, e portanto, os menos frequentes nessa distribuição.

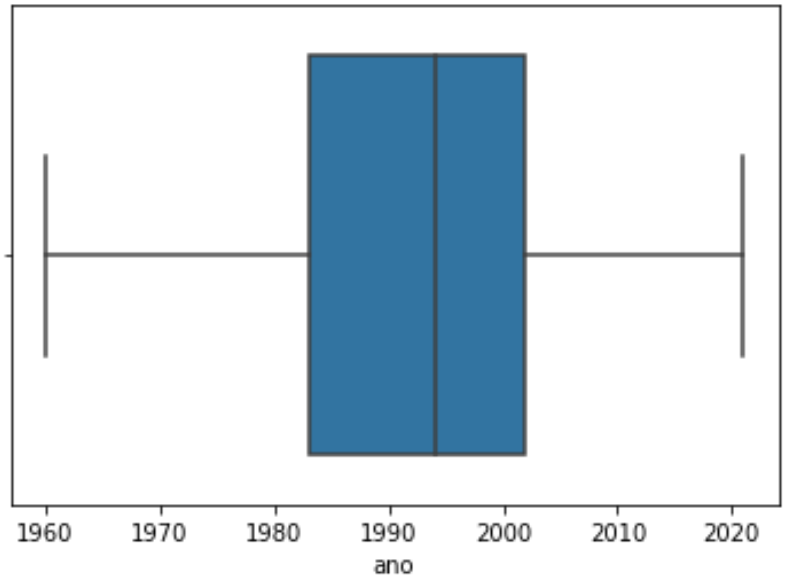
Figura 36 - Distribuição dos anos modelo dos veículos autuados durante Operação Inverno 2021



Fonte: Elaborada pelo autor com dados fornecidos pela CETESB

O diagrama do tipo Boxplot da Figura 37 ilustra mais a fundo o perfil da frota autuada nas operações. Observa-se que 50% dos veículos autuados pertencem aos modelos dos anos de 1983 a 2002.

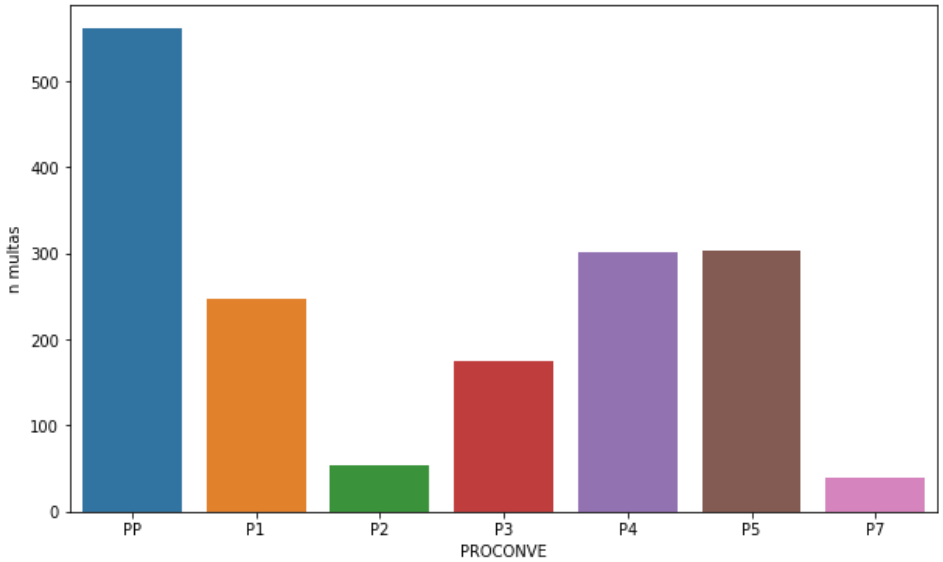
Figura 37 – Distribuição no diagrama Boxplot dos anos modelo dos veículos autuados na Operação Inverno 2021



Fonte: Elaborada pelo autor com dados fornecidos pela CETESB

Para verificação mais segmentada, observou-se o comportamento das autuações com relação às fases do PROCONVE a que pertencem os veículos. A visualização dessa distribuição está representada no gráfico de barras da Figura 38.

Figura 38 - Distribuição dos veículos autuados na Operação Inverno de 2021 com relação às fases do PROCONVE



Fonte: Elaborada pelo autor com dados fornecidos pela CETESB

Segundo indicado pela Figura 38, os veículos da fase pré-PROCONVE são os que mais recebem multas com relação às emissões de fumaça preta, seguidos pelos de fase P4 e P5.

Maior número de autuações para fases P4 e P5 eram esperados, uma vez que possuem mais veículos em circulação, segundo dados da CETESB (CETESB, 2020). No entanto, veículos pré-PROCONVE representam menos de 10% da frota circulante de veículos diesel, o que indica a má conservação de tais veículos, assim como mostra a importância da renovação da frota para melhorar a qualidade do ar.

Há de se observar que veículos da fase P7 representavam cerca de 30% da frota circulante em 2019. No ano de 2021, quando esse estudo foi realizado, estima-se que essa frota represente cerca de 50%. Isso mostra que a Escala de Ringelmann não é mais eficaz para fiscalização de grande parte dos veículos da frota circulante do Estado de São Paulo. Esse é mais um motivo para a inclusão de sistemas de SR como complemento dos programas de I/M no Estado de São Paulo.

CONCLUSÕES

A técnica de SR foi desenvolvida no final dos anos 1980 e possui aplicações de sucesso em diversos países. Segundo este estudo realizado, a utilização desse sistema poderia ser eficaz para a redução das emissões de veículos a diesel no Estado de São Paulo.

São realizadas três diferentes fiscalizações em veículos do ciclo diesel no Estado de São Paulo atualmente: opacidade, Escala de Ringelmann e inspeção de sistema SCR. De acordo com os dados levantados, as fiscalizações de opacidade realizadas pela CETESB têm uma representatividade de cerca de 0,03% do total da frota diesel circulante na RMSP, enquanto as realizadas pela Escala de Ringelmann não são capazes de avaliar os veículos mais novos, que já somam quase 50% do total da frota. Com relação ao sistema SCR, tem-se o mesmo problema de eficiência das fiscalizações de opacidade. Esses casos ilustram a necessidade de inclusão de uma nova técnica para avaliação dos veículos em uso, que seja mais eficiente e retorne os investimentos em ganhos ambientais.

Dessa forma, foram propostas duas medidas que introduzem a utilização do sistema de SR, como forma de complementar inspeções veiculares, no Estado de São Paulo. Uma delas prevê a medição e identificação de *high* e *low emitters*, e requer a abertura de centros de inspeção, para avaliação total da frota diesel, a começar pela RMSP. A outra proposta indica a utilização do sistema de SR juntamente com o sistema já existente e estruturado do PMMVD, do Estado de São Paulo. Esta segunda proposta, por já possuir unidades operacionais cadastradas e participantes, teria menos custos iniciais de implementação e seria importante para inclusão da utilização da técnica de SR na cultura local. É importante ressaltar que sistemas de SR não substituem programas de I/M, apenas os complementam. Assim como discutido, o SR pode otimizar programas já existentes e realizar monitoramento para estudo da frota circulante.

Não foi possível criar limites confiáveis para *high* e *low emitters* com os dados de opacidade obtidos das fiscalizações da CETESB. No entanto, segundo estudo de Branco (2021), muitos veículos da fase P7 do PROCONVE ultrapassam os limites estabelecidos em homologação. Assim, entende-se que para uma avaliação correta da frota, para identificação dos veículos mais e menos poluidores, é preciso realizar um estudo mais aprofundado com dados obtidos com equipamentos de SR no Estado.

A escolha do local a ser instalado inicialmente um equipamento de sensoriamento remoto deve levar em consideração diversos fatores, como fluxo de veículos, tráfego livre, pequena inclinação positiva e livre de condições extremas climáticas. Incluiu-se nessa lista as

condições de qualidade do ar observadas no ano de 2021. Observou-se que nas regiões de Osasco e Mauá, que apresentaram maiores concentrações médias de MP no ano, possuíam índices horários opostos. Enquanto Osasco tem pico de concentrações pela manhã, Mauá possui à noite. Assim, entende-se que, além da escolha correta do ponto, é necessário entender como os fluxos de veículos se comportam, para poder otimizar recursos humanos e materiais envolvidos.

Segundo dados das campanhas de levantamento estatístico da CETESB, duas regiões da Zona Leste de São Paulo (Av. Jacu Pêssego e Av. Salim Farah Maluf) apresentam índices de não conformidade de veículos diesel bastante elevados. Essas regiões não se encontram entre piores com relação à poluição atmosférica, talvez pelo fato de não haver redes de monitoramento por perto. Assim, indica-se que sejam realizados estudos aprofundados na região, para uma melhor caracterização da frota e possível atribuição de SR.

A região de Congonhas apresentou maiores índices de NO_X, porém não ficou entre as primeiras com relação ao MP. Isso indica que não seria forte candidata para instalação de SR em um programam conjunto com o PMMVD, porém pode ser considerada caso seja implantado o programa de I/M.

REFERÊNCIAS

AIRCARE EMISSIONS PROGRAM ENDING FOR METRO VANCOUVER VEHICLES. CBC News, 2014. Disponível em: <https://www.cbc.ca/news/canada/british-columbia/aircare-emissions-program-ending-for-metro-vancouver-vehicles-1.2885573>. Acesso em: 14 de jan de 2022.

BERNARD, Y. **Catching Defeat Devices – How Systematic Vehicle Testing Can Determine the Presence of Suspicious Emissions Control Strategies**. International Council on Clean Transportation (ICCT). 2019. Disponível em: <https://theicct.org/publications/detecting-defeat-devices-201906>. Acesso em: 13 de nov. de 2019.

BERNARD, Y., GERMAN, J., MUNCRIEF, R. **Worldwide Use of Remote Sensing to Measure Motor Vehicle Emissions**. International Council on Clean Transportation (ICCT), 2019. Disponível em: <https://theicct.org/wp-content/uploads/2021/06/Worldwide-use-RSD-4.20.20.pdf>. Acesso em: 12 de fev. de 2022.

BISHOP, G. A. et al.(1989). Ir long-path photometry: A remote sensing tool for automobile emissions. **Analytical Chemistry**, 61(10), 671A-677A. Disponível em: <https://doi.org/10.1021/ac00185a002>. Acesso em: 12 de fev. de 2022.

BRANCO, F. C., BRANCO, G. M., BRANCO, M. C., SZWARC, A. **Benefícios ambientais e resultados do programa de inspeção e manutenção de São Paulo**. In: XXI Simpósio Internacional de Engenharia Automotiva - SIMEA, São Paulo, 2013.

BRANCO, F. C., BRANCO, G. M., BRANCO, R. A. R., SZWARC, A. **Monitoramento De Emissões Veiculares Por Sensoriamento Remot**o. In: Simpósio Internacional de Engenharia Automotiva - SIMEA 2021, São Paulo, 2021.

BRANCO, GM; SZWARC, A; BRANCO, FC. **Programa ambiental de Inspeção Veicular – Princípios, fundamentos e procedimentos de teste**. Ed. Edgard Bluchher Ltda, São Paulo, 68p. (2012).

BRASIL. MMA. **Resolução CONAMA nº 18, de 06 de maio de 1986**. Dispõe sobre a criação do Programa de Controle de Poluição do Ar por Veículos Automotores – PROCONVE. Com as alterações posteriores. Disponível em: <http://www2.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=41>. Acesso em: 16 de nov. de 2019.

BRASIL. MMA. **Resolução CONAMA nº 418, de 25 de novembro de 2009**. Dispõe sobre critérios para a elaboração de Planos de Controle de Poluição Veicular - PCPV e para a implantação de Programas de Inspeção e Manutenção de Veículos em Uso - I/M. Com as alterações posteriores. Disponível em: <http://conama.mma.gov.br/?option=com_sisconama&task=arquivo.download&id=599>. Acesso em: 16 de nov. de 2019.

BRASIL. MMA. **Resolução CONAMA nº 490, de 16 de novembro de 2018**. Dispõe sobre o estabelecimento da fase P8 do Programa de Controle de Poluição do Ar por Veículos Automotores – PROCONVE. (2018a). Disponível em: < http://www.in.gov.br/materia/-

/asset_publisher/Kujrw0TZC2Mb/content/id/51058898/do1-2018-11-21-resolucao-n-490-de-16-de-novembro-de-2018-51058604>. Acesso em: 10 de nov. de 2019.

BRASIL. MMA. **Resolução CONAMA nº 491, de 19 de novembro de 2018**. Dispõe sobre padrões de qualidade do ar. (2018b) Disponível em: <https://www.in.gov.br/web/guest/materia/-/asset_publisher/Kujrw0TZC2Mb/content/id/51058895/do1-2018-11-21-resolucao-n-491-de-19-de-novembro-de-2018-51058603>. Acesso em: 14 de fev. de 2022.

BRASIL. SIMA. **Frota de Veículos - 2021**. Disponível em: <https://www.gov.br/infraestrutura/pt-br/assuntos/transito/conteudo-denatran/frota-de-veiculos-2021>. Acesso em: 25 de janeiro de 2022.

BRUNI, A. de C. **Critérios para identificação de veículos leves do ciclo Otto com elevadas emissões, utilizando dispositivo de sensoriamento remoto**. 2018. Tese (Doutorado em Ciências) - Faculdade de Saúde Pública, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2018. Disponível em: <http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/6/6134/tde-19042018-120404/>. Acesso em: 25 de janeiro de 2022.

CETESB. **Emissões veiculares no estado de São Paulo 2019**. São Paulo, 2020. (Série Relatórios). Disponível em: <https://cetesb.sp.gov.br/veicular/relatorios-e-publicacoes/>. Acesso em: 10 de nov. de 2019.

CETESB. **Empresas participantes do PMMVD**. São Paulo, 2022. Disponível em: < https://cetesb.sp.gov.br/veicular/empresas-participantes-do-pmmvd/>. Acesso em: 22 de jan. de 2022.

CETESB. **Plano de Controle de Poluição Veicular 2020 - 2022**. São Paulo, (2021a). Disponível em: <http://ar.cetesb.sp.gov.br/publicacoes-relatorios/>. Acesso em: 24/01/2022.

CETESB. **Relatório Da Operação De Fiscalização De Arla 32**, São Paulo, 2017. Disponível em: < https://cetesb.sp.gov.br/veicular/relatorios-e-publicacoes/>. Acesso em: 14 de nov. de 2019.

CETESB. **Relatório de qualidade do ar no Estado de São Paulo 2020**. São Paulo, (2021b). (Série Relatórios). Disponível em: <http://ar.cetesb.sp.gov.br/publicacoes-relatorios/>. Acesso em: 24/01/2022.

CETESB. **ESTUDO TÉCNICO PARA AVALIAR E PROPOR PRAZO PARA O INÍCIO DA VIGÊNCIA DA META INTERMEDIÁRIA ETAPA 2 (MI2) DE ACORDO COM O ARTIGO 8º DO DECRETO ESTADUAL nº 59.113/2013**. São Paulo, (2021c). Disponível em: < https://cetesb.sp.gov.br/ar/wp-content/uploads/sites/28/2021/12/Estudo-Tecnico-para-viabilizar-a-Etapa-MI2-.pdf>. Acesso em: 28/03/2022.

DETRAN-RJ – Departamento Estadual de Trânsito do Rio de Janeiro – **Aferição de Gases Poluentes**. Disponível em: https://www.detran.rj.gov.br/_documento.asp?cod=7507. Acesso em: 14 de jan. de 2022.

DALLMANN, T. et al. **Remote Sensing of Motor Vehicle Emissions in Paris**. The Real Urban Emission (TRUE), 2019. Disponível em: <https://theicct.org/wp-content/uploads/2021/06/TRUE_ParisRS_study_20190909.pdf>. Acesso em: 12 de fev. de 2022.

DALLMANN, T. **Use of remote-sensing technology for vehicle emissions monitoring and control**. International Council on Clean Transportation (ICCT), 2018. Disponível em: <https://theicct.org/sites/default/files/publications/ICCT_remote-sensing_brief_201812.pdf>. Acesso em: 12 de fev. de 2022.

ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY - EPA (EUA), 2002. **Guidance on Use of Remote Sensing for Evaluation of I/M Program Performance**. EPA420-B-02-001.

ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY - EPA (EUA), 2021. **Overview of Vehicle Inspection and Maintenance (I/M) Programs**. Disponível em: <https://nepis.epa.gov/Exe/ZyPDF.cgi?Dockey=P1013CC0.pdf> . Acesso em: 30 de mar. de 2022.

EDAR: A Touchless Emissions Testing Solution. HEAT, c2019a. Disponível em: <https://www.heatremotesensing.com/installation-options>. Acesso em: 29 de jan. de 2022.

EDAR Installation Options. HEAT, c2019b. Disponível em: <https://www.heatremotesensing.com/edar>. Acesso em: 29 de jan. de 2022.

FRANCO, V. et al. Real-World Exhaust Emissions From Modern Diesel Cars - **A Meta-Analysis of PEMS Emissions Data From EU (EURO 6) and US (TIER 2 BIN 5/ULEV II) Diesel Passenger Cars**. International Council on Clean Transportation (ICCT), 2014. Disponível em: <https://theicct.org/sites/default/files/publications/ICCT_PEMS-study_diesel-cars_20141010.pdf>. Acesso em: 10 de nov. de 2019.

FUZZI, S. et al. Particulate matter, air quality and climate: Lessons learned and future needs. **Atmospheric Chemistry and Physics**, 2015, volume 15, issue 14, 8217–8299. Disponível em: <https://doi.org/10.5194/acp-15-8217-2015>. Acesso em: 12 de fev. de 2022.

EVERYTHING ABOUT THE GERMAN EMISSIONS STICKER. The German Emissions Sticker, 2021. Disponível em: https://www.germanemissionssticker.com/. Acesso em: 22 de jan. de 2022.

GRUENING, C. et al. (2019). **Potential of Remote Sensing Devices (RSDs) to screen vehicle emissions Assessment of RSD measurement performance**. Joint Research Centre (European Commission), 2019, ISSN 831-9424. Disponível em: <https://doi.org/10.2760/277092>. Acesso em: 12 de fev. de 2022.

HEALTH EFFECTS INSTITUTE - HEI. **State of Global Air 2019 - A Special Report On Global Exposure To Air Pollution And Its Disease Burden**. Health Effects Institute, 2019, 24p. Disponível em: <https://www.stateofglobalair.org/sites/default/files/soga_2019_report.pdf>. Acesso em: 12 de fev. de 2022.

HIROTA, K., MINATO, K. **Inspection and maintenance system in Japan**. UN ESCAP Conference Center, Bangkok, Tailândia. Disponível em: <ww.un.org/esa/gite/iandm/jaripaper.pdf>. Acesso em 01 de set. de 2019.

HONG KONG - **Strengthened Emissions Control for Petrol and LPG Vehicles** (c2021). Disponível em: https://www.epd.gov.hk/epd/english/environmentinhk/air/guide_ref/remote_sensing_Petrol_n_LPG.htm#Implementation%20Details. Acesso em: 14 de jan. de 2022.

HONG KONG - **Transport Department Of Hong Kong, Transport Department of Hong Kong**, 2017 - Table 4.4: Registration and Licensing of Vehicles by Fuel Type. Disponível em: <http://www.td.gov.hk/filemanager/en/content_4855/table44.pdf>. Acesso em: 12 de fev. de 2022.

HUANG, Y. et al. (2018). Emission measurement of diesel vehicles in Hong Kong through on-road remote sensing: Performance review and identification of high-emitters. **Environmental Pollution**, 2018, volume 237, p. 133–142. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2018.02.043>. Acesso em: 12 de fev. de 2022.

INSPECTION. JAPÃO, 2022. Disponível em: <https://www.mlit.go.jp/english/inspect/car13e.html>. Acesso em: 29 de jan. de 2022

KLEEFELD, B. J., DALLMANN, T. **Remote sensing of motor vehicle exhaust emissions**. International Council on Clean Transportation, 2018. Disponível em: <https://theicct.org/wp-content/uploads/2021/06/Remote-sensing-emissions_ICCT-White-Paper_01022018_vF_rev.pdf>. Acesso em: 12 de fev. de 2022.

MAZZOLENI, C., KUHNS, H. D., MOOSMÜLLER, H. **Monitoring automotive particulate matter emissions with LiDAR: A review.** *Remote Sensing*, 2010, *2*(4), 1077–1119. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/rs2041077>. Acesso em: 12 de fev. de 2022.

MCKEE, D. J. **Tropospheric ozone: human health and agricultural impacts**. CRC Press, Inc, Boca Raton, 1994. Disponível em: <https://scholar.google.com/scholar_lookup?title=Tropospheric%20ozone%3A%20human%20health%20and%20agricultural%20impacts&publication_year=1994>. Acesso em: 12 de fev. de 2022.

MMA. **Poluentes Atmosféricos** (2019a). Disponível em: <https://www.mma.gov.br/cidades-sustentaveis/qualidade-do-ar/poluentes-atmosf%C3%A9ricos.html>. Acesso em: 16 de nov. de 2019.

MMA. **PROCONVE: Programa De Controle De Poluição Do Ar Por Veículos Automotores** [2019b]. Disponível em: <https://www.mma.gov.br/estruturas/163/_arquivos/proconve_163.pdf>. Acesso em: 16 de nov. de 2019.

MONKS, P. S.et al. Tropospheric ozone and its precursors from the urban to the global scale from air quality to short-lived climate forcer. **Atmospheric Chemistry and Physics**, 2015, 15(15), 8889–8973. Disponível em: <https://doi.org/10.5194/acp-15-8889-2015>. Acesso em: 12 de fev. de 2022.

NAKAMOTO, Y., KAGAWA, S. Role of vehicle inspection policy in climate mitigation: The case of Japan. **Journal of Environmental Management**, 2018, volume 224, p. 87–96. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.07.028>. Acesso em: 12 de fev. de 2022.

OPUS REMOTE SENSING TECHNOLOGY. Opus. Disponível em: <https://web.ecomonitoring.com/uploadedfiles/589_ECM-Opus_RSD_Technology_briefing_EN.pdf>. Acesso em: 29 de jan. de 2022.

ORGAN, B. et al. A remote sensing emissions monitoring programme reduces emissions of gasoline and LPG vehicles. **Environmental Research**, 2019, volume 177, 108614. Disponível em: < https://doi.org/10.1016/j.envres.2019.108614>. Acesso em: 12 de fev. de 2022.

POSADA, F., YANG, Z., MUNCRIEF, R. **Review of Current Practices and New Developments in Heavy-Duty Vehicle Inspection and Maintenance Programs**. International Council on Clean Transportation (ICCT), 2015. Disponível em: <https://theicct.org/wp-content/uploads/2021/06/HDV-insp-maint-White-Paper-v2.pdf>. Acesso em: 12 de fev. de 2022.

ROPKINS, K. et al. Evaluation of EDAR vehicle emissions remote sensing technology. **Science of the Total Environment**, 2017, volume 609, p. 1464–1474. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.07.137>. Acesso em: 12 de fev. de 2022.

SÃO PAULO (Estado). **Decreto Estadual nº 59.113, de 23 de abril de 2013**. Estabelece novos padrões de qualidade do ar e dá providências correlatas. Disponível em: < https://www.al.sp.gov.br/repositorio/legislacao/decreto/2013/decreto-59113-23.04.2013.html>. Acesso em 10 de nov. de 2019.

SÃO PAULO (Estado). **Decreto Estadual nº 54.487, de 26 de junho de 2009**. Altera a redação e inclui dispositivos e anexos no Regulamento da Lei nº 997, de 31 de maio de 1976, aprovado pelo Decreto nº 8.468, de 8 de setembro de 1976, que dispõe sobre o controle da poluição do meio ambiente e dá outras providências. Disponível em: < https://www.al.sp.gov.br/repositorio/legislacao/decreto/2009/decreto-54487-26.06.2009.pdf>. Acesso em 10 de nov. de 2019.

SMIT, R. et al. A decade of measuring on-road vehicle emissions with remote sensing in Australia. **Atmospheric Environment**, 2021, volume 252, 118317. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2021.118317>. Acesso em: 12 de fev. de 2022.

SLOTT, R. S. **Remote sensing in four cities to determine the changes in on-road vehicle fleet emissions over time**. CRC Report No. E-23. (2007). Disponível em: http://crcsite.wpengine.com/wp-content/uploads/2019/05/E-23-Slott-FINAL-revised-7-09DEC2007.pdf. Acesso em 19 de jan. de 2022.

THE NEW VEHICLE INSPECTION PROGRAM. REGISTRY. Ontário, Canadá, 2021. Disponível em: <https://www.ontariocanada.com/registry/showAttachment.do?postingId=38747&attachmentId=50576>. Acesso em: 14 de jan de 2022.

THE REMOTE SENSING DEVICE. Opus. Disponível em: < https://www.opusrse.com/technology/remote-sensing-device/>. Acesso em: 29 de jan. de 2022.

VEHICLE EMISSIONS TEST. Ontario, Canadá, 2021. Disponível em: <https://www.ontario.ca/page/vehicle-emissions-test>. Acesso em: 14 de janeiro de 2022.

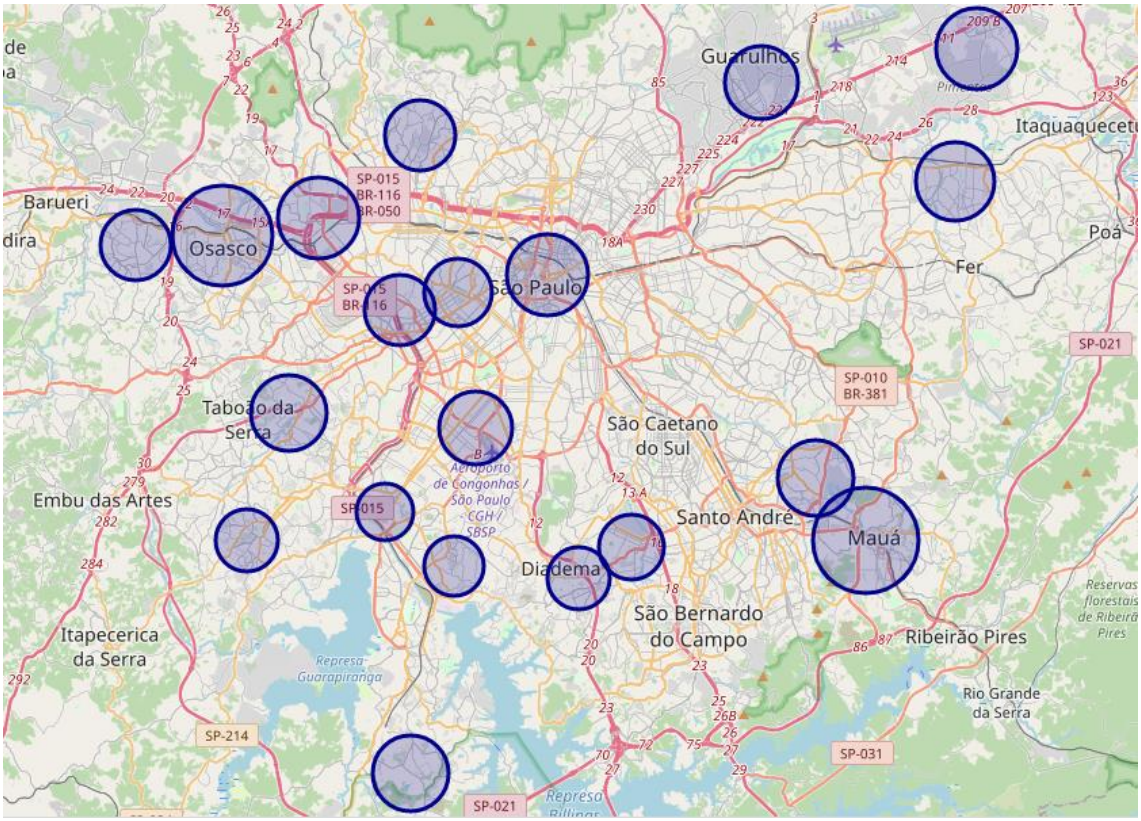
VENTURA, M. L. B. et al. Inspection and maintenance programs for in-service vehicles: An important air pollution control tool, **Sustainable Cities and Society**, volume 53, 2020, 101956, ISSN 2210-6707. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2210670719322164>. Acesso em: 12 de fev. de 2022.

WHO – WORLD HEALTH ORGANIZATION. **Air quality guidelines for Particulate matter (PM2.5 and PM10), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide**, 2021. Disponível em: < https://apps.who.int/iris/bitstream/handle/10665/345329/9789240034228-eng.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: 28 de mar. de 2022.

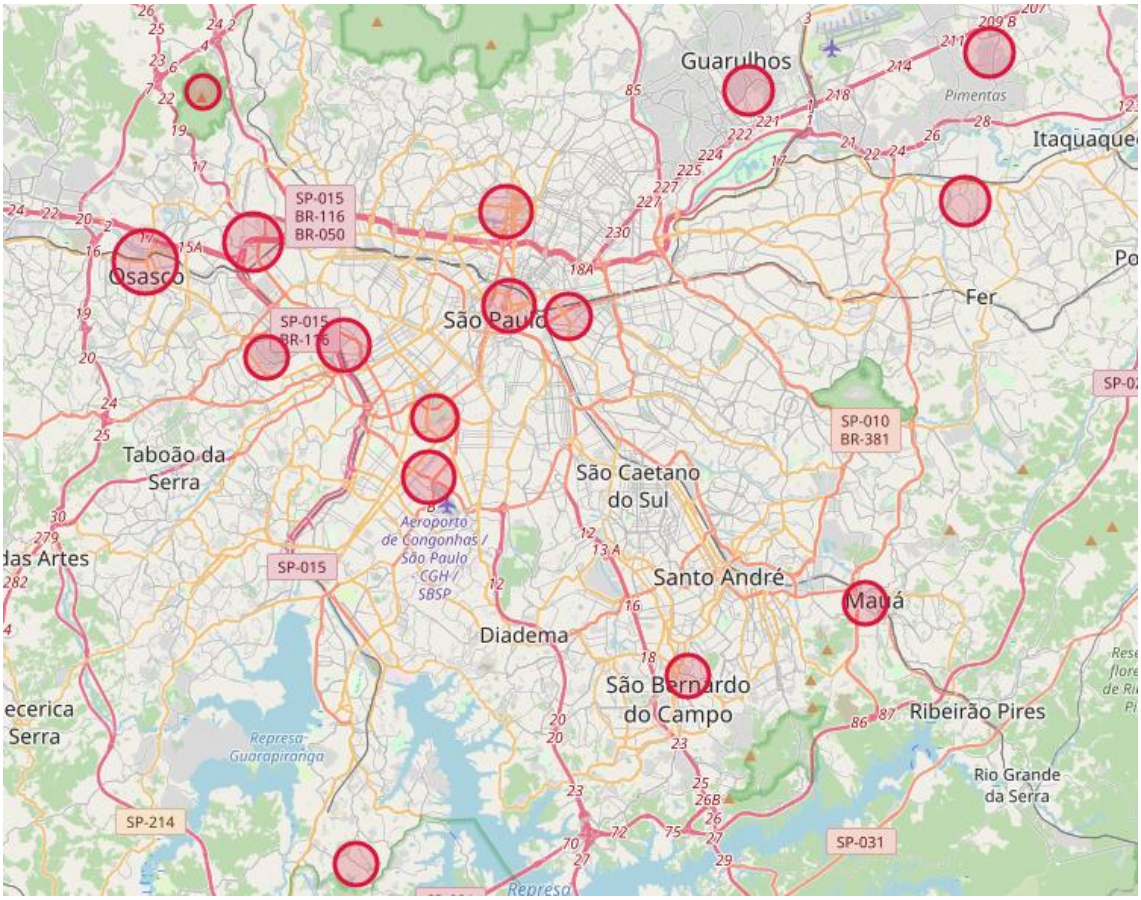
YANG, L., BERNARD, Y., DALLMANN, T. **Technical considerations for choosing a metric for vehicle remote-sensing regulations**. International Council on Clean Transportation (ICCT), 2019. Disponível em: <https://theicct.org/publication/technical-considerations-for-choosing-a-metric-for-vehicle-remote-sensing-regulations/>. Acesso em: 26 de janeiro de 2022.

ZHAN, T. et al. An analysis of real-world exhaust emission control deterioration in the California light-duty gasoline vehicle fleet. **Atmospheric Environment**, 2020, volume 220, 117107. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2019.117107>. Acesso em: 12 de fev. de 2022.

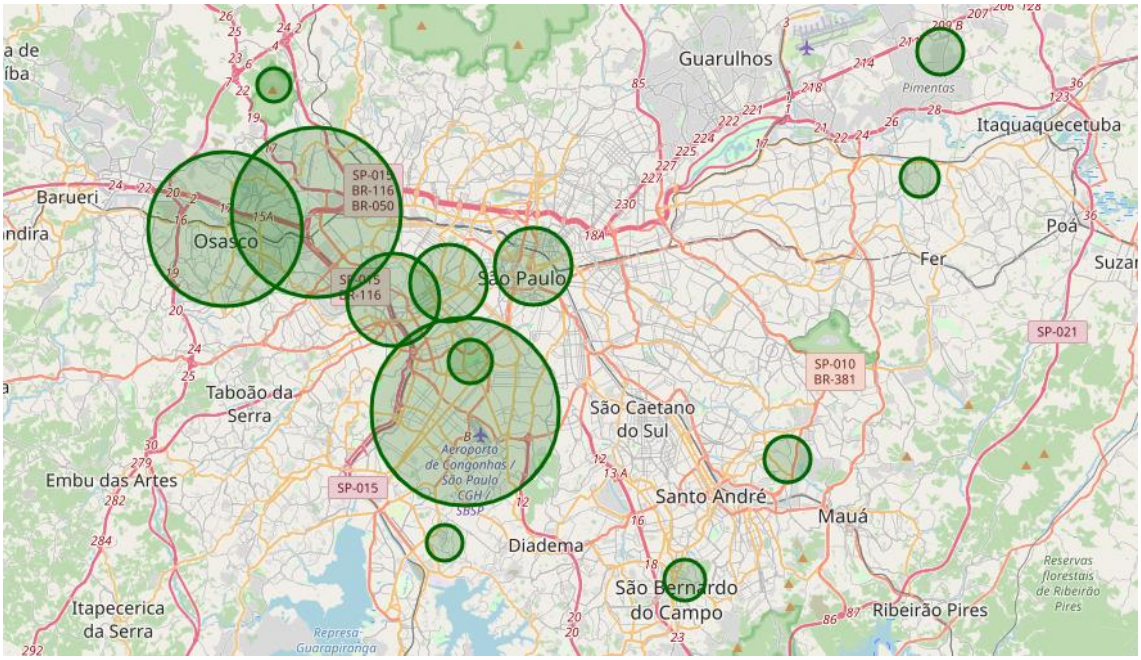
ANEXO A - MÉDIAS DE CONCENTRAÇÃO DE MP_{10} NA REDE DE MONITORAMENTO DA CETESB NA RMSP EM 2021



ANEXO B - MÉDIAS DE CONCENTRAÇÃO DE $MP_{2,5}$ NA REDE DE MONITORAMENTO DA CETESB NA RMSP EM 2021



ANEXO C - MÉDIAS DE CONCENTRAÇÃO DE NO_X NA REDE DE MONITORAMENTO DA CETESB NA RMSP EM 2021



ANEXO D - TABELA DE PONTOS E RESULTADOS DE NÃO CONFORMIDADE DE 2019 DA CETESB

Local	Total de veículos	Não conforme	% não conforme
Rodovia Régis Bittencourt altura km 274S/276N	178	7	3,93
Av. Professor Francisco Morato, altura Av. Jorge João Saad	84	0	0,00
Av. Jacu Pêssego, 3655 e 900	250	29	11,60
Rodovia Castello Branco, km29-30	566	28	4,95
Rodovia dos Bandeirantes, próximo ao aterro sanitário de Perus	640	29	4,53
Av. Inajar de Souza, altura da Av. Nossa Senhora do Ó	139	1	0,72
Marginal Tietê, sobre a ponte da Vila Guilherme - Pista expressa	858	6	0,70
Av. Luiz Dumont Villares, altura da Av. Gal. Ataliba Leonel	45	1	2,22
Rodovia Fernão Dias	274	21	6,93
Rodovia Presidente Dutra Km 211	688	32	4,65
Av. Professor Vicente Rao	93	0	0,00
Rodovia dos Imigrantes, altura do trevo de Diadema	186	2	1,08
Av. Ricardo Jafet, 2133/3000	116	1	0,86
Rodoanel Mário Covas- Trecho Sul	481	17	3,53
Rua da Consolação, altura 1660, cemitério1	58	0	0,00
Av. do Estado,5000/ 5382	156	6	3,85
Av. Celso Garcia, 3396	35	0	0,00
Av. Salim Farah Maluf, altura da Av. Álvaro Ramos	401	31	7,73
Av. Aricanduva, 12050/12011	113	3	2,65
Rodovia Anchieta, altura do km 20 S. Bernardo	217	12	5,53

APÊNDICE A – ROTEIRO PARA IMPLANTAÇÃO DE SENSORIAMENTO REMOTO COMO COMPLEMENTO DE I/M

Como produto técnico deste trabalho, é apresentado um roteiro para implantação de sistemas de sensoriamento remoto como forma de selecionar ou liberar veículos de inspeções ambientais.

Há seis etapas básicas que devem ser seguidas de forma a garantir a utilização de sensoriamento remoto de forma eficaz, otimizando os ganhos ambientais locais e refletindo positivamente a cultura de manutenção veicular preventiva da sociedade. As etapas são as seguintes: definição da frota alvo; definição dos poluentes a serem medidos; escolha do tipo de equipamento de SR; definição dos pontos de utilização dos equipamentos; definição dos limites para *high* e *low emitters;* equipamentos de SR em funcionamento.

1. Definição da Frota Alvo

A frota a ser inspecionada direciona todas as próximas definições do projeto, e por isso deve ser a primeira etapa do processo. Pode-se iniciar o processo com SR com a frota de menor volume, seguindo para a de maior. Isso garante que o processo seja incorporado de forma gradual e corrigindo possíveis falhas de execução, em momento que se lida com público alvo menor.

Iniciar trabalhos com SR na frota de veículos a diesel se torna interessante para o Estado de São Paulo, uma vez que esta possui frota relativamente pequena, porém é uma das principais responsáveis por emissões de NO_X e MP.

2. Definição dos Poluentes a Serem Medidos

Assim como a frota alvo, a escolha dos poluentes que serão medidos durante as inspeções define etapas futuras, como a escolha dos equipamentos por exemplo.

Os equipamentos de SR mais utilizados atualmente são capazes de medir os principais poluentes emitidos tanto por veículos do ciclo Otto, quando do diesel.

Para veículos do ciclo diesel, é importante que sejam medidos o NO_X e MP (que é realizado de forma aproximada por opacidade). Para veículos do ciclo Otto, geralmente são analisados CO, HC e NO_X. Segundo estudos de Branco et al. (2021), já se torna necessário limitar as emissões de MP também em automóveis, diante da significativa redução das emissões pelos veículos diesel.

3. Escolha do Tipo de SR

O tipo de SR a ser utilizado depende de muitos fatores, como a frota alvo escolhida e os poluentes a serem analisados. Além disso, os custos envolvidos para cada tipo de SR são diferentes e devem ser analisados durante a definição do projeto.

Atualmente existem duas categorias de SR, a *cross road* e a *top down*. Levando-se em conta somente a frota alvo e os poluentes medidos por cada uma das categorias, a *top down* possui ligeira vantagem, pois é capaz de avaliar as emissões veiculares independentemente da localização do escapamento. Além disso, de acordo com as configurações atuais, esse tipo de equipamento é capaz de identificar se o veículo está em funcionamento ainda a frio, o que descarta a medição.

Análises de viabilidade e de custo-benefício mais aprofundadas devem ser realizadas para cada um dos tipos de equipamentos, de forma a garantir a melhor escolha.

4. Pontos de Utilização do SR

Os locais de utilização dos sistemas de SR devem ser escolhidos de forma fundamentada, para garantir medições precisas e dentro dos critérios de avaliação.

Segundo Bruni (2018) e Connecticut (2019), os locais devem possuir as seguintes características:

- Pista com pequena inclinação positiva;
- Não deve pertencer a áreas residenciais;
- Os veículos devem estar em condição de carga moderada e dentro de limites de velocidades próprias para o método;
- A via deve possuir tráfego suficientemente alto;
- Condições ambientais: temperatura entre 7°C e 49°C, umidade entre 5% e 95%, luz consistente, altitude entre -305m e 3048m.

Além disso, para escolha dos principais pontos de inspeção com SR, deve-se levar em consideração os índices de poluentes atmosféricos, fluxos dos veículos da frota alvo e população atingida.

A população atingida é um fator importante durante a escolha. Isso porque, em alguns casos pode haver grande fluxo de veículos e em uma região com altos índices de poluentes atmosféricos, porém em regiões nas quais não há população atingida, como é o caso de regiões afastadas de centros urbanos. Essa talvez pudesse ser deixada para etapas mais avançadas da inspeção.

5. Definição dos limites

A etapa de definição dos limites de emissões, tanto para *high* quanto para *low emitters* é realizada já com o equipamento de SR, em fase de estudo da frota alvo.

Nesta etapa será utilizado o equipamento de SR nos locais previamente definidos, medindo os poluentes definidos da frota alvo.

Os limites de *high emitters* para cada fase do PROCONVE podem ser definidos estatisticamente, como mostrado por Bruni (2018). Os limites para *low emitters* podem ser definidos de forma semelhante, como mencionado também por Bruni (2018).

6. Equipamentos de SR em Funcionamento

Após todas as etapas de definições e escolhas realizadas, o processo de inspeção está pronto para ser iniciado, de acordo com a legislação vigente.

Com o programa funcionando para a frota alvo e locais previamente definidos, pode-se expandir as inspeções para outros locais, com novos equipamentos, garantindo maior abrangência das inspeções.

Consolidado o processo de inspeções com SR como complementos de medidas de I/M para a primeira frota alvo, pode-se iniciar processos ampliação das frotas a serem abrangidas pela legislação de I/M com SR.