

MONITORAMENTO DE EMISSÕES VEICULARES POR SENSORIAMENTO REMOTO

Fabio C. Branco
Gabriel M. Branco

EnvironMentality Tecnologia com Conceitos Ambientais SC, Ltda

Rafael A. Ricardi Branco
Pós-graduando, Instituto de Matemática,
Estatística e Computação Científica- UNICAMP

Alfred Szwarc
ADS tecnologia e desenvolvimento sustentável

Resumo

O método de medição de emissões veiculares por Sensoriamento Remoto foi desenvolvido na Universidade de Denver, no Colorado, EUA, na década de 80^[1]. Este método foi concebido para a medição dos poluentes em condições reais de utilização dos veículos em vias públicas, com elevada capacidade, representatividade estatística e custos baixos. Esta tecnologia permite medir simultaneamente CO, HC, NO, NO₂, SO₂, NH₃, particulados e CO₂.

Este trabalho revisa os cálculos da emissão de HC para o método de medição por Sensoriamento Remoto e propõe atualizações para sua aplicação em medições de veículos flex no Brasil. O método é adequado para o monitoramento da frota circulante e a conscientização pública para a manutenção preventiva dos veículos.

O trabalho também discute a utilização do Sensoriamento Remoto para a avaliação de veículos diesel, visando, especialmente, a identificação de fraude na utilização do reagente ARLA 32, fato que já atinge grandes proporções e resulta em significativo aumento da emissão de NOx.

Finalmente, são apresentados os resultados obtidos em cerca de 4 mil automóveis e 8 mil caminhões medidos em 2019 por Sensoriamento Remoto em demonstrações de um e quatro dias, respectivamente, que permitiram a elaboração de um diagnóstico preliminar da conformidade destas frotas e indicam a necessidade de reavaliação das estratégias adotadas atualmente pelo PROCONVE.

ABSTRACT

The Remote Sensing method of measuring vehicle emissions was developed at the University of Denver, Colorado, USA, in the 1980s^[1]. This method was developed to measure vehicle pollutants under real traffic conditions, with high fleet coverage capacity, significant statistical

representativeness and low costs. This technology allows the measurement of CO, HC, NO, NO₂, NH₃, SO₂, particulates and CO₂ simultaneously.

This paper reviews the HC emission calculations for Remote Sensing measurement and proposes updates to be applied to flex fuel vehicles. This is necessary to adapt the use of Remote Sensing in Brazil for fleet monitoring and public awareness campaigns for preventive maintenance of vehicles.

The paper also discusses the use of Remote Sensing for the evaluation of diesel vehicles, especially regarding to the fraud in the use of the ARLA 32 reagent, a fact that has already reached high proportions and results in a significant increase in NOx emissions.

Finally, the results obtained in about 4 thousand cars and 8 thousand trucks measured in 2019 by Remote Sensing demonstrations of one and three days, respectively, are presented, which allowed the elaboration of a preliminary diagnosis of the compliance of these fleets and indicate the need to review the strategies currently adopted by PROCONVE.

1. INTRODUÇÃO

As reduções das emissões de escapamento dos veículos novos, propiciadas pelo PROCONVE^a, superam 80% para todos os poluentes e já atingem 99% em alguns casos, como o do monóxido de carbono (CO) e dos hidrocarbonetos (HC), conforme dados de certificação de veículos novos.

Entretanto, por falta de manutenção, modificações feitas por usuários com os mais diversos propósitos e fraudes, o benefício ambiental esperado é seriamente comprometido. Verifica-se, portanto, a necessidade do

^a Programa de Controle de Poluição do Ar por Veículos Automotores, estabelecido pela Resolução CONAMA 18/1986.

monitoramento da frota circulante para aferir e assegurar a real efetividade dos limites de emissão estabelecidos.

O método de medição de gases por sensoriamento remoto foi utilizado pela Universidade de Denver, EUA, na década de 80 para o desenvolvimento de um equipamento (ESR) específico para a medição de emissões de veículos em tráfego real. O conceito do ESR vem sendo aprimorado e implantado com sucesso para o monitoramento estatístico da frota em vários países, visando o levantamento de dados de veículos em circulação e como meio de educação ambiental da população. Em 2017, as cidades de Londres e Paris implantaram programas de monitoramento com ESR, inicialmente com o objetivo de conscientização da população para a necessidade de cuidados adequados com os veículos para a redução da poluição do ar, e a Diretoria Geral de Meio Ambiente, da Comissão Europeia, passou a defender a extensão do programa a outras cidades europeias^[2].

No Brasil foi feito um levantamento com a utilização do ESR entre os anos de 2009 e 2011, tendo sido medidos mais de dois milhões de veículos leves no período, o que permitiu desenvolver uma correlação com os resultados do Programa de Inspeção e Manutenção de Veículos em Uso de São Paulo. A partir do final de agosto de 2019, foram realizadas novas experiências em São Paulo, estendidas a veículos pesados, que produziram os dados tomados como base para o presente trabalho. As três primeiras mediram seis mil veículos leves, sendo a primeira no campus do Instituto Mauá de Tecnologia (São Caetano do Sul), e as outras duas nos centros das cidades de São Paulo e de Campinas. A quarta demonstração foi realizada em uma praça de balanças da Rodovia Régis Bitencourt, para verificação da adaptabilidade do método aos veículos pesados. Esta experiência foi feita com o apoio da Polícia Rodoviária Federal, quando foram avaliados mais de oito mil caminhões e ônibus em quatro dias.

O ESR analisa as concentrações de poluentes a distância enquanto o veículo trafega normalmente, sem a necessidade de prepará-lo ou detê-lo para a avaliação. Cada equipamento pode avaliar mais de mil veículos por hora, em

locais com condições de tráfego apropriadas. Este método, destinado para o monitoramento de frotas em uso real, possibilita levantamentos estatísticos de grande abrangência em pouco tempo e a identificação rápida de veículos com emissão de poluentes elevada. No caso da utilização desta tecnologia em programas de inspeção periódica de veículos, aqueles identificados com emissão considerada aceitável poderiam ser dispensados de uma inspeção mais detalhada, que somente seria exigida para os veículos com emissão elevada para confirmação da ultrapassagem dos padrões de aceitabilidade ou para demonstrar que a reparação foi realizada.

2. O EQUIPAMENTO DE MEDIÇÃO POR SENSORIAMENTO REMOTO

O equipamento utilizado nas experiências brasileiras consiste em um analisador de infravermelho não dispersivo (NDIR) para detectar CO, HC e dióxido de carbono (CO₂), e outro de luz ultravioleta (UV) para a medição de monóxido de nitrogênio (NO). Os equipamentos mais modernos do mesmo tipo têm um espectrômetro dispersivo duplo UV para medir óxidos de nitrogênio separadamente (NO e NO₂), óxidos de enxofre (SO₂) e amônia (NH₃).

O equipamento também estima a massa de particulados (por UV para fumaça preta da combustão e por infravermelho para fumaça azul de óleo lubrificante). Esta avaliação, expressa em % da massa de combustível ou gramas de MP diesel/100g de combustível, considera uma distribuição arbitrária do tamanho de partículas. Os comprimentos de onda utilizados na faixa UV são mais adequados e sensíveis às partículas de 100nm, que são a maior parte da massa de MP de escapamento, mas diferem dos adotados nos opacímetros comuns^[3], como mostra a figura 1, de forma que a comparação destes resultados com limites de emissão associados aos métodos convencionais não é direta (leituras iguais a 1,0 correspondem aproximadamente à opacidade de 10%)^[4]. Entretanto, estas medições produzem resultados comparativos importantes, especialmente para identificar veículos de alta emissão.

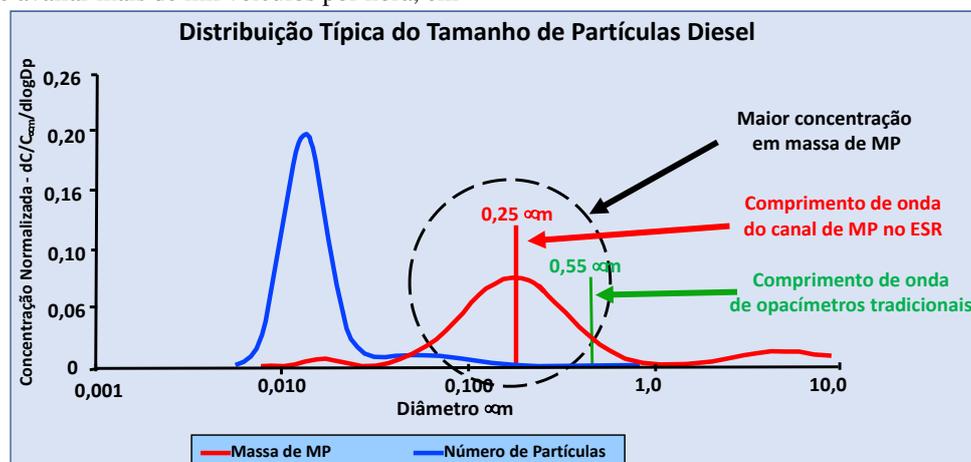


Figura 1 – Tamanho de partículas x comprimento de onda

As unidades de fonte e detector são posicionadas ao lado da via de tráfego e um conjunto de espelhos do lado oposto retorna os feixes colineares de NDIR e UV ao detector que, em seguida, são focados em um divisor de feixe dicróico, que os separa em seus componentes para cada conjunto analisador.

A luz infravermelha é então dirigida para um espelho poligonal giratório, que espalha a luz pelos quatro detectores de infravermelho: CO, CO₂, HC e de referência. A luz UV é refletida na superfície do espelho dicróico e focalizada na extremidade de um feixe de fibra de quartzo, dividido para transportar o sinal UV para dois espectrômetros separados. O primeiro trabalha na faixa de 200 nm a 227 nm para medir os picos de SO₂, NH₃ e NO. A absorbância de cada gás no espectro UV é comparada a um espectro de calibração usando uma rotina clássica de ajuste de mínimos quadrados para obter as emissões do veículo. O segundo espectrômetro mede apenas NO₂ numa banda de absorbância de 438nm (ainda no espectro UV) e comparando-o com um espectro de calibração na mesma faixa.

Junto ao analisador, são montados três emissores de laser próximos ao solo e perpendiculares ao eixo da via, com refletores do lado oposto, que servem para medir a velocidade dos veículos ao passarem em frente, a partir dos tempos medidos entre as interrupções dos feixes de luz pelos pneus. Pelas diferenças de velocidade entre os pneus

dianteiros e traseiros associadas ao tempo entre as duas medições, são calculadas também a aceleração do veículo. Com base na aceleração e na inclinação da pista são calculadas as forças necessárias ao movimento do veículo que, multiplicadas pela velocidade permite estimar a potência por tonelada empregada no momento da medição.

O equipamento também tem uma câmera para tomar a imagem da placa para identificação posterior do veículo e comparação com os parâmetros de referência aplicáveis ao modelo (figura 2).

Existem basicamente dois tipos de equipamentos, de maneira que os raios cruzam a pluma no sentido vertical ou horizontal. O tipo vertical tem a vantagem de avaliar os veículos por cima e permite cobrir mais de uma faixa de rolamento, mas necessita de um refletor instalado na pista. Instalações fixas prestam-se mais à fiscalização em locais definidos, enquanto que as móveis requerem uma proteção adicional, mas são portáteis e se prestam melhor ao monitoramento em locais variados, minimizando os efeitos de evasão da via por transgressores contumazes que se comunicam entre si. Este tipo de instalação é também mais recomendado para programas piloto destinados ao levantamento e conhecimento da frota para definição dos programas mais amplos de fiscalização sistemática (figura 3).



Figura 2 – Esquema de instalação do ESR

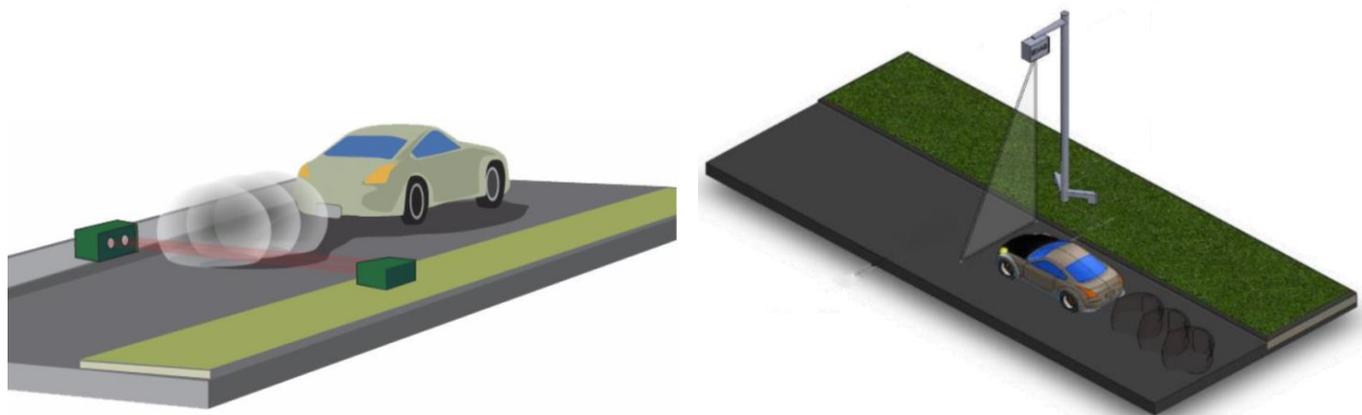


Figura 3 – Tipos de instalação de ESR horizontal e vertical

3. O PROCESSO DE MEDIÇÃO E CÁLCULO DAS EMISSÕES

O equipamento utilizado para a medição de emissões de poluentes veiculares por sensoriamento remoto nesta experiência é o do tipo horizontal. Este equipamento faz uma amostragem dos gases sobre a pista de rolamento em frequência de 100 vezes por segundo, sendo computados os valores das medições durante 0,5 segundo após a passagem do veículo, dos quais são descontados os valores de “background” medidos imediatamente antes deste chegar ao equipamento. Desta forma, são minimizadas as interferências do veículo anterior ao que está sendo medido. Eventualmente esse desconto produz valores negativos em veículos de emissão muito baixa, entretanto tais valores não devem ser desprezados, para manter a integridade da caracterização da frota como um todo, pois a remoção das leituras negativas introduziria um desvio para o positivo^b.

3.1. PRINCÍPIOS FÍSICOS E MÉTODO DE CÁLCULO DAS EMISSÕES

O caminho dos feixes de luz na pluma de escapamento e a densidade da pluma observada são altamente variáveis de veículo para veículo e dependem, entre outras coisas, da altura do tubo de escape do veículo, vento e turbulência atrás do veículo. Por esta razão as séries temporais das concentrações medidas apresentam variações grandes e aleatórias (figura 4, esquerda), entretanto as proporções entre as concentrações são as mesmas, uma vez que apenas a diluição varia de ponto para ponto da atmosfera^[5], conforme mostra a regressão linear no gráfico da direita da figura 4.

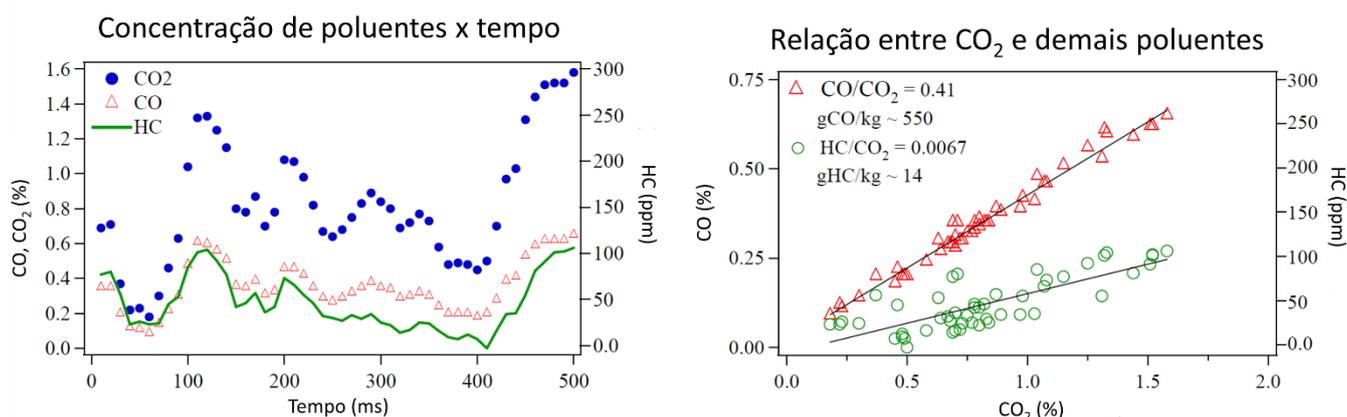


Figura 4 – Método de cálculo das emissões com base na concentração de CO₂

^b Se um grupo de veículos tiver metade das leituras iguais a 100 ppm de HC e a outra metade iguais a -50 ppm, por ex., a sua média seria de 25 ppm. Se os valores negativos fossem retirados, a média passaria a 100 ppm, enquanto que se fossem aproximados para zero, esta se aproximaria de 50 ppm apenas. Por isso,

recomenda-se que os valores negativos sejam tomados iguais a zero nos relatórios de análises individuais de veículos e mantidos com os valores originais para fins de inventário.

Por esses motivos, o ESR mede diretamente apenas as proporções molares de CO, HC, NO, SO₂, NH₃ ou NO₂ em relação ao CO₂, expressas em porcentagem molar de cada poluente nos gases de escapamento, ou seja, como quocientes denominados QCO, QHC, QNO, QSO₂, QNH₃ e QNO₂, respectivamente. Estas proporções são os parâmetros úteis para descrever a combustão de hidrocarbonetos em um sistema e o equipamento processa as leituras fazendo uma regressão linear das concentrações de cada poluente em relação à de CO₂, tomando cada coeficiente angular determinado como os quocientes acima, expressos em “% / %” ou “ppm / %”.

Desta forma, torna-se possível calcular as emissões do veículo em gramas de poluente por mol de carbono ou por quilograma de combustível queimado. Este recurso permite a comparação dos resultados do ESR com ensaios feitos pelos demais métodos de laboratório.

A medição de HC por NDIR, tradicionalmente utilizada em programas de inspeção e expressa em ppm de hexano, apresenta resultados equivalentes à metade daqueles expressos em ppm de propano^c, em uma base por átomo de carbono, que são obtidos com a detecção por ionização de chama (FID) em laboratório e utilizados como referência legal, neste trabalho referidos como HC3 e HC6. O ESR é

$$\frac{n^{\circ}mol_poluente}{n^{\circ}mol_C} = \frac{n^{\circ}mol_poluente}{(n^{\circ}mol\ CO + n^{\circ}mol\ CO_2 + 3 * n^{\circ}mol\ HC_{propano})} \quad (1)$$

Ou, utilizando as razões entre as concentrações dos gases:

$$\frac{n^{\circ}mol_poluente}{n^{\circ}mol_C} = \frac{(\%poluente / \%CO_2)}{(\%CO / \%CO_2) + 1 + 3 * (\%HC_{propano} / \%CO_2)} = \frac{Q_{pol}}{1 + Q_{CO} + 3Q_{HC_{propano}}} \quad (2)$$

Na sequência, a massa de poluente por massa de carbono é dada pela multiplicação de cada mol pelo respectivo peso molecular:

$$\frac{massa_poluente}{mol_C} = \frac{Q_{pol} * Massa\ molecular_{pol}}{(1 + Q_{CO} + 3Q_{HC_{propano}})} \quad (3)$$

A partir deste ponto, é possível converter as medições das emissões em massa para:

- gramas de poluente / kg de combustível, se este for conhecido, ou
- gramas de poluente / kWh, se conhecido o consumo específico do motor, ou

calibrado com propano e expressa seus resultados desta forma.

Nos equipamentos tradicionais, a medição de óxidos de nitrogênio é apenas da concentração de NO, desprezando as concentrações de NO₂ por serem inferiores a 5% do total de NOx. Por outro lado, a emissão de NOx é definida para os efeitos de ensaios de laboratório e comparação com os limites legais como a soma das concentrações de NO e NO₂, como se o primeiro estivesse na forma do segundo, e utiliza-se a densidade do NO₂ para o cálculo da emissão de NOx em massa, apesar do NO ser a maior parcela. Por isso, as medições por ESR também devem ser tratadas como NO₂ para efeito de comparação com resultados obtidos em laboratório ou mesmo com limites oficiais da emissão de NOx.

A conversão das medições para gramas de poluente por quilograma de combustível (g/kg) é bastante precisa, sendo especialmente útil e seguramente comparável aos resultados de laboratório expressos em g/km ou em g/kWh. Essa conversão é obtida diretamente, convertendo primeiro as leituras da proporção de poluentes em moles de poluente por moles de carbono nos gases de escape, usando a seguinte equação^[6]:

- gramas de poluente / km, se for conhecido o consumo de combustível do veículo por km rodado.

As unidades acima se prestam a diferentes comparações: a primeira é muito útil para comparar tecnologias e calcular inventários rapidamente a partir das vendas de combustíveis por região; a segunda é a unidade utilizada para caracterizar motores e também permite comparar tecnologias, independentemente do tamanho do motor; a terceira é mais usada para a elaboração de

^c A proporção correta entre estes resultados é dada pela razão entre os pesos moleculares de hexano (C₆H₁₄) e propano (C₃H₈), ou seja, 86/44=1,955.

inventários a partir do conhecimento das frotas e dos hábitos de condução de veículos. Para efeito de monitoramento e inventário de emissões, estes cálculos podem ser aproximados por valores médios do consumo (por km ou por kWh) em condições normais de utilização, que são bem representados pelos resultados obtidos em ciclos de condução padrão.

Comparando as propriedades dos combustíveis utilizados no Brasil (tabela 1), é importante observar que a

massa de combustível por mol de carbono é a mesma para gasolina e diesel, mas difere para o etanol. Entretanto, a densidade energética por mol de carbono é praticamente igual a 0,60 MJ/C para os três combustíveis, o que permite que o cálculo seja realizado com os parâmetros válidos para a gasolina, inclusive o consumo médio em MJ/km, que é o fator determinante do consumo e da produção de emissões. Este artifício é particularmente importante para o monitoramento de veículos flex, nos quais não se conhece qual combustível está sendo utilizado no momento da medição.

Tabela 1 - Propriedades dos principais combustíveis brasileiros:

	Fórmula reduzida			Densidade g/litro	Combustível				
	C	H	O		(g/mol reduzido)	kg/mol C	MJ/kg	MJ/mol C	A/C_est
Gasolina pura	1	2	0	730	14,0	0,0140	42,7	0,598	14,71
Gasool E22	1,0	2,159	0,079	743	15,4	0,0154	39,2	0,604	13,35
Gasool E25	1,0	2,182	0,091	745	15,6	0,0156	38,7	0,605	13,17
Gasool E60 (hidrat 95%)	1,0	2,567	0,283	772	19,1	0,0191	32,4	0,618	10,78
Etanol hidratado a 95%	1,0	3,170	0,585	801	24,5	0,0245	25,5	0,625	8,39
Diesel	1,0	2,000	0,000	835	14,0	0,0140	42,5	0,595	14,71

Portanto, o cálculo da emissão por MJ de combustível pode ser feito a partir da equação a seguir^d e tomado como o resultado básico da medição por sensoriamento remoto,

praticamente isento de aproximações, e a ser convertido posteriormente para g/km ou g/kWh com o consumo referido à energia expressa em MJ:

$$\frac{\text{massa}_{poluente}}{MJ} = \frac{Q_{pol} * \text{Massa molecular}_{pol}}{0,60 * (1 + Q_{CO} + 3Q_{HC_{propano}})} \quad (4)$$

Nota: para expressar os resultados como hexano (geralmente em programas I/M), as concentrações medidas como propano devem ser divididas por 2 e o valor da massa molecular na equação acima deve ser a do hexano.

A partir da equação (4) a emissão em g/km é calculada com o consumo médio de referência do veículo dado em MJ/km. Alternativamente, a emissão específica em g/kWh é

calculada com o consumo específico médio de referência do motor expresso em MJ de energia interna do combustível por kWh produzido no eixo.

$$\begin{aligned} \text{Emissão em } \frac{g}{km} &= \frac{\text{Massa poluente}}{MJ} * \frac{\text{consumo em MJ}}{km} = \\ &= \frac{\text{Massa poluente}}{MJ} * \frac{\text{densidade}(kg/L) * MJ/kg}{\text{autonomia}(km/L)} \quad \text{ou} \end{aligned} \quad (4a)$$

$$\begin{aligned} \text{Emissão em } \frac{g}{kWh} &= \frac{\text{Massa poluente}}{MJ} * \frac{MJ \text{ de combustível}}{kWh \text{ no eixo}} = \\ &= \frac{\text{Massa poluente}}{MJ} * \frac{\text{cons. espec}(g/kWh)}{1000} * MJ/kg \end{aligned} \quad (4b)$$

^d Adotado o conteúdo energético da gasolina de 0,60MJ/mol de carbono, como referência internacional, o que introduz erro de 0,7% para o E22 até 4,1% para o E100.

Para os levantamentos estatísticos, os parâmetros de autonomia e consumo de combustível utilizados nas equações 3-a e 3-b devem ser assumidos como os valores médios representativos para as condições do tráfego nos locais de medição, exemplificados na tabela 2. Entretanto, para o cálculo das emissões de um veículo individualizado, a medição expressa em g_{poluente}/MJ (equação 2) tem o valor mais preciso e válido para qualquer combustível, sendo que o cálculo em g/km ou g/kWh poderá ser aprimorado se forem utilizados os valores do próprio modelo para considerar as suas peculiaridades (como os automóveis híbridos, da ordem de 20 km/L, e outros, como carros de alta potência, de 5 km/L). De uma forma exploratória, análises estatísticas podem ser feitas tomando-se por base os seguintes dados, considerados como os mais representativos das frotas brasileiras^[7]:

Tabela 2 – Consumos típicos de veículos e motores brasileiros

Consumos	km/L	g/kWh (*)
Automóveis Flex gasolina	13,2	350
Com. Leves flex gasolina	9,9	350
Comerciais leves diesel	10,8	240
Microônibus	3,3	230
Ônibus urbanos	2,1	220
Ônibus rodoviários	3,4	210
HDV leves	5,6	223
HDV pesados	3,6	210

(*) Médias de veículos leves 2012 a 2019 corrigidas para uso real e valores de produção no ensaio 13 pontos para motores Diesel de veículos pesados

A determinação direta da emissão em g/kg de combustível pode ser feita utilizando o parâmetro de massa de combustível por mol de carbono, associando os resultados das medições por ESR diretamente ao consumo instantâneo de combustível, determinado pelo balanço de carbono da própria medição. Este cálculo produz um resultado equivalente e indicador da emissão específica, comparável às expressas em g/kWh.

$$\frac{\text{massa}_{poluente}}{\text{kg de combustível}} = \frac{Q_{pol} * \text{Massa molecular}_{pol}}{(\text{kg combustível} / \text{mol}) * (1 + Q_{CO} + 3Q_{HCpropano})} \quad (5)$$

Onde:

(kg combustível/mol) é igual a:

- 0,0140 para gasolina pura e óleo diesel; ou
- 0,0154 para gasool E22 (referência para os veículos flex);
- outras proporções de etanol podem ser calculadas como E22

Poluente	CO	Propano	NO (*)	NO ₂	SO ₂	NH ₃
Massa molecular – g/mol	28	44	30	46	64	17

(*) Para o cálculo do conjunto de NO_x deve ser utilizada a massa molecular do NO₂

Embora a referência internacional seja desconsiderada em favor da referência brasileira de certificações, a adoção do parâmetro de 0,0154 kg de combustível por mol de carbono, associado ao consumo de referência certificado para a gasolina E22, o que resulta em desvio de 10% a menos na emissão, se os cálculos fossem feitos para gasolina pura. Este cálculo configura-se numa boa prática a ser seguida também em veículos abastecidos com teores mais elevados de etanol porque a emissão por quilo de combustível diminui com o teor de etanol, mas é compensada pelo aumento do consumo do motor, que se mantém em MJ/km. Portanto, este cálculo pode ser realizado para todos os veículos como se estivessem com o combustível de referência E22, associado ao seu consumo com este combustível, mesmo que o veículo esteja abastecido com teores diferentes de etanol.

3.2 VALIDAÇÃO DAS MEDIÇÕES E CÁLCULO DA POTÊNCIA

O software do ESR avalia a qualidade da pluma de gases para verificar se o decaimento das concentrações de poluentes e CO₂ guardam uma proporção que possa ser definida por uma regressão linear entre eles ou se houve alguma interferência significativa (vento, diluição excessiva, poeira, chuva etc.), que possa interferir nos valores de emissão medidos. Uma vez verificada esta condição, as leituras dos gases são consideradas como válidas e os quocientes entre as concentrações de cada poluente e do CO₂ são determinados como resultados primários da medição.

A seguir são validadas a velocidade e aceleração para verificar se a potência aplicada ao movimento do veículo no momento da medição se situa no intervalo válido, para que não sejam consideradas medidas feitas em situações extremas de carga.

Uma vez validadas a velocidade e a aceleração, é calculada a potência específica do veículo (VSP - Vehicle Specific Power) no momento da medição, com base na inclinação da pista, na velocidade e na aceleração, conforme descrito em 2.

4. ESCOLHA DOS LOCAIS DE MEDIÇÃO E SIGNIFICÂNCIA DOS RESULTADOS

A correlação entre as concentrações de gases medidas por ESR e outros equipamentos é muito boa, biunívoca, como a que foi demonstrada para os ensaios de motores em marcha lenta, no Programa I/M-SP^[8].

A correlação entre os resultados obtidos por ESR com outros tipos de ensaios deve ser levantada estatisticamente para cada categoria de veículo, visto que cada procedimento de certificação submete o veículo a diferentes regimes de

funcionamento, conforme o ciclo de ensaio, aos quais o limite legal de emissão está associado.

4.1 REPRESENTATIVIDADE DAS MEDIÇÕES POR ESR

É sabido que as emissões variam com a carga do motor, sendo maiores em cargas mais elevadas e nas cargas baixas quando a combustão é mais instável. Entretanto, quando divididas pela massa de combustível queimado, as emissões “específicas”, expressas em gramas de poluente por quantidade de combustível queimado (g/kg ou em g/MJ), se apresentam em valores estáveis numa ampla faixa de potências e velocidades^[9], como mostra o “mapa do motor” apresentado^e no gráfico inferior da figura 5. Com exceção das zonas de potência máxima e de alto torque em baixa RPM (“motor forçado”), que são utilizadas mais raramente, pode ser observado que as variações dessa emissão com os regimes de funcionamento do motor ficam abrigadas por uma faixa de tolerância relativamente pequena (menos que 20% acima da média de todo o mapa). Este fato permite a determinação de valores de referência para uma ampla faixa de condições de carga no momento da medição, a serem utilizados em programas baseados em medições por ESR.

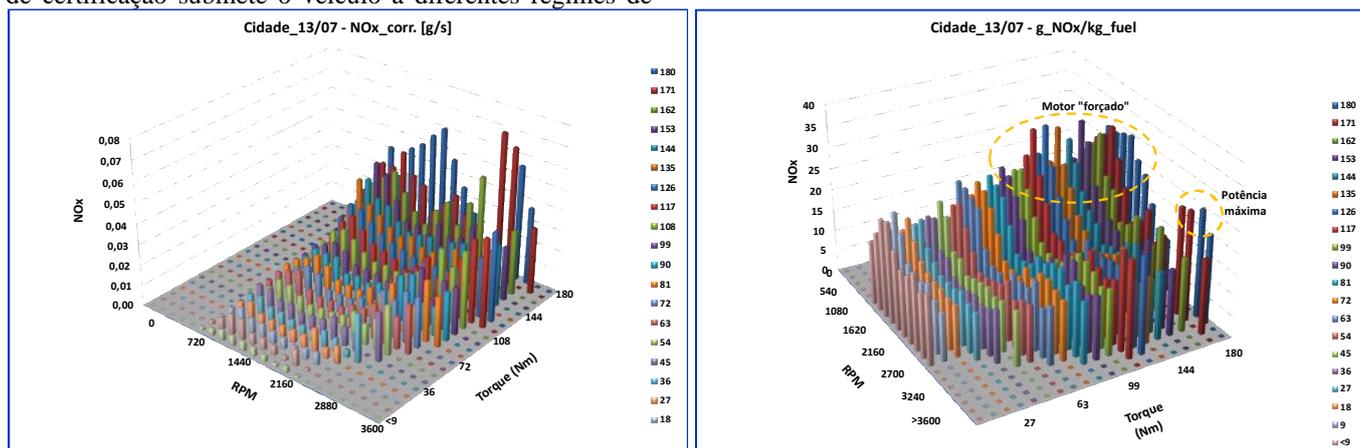


Figura 5 – Emissão típica de NOx para um motor Diesel no mapa de torque/RPM obtidas no trânsito real em g/s e g/kg_combustível

A medição por ESR “flagra” o veículo numa situação instantânea de carga e velocidade, resultante das características do tráfego e da inclinação da via no local da medição. Nas campanhas de medição de emissões por ESR procura-se instalar os equipamentos em locais que façam com que as cargas dos motores recaiam sobre a região de potências médias no mapa do motor e de ocorrência mais frequente nos ensaios de certificação. A tabela 3 mostra os níveis de emissão de NOx de um motor Diesel de automóvel em tráfego real, indicando em vermelho os picos de emissão que devem ser evitados no monitoramento, por corresponderem a situações extremas, mas permitidas e

incluídas no ciclo de certificação com baixa percentagem do tempo de operação, por ocorrerem raramente em tráfego real. A área circundada por um retângulo azul representa as faixas de velocidade e potência mecânica que definem a região onde o monitoramento por ESR produz leituras uniformes e confiáveis neste motor. Esta área do mapa do motor cobre mais de 40% dos regimes de funcionamento de um veículo em tráfego urbano real e 52% dos regimes de funcionamento que compõem o ciclo de ensaio de certificação de veículos leves da ABNT NBR 6601, conferindo grande

^e Este gráfico indica a emissão de NOx de um motor Diesel para cada combinação de carga e velocidade de rotação em que ele pode funcionar. As condições flagradas estatisticamente nos veículos em trânsito podem ser comparadas com a área

correspondente deste mapa para determinar a correlação entre as medições e o estabelecimento de valores de referência para cada método de teste.

representatividade ao monitoramento por ESR e garantindo a comparabilidade dos resultados.

Tabela 3 – Emissão específica de NOx (g/kg_combustível) nas condições tráfego real em ambiente urbano

		Velocidade do veículo (km/h)													
		0	0 a 5	5 a 10	10 a 15	15 a 20	20 a 25	25 a 30	30 a 35	35 a 40	40 a 45	45 a 50	50 a 55	55 a 60	60 a 65
Potência na roda [kW]	37,5 a 40														
	35 a 37,5														
	32,5 a 35														
	30 a 32,5														
	27,5 a 30														
	25 a 27,5														
	22,5 a 25														
	20 a 22,5														
	17,5 a 20														
	15 a 17,5														
	12,5 a 15														
	10 a 12,5														
	7,5 a 10														
	5 a 7,5														
	2,5 a 5														
	0 a 2,5														
	-2,5 a 0														
-5 a -2,5															
-7,5 a -5															
-8 a -7,5															
<-8															

Legenda	Emissão baixa	Emissão média	Emissão alta	ESR
---------	---------------	---------------	--------------	-----

A tabela 4 mostra as percentagens de tempo dispendido pelo motor deste mesmo exemplo em cada regime de funcionamento durante um ciclo de condução FTP, que correspondem aos pesos dados pela legislação a cada um para a determinação do fator de emissão médio, certificado para o veículo em questão por meio do ensaio conforme a

ABNT NBR 6601. Este fator médio é o parâmetro limitado pela regulamentação ambiental.

Tabela 4 – Percentagem de tempo dispendido pelo motor durante o ciclo de condução FTP

		Velocidade do veículo (km/h) - FTP													
		0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65
Potência na roda [kW]	>=40								0,0%	0,1%	0,0%	0,1%	0,1%	0,1%	0,1%
	37,5								0,0%	0,0%	0,0%	0,1%	0,0%	0,0%	0,0%
	35,0								0,0%	0,1%	0,0%	0,1%	0,0%	0,0%	0,0%
	32,5								0,1%	0,1%	0,1%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
	30,0							0,0%	0,1%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
	27,5							0,1%	0,1%	0,1%	0,1%	0,1%	0,0%	0,0%	0,0%
	25,0							0,1%	0,1%	0,1%	0,1%	0,1%	0,0%	0,0%	0,0%
	22,5							0,2%	0,3%	0,2%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
	20,0					0,0%	0,2%	0,2%	0,2%	0,2%	0,1%	0,0%	0,1%	0,0%	0,0%
	17,5					0,2%	0,3%	0,3%	0,3%	0,5%	0,2%	0,1%	0,2%	0,1%	0,1%
	15,0				0,0%	0,3%	0,4%	0,4%	0,4%	0,5%	0,4%	0,5%	0,2%	0,4%	0,1%
	12,5			0,1%	0,3%	0,5%	0,6%	0,4%	0,5%	0,4%	0,7%	0,4%	0,5%	0,2%	0,2%
	10,0			0,3%	0,5%	0,4%	0,5%	0,5%	0,6%	0,8%	1,5%	0,6%	0,1%	0,3%	0,3%
	7,5			0,4%	0,5%	0,5%	0,4%	0,6%	0,9%	1,6%	1,7%	0,6%	0,2%	2,0%	0,2%
	5,0		0,1%	0,4%	0,2%	0,2%	0,7%	0,3%	0,8%	1,2%	4,3%	2,0%	0,4%	0,2%	0,2%
	2,5		0,4%	0,1%	0,4%	0,2%	0,4%	0,7%	1,5%	3,4%	2,7%	0,5%	0,2%	0,2%	0,2%
	0,0	17,9%	3,4%	0,5%	0,3%	0,2%	0,3%	0,4%	0,4%	1,3%	0,7%	0,3%	0,3%	0,1%	0,1%
-2,5		1,6%	0,2%	0,2%	0,4%	0,0%	0,1%	0,5%	0,4%	1,0%	0,3%	0,2%	0,1%	0,1%	
-5,0		0,2%	0,9%	0,1%	0,1%	0,2%	0,0%	0,4%	0,5%	0,6%	0,2%	0,1%	0,0%	0,0%	
-7,5			0,6%	0,2%	0,1%	0,1%	0,1%	0,3%	0,5%	0,4%	0,1%	0,1%	0,1%	0,1%	
<-8			0,2%	0,8%	0,1%	0,1%	0,2%	0,7%	0,5%	0,3%	0,1%	0,2%	0,0%	0,0%	

Legenda	Pontos mais frequentes	ESR
---------	------------------------	-----

Em decorrência das características dos veículos e motores indicadas acima, a escolha dos locais de medição é bastante importante para que o veículo seja avaliado em condições médias de carga, características do uso do veículo em trânsito urbano, e condizentes com as condições dos

ensaios associados aos limites de emissão estabelecidos pela legislação. Essas características são avaliadas e controladas mediante o cálculo da potência mecânica na roda, aplicada pelo veículo no momento da medição, determinada a partir das medições da aceleração do veículo e da inclinação da

pista. Este controle determina os critérios de escolha dos locais de medição para se obter o maior número possível de medições consideradas válidas.

A experiência internacional recomenda a escolha de locais com inclinações entre 2% e 10%, onde os veículos se apresentam em situações médias de potência (tipicamente entre 5 e 15 kW/tonelada) e as medidas são seguramente representativas por não refletirem as condições extremas de carga mencionadas acima. Este parâmetro é monitorado pelo ESR individualmente em cada medição para interpretação dos resultados e caracterização das estatísticas do monitoramento da frota. Adicionalmente, em programas de fiscalização, uma pequena fração da frota tem emissões muito acima dos padrões estabelecidos e a sua identificação caracteriza a desconformidade do veículo indubitavelmente por estar muito acima das tolerâncias inerentes às medições.

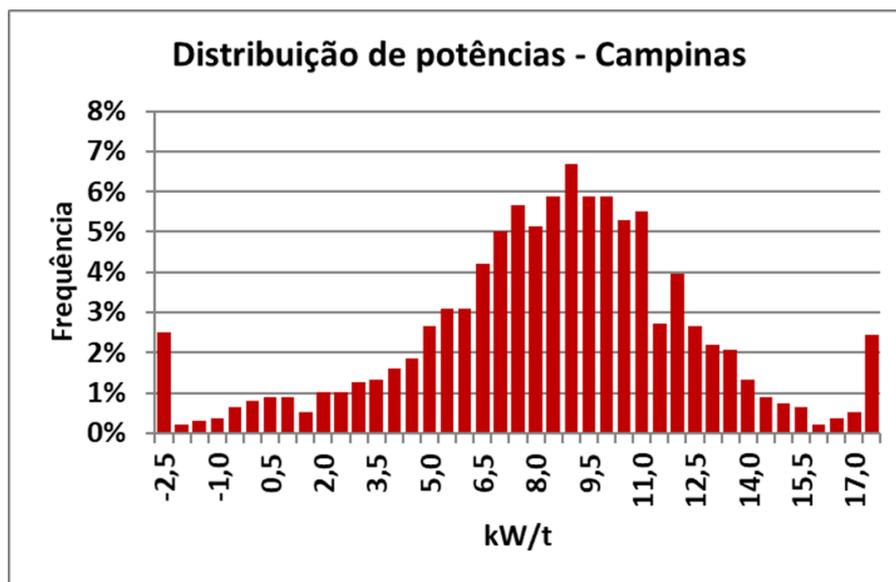
4.2. DEPENDÊNCIA DOS RESULTADOS ESR COM A POTÊNCIA APLICADA AO MOVIMENTO

De uma maneira geral, as emissões dependem do nível tecnológico dos veículos medidos e a potência aplicada ao

movimento pode influenciar a emissão de cada poluente de maneira distinta. Para avaliar a escolha dos locais utilizados neste experimento, foram feitas comparações entre a potência calculada pelo software do equipamento (em função da inclinação da pista, velocidade e aceleração do veículo) e as emissões medidas. Em cada local de medição foi verificado o intervalo de potências em que o experimento foi feito e a dependência entre a emissão de cada poluente e a potência. Para estas comparações foi tomada a emissão em gramas de poluente por MJ de energia interna do combustível queimado, tendo sido consideradas apenas os veículos das fases mais recentes (P5 e P7 para os caminhões e L5 e L6 para os automóveis) para minimizar o efeito da deterioração nesta análise de consistência dos resultados.

a. Veículos leves

No local de medições de veículos leves, em Campinas, 95% dos veículos apresentaram potências entre -2,5 kW/t (veículos que frearam no momento da medição) e +17 kW/t, conforme o histograma da figura 6.



Nota: os extremos acumulam os valores externos ao intervalo de potências considerado

Figura 6 – Distribuição das potências nas medições de veículos leves

Nessas medições, em cerca de 1360 automóveis da fase L6 veículos, não se observa qualquer tendência de variação com a potência, como mostra a figura 7.

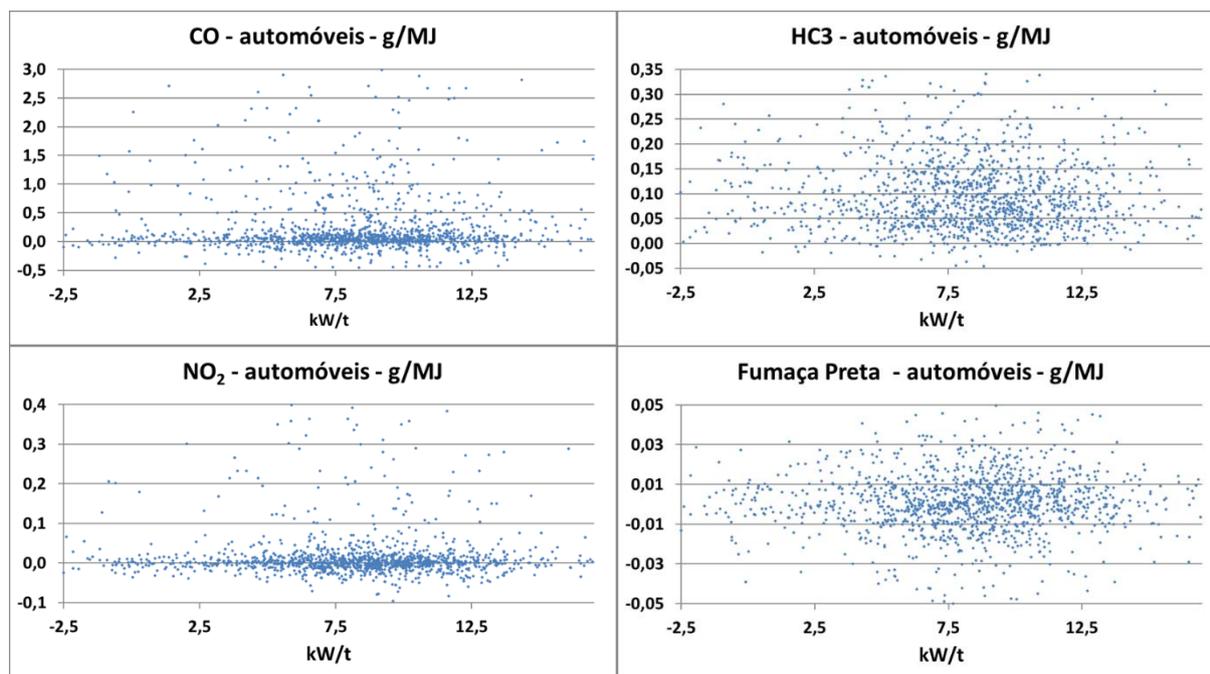


Figura 7 – Distribuição das potências nas medições de veículos leves

Para realizar uma análise mais aprofundada, as observações foram divididas em cinco intervalos de potência de mesmo comprimento, e estes foram comparados em diagramas de caixa ou “boxplots”, que é uma análise gráfica simples, de fácil leitura e de ajuste robusto, cuja interpretação não exige a formulação de suposições sobre a distribuição dos dados. Os diagramas de caixas retiram os valores extremos das amostras quando estes são muito aberrantes (outliers), e apresentam o mínimo (p0), o primeiro quartil (p25), a mediana (p50), o terceiro quartil (p75) e o máximo (p100) das amostras reduzidas. A figura 8 apresenta os boxplots das emissões de CO para cada intervalo de potência, sendo que as medianas e os p25 indicam pouca ou nenhuma dependência das emissões com este parâmetro, em

toda a faixa dos valores observada. Nos veículos mais novos (L6) observa-se uma elevação da emissão de CO nas potências mais altas, o que é esperado por ser a condição onde a razão ar/combustível pode deixar de ser estequiométrica, e enseja a recomendação de que esta faixa de potências seja evitada numa fiscalização. Entretanto, nos veículos L5 este efeito é encoberto pelas falhas de manutenção que elevam as emissões em todas as faixas de potência para o mesmo patamar, apesar de os limites de certificação serem os mesmos. A mesma variação foi constatada quando os resultados são expressos em g/MJ.

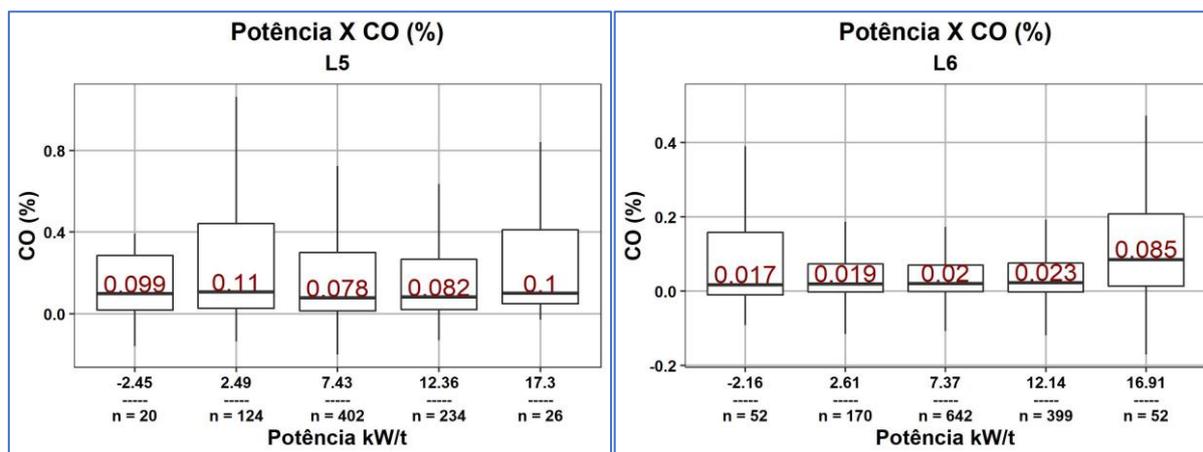


Figura 8 – Estatística das emissões de CO em função da potência – veículos leves

É importante observar que, mesmo em potências negativas (veículo freando para evitar uma fiscalização) o resultado da medição é mantido porque não dá tempo de alterar significativamente a composição dos gases produzidos imediatamente antes. Este comportamento é muito semelhante para os demais poluentes e o

aproveitamento de resultados de acordo com a potência específica pode ser sumarizado como indicado na tabela 5.

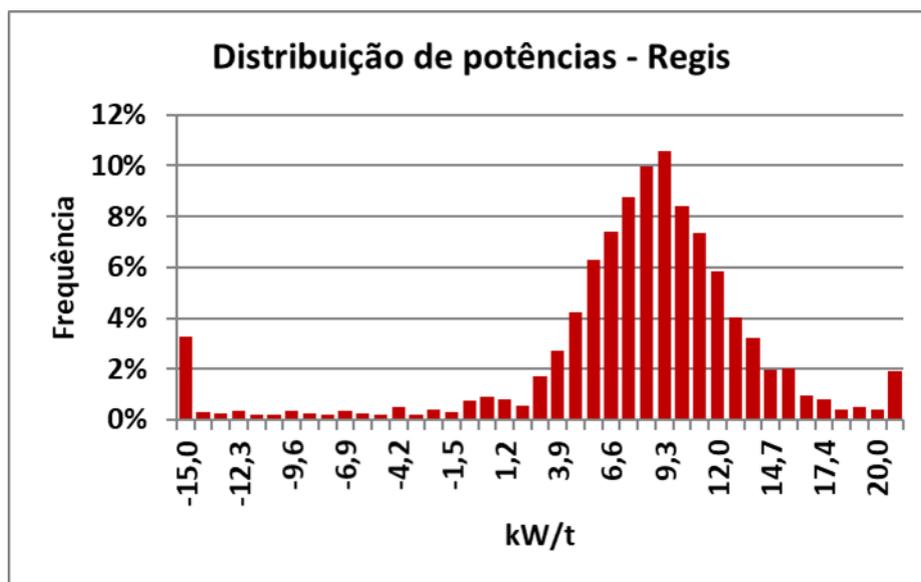
Tabela 5 – Emissões de acordo com a potência específica para automóveis

Poluente	Potência aceitável em veículos leves - kW/t				
	-5 a 0	0 a 5	5 a 10	10 a 15	15 a 20
CO	+	+	+	+	NR
HC	S	+	+	+	+
NOx	S	+	+	+	NR
MP	+	+	+	+	+
Fumaça Azul	+	+	+	+	+

+ – Potências mais apropriadas
 S – Resultados suspeitos (maior variabilidade)
 NR – Não recomendável, mas possível com maior tolerância

b) Veículos pesados:

No local de medição dos caminhões a potência mecânica variou entre -49 kW/t (veículos que frearam no momento da medição) e +56 kW/t ficando concentrada na faixa de 3 a 15 kW/t (81% das medições), conforme o histograma da figura 9. Observa-se que a faixa de variação dos valores de potência por unidade de massa do veículo é mais extensa em virtude de os caminhões apresentarem uma variação de massa (vazio ou carregado) muito maior que a dos automóveis.



Nota: os extremos acumulam os valores externos ao intervalo de potências considerado

Figura 9 – Distribuição das potências nas medições de caminhões

A mesma análise estatística feita para os veículos leves foi aplicada aos veículos pesados e produziu resultados muito semelhantes, como mostram os boxplots da figura 10

para NOx. A mesma variação foi constatada quando os resultados são expressos em concentração.

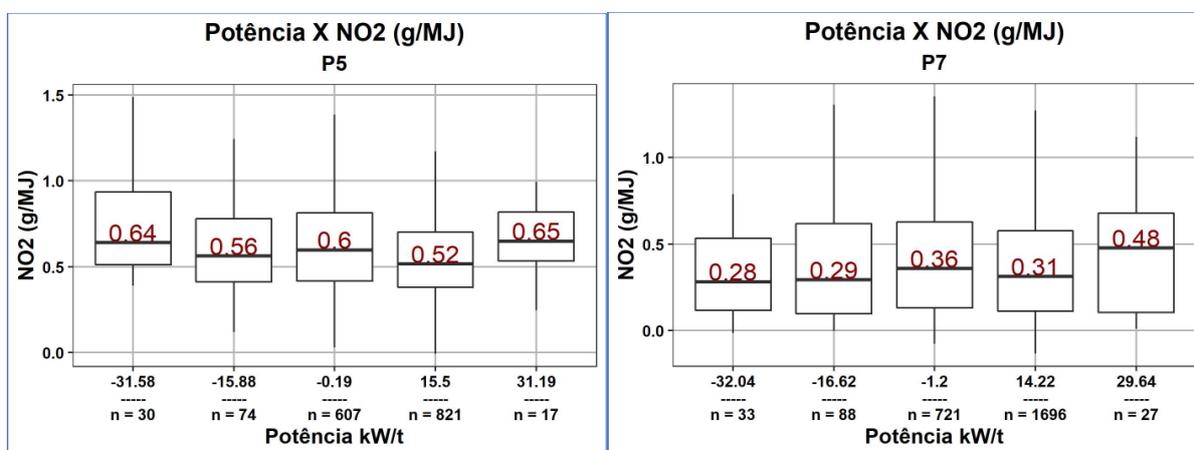


Figura 10 – Estatística das emissões de NOx em função da potência – veículos pesados

Observa-se uma elevação da emissão de NOx para potências acima de 25 kW/t nos veículos P7, o que não

ocorre nos demais. Entretanto, em caso de fiscalizações por ESR é possível ajustar o resultado para corrigir este efeito,

para evitar a perda de medições que ocorrerem em veículos descarregados.

A tabela 6 sumariza a forma de utilização dos resultados ESR para todos os poluentes e, também neste caso, as medições que ocorrerem durante frenagens momentâneas também dão os mesmos resultados.

Tabela 6 – Emissões de acordo com a potência específica para caminhões

Poluente	Potência aceitável em veículos pesados - kW/t				
	-40 a -24	-24 a -8	-8 a +8	8 a 24	24 a 40
CO	+	+	+	+	NR
HC	+	+	+	+	+
NOx	+	+	+	+	S
MP	+	+	+	+	+
Fumaça Azul	+	+	+	+	+

+ – Potências mais apropriadas

S – Resultados suspeitos (maior variabilidade)

NR – Não recomendável, mas possível com maior tolerância

Não havendo grande influência da potência sobre os resultados de emissão obtidos pela técnica do ESR, os parâmetros determinados podem ser utilizados como indicador do estado de manutenção, ainda que determinado em condições variáveis de carga. Esta constatação indica que as medições feitas em qualquer ponto do intervalo de potências recomendado pode ser considerada como equivalente, de maneira que os valores de referência a serem estabelecidos para a classificação dos veículos como “bons” ou “ruins” independe da potência medida, desde que estabelecida uma tolerância adequada para a determinação dos valores de referência, de forma a estabelecer faixas aceitáveis para cada categoria de veículo e ano-modelo ou fase do PROCONVE aplicável.

4.3 – APROVEITAMENTO DAS MEDIÇÕES

A escolha criteriosa dos locais de medição determina o grau de aproveitamento das medições. O software do ESR estabelece as faixas de velocidade e de aceleração para validação das medições, de maneira que as medidas são feitas com validação das concentrações de gases e, mesmo sem a validação da velocidade e aceleração, também se prestam para análises gerais da frota, como uma forma de aumentar o volume de dados, sem a introdução de desvios significativos, enquanto que as medições com validação também do par velocidade-aceleração são mais precisas por eliminar também estes pequenos desvios.

Outra fonte de perda de dados é o reconhecimento da placa do veículo, que leva à identificação de marca, modelo e tecnologia do mesmo, permitindo associar padrões de emissão às características dos veículos. Com isto torna-se possível detectar características intrínsecas dos diversos

níveis e padrões tecnológicos, comparando-os entre si para avaliar o efeito produzido pelas diferentes fases do PROCONVE sobre a emissão da frota como um todo.

A figura 11, a seguir, mostra o nível de aproveitamento nos locais escolhidos para medição de veículos leves e pesados.

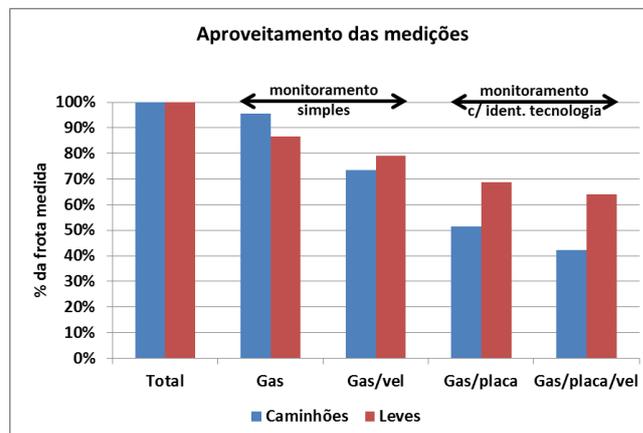


Figura 11 – Aproveitamento das medições com validação dos gases, gases e velocidade-aceleração, gases e placa e de todos os parâmetros

5. APLICAÇÕES DO SENSORIAMENTO REMOTO E UTILIZAÇÃO DOS RESULTADOS

O ESR apresenta características que tornam essa tecnologia a melhor solução conhecida para o monitoramento contínuo e em larga escala da frota de veículos em circulação. Oportuno registrar que o mercado oferece equipamentos com características operacionais distintas, todavia, pode-se dizer que apresentam os mesmos benefícios. Além de permitir o monitoramento de um grande volume de veículos de forma rápida e sem incomodar os usuários, o ESR também inclui a medição de NOx, que é feita somente em Programas de Inspeção sofisticados, por demandar ensaios de alto custo em dinamômetro, sob carga. Nesse sentido, os primeiros indícios de que os veículos a diesel europeus apresentavam emissões em tráfego real muito acima das certificadas em laboratório, foram obtidos após a análise de 13 anos de dados coletados por sensoriamento remoto em Zurique^[10]. O monitoramento por ESR é também útil na identificação de veículos com modificações indesejáveis e fraudes individuais praticadas pelos usuários, bem como para o levantamento estatístico de modelos de veículos suspeitos ou com baixo desempenho no controle de emissões, que podem ser devido a problemas de durabilidade de componentes ou a falhas nos procedimentos de manutenção recomendados por seus fabricantes. Quando aplicado amplamente sobre a frota brasileira, este tipo de análise estatística poderá orientar avaliações mais minuciosas, mediante ensaios de veículos instrumentados em tráfego real ou em laboratório, como realizado pelo programa TRUE-Initiative em Londres e Paris^[11].

5.1. MONITORAMENTO GERAL DA FROTA E ORIENTAÇÃO ESTRATÉGICA PARA O PROCONVE

Com a evolução do gerenciamento eletrônico do motor e da inteligência embarcada, que ajustam os controles do veículo a cada situação particular de funcionamento, o estabelecimento de regulamentos para o controle da poluição do ar, baseados em ensaios de laboratório, precisam ser complementados por dados obtidos no mundo real. Em poucos dias, o monitoramento realizado em 2019 identificou a distribuição estatística das emissões medidas das frotas de veículos, que mostra, em caráter preliminar, alguns aspectos importantes do ponto de vista estratégico para o conhecimento da frota em uso real visando sua contínua avaliação e a realimentação do PROCONVE para o seu aprimoramento e atualização.

As medições por ESR permitem avaliar o desempenho efetivo do PROCONVE na redução de emissões, identificando as estratégias bem sucedidas nas condições reais de utilização dos veículos e os aspectos que eventualmente necessitem revisões para a implantação de ações mais intensas para combater desconformidades, ou mesmo de novas exigências para considerar emissões ainda não incluídas nas estratégias de controle, mas que se evidenciem como importantes no contexto atual.

A interpretação dos resultados medidos nas suas diversas unidades e formas de apresentação facilita comparações entre tecnologias que podem evidenciar aspectos mal interpretados, a partir de pontos de vista mais abrangentes, estendendo técnicas de controle, disponíveis e praticadas em alguma categoria de veículos isoladamente, a outros tipos de veículos, como no caso da emissão de particulados pelos motores do ciclo Otto.

Complementarmente, a alta produtividade das medições por ESR permite o levantamento de informações estatisticamente robustas em curto espaço de tempo, tanto em situações normais quanto especiais. A análise estatística dos dados gerados permite investigar as diferenças de comportamento dos veículos em temperaturas ambientais baixas ou altas, em rampas íngremes, em congestionamentos, etc. para verificar se há necessidade de complementar a legislação com alteração das estratégias regulatórias para a certificação de veículos voltadas a situações não contempladas, sejam comuns ou regionais.

Oportuno destacar que o uso da tecnologia de sensoriamento remoto foi um elemento primordial na identificação e caracterização do escândalo conhecido como “Dieselgate”, registrado na Europa, EUA e outros países. O uso da tecnologia ESR possibilitou verificar que as estatísticas de emissão de NOx pelos automóveis a diesel e a gasolina apresentavam diferenças significativas no grau de conformidade com os regulamentos ambientais, apontando a necessidade de revisão dos procedimentos regulatórios, bem

como para a necessidade de melhor comprovação em alguns modelos que foram caracterizados por fraudes de projeto^[12]. Esse fato demonstrou a necessidade de evolução das regulamentações de controle de emissão, o que resultou, dentre outras medidas, na inclusão de ensaios em condições de tráfego real - RDE (Real Driving Emission) nos processos de certificação de conformidade e de auditoria de veículos em uso, realizados em veículos equipados com equipamentos de medição a bordo, trafegando em circuitos reais e representativos.

Portanto, a tecnologia ESR permite identificar itens da regulamentação existentes passíveis de reparos e complementações, indicando o caminho para que testes complementares venham definir os detalhes e procedimentos necessários para estabelecer novas exigências e modernizar a legislação.

Uma observação levantada pelo monitoramento por ESR em São Paulo, que pode ser considerada como um exemplo típico de revisão estratégica a ser discutida, é que a emissão de material particulado dos veículos leves pode não ser desprezível quando comparada à dos caminhões e ônibus, como sempre se admitiu. Particularmente a partir da fase P7, em que a emissão de particulados pelos motores Diesel pesados já atingiu reduções de mais de 95%, a emissão de MP pelos veículos com motor do ciclo Otto, especialmente a dos mais modernos equipados com injeção direta (GDI), pode ter se tornado comparável à dos caminhões.

Embora a medição de MP por ESR seja feita por um método de detecção não regulamentado, seus resultados expressos em g/MJ de energia interna do combustível permitem avaliar as tecnologias envolvidas em motores de tipos e tamanhos diferentes e independentemente do tipo de combustível. As comparações com base na quantidade de combustível queimado também são um bom indicador por fornecer uma informação direta do impacto ambiental associado ao consumo energético em cada caso.

Os “scatter-plots” apresentados na figura 12 mostram a dependência entre a fumaça preta (resultante da queima incompleta do combustível) e a fumaça azul resultante do desgaste do motor (queima de óleo lubrificante) para os veículos pesados da fase P7 e os leves da fase L6.

Os valores absolutos observados não devem ser comparados aos limites legais, antes de uma correlação ainda por ser aprimorada com base em experimentos controlados envolvendo ambos os métodos, visto que foram determinados em comprimentos de onda diferentes dos utilizados normalmente. Entretanto, a maior capacidade do ESR para identificar as partículas inferiores a 1 µm, permite observar que existe uma quantidade de particulados decorrente do desgaste do motor devido à queima de óleo ainda maior do que da combustão incompleta (fumaça preta).

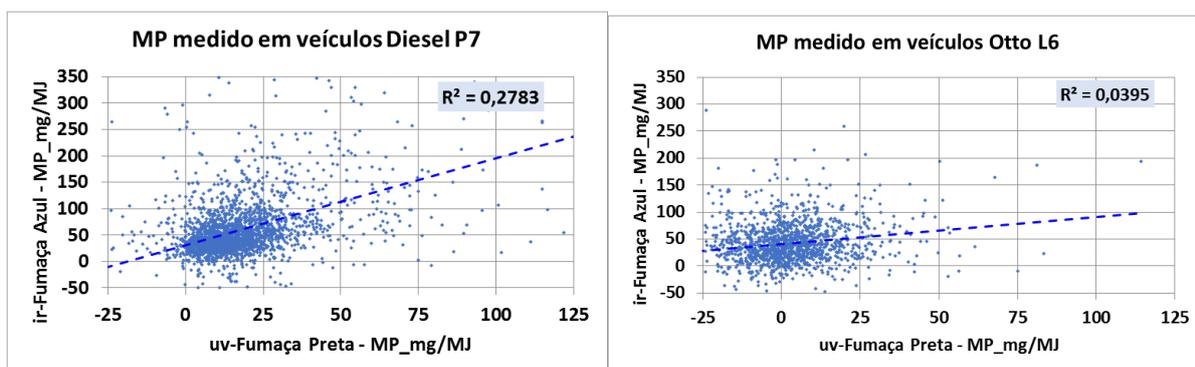


Figura 12 – Correlação das emissões de MP em motores Diesel e Otto das fases mais recentes do PROCONVE

Observa-se que a fumaça preta dos motores a diesel situa-se tipicamente na faixa de 0 a 40 mg/MJ, enquanto que a dos veículos a gasolina e flex limita-se a 20 mg/MJ, mas apresentou uma grande quantidade de valores negativos, de forma que a média ainda é baixa, sendo de 10 a 20 vezes inferior à dos motores Diesel, como mostra a tabela 7.

Por sua vez, a emissão de fumaça azul varia tipicamente entre 0 mg/MJ e 100 mg/MJ tanto nos veículos Otto como nos Diesel, sendo que a média destes últimos é 50% maior que a dos primeiros e três vezes maior do que a emissão de fumaça preta. Diante deste quadro, a emissão de MP pelos veículos Otto assume importância significativa.

Tabela 7 – Média das emissões de particulados – mg/MJ

	P7	L6	L5
Fumaça Preta	18,6	0,8	1,5
Fumaça Azul	61,7	41,3	37,8

Esta constatação demonstra que a queima de óleo lubrificante passou a representar a maior fonte de material particulado pelo escapamento dos veículos, sejam leves com motor do ciclo Otto ou Diesel pesados. Em segundo lugar, deixa evidente que já se torna necessário limitar a emissão de MP também nos automóveis, diante da significativa redução da emissão de MP pelos motores Diesel. Um fator digno de nota é que a emissão de fuligem apresenta uma leve correspondência com a emissão devida à queima de óleo, mas esta correlação indica que para valores desprezíveis de fuligem, a emissão de fumaça azul nos motores Diesel é menor do que nos Otto.

A figura 13 mostra que, em termos estatísticos, esta afirmação é consistente em toda a amostra, cujas curvas percentílicas confirmam a proximidade dos resultados dos veículos leves e pesados em 80% da distribuição para fumaça azul e uma diferença média da ordem de 15 mg/MJ entre a fumaça preta dos veículos leves e pesados, entre os percentis de 10% a 90%. Ressalta-se que as fases do PROCONVE escolhidas para essa análise não envolvem veículos muito antigos, portanto não refletindo problemas devidos a desgastes exagerados.

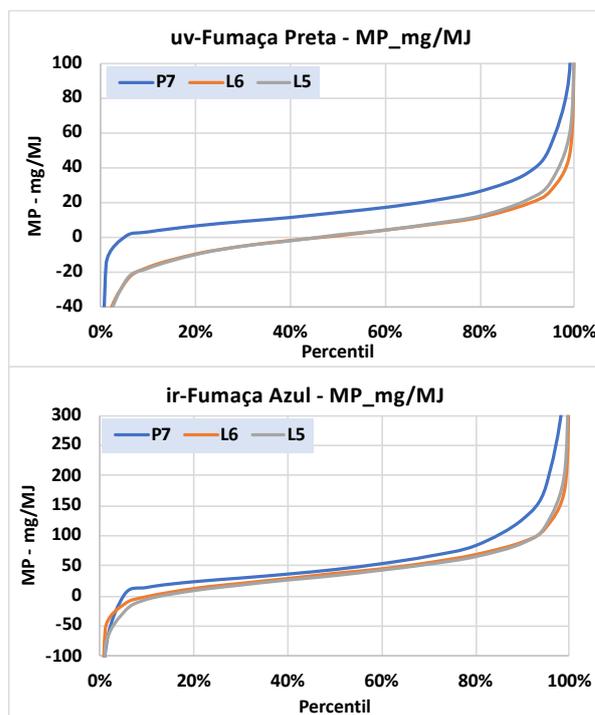


Figura 13 – Distribuição estatística das emissões de MP em motores Diesel e Otto das fases mais recentes do PROCONVE

Adicionalmente, deve-se considerar que a introdução dos motores GDI nos EUA aumentou a emissão de MP₁₀ dos veículos a gasolina em dez vezes (de 0,7 mg/km em 2007 para 7 mg/km em 2018, durante o período de crescimento da participação deste tipo de motor no mercado interno), como pode ser verificado a partir dos fatores de emissão publicados no modelo EMFAC-2014^[13]. A mesma tendência poderá ocorrer também no Brasil, o que levaria a emissão média de fumaça preta dos veículos Otto para a mesma ordem de grandeza verificada nos Diesel.

Todas essas constatações necessitam análises mais profundas e detalhadas por métodos de medição tradicionais, mais seletivos e precisos, para serem confirmadas, pois trazem à tona a possibilidade de que os veículos leves sejam uma fonte de emissão mais relevante do que se imagina. Havendo confirmação dessa observação inicial, e dependendo da sua real magnitude, talvez os veículos leves a gasolina e flex também necessitem de requisitos para o

controle eficaz de emissão de particulados, evitando o crescimento da emissão de MP pelo crescimento da participação dos motores GDI e, especialmente, limitando a emissão de fumaça azul gerada pela queima de óleo lubrificante, através da comprovação desta emissão nos ensaios de durabilidade.

5.2. APLICAÇÃO DO ESR PARA MONITORAMENTO DA FROTA

O ESR é uma ferramenta que vem complementar as estratégias de controle de emissões veiculares através do monitoramento amplo de veículos em campo. Sendo assim, sua aplicação pode ser voltada tanto a programas de conscientização pública em relação à problemática da poluição do ar e sua relação com a manutenção preventiva dos veículos, quanto diretamente à fiscalização efetiva.

A influência da falta de manutenção regular dos veículos sobre a poluição do ar é pouco conhecida da população em geral, principalmente quando não há Programas de Inspeção e Manutenção de Veículos em Uso, como é atualmente o caso no Brasil. Por esse motivo, a implantação do ESR deve ser feita idealmente de maneira gradativa, considerando uma etapa inicial de conscientização pública, voluntária e sem penalizações, para permitir que a população que ainda não faz a correta manutenção dos seus veículos, por desconhecimento do seu impacto sobre a qualidade do ar, ou pela escolha de oficinas desqualificadas, possa modificar esse comportamento e proporcionar uma redução significativa das emissões. Em uma segunda etapa, esse programa pode assumir um caráter de obrigatoriedade, no sentido de penalizar aqueles que, já tendo o conhecimento da necessidade de proceder à manutenção preventiva, mantiverem os altos níveis de emissão por negligência. Em paralelo, desde o início, o programa deverá atuar de forma fiscalizatória e punitiva em relação às fraudes intencionais feitas pelos usuários de veículos, que levam ao aumento das emissões, como é o caso da utilização de subterfúgios para não utilizar o ARLA 32 em veículos Diesel P7 equipados com SCR, por exemplo.

Para efeito da conscientização da sociedade e otimização da sua participação no processo de melhoria da qualidade do ar, é preciso distinguir os veículos com boa manutenção, identificados como “BONS”, daqueles com alta emissão por manutenção inadequada, considerados “RUINS”. Esta classificação é definida por valores intrinsecamente relacionados ao nível tecnológico do veículo, visto que este não é de responsabilidade do usuário, de forma que um veículo “BOM” é aquele com emissão nos níveis possíveis para a sua tecnologia e idade e não apenas os veículos modernos com emissão baixa. Por isso, esta classificação é definida por valores de referência típicos para cada ano de fabricação (ou nível tecnológico, definido pela fase do PROCONVE para a qual foi homologado) e categoria de veículo.

Sendo um programa de conscientização, suas ações devem ser graduais e amigáveis para promover a adesão da população e das redes de reparação e de venda de peças de reposição, cuja progressividade intensificará os ganhos ambientais dentro de metas viáveis para o cumprimento das suas ações.

Para este programa, a medição por sensoriamento remoto é especialmente adequada por ser realizada durante a passagem do veículo em frente ao equipamento e seu resultado ser exibido imediatamente. O seu uso para o monitoramento da frota circulante permite que a população seja informada rapidamente sobre os níveis de emissão que são passíveis de atendimento pelos diversos padrões tecnológicos de veículo, definidos a partir das estatísticas levantadas pelo programa local. A possibilidade de testar os veículos aleatoriamente em campo, com captura da placa de cada veículo, fornece um conhecimento detalhado das emissões da frota, inclusive por marca, modelo e ano de fabricação, além de ganhos adicionais tanto para a informação ao governo e aos usuários, bem como às próprias montadoras e fabricantes de autopeças.

Em relação aos usuários, o programa pode fornecer os valores típicos de emissão de cada modelo para orientação da manutenção, seja preventiva ou corretiva. Nestes casos, as informações devem considerar tolerâncias inerentes às incertezas de medição, para que a informação seja utilizada como meta. Além disso, tais valores podem ser utilizados como orientação para uma escolha mais consciente no momento da compra de um novo veículo, como mostrado no banco de dados de modelos em Londres^[14].

Em relação aos fabricantes, tais dados permitem a detecção dos modelos que se desviam significativamente do comportamento médio de emissão da sua categoria em particular, fornecendo um feedback importante para orientar ações de revisão de componentes ineficazes ou de baixa durabilidade e correção de procedimentos de manutenção específicos. Para modelos que apresentem problemas persistentes, tal informação deverá orientar ações do governo para uma campanha voltada à sua correção.

Em programas de sensibilização e conscientização da população para ações de controle da poluição do ar, uma informação genérica pode ser imediatamente transmitida por painéis luminosos aos usuários (figura 14) e, após o processamento dos resultados e comparação com as especificações do veículo, os proprietários de veículos com baixa emissão em relação ao seu próprio padrão podem ser notificados positivamente como reconhecimento da boa prática de manutenção preventiva. Ao contrário, veículos detectados como de alta emissão, em relação ao que seria possível para aquela marca e modelo, poderão ser orientados a proceder à manutenção corretiva.



Figura 14 – Programa de monitoramento e conscientização de Madrid

Este programa pode ser estendido ao propósito de fiscalização se for exigido que os veículos de alta emissão comprovem a realização dos reparos necessários para serem licenciados, ou mesmo para entrarem em “zonas limpas” com circulação restrita, como é feito em Londres.

O programa de conscientização tem suma importância para que a sociedade se engaje no controle da poluição. Atingida esta conquista, é importante manter o sistema de monitoramento e informação, mas introduzindo gradativamente ações que incentivem o interesse do maior número de pessoas, ou mesmo fiscalizatórias, para aumentar a adesão ao programa.

Portanto, novos valores de referência devem ser determinados para a aplicação às condições definidas pelo uso de medições por ESR, inicialmente baseados na análise estatística dos resultados da etapa anterior, de conscientização.

Um veículo é caracterizado como de “alta emissão” ou de “baixa emissão” quando seus resultados estão muito acima ou muito abaixo do que é esperado para o seu modelo em questão. Não se trata de comparar os veículos antigos com os modernos, mas de definir se o estado de manutenção é aceitável ou não, para orientação da sociedade quanto à sua obrigação e cumprimento do que lhe cabe fazer em benefício da qualidade do ar.

Aos dois níveis, de baixa emissão e de alta emissão, devem ser atribuídos valores característicos de cada poluente, considerados como parâmetros de referência para cada padrão tecnológico dos veículos. Tais valores devem ser definidos de acordo com o grau de exigência desejado para o Programa e, também, com o que os proprietários de

veículos são capazes de cumprir, levando em conta as características e capacitação da rede de manutenção, o mercado de peças de reposição e o grau de conscientização já atingido pelo programa para os cuidados com o veículo e com o meio ambiente.

O rigor da fiscalização pode ser aumentado ao longo do tempo através do estabelecimento gradual de valores de referência mais restritivos, para não reprovar mais do que uma pequena parcela da frota circulante, a ser definida estrategicamente para graduar a intensidade do programa. Na medida que a sociedade se conscientize e se prepare para o cumprimento das metas estabelecidas, estas poderão ser ajustadas de acordo com os resultados estatísticos do próprio programa, visando tirar maior proveito do monitoramento e, assim, utilizar com maior plenitude o potencial tecnológico de controle ambiental trazido pelo PROCONVE e já em uso no país.

Desta forma, o programa de monitoramento promoveria a conscientização da sociedade, a preparação da rede de reparação de veículos e uma considerável redução de emissões, que foi conquistada pelo PROCONVE, mas parcialmente perdida por falhas de conservação da frota.

A porcentagem total da frota a ser reparada por determinação de um programa de ESR deve ser cuidadosa e estrategicamente definida para moderar o impacto na capacidade de atendimento da rede de reparação, a qual poderia não estar preparada para o aumento de demanda, e na aceitação do programa pela população. Este aspecto é fundamental porque o aumento dos percentuais da frota encaminhados para reparo influencia no sucesso do programa da seguinte maneira:

- quanto mais restritivo o programa, maior a dificuldade para o seu cumprimento;
- maior número de pessoas e de veículos serão afetados, o que certamente diminuiria a adesão da população ao programa;
- maior demanda de serviços e peças de reposição, podendo inflacionar o mercado e congestionar a rede de reparação.

Os valores de referência não devem reprovar demais para não desestimular a cooperação da sociedade, nem ser muito lenientes para que o Programa seja efetivo e tire bom proveito do potencial de redução de emissões dos veículos dotados de tecnologias mais recentes e aprimoradas.

Assim, a melhor estratégia para corrigir os piores veículos da frota é através de exigências gradualmente mais restritivas, à medida em que a adesão da população e a capacidade da rede de reparação sejam consolidadas.

Esta estratégia deve ser baseada no cálculo de valores de referência que determinem o percentual da frota total que

deverá sofrer manutenção. A tabela 8 mostra o exemplo de uma possível estratégia para controle de aproximadamente 10% da frota total, como primeira etapa do programa.

Tomando-se por exemplo a fase L5, que representa 33% da amostra medida, estabelecendo-se índices de reprovação de 4% para CO, 7% para HC (poluente mais crítico dos veículos leves) e 3% para NOx (menos importante por ser predominantemente emitido pelos veículos Diesel), levaria 12% dos veículos dessa fase à revisão. Note-se que neste caso, os valores de referência são muito superiores aos limites estabelecidos pelo PROCONVE (5 vezes no caso do CO, 16 vezes para HC e 12 vezes para NOx), de maneira que

os valores determinados poderão ser facilmente atendidos com procedimentos de manutenção simples e de baixo custo na maioria dos casos. De maneira semelhante, a tabela 8 exhibe proporções sugeridas para cada fase do PROCONVE, de forma combinada como parte de uma estratégia conjunta, sendo que os veículos mais antigos (anteriores a 1997) poderiam ser isentos de controle nesta primeira etapa por representarem uma parcela muito pequena da frota (ao redor de 1%) e da emissão total da cidade.

Tabela 8 – Exemplo de estratégia para reparo de 10% da frota

Fase PROCONVE	N	% frota	Início	Limites legais (g/km)			% de reprovação				Limites reprov. (g/km)			
				CO	NMHC	NOx	CO	HC	NO	TOTAL	CO	NMHC	NOx	
Pré	5	0,2%												
L1	7	0,3%	1989	24	2,1	2								
L2	16	0,6%	1992	12	1,2	1,4								
L3	126	4,9%	1997	2	0,3	0,6	6%	6%	6%	17%	19,78	3,13	3,05	
L4	195	7,6%	2007	2	0,16	0,25	6%	6%	6%	17%	11,17	1,92	1,81	
L5	849	33%	2009	2	0,05	0,12	4%	7%	3%	12%	10,58	0,80	1,41	
L6	1359	53%	2014	1,3	0,05	0,08	3%	5%	2%	9%	7,54	0,56	1,18	
Total	2557						4%	6%	3%	11%				

Legislação	% reprovação parcial
Resultados	% reprovação da frota

Analisando esta mesma estratégia em termos dos valores medidos diretamente pelo ESR (Tabela 9), o valor de referência preliminar para levar a estas porcentagens de reparação (ainda em relação à fase L5) seria da ordem de 1600 ppm de HC (expressos como propano)^f, o que pode ser facilmente cumprido, posto que esta frota é constituída pelos veículos fabricados entre 2009 e 2013, cujo valor de referência no Programa I/M é equivalente a 195 ppm de

propano, obtido nas oficinas mecânicas com procedimentos triviais de manutenção. Em relação ao CO, o valor de referência preliminar seria de 1,64%, quando o valor de referência no Programa I/M é de 0,3%.

Tabela 9 – Comparação da estratégia sugerida com o Programa I/M

Fase PROCONVE	N	% frota	Início	Limites I/M		Limites reprov. (medição)		
				CO (%)	HC3 (ppm)	CO (%)	HC3 (ppm)	NOx (ppm)
L3	88	3,4%	1997	1	1365	3,19	3255	3131
L3	38	1,5%	2003	0,5	390			
L3	0	0,0%	2006					
L4	195	7,6%	2007	0,3	195	1,71	1998	1603
L5	849	33%	2009			1,64	1603	768
L6	1359	53%	2014			1,14	748	316
Total	2529	99%						

Legislação
Resultados

Se os veículos selecionados por ESR de acordo com esta estratégia forem efetivamente reparados, as reduções das emissões totais da frota de veículos leves seriam simultaneamente de 36% para o HC, 36% para o CO e 29% para o NOx, distribuídos conforme mostram os gráficos da figura 15, o que demonstra claramente o potencial da

manutenção preventiva para o controle ambiental por parte dos usuários de veículos.

^f A Resolução CONAMA 418/2009 estabelece valores de referência para HC expressos em partes por milhão em volume (ppm) de hexano. Esses mesmos valores de referência devem ser

multiplicados por 1,95 para serem expressos em ppm de propano, para comparação com os dados do ESR, obtidos nesta unidade.

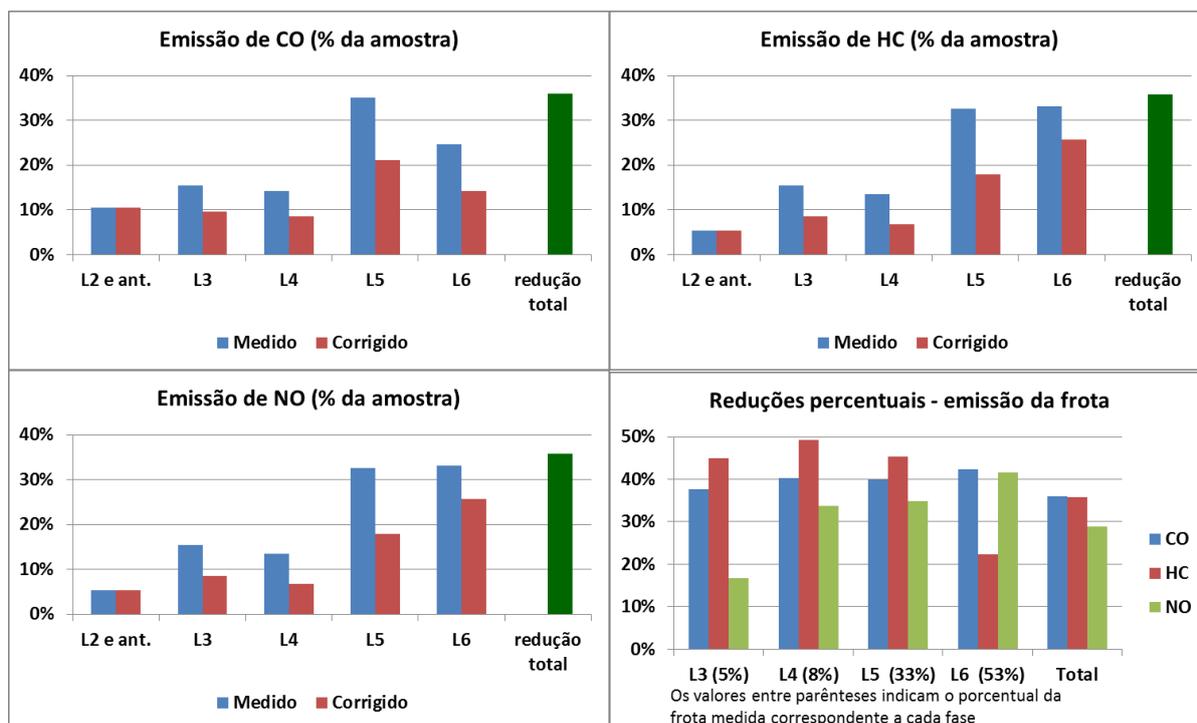


Figura 15 – Reduções de emissão estimadas por fase do PROCONVE

Em relação às fraudes, o caso mais conhecido, que representa um impacto ambiental importante, é a fraude no uso do ARLA 32 em veículos pesados a Diesel da fase P7, que aumenta a emissão de NOx em níveis variados, dependendo do tipo de fraude, podendo chegar em níveis 3 a 4 vezes superiores ao limite legal. Essa fraude tem ocorrido em grande escala, já tendo sido identificada pela Polícia Rodoviária Federal – PRF e pelo IBAMA, que têm se esforçado para coibir o problema por meio de fiscalização com punição severa. Entretanto, como a inspeção no veículo é demorada, envolvendo verificação do uso do ARLA 32, aferição de sua qualidade e presença de dispositivos eletrônicos inibidores do controle automático original do veículo[§], é possível inspecionar apenas cerca de 20 veículos por dia, por equipe, o que é obviamente insuficiente para se coibir o problema, considerando os cerca de um milhão de veículos da fase P7 que estão atualmente em circulação, número que tende a aumentar com o tempo e a limitação de recursos humanos e materiais para este tipo de operação.

Como a fraude produz um aumento muito grande nas emissões de NOx, a sua identificação pode ser feita por um valor de referência elevado com absoluta nitidez. A figura 16 mostra o limite do PROCONVE em amarelo e a identificação de 14% da frota com emissão superior a 4 vezes esse limite.

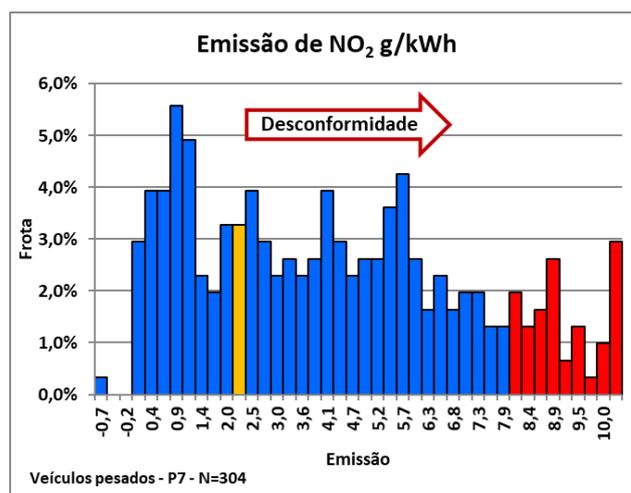


Figura 16 – Histograma da emissão de NO₂ em veículos P7

6. Conclusões

Em resumo, deve-se considerar que:

- ESR é uma tecnologia eficaz para diversas aplicações e tem o seu uso comprovado no exterior;
- o uso do ESR tem baixo custo por resultado válido em comparação com outros métodos;

[§] Também no Brasil, a Resolução CONAMA 230/1997 define “dispositivos de ação indesejável” como qualquer equipamento, software, lubrificante, aditivo etc. que iniba ou reduza a eficácia

dos controles de emissão e proíbe seu uso, o que pode ser caracterizado como crime ambiental.

c) o ESR é prático, móvel e não requer investimento em infraestrutura, substituindo com vantagens os programas IM convencionais;

d) a não adoção de tecnologias para aferir a emissão dos veículos em circulação, identificando os grandes emissores e fraudes, limita a efetividade do PROCONVE e o atingimento dos Padrões de Qualidade do Ar, principalmente para MP e ozônio.

Os problemas de poluição do ar precisam de soluções baseadas em medições realistas e não apenas em previsões baseadas na simulação das condições de uso do veículo ou do motor em laboratório que, por sua natureza, são limitadas. Estas simulações funcionaram bem no passado, mas o gerenciamento eletrônico dos veículos mudou este cenário pois permite adequar o controle de emissões a situações tão particulares que o veículo de teste perde a sua própria representatividade nas simulações por ciclos de condução. Assim, a falta de uma base mais realista para o controle das emissões tem dificultado sobremaneira o atingimento das metas de qualidade do ar recomendadas pela Organização Mundial da Saúde em todo o mundo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] Bishop, G.A., Starkey, J.R., Ihlenfeldt, A., Williams, W.J., Stedman, D.H., 1989. IR long-path photometry: a remote sensing tool for automobile emissions. *Anal. Chem.* 61 (10):671A–677A. <http://dx.doi.org/10.1021/ac00185a746>.

[2] <https://www.youtube.com/watch?v=G-KfoM-VgYo>

[3] Lowell, D. - Emissions Monitoring Using Remote Sensing Devices - IV Vehicles Emissions International Conference – Brasília 2004

[4] MBTA Bus Fleet - RSD Engine Emission Analysis – October 1, 2004

[5] Bishop, G. A.; Peddle, A.; Stedman, D. H. - On-Road Motor Vehicle Emissions including NH₃, SO₂ and NO₂. University of Denver. June 2010

[6] Stedman D. H., Principle Investigator; Bishop, G. A.; Peddle, A; Zhan, T. - On-Road Motor Vehicle Emissions including NH₃, SO₂ and NO₂ - prepared for the California Air Resources Board - Contract No. 07-319 October 2009

[7] CETESB, Relatórios de qualidade do ar, 2013 a 2018 (média 2012/18 e RVEP-13 pontos)

O levantamento preliminar de emissões por ESR realizado em São Paulo confirma essa tendência, mostrando caminhos de aprimoramento para o controle da qualidade do ar que podem ser identificados a partir do monitoramento e das estatísticas da frota circulante, e já aponta para a necessidade de revisões nas estratégias adotadas para o controle de HC, NOx e MP adotadas pelo PROCONVE, assim como para a implantação de programas de monitoramento, conscientização e fiscalização.

É recomendável a implantação de programas-piloto baseados no uso do ESR para a realização de campanhas educativas e monitoramento da frota, os quais podem propiciar alto grau de redução da poluição urbana, afetando uma pequena parcela da frota que responde pela maior parte das emissões, bem como estabelecer as bases para uma fiscalização muito eficaz e de baixo custo para a identificação de falhas de manutenção, fraudes e adulteração de veículos em desconformidade com suas especificações originais.

[8] Branco, F. C., Branco, G. M., Szwarc, A., Beccardi, R., Rosin, E. - Correlação de Resultados de Inspeção em Marcha Lenta e Medições por Sensoriamento Remoto - XX SIMEA, 2012

[9] Branco, F. C., Branco, G. M.- Teste e Certificação de Emissões de Veículos: Detecção de Dispositivos Indesejáveis – XXV SIMEA, 2017

[10] Chen, Y. e Borken-Kleefeld, J.– Real-driving emissions from cars and light commercial vehicles – Results from 13 years remote sensing at Zurich/CH. Elsevier, 2014, *Atmospheric Environment*, Vol. 88, pp. 157–164

[11] TRUE Initiative – <https://www.trueinitiative.org>

[12] Borken-Kleefeld, J. - Real World Emissions from Road Vehicles: Results from Remote Sensing, Emission Measurements and Models - International Institute for Applied Systems Analysis (IIASA), Mitigation of Air Pollution and Greenhouse Gases Program, Schlossplatz 1, 2361 Laxenburg/Austria

[13] CARB – EMFAC2014 Web Database. California Air Resources Board. <https://www.arb.ca.gov/emfac/2014/>

[14] TRUE Initiative – <https://www.trueinitiative.org/true-rating>