

A Importância Estratégica do Monitoramento por Sensoriamento Remoto para o Controle de Emissões Veiculares para Atingir as Metas de PQAr

The Strategic Importance of Remote Sensing Monitoring for Vehicle Emissions Control Towards NAQS Targets Compliance

Fábio C. Branco

Gabriel M. Branco

EnvironMentality – Tecnologia com Conceitos Ambientais Ltda.

Dr. John Stewart Hager

HEAT – Hager Environmental Atmospheric Technologies LLC.

Ivan Pio de Azevedo

RSdB – Remote Sensing do Brasil Ltda.

ABSTRACT

Meeting Air Quality Standards depends essentially on reducing vehicle emissions, and the inspection of in-use vehicles is a key factor in meeting these objectives.

The technological sophistication of engines with electronic management requires new inspection methods, because traditional tests are no longer capable of carrying out this task adequately for inspection purposes.

One of the achievements of this development is the remote sensing measurement method, which measures the traditional pollutants (CO, HC, NOx and PM), as well as various other compounds (ethanol, aldehydes, N2O, SO2, etc.) to support new public policies aimed at controlling these gases, which allows for a good correlation with certification requirements.

Remote sensing measurements are taken virtually instantaneously on traffic routes, and each device can take more than a million measurements a year, producing very reliable and low-cost statistics, which have gained worldwide acclaim for having characterized the identification of frauds, such as the famous “dieselgate” in 2015.

This paper discusses the implementation of the remote sensing measurement method in Brazil as a complement or even a future replacement for the current I/M Program.

RESUMO

O atendimento aos Padrões de Qualidade do Ar depende essencialmente da redução das emissões veiculares e a inspeção de veículos em uso é fator fundamental para atender a esses objetivos.

A sofisticação tecnológica dos motores com gerenciamento eletrônico exige novos métodos de inspeção, porque os ensaios tradicionais já não são mais capazes de realizar esta tarefa adequadamente para a fiscalização.

Um dos resultados desse desenvolvimento é o método de medição por sensoriamento remoto, que mede os poluentes tradicionais (CO, HC, NOx e MP), além de vários outros compostos (etanol, aldeídos, N2O, SO2 etc.) para subsidiar novas políticas públicas destinadas ao controle desses gases, permitindo boa correlação com as exigências para certificação.

As medições por sensoriamento remoto são realizadas nas vias de tráfego, com o veículo em uso normal e de forma praticamente instantânea, e cada equipamento pode realizar mais de um milhão de medições por ano, produzindo estatísticas muito seguras e de baixo custo, tendo se consagrado mundialmente por terem caracterizado a identificação de fraudes, divulgadas como o conhecido “dieselgate” em 2015.

Este trabalho discute a base técnica e propõe uma estratégia de implantação do método de medição por sensoriamento remoto no Brasil como complemento ou até a futura substituição do Programa I/M atual.

1. O DESENVOLVIMENTO DO MÉTODO DE MEDIÇÃO POR SENSORIAMENTO REMOTO

O atendimento aos Padrões de Qualidade do Ar depende essencialmente da redução das emissões veiculares de escapamento e evaporativas de combustível, sendo a inspeção de veículos em uso o instrumento fundamental para atender a esses objetivos.

Entretanto, os programas de inspeção periódica suscitam reações contrárias da sociedade e padecem por não poder avaliar os veículos na frequência necessária para assegurar a sua conformidade com os padrões tecnológicos de controle de emissões ao longo do ano todo. Além, disso, por motivos de custo e da rapidez necessária à inspeção, os ensaios de verificação são expeditos e com poucos recursos para uma avaliação mais realista com o motor sob carga.

Em paralelo, a sofisticação tecnológica dos motores com gerenciamento eletrônico exige novos métodos de inspeção, ainda mais sofisticados, porque os ensaios tradicionais já não são mais capazes de realizar esta tarefa adequadamente para a fiscalização.

O método de medição de gases por sensoriamento remoto (SR) foi concebido pelo Prof. Dr. Donald Stedmann e sua equipe da Universidade de Denver, EUA, na década de 80 para o desenvolvimento de um equipamento específico para o monitoramento da emissão de monóxido de carbono (CO) de veículos em tráfego real ^[1]. Desde então, os equipamentos incorporaram gradativamente a medição de hidrocarbonetos totais (THC), óxidos de nitrogênio (NOx) e material particulado (MP). Esses equipamentos medem a concentração dos gases de interesse na atmosfera sobre a pista de rolamento, antes e depois do veículo para calcular a sua contribuição individual. Tais medições são fortemente

afetadas pela turbulência, entretanto, a chave para calcular a emissão de escapamento utilizando esse tipo de medição consiste em dividir a concentração de cada poluente pela concentração dos compostos de carbono no mesmo instante, levando a resultados dados em gramas de poluente por Mol de carbono, facilmente convertidas para gramas de poluente por quilograma de combustível queimado.

As medições por sensoriamento remoto ocorrem em cerca de 1 segundo e permitem a avaliação de milhares de veículos por dia, por equipamento, dependendo apenas do fluxo de tráfego, tornando este método o de melhor custo efetividade. Uma câmera de vídeo dotada de OCR captura a placa do veículo no momento da medição, para buscar as características dos veículos (placa, ano de fabricação, marca, modelo, tipo de combustível etc.), permitindo a criação de um banco de dados de emissões reais. Outro dispositivo mede a velocidade e a aceleração do veículo para avaliar a potência utilizada no momento da medição e validar os resultados, enquanto os sensores meteorológicos medem as condições ambientais, como temperatura, pressão barométrica e umidade.

Em 2014, a *Hager Environmental Atmospheric Technologies* - HEAT lançou um novo equipamento, apresentado na figura 1, dando um salto de qualidade significativo ao método de sensoriamento remoto, aplicando o LiDAR – *Light Detection And Ranging* utilizando a técnica de absorção diferencial (DiAL - *Differential Absorption LiDAR*) para a obtenção de uma imagem tridimensional da pluma de gases emitidos por um veículo em movimento. Esta técnica é utilizada em imageamento por satélites artificiais ^[2] por ser particularmente eficiente na medição de concentração de gases atmosféricos, permitindo que as medições sejam totalmente automatizadas, operando em 24 horas e 7 dias por semana e aumentando ainda mais a produtividade do equipamento.

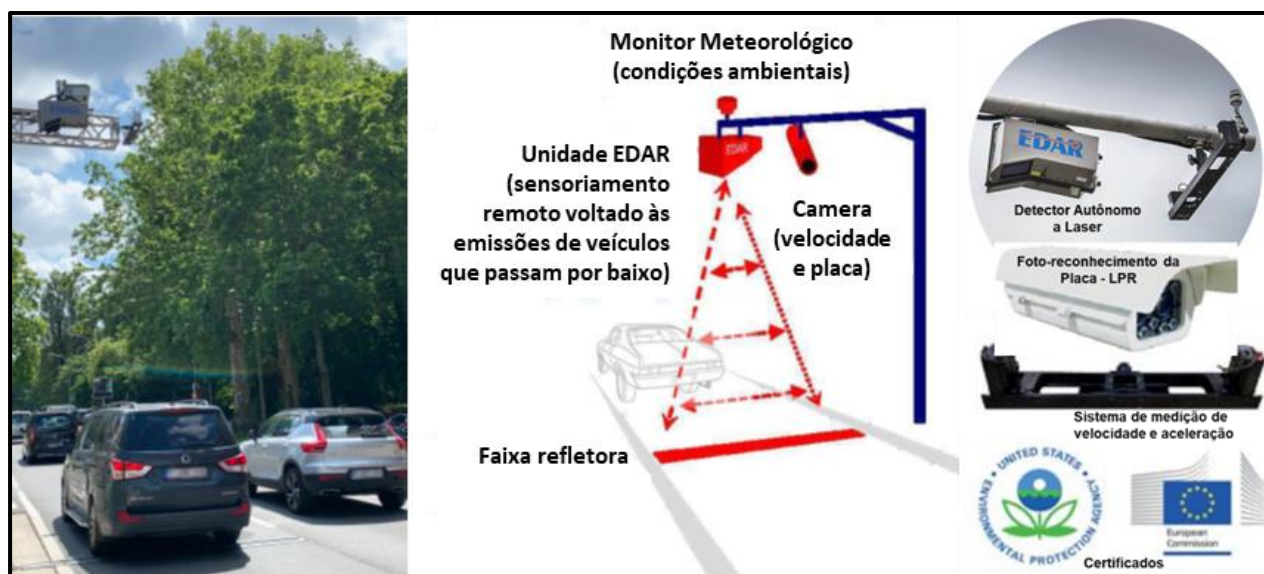


Figura 1 – Instalação para a medição por sensoriamento remoto por varredura

O método baseado em DiAL também inclui uma avaliação da temperatura dos gases de escape e ajusta automaticamente as leituras, dispensando as frequentes verificações da calibração dos instrumentos de medição com gases padrão, visto que em satélites espaciais não seria possível realizar tal operação e assegura muito maior precisão às leituras^[3], o que lhe garantiu a validação pela EPA e pela Comunidade Europeia para monitoramento de veículos.

Este novo sistema apresenta outras vantagens construtivas e operacionais, como a montagem com feixe de varredura vertical, que dispensa a segregação de faixas de tráfego, permite a montagem sobre qualquer pista de rolamento e protege o equipamento contra acidentes. O veículo passa por uma cortina de laser de diferentes comprimentos de onda.

A técnica de varredura de laser no plano vertical, perpendicular à faixa de rolamento desejada, monitora qualquer tipo de veículo indistintamente com a mesma configuração de instalação do equipamento, sendo menos sensível à posição do veículo na via e elimina as interferências da operação sobre o tráfego. É importante destacar que o tipo de laser utilizado foi certificado pela FDA norte-americana como “Classe 1”, segura para a utilização pública sem afetar os olhos, mesmo que observado diretamente.

A varredura vertical também permite avaliar a distribuição espacial das concentrações na pluma de poluentes atrás do veículo, sendo capaz inclusive de detectar quaisquer pontos críticos de emissão, como mostrado na figura 2.

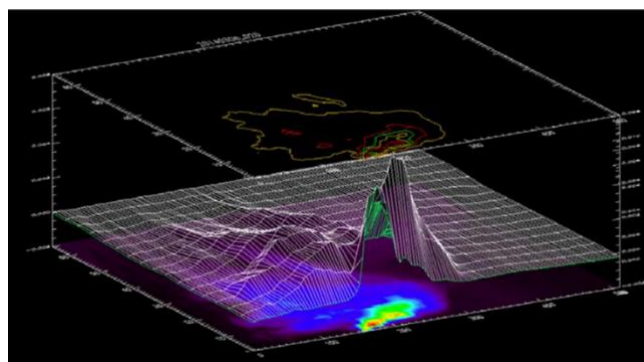


Figura 2 – Distribuição espacial das concentrações de um poluente

A partir destas distribuições, um algoritmo específico identifica as regiões da pluma que apresentam proporcionalidade entre a concentração de cada poluente e a de CO_2 , caracterizando-a como a emissão de escape desse veículo. As regiões onde esta proporcionalidade é comprometida caracterizam as interferências de outras fontes do poluente e são descartadas da avaliação da emissão de escape.

Entretanto, quando esta interferência ocorre apenas no THC, o algoritmo a localiza e identifica como emissão evaporativa, podendo quantificá-la separadamente, como indica a figura 3. A análise desta emissão pode associá-la a um canister inoperante, ou a falhas de vedação do bocal de enchimento do tanque de combustível do veículo, ou mesmo à emissão fugitiva de caminhões tanque que transportam combustível, atualmente com grande emissão evaporativa e sem qualquer tipo de controle.

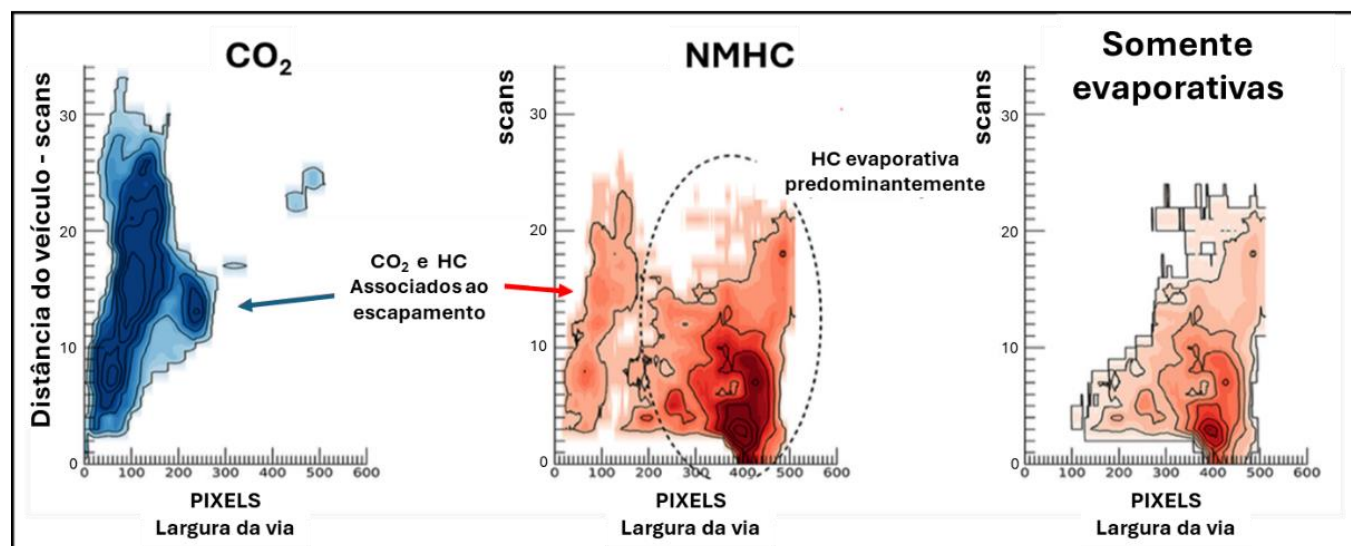


Figura 3 – Processo de detecção da emissão evaporativa

A figura 4 apresenta os resultados finais do monitoramento de todas as emissões de interesse obtidas pela técnica de varredura da via por laser e potencializada pelo método de detecção DiAL, indicando a segregação dos hidrocarbonetos de escapamento e evaporativos. Observe como as plumas de CO₂, CO e NO estão posicionadas no mesmo local, mas o NMHC não, indicando a presença de emissão evaporativa.

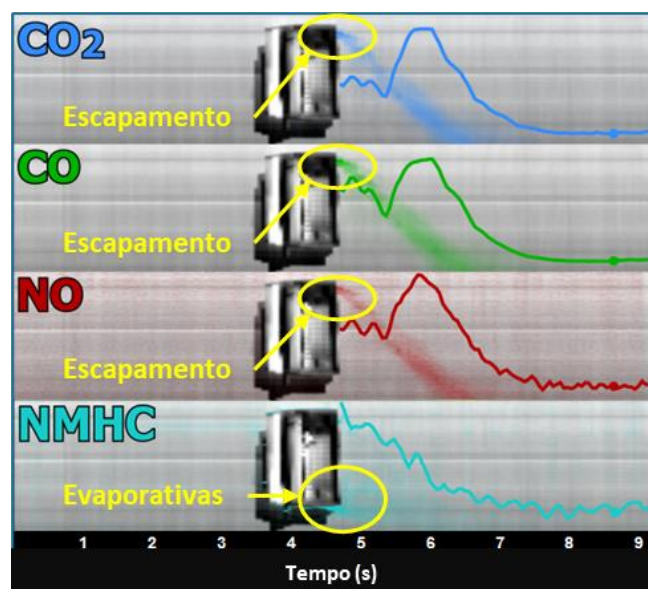


Figura 4 –Localização de emissões de escapamento e evaporativas na pluma de gases

Esta tecnologia também permite a detecção de outros compostos, tais como etanol, etileno, aldeídos, SO₂, NH₃ e outros, podendo ser facilmente adaptada para qualquer molécula gasosa, mediante a escolha de sensores para os comprimentos de onda apropriados a cada composto. Como a emissão de etanol e seus subprodutos é fundamental para o controle de ozônio no Brasil, o equipamento baseado na técnica DiAL com canais voltados a estes gases pode desempenhar um papel importantíssimo para o equacionamento correto deste problema ambiental, diante da recente Lei do “Combustível do Futuro”, publicada em outubro de 2024, que prioriza o uso de combustíveis renováveis.

Estes aprimoramentos do SR voltados às emissões de veículos vêm fazendo deste método um sucesso mundial para o monitoramento estatístico da frota em vários países, visando o levantamento de dados de veículos em circulação

Em 2016, as discussões do conhecido “dieselgate” levaram à criação do Programa *TRUE Initiative* [4], que impulsionou o SR como a ferramenta principal para a detecção de desconformidades nas frotas de veículos em circulação. Em 2017, as cidades de Londres e Paris implantaram pioneiramente programas de monitoramento com equipamentos de SR, inicialmente com os objetivos de monitorar as frotas e conscientizar a 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, quando os equipamentos EDAR tornaram-se conhecidos pela sua confiabilidade e operação autônoma, supervisionada por uma central de operações à distância.

2. A AVALIAÇÃO DE CONCENTRAÇÕES PELO LIDAR/DIAL

Sistemas de sensoriamento remoto baseados em LiDAR e DiAL são amplamente utilizados em sensoriamento remoto orbital ou aeroportado há mais de 30 anos para diversas aplicações. Uma destas aplicações é o satélite ASCENDS - *Active Sensing of CO₂ Emissions over Nights, Days, and Seasons*, que utiliza um sistema de sensoriamento remoto ativo (equipamentos que possuem a própria fonte de radiação) que utiliza pulsos de laser em comprimentos de onda específicos para o tipo de material que se pretende analisar. Como exemplo, a figura 5 mostra um filtro infravermelho típico para monóxido de carbono, com absorvância de 3,5% em uma coluna de 10 cm com uma atmosfera com 2000 ppm de CO (faixa em que este composto é transparente) [5]. Entretanto, existem algumas frequências que apresentam alta absorvância (até 65%), que correspondem a ressonâncias das estruturas moleculares do monóxido de carbono, conforme demonstra a física quântica.

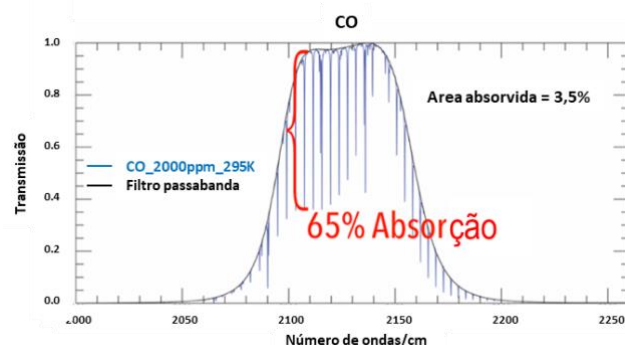


Figura 5 – Curva espectral de uma atmosfera com 2000 ppm de CO em uma coluna de 10 cm

A técnica DiAL é amplamente utilizada em sensoriamento remoto orbital para análise das concentrações de gases na atmosfera. A técnica DiAL baseia-se em um feixe de laser filtrado para dois comprimentos de onda vizinhos, segregando as áreas de máxima e mínima absorvância (*on* e *off*, respectivamente) pela substância em questão, como mostrado na Figura 6, que amplia parte do filtro infravermelho da Figura 5. O valor *off* é tomado como linha de base e o valor *on* é o que sofre maior influência da concentração de CO, sendo que estas frequências devem caracterizar picos nítidos e não coincidentes com os de outras substâncias para eliminar interferências. A concentração do gás estudado é dada a partir da relação entre os logaritmos dos sinais *on* e *off*, motivo pelo qual esta técnica leva ao desenvolvimento de equipamentos com canais específicos para cada composto a ser analisado. Nesse caso, a

sensibilidade do sinal do DiAL é aumentada em 1860% em relação ao filtro IR, o que proporciona alta confiabilidade à medição de CO. Devido à natureza absoluta do método DiAL, a calibração é desnecessária.

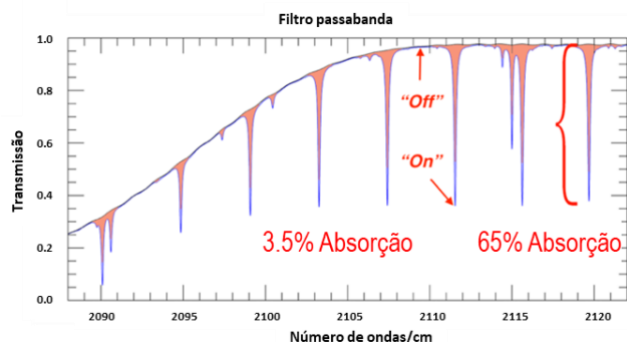


Figura 6 – Definição de frequências para análise espectral pelo método DiAL

No caso dos hidrocarbonetos, em particular, é possível inclusive desenvolver pares de filtros específicos que permitem a especiação dos compostos orgânicos.

No monitoramento da frota brasileira, que utiliza 27% de etanol na gasolina e tem grande participação de veículos flex, que utilizam até 100% de etanol, a aplicação deste método é particularmente interessante para o monitoramento de etanol, aldeídos, etileno etc., que têm efeitos diferenciados sobre a formação de ozônio troposférico.

3. EXPERIÊNCIA BRASILEIRA

Desde o ano 2000, a Contrôlar, empresa brasileira que se dedicou ao Programa de Inspeção e Manutenção de Veículos em Uso em São Paulo – I/M-SP, se dedicou ao conhecimento do método de sensoriamento remoto para a medição de emissões de escapamento de veículos e realizou diversas demonstrações em São Paulo e Brasília, das quais resultaram as primeiras estatísticas das emissões reais de veículos em uso.

Posteriormente em 2009, a Remote Sensing do Brasil – RSDB, uma empresa do mesmo grupo, introduziu o monitoramento de emissões veiculares como meio de auditar a efetividade do Programa I/M-SP. Durante três anos, mais de 2 milhões de medições em veículos leves foram realizadas em rodízio de 50 locais da cidade, que foram correlacionadas com os resultados das inspeções anuais feitas pelos métodos tradicionais, mostrando altos índices de correlação entre as avaliações realizadas pelos dois métodos [6], ao mesmo tempo que comprovou a eficácia das inspeções realizadas anualmente pelo Programa I/M-SP.

Mais tarde, em 2019, a RSDB e a EnvironMentality realizaram duas campanhas de medição por sensoriamento remoto, objetivando a demonstração do método e sua

aplicação também em caminhões de múltiplos eixos, quando foi evidenciado o distanciamento entre as exigências durante o processo de certificação de veículos novos e o comportamento dos mesmos em campo. O fato mais marcante foi a desconformidade de veículos pesados a diesel que utilizam catalisadores seletivos SCR com injeção de um reagente à base de ureia para a redução de NOx, cujo sistema de controle é fraudado pela aplicação de dispositivos eletrônicos que inibem a sua injeção, bem como com a utilização de água ou de reagente falsificado. Em todos os casos em que foram detectadas emissões acima dos limites fixados como alertas do sistema OBD, as medições por sensoriamento remoto apresentaram resultados inequívocos, que a polícia rodoviária utilizou para rastrear uma centena de veículos apontados como irregulares e encontrou fraudes em todos eles.

4. APLICAÇÕES DO MÉTODO DE SENSORIAMENTO REMOTO

O monitoramento de emissões da frota de veículos em uso por sensoriamento remoto tem diversas aplicações, permitindo ao mesmo tempo, que as cidades colem dados valiosos que possam fundamentar futuras estratégias e decisões políticas, com base em emissões reais e informações factuais, dentre as quais destacamos as principais que contemplam os seguintes objetivos:

- monitoramento da frota para levantamento de dados reais dos veículos em circulação, nas temperaturas predominantes na cidade;
- formação de um banco de dados de emissões por marca, modelo, combustível e ano de fabricação dos veículos objeto do programa e verificar a efetividade das estratégias de controle de emissões certificadas em veículos novos e identificar a degradação de componentes em tempo real;
- identificação dos veículos mais limpos da cidade por meio de monitoramento contínuo, definindo valores máximos de emissão aceitáveis para a implantação de Zonas de Ar Limpo válidas (ou de baixa emissão – ZBE). Depois que os veículos limpos forem identificados várias vezes em circulação, uma lista poderá ser gerada, permitindo que estes veículos entrem na ZBE, independentemente da sua fase do PROCONVE, sem penalidade. Isso recompensa os veículos efetivamente mais limpos, o que incentiva uma mudança de comportamento positiva entre os motoristas.
- aprimoramento dos inventários e avaliação das estratégias e políticas públicas voltadas ao controle da poluição do ar por veículos automotores;
- divulgação dos objetivos e princípios básicos do Programa para a conscientização da sociedade quanto à poluição veicular, à necessidade de manutenção preventiva e à capacitação técnica e operacional dos

estabelecimentos voltados à manutenção e reparação de veículos;

- f) notificação de usuários para a manutenção de veículos de alta emissão e a sua posterior aferição, seja com manutenção do veículo voluntária ou obrigatória;
- g) fiscalização da frota de veículos e motocicletas para induzir a manutenção preventiva e coibir a circulação de veículos de alta emissão.
- h) desenvolvimento de campanha de combate à adulteração que identifique veículos com filtros e catalisadores com defeito ou desativados, ou a inoperância dos sistemas de controle de emissões.

O Programa de monitoramento utilizando SR deve ser dimensionado e implantado de forma progressiva para dar o tempo necessário à adesão da sociedade e preparar a rede de serviços de manutenção de veículos para o cumprimento das metas ambientais adequadamente e otimizar a frota circulante.

5. LEVANTAMENTO DE DADOS E FORMAÇÃO DE UMA BASE DE CONHECIMENTO DAS EMISSÕES REAIS DE VEÍCULOS EM USO

Uma vez que o equipamento de sensoriamento remoto mede as emissões dos veículos em uso normal, o monitoramento contínuo permite criar uma base de dados que reflete as emissões reais da frota de veículos em uso, compondo uma base de conhecimento específica para cada região do país, permitindo caracterizar as emissões típicas de todos os poluentes considerados, correlacionando com idade (ou ano de fabricação) do veículo, marca, modelo, combustível etc.

Os resultados da medição por sensoriamento remoto são exatos quando expressos em gramas de poluente por mol de carbono queimado, válidos indistintamente para todos os combustíveis e calculados a partir da razão entre as concentrações do poluente e dos compostos de carbono. Esta forma de expressar os resultados é muito interessante porque permite caracterizar a emissão em gramas de poluente por quilograma de combustível queimado, que é uma forma inteligente de associá-la à geração de energia e permite uma correlação segura com as medidas expressas em g/km e g/kWh, para compará-la aos limites legais e valores de certificação.

A correlação dos métodos de ensaio de certificação com o sensoriamento remoto pode ser feita a partir da divisão dos resultados de emissão pelos de consumo de combustível, ambos obtidos em testes oficiais de laboratório, em g/km e g/kWh, e do tipo de combustível utilizado nestes ensaios, de forma a se determinar os valores de certificação também expressos em gramas de poluente/Mol de Carbono [7]. Com este artifício, a base de conhecimento gerada por sensoriamento remoto pode ser comparada à dos valores de

emissão oficiais de cada um dos poluentes convertidos em gramas de poluente por mol de carbono, ou por kg de combustível queimado, conforme demonstrado no mesmo trabalho citado, dado que as composições dos combustíveis comerciais são conhecidas, de forma a se trabalhar com grandezas mais comumente utilizadas na prática. Entretanto, no caso dos veículos flex, que compõem 80% da frota de veículos leves brasileiros, o combustível existente no tanque no momento da medição por sensoriamento remoto pode ser uma mistura de gasolina com 27% até 100% de etanol sendo, portanto, necessário trabalhar com a massa de Carbono, que é a forma exata de cálculo independente da composição do combustível. Com estas conversões, é possível caracterizar os fatores de degradação médios da frota ou de cada modelo que a compõe.

A correlação entre os fatores de emissão expressos desta forma e as estatísticas levantadas por sensoriamento remoto será uma das orientações que devem ser tomadas para a definição dos valores de referência associados aos dados oficiais de certificação para identificar os veículos limpos e os de alta emissão no âmbito do próprio programa, como será visto mais adiante.

Esta base de conhecimento permitirá que sejam detectados não apenas os problemas pontuais devidos às deficiências de manutenção, como também eventuais fraudes praticadas por usuários dos veículos, problemas de durabilidade dos equipamentos de controle de emissões de determinados modelos e outras condições que levam à degradação acelerada, entre outros problemas, bem como as fraudes de certificação como as que caracterizaram o “dieselgate”, permitindo o aprimoramento do PROCONVE e PROMOT para redução efetiva das emissões ao longo de toda a vida útil dos veículos.

Entretanto, para que os resultados obtidos em campo por sensoriamento remoto sejam coerentes com os dados de certificação de veículos e ambos componham uma base de conhecimento unificada, é mandatório que os combustíveis de referência, utilizados para a certificação de tipo em laboratório, tenham especificações representativas daquelas comercialmente disponíveis ao público. Somente desta forma, haverá uma correlação segura entre os fatores de emissão certificados com aqueles que prevalecerão ao longo da vida dos veículos, tornando os inventários de emissões realistas e permitindo o desenvolvimento de políticas públicas eficazes para o atingimento dos padrões de qualidade do ar.

6. A IMPORTÂNCIA DA DEFINIÇÃO DE VALORES DE REFERÊNCIA PARA FISCALIZAÇÃO

Como já mencionado, as medições por sensoriamento remoto são expressas precisamente em gramas de poluente por Mol de Carbono, de forma que a sua correlação com os outros processos de medição deve tomar por base esta mesma relação obtida a partir dos seus resultados.

O primeiro aspecto da definição dos valores de referência é voltado às implicações técnicas, como comentado anteriormente. A figura 7 apresenta o histograma da emissão de NOx dos veículos pesados da fase P7 do PROCONVE, levantada por sensoriamento remoto durante 4 dias em novembro de 2019, no qual o limite de emissão de 2,0 g/kWh foi convertido para 9 g/kg_diesel, utilizando-se o consumo específico médio de 220 g/kWh obtido nos processos de certificação^a. Desta forma, 9 g/kg_diesel é o valor de referência correspondente ao limite legal dessas categorias de veículos, sendo admissível uma variabilidade até as duas colunas vizinhas quando se considera a faixa de consumos específicos de cada modelo. Este levantamento indica uma probabilidade crescente de desconformidade para a emissão de NOx acima de 11 g/kg_diesel. É interessante lembrar que o histograma do primeiro dia mostrou o dobro dos índices de desconformidade, evidenciando que a simples presença do monitoramento já inibe bastante a fraude no uso do reagente à base de ureia (ARLA).

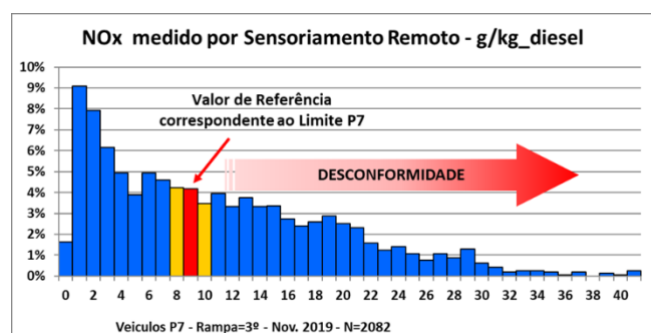


Figura 7 – Histograma das emissões de NOx em veículos pesados da fase P7

Ao utilizar um levantamento desta natureza, podem-se definir valores de referência que caracterizem veículos de baixa emissão para cada tecnologia e categoria, isto é, aqueles que seguramente apresentam emissão abaixo do limite legal, substituindo a inspeção anual tradicional. Da mesma forma, podem também ser definidos valores de referência que caracterizem veículos de alta emissão, isto é, aqueles que seguramente apresentam emissão muito acima do limite legal e devem ser induzidos a realizar manutenção corretiva ou terem a sua circulação restringida.

O segundo aspecto de importância para a definição dos valores de referência diz respeito à estratégia a ser aplicada ao Programa, sendo voltado ao estabelecimento de exigências de forma que os piores veículos sejam priorizados para correção, o que corresponde à identificação do menor número de veículos, cuja correção possa produzir as maiores reduções de emissão na cidade. Diante desta ótica, o histograma acima indica que a aplicação de um valor de referência de 27 g/kg, igual a 3 vezes o limite legal, levaria à correção de 6% da frota, com grande probabilidade de aceitação da exigência, porque a maioria dos veículos

apresenta emissão inferior a esta e todos devem ter a mesma possibilidade de cumpri-la. Já com um valor de referência de 18 g/kg, igual a 2 vezes o limite legal, a correção seria de 22% da frota, ainda com baixa possibilidade de erros que condenem veículos indevidamente.

Os valores de referência a serem adotados como “limites de corte” de um programa de fiscalização devem ser determinados segundo os conceitos apresentados por Branco et al. no XXI SIMEA [8], de forma que o número de veículos classificados como de alta emissão não seja tão leniente a ponto de que o Programa não produza os efeitos desejados, nem tão restritivo para preservar a aceitação do programa pela sociedade, evitar a sobrecarga da rede de reparação e assegurar a efetividade do Programa.

Evitando a reprovação exagerada, que comprometeria a aceitação e o êxito do Programa, sem perder a sua eficácia, os valores de referência devem ser atualizados periódica e progressivamente à medida que as estatísticas do próprio programa de fiscalização indiquem que a sociedade já encontrou os meios e está preparada para atendê-los. Entretanto, este aumento das restrições é limitado pelos valores de referência correspondentes aos ensaios de certificação de cada modelo de veículo ou fase do PROCONVE, como ilustrado na figura 8.

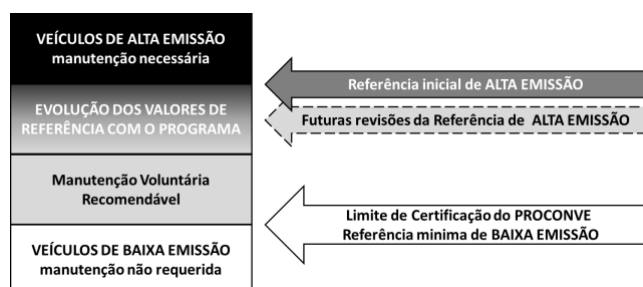


Figura 8 – Esquema da determinação e evolução dos valores de referência

Neste processo, o Programa de monitoramento deve ser seguido por uma ampla campanha de divulgação dos seus resultados e conscientização pública a respeito da necessidade ambiental da manutenção preventiva e corretiva dos veículos em uso para preservar a qualidade do ar.

O monitoramento por sensoriamento remoto poderá complementar o Programa I/M advertindo os veículos que ultrapassarem os valores de referência de alta emissão para realizarem a manutenção corretiva e a comprovarem mediante uma inspeção tradicional extraordinária, ou mesmo uma nova medição por sensoriamento remoto em prazo determinado. Adicionalmente, advertências semelhantes podem ser emitidas aos proprietários que estiverem marginalmente próximos aos limites legais para que antecipem a manutenção de seus veículos e evitem a reprovação na inspeção anual. Inversamente, a avaliação dos

valores mais conhecidos e adequados à sua compreensão, do que a referência dada em Mol de carbono.

^a Como neste caso o combustível é sempre o óleo diesel, a conversão foi feita para g_NOx/kg_diesel, que resulta em

veículos de baixa emissão por SR pode substituir com vantagens a inspeção tradicional.

Da mesma forma, a identificação de modelos de veículos que apresentem desconformidades sistemáticas de origem poderá desencadear ações junto ao fabricante para que oriente quanto à sua correção a ser oferecida à sociedade.

Um aspecto importante a ser considerado na introdução do SR como método de fiscalização é a segurança jurídica do usuário, que pode ter seu veículo aprovado pelos métodos tradicionais do Programa I/M e ser reprovado pelo SR. Neste caso, é preciso considerar os seguintes aspectos principais:

- a) Os métodos tradicionais de I/M fiscalizam a conformidade do veículo com as exigências ambientais dadas pelo PROCONVE a partir da avaliação indireta do estado de manutenção do veículo, mediante testes expeditos com o veículo numa condição de funcionamento muito particular, isto é, parado e sem carga, o que inviabiliza a avaliação do sistema de controle de NOx, por exemplo;
- b) Em contrapartida, o SR estende a avaliação do veículo a outras exigências do PROCONVE que são aplicáveis, mas desconsideradas pelos métodos tradicionais pela dificuldade da sua verificação, isto é, envolve mais poluentes, com o motor sob carga e quantifica a emissão em massa. Diante desta nova situação, a avaliação por SR é mais completa e efetiva. Os seus resultados representam melhor a emissão real da frota circulante e devem prevalecer sobre os dos métodos indiretos tradicionais, sendo que a sua segurança jurídica deve ser assegurada a partir da sua melhor correlação com as exigências do PROCONVE aplicáveis ao ano de fabricação de cada veículo;
- c) Adicionalmente, o SR é capaz de avaliar a emissão de material particulado com o motor sob carga, o que apenas é feito para veículos Diesel em programas I/M avançados, que utilizam dinamômetros de rolo (ASM e I/M240^b);
- d) O SR permite, ainda, avaliar falhas no controle de emissões evaporativas, trazendo um avanço significativo no controle de precursores de ozônio. Esta avaliação também pode ser aplicada aos veículos de transporte de combustível;
- e) A inspeção por SR avalia o veículo em funcionamento real, sendo menos sujeita aos ajustes do veículo voltados exclusivamente para sua aprovação, avaliando a conformidade do funcionamento de todos os componentes dos sistemas de controle de emissão sendo, portanto, mais abrangente do que a inspeção tradicional;

- f) O monitoramento por SR é feito durante o ano todo, focalizando os veículos de maior circulação e, portanto, de maior interesse para o controle ambiental, permitindo uma ação imediata para a reparação dos veículos em desconformidade;
- g) Por fim, o custo por inspeção é dezenas de vezes menor do que o dos programas I/M tradicionais.

7. INVENTÁRIOS MAIS REALISTAS A PARTIR DE MONITORAMENTO EM CAMPO

O inventário de emissões é uma ferramenta de planejamento destinada à determinação das prioridades na tomada de decisão nas políticas públicas.

O cálculo de um inventário de emissões veiculares baseia-se na combinação de quatro parâmetros básicos: o perfil da frota (categorias, idades, tipo de combustível), quilometragem média anual, fatores de emissão e de degradação.

Desde os primeiros inventários de emissão de poluentes por veículos até hoje, as estimativas de emissão das frotas sempre foram feitas com base nos fatores de emissão certificados afetados de fatores oficiais de deterioração, determinados sob condições ideais de funcionamento e manutenção dos veículos, que refletem a condição de desgaste mínima se o veículo for bem mantido, mas não correspondem à realidade média da frota. Assim, os inventários normalmente apresentam-se subestimados devido à inexistência de dados confiáveis da degradação dos veículos e dos seus sistemas de controle de emissões.

Por outro lado, o cálculo de tais fatores baseados nas estatísticas obtidas por sensoriamento remoto diretamente da frota em uso permitirá o aprimoramento dos inventários, tornando-os mais realistas para subsídio das ações governamentais de controle da poluição, com vistas ao atendimento aos padrões de qualidade do ar, bem como permite a avaliação das estratégias e políticas públicas voltadas ao controle das emissões de veículos automotores.

Adicionalmente, ao caracterizar as emissões dos veículos em gramas de combustível por Mol de carbono queimado, o sensoriamento remoto permite a elaboração de inventários expeditos, com base apenas no consumo de combustíveis da região que se pretende avaliar e nos fatores de emissão médios determinados por sensoriamento remoto, que já reflete a composição da frota operante, a quilometragem média anual etc., visto que os veículos circulantes são detectados segundo a frequência respectiva de cada categoria e idade.

8. CONCLUSÕES - MONITORAMENTO SR NA VIDA REAL PARA GUIAR AS

veículos leves utilizados em centros de inspeção avançados, de alto custo.

^b O ciclo I/M240 e o teste ASM - *Acceleration Simulation Mode* são procedimentos de inspeção sob carga para

ESTRATÉGIAS DE REDUÇÃO DE EMISSÕES E ATINGIR AS METAS DOS PQAR

A metodologia estabelecida para a avaliação de emissões de veículos em uso pelo Programa I/M no Brasil encontra-se desatualizada frente à evolução tecnológica dos veículos, não sendo mais efetiva para os veículos com controle eletrônico do motor, os quais já estão no mercado há duas décadas e compõe a quase totalidade da frota circulante.

A utilização de equipamentos modernos de medição por sensoriamento remoto no monitoramento das frota permite avaliar corretamente não apenas as emissões dos poluentes considerados nos Programas I/M (CO e THC em marcha lenta para veículos do ciclo Otto e opacidade em aceleração livre para veículos do ciclo Diesel), mas agora com o motor sob carga e incluindo os demais poluentes regulamentados (NOx e MP), o que torna essa análise mais aprofundada e efetiva do que os métodos do Programa I/M tradicional. Além disso, o sensoriamento remoto também pode avaliar a emissão dos poluentes não regulamentados, mas que podem vir a configurar outros problemas ambientais, tais como os efeitos do etanol, etileno, aldeídos, N₂O e outros sobre a formação de ozônio e o efeito estufa, considerando todos os tipos de veículos e combustíveis indistintamente.

O monitoramento contínuo por sensoriamento remoto constitui a ferramenta mais eficaz para a fiscalização da frota circulante quanto à fraude do tipo “ajustar para passar e reajustar depois”, continuando a poluir durante o resto do ano, conhecida de longa data nos Programas I/M tradicionais.

Recomenda-se que a introdução da tecnologia de medição por sensoriamento remoto no Brasil seja feita por etapas, com uma fase inicial para monitoramento das emissões da frota e campanhas de conscientização pública quanto à necessidade de manutenção dos veículos para melhoria da qualidade do ar. Nesta fase será possível a criação de um primeiro banco de dados das emissões reais da frota em uso normal, fornecendo dados, até então inéditos, para subsidiar os formuladores de políticas públicas e órgãos reguladores na avaliação e evolução da legislação ambiental. Adicionalmente, essas informações também poderão ser repassadas aos consumidores e fabricantes para orientação das suas próprias tomadas de decisão, como estabelecido pela “TRUE Initiative” da Europa.

Uma vez constituído um banco de dados de emissões robusto, será possível estabelecer os valores de referência para classificar os veículos nas categorias de alta ou baixa emissão. Estabelecidos os valores de referência, as medições feitas por sensoriamento remoto poderão ser utilizadas como complemento ao Programa I/M, permitindo uma triagem inicial para definir quais os veículos já poderão ser considerados inspecionados em substituição à inspeção periódica (veículos de baixa emissão), por um lado, e quais deverão ser intimados a realizar manutenção corretiva antes de se apresentar para uma nova verificação por SR ou uma avaliação completa em um centro de inspeção dotado de dinamômetro para testes segundo o ciclo I/M 240 ou ASM, equipamentos para análise por OBD e, eventualmente, de um sistema PEMS/RDE^c para dirimir questionamentos judiciais.

Em um terceiro momento, as medições por sensoriamento remoto poderão praticamente substituir as inspeções presenciais do Programa I/M com vantagens técnicas e a um custo significativamente mais baixo, efetuando a fiscalização de maneira contínua (não apenas uma vez ao ano), envolvendo todos os poluentes de interesse, dispensando a população do incômodo de uma inspeção em local e horário agendado previamente, especialmente aqueles que mantêm os seus veículos em boas condições.

O sensoriamento remoto não é uma bala de prata. Mas é uma tecnologia prática e econômica. Combinado com testes laboratoriais e outras técnicas, ele pode levar a uma compreensão mais clara da poluição do ar causada pelo transporte rodoviário e a melhores opções de políticas públicas.

Portanto, o sensoriamento remoto DiAL é o método de monitoramento e inspeção das emissões da frota de veículos que nos aproxima do grande objetivo de melhorar a qualidade do ar nas cidades brasileiras e atingir as metas de conformidade com os padrões de qualidade do ar.

REFERÊNCIAS DO APRESENTADOR

Fábio Cardinale Branco trabalha há 29 anos na EnvironMentality – Tecnologia com Conceitos Ambientais Ltda no controle da poluição veicular, particularmente nas áreas de inspeção veicular, elaboração de inventários, sensoriamento remoto, avaliação de veículos em uso e nas revisões do PROCONVE. É mestre em sensoriamento remoto orbital pelo Instituto de Geociências da USP.

Celular: (11) 9 9955-8339

e-mail: fabio.branco4@gmail.com

^c Os testes RDE – Real Drive Emission são realizados em vias de tráfego com medição realizada a bordo do veículo

por equipamentos PEMS – Portable Emissions Measurement System.

REFERÊNCIAS

- ¹ Bishop, G.A.; Starkey, J.R.; Ihlenfeldt, A.; Williams, W.J.; Stedmann, D. – IR Long-path Photometry: a Remote Sensing Tool for Automobile Emissions - Denver University - Analytical Chemistry, Vol. 61 (10), May 15, 1989
- ² NASA Spinoff: CO₂ Sensors Monitor Vehicle Emissions from Above; spinoff.nasa.gov/Spinoff2017/t_4.html
- ³ Mazzoleni, C., Kuhns, H.D. e Moosmüller, H. - Monitoring Automotive Particulate Matter Emissions with LiDAR: A Review – Open Access Remote Sensing – 2010 - ISSN 2072-4292 - <http://www.mdpi.com/journal/remotesensin>
- ⁴ The Real Urban Emission Initiative - TRUE Initiative - <https://www.trueinitiative.org/>
- ⁵ Hager, J.S. - Extremely Sensitive Gas Plume Imaging - SPIE Defense & Commercial Sensing Conference - 13454, Paper 13454-40 – 13 to 17 April 2025
- ⁶ 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
- ⁷ Branco, F.C.; Branco, G.M.; Branco, R.A.R.; Szwarc, A. - Monitoramento de Emissões Veiculares por Sensoriamento Remoto - XXVIII SIMEA - 2020
- ⁸ Branco, F.C.; Branco, G.M.; Szwarc, A.; Mello Filho, L.V.F.; Napoleone, J.M. - Valores Característicos dos Parâmetros de Referência de Emissões dos Veículos Brasileiros – XXI SIMEA 2013.