

Controle de Partículas dos Motores a Gasolina e Etanol

Gabriel Murgel Branco

Fábio Cardinale Branco

Resumo

A partir dos valores médios de certificação dos veículos brasileiros, observa-se um aumento da emissão de material particulado dos automóveis a gasolina e flexfuel pela introdução de motores Otto com injeção direta de combustível (GDI). Este efeito foi comparado às estratégias de redução de material particulado voltadas aos motores diesel pesados, já em andamento no Brasil desde 1986 e com grande eficácia, para se avaliar a necessidade de uma abordagem específica para os motores do ciclo Otto que equipam os veículos leves.

Este trabalho compara os padrões tecnológicos aplicados aos motores leves e pesados, para uma avaliação estratégica do controle de emissões veiculares de material particulado, mas como tais emissões são expressas de formas diferentes para estas categorias de veículos, foi desenvolvido um novo método de análise, especificamente para esta finalidade.

Trata-se de um método expedito, baseado na demanda energética, que converte os fatores de emissão para uma base comum, mais associável ao trabalho realizado pelos motores e, consequentemente, mais representativo das atividades realizadas pelo conjunto de veículos em suas frotas, independentemente do conhecimento das estatísticas de utilização de cada um. O conceito se baseia na conversão dos fatores de emissão originalmente incomparáveis, medidos em g/km para veículos leves e em g/kWh para veículos pesados, para uma unidade padronizada em gramas de MP por quilograma de combustível queimado (ou por Mol de Carbono, para comparações mais precisas com combustíveis oxigenados), permitindo a comparação da “eficiência ambiental” entre diferentes tipos de máquinas.

A comparação feita nesta nova base permitirá identificar se os avanços tecnológicos nos motores e sistemas de pós-tratamento dos gases aplicados aos veículos pesados já superam a qualidade das tecnologias atuais aplicadas aos veículos leves, e indicará a real necessidade de priorizar estes últimos no controle de material particulado. Se este for o caso, a substituição dos motores Otto com injeção indireta MPFI pelos novos motores GDI precisará ser reavaliada, para que esta tendência de mercado seja viabilizada mediante a aplicação de recursos que reduzam a emissão de MP. Tal estratégia potencializa a aplicação de filtros cerâmicos nos sistemas de escapamento, que é a melhor alternativa, pois permite obter os resultados ambientais mais avançados, com o benefício adicional de reduzir também o número de partículas (NP).

Este processo de cálculo está sendo estudado para a aplicação em todo o histórico da evolução do controle de material particulado no Brasil, considerando os fatores médios de emissão de cada tecnologia e as proporções de mercado MPFI/GDI, de forma a comparar efetivamente a tendência de redução da emissão de MP pelos veículos pesados a diesel com a nova tendência de crescimento nos motores leves a gasolina e flex, com vistas à definição precisa da estratégia para a sua correção.

Esta análise permite uma avaliação muito abrangente, envolvendo todos os tipos de veículos e motores para reequilibrar as estratégias de controle de emissões de MP que estão divorciadas entre si.

Antecedentes

Tradicionalmente, os motores do ciclo Otto com ignição por centelha apresentam baixa emissão de material particulado, mesmo sem dispositivos de controle, porque a mistura ar-combustível é preparada antes da sua entrada na câmara de combustão, apresentando alto grau de homogeneidade e uma queima mais completa. Este fato os diferencia significativamente dos motores Diesel, nos quais o combustível é injetado sob alta pressão diretamente na câmara de combustão, formando um spray cujas gotículas transformam-se em núcleos de formação de material particulado, cuja emissão é naturalmente elevada.

Entretanto, este sistema de injeção de combustível apresenta vantagens de desempenho e de eficiência energética, e também vem sendo aplicado aos motores do ciclo Otto, o que aumenta significativamente a sua emissão de material particulado.

Nos Estados Unidos, a introdução dos motores a gasolina com injeção direta (Gasoline Direct Injection – GDI) a partir de 2008 no mercado, elevou a média da emissão de material particulado dos automóveis em cerca de 10 vezes, levando a legislação ambiental daquele país a estabelecer o limite de 0,3 mg/km. Previsões modeladas pela sua agência ambiental em 2014 indicaram que este processo demoraria duas décadas para trazer a média da emissão de MP de volta para valores aceitáveis¹, como mostra a figura 1.

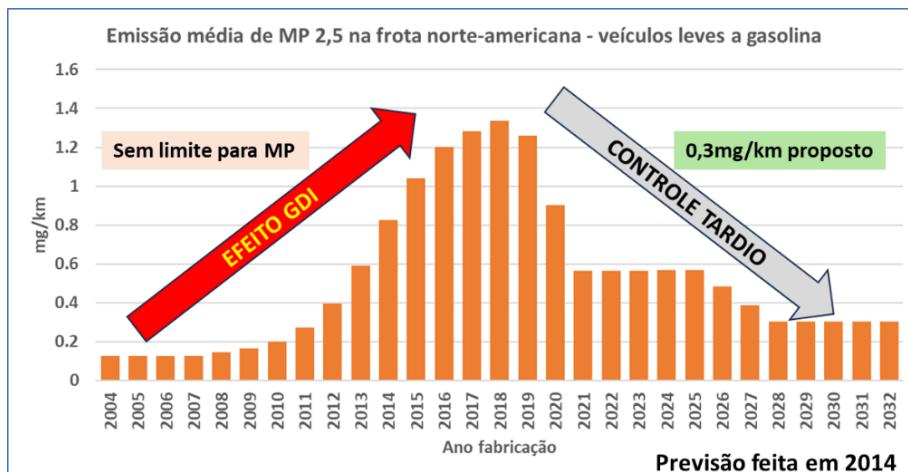


Figura 1 - Emissão média de particulados da frota de veículos a gasolina - EUA

Este efeito foi confirmado em 2023 em levantamentos de emissões feitos por sensoriamento remoto para o TRUE Initiative Program, e mostraram queda da emissão de MP dos modelos 2005 a 2015 e a reversão abrupta desta tendência, que foi totalmente perdida com o crescimento observado até os anos-modelo 2020.² Esta mesma tendência também é detectada na análise das concentrações atmosféricas de

MP_{2,5} em várias regiões dos EUA, que já mostram uma reversão do decréscimo deste poluente que vinha sendo observado desde 2010, com a retomada do crescimento a partir de 2020 em nível nacional, que já levou a média anual a ultrapassar o padrão norte-americano de 9 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, em diversas regiões, como mostrado na figura 2, obtida a partir de dados do EPA³.

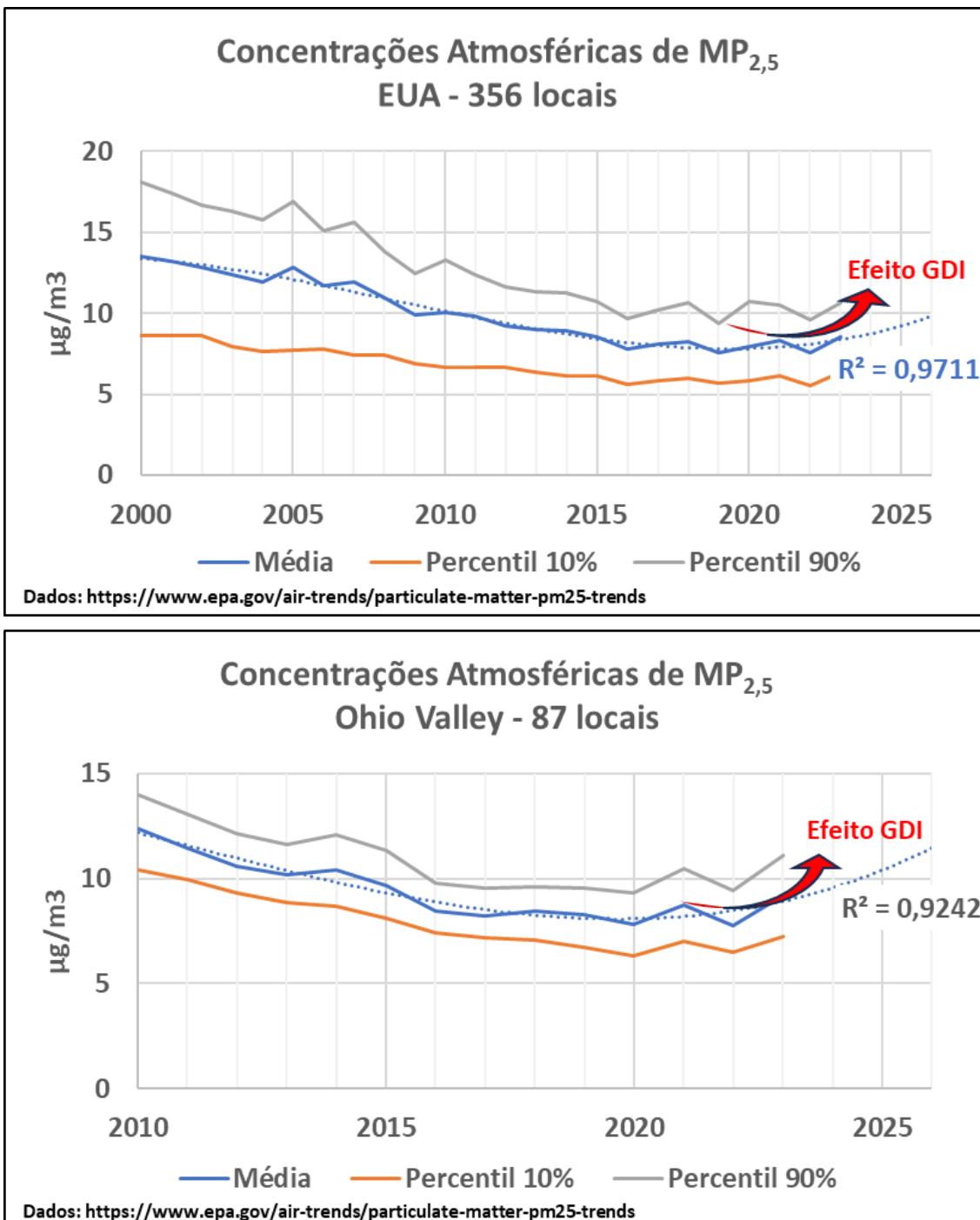


Figura 2: Médias atmosféricas anuais de MP_{2,5} nos EUA

Tanto nos motores Diesel como nos Otto GDI, a tecnologia mais eficaz para o atendimento aos limites mais exigentes da emissão de MP se baseia na filtragem dos gases de escapamento e queima da fuligem acumulada no filtro a partir da própria temperatura dos gases. Trata-se de filtros cerâmicos que, além de reduzirem a massa de particulados, reduzem também o número de partículas presentes nos gases em até 500 vezes, dependendo do padrão tecnológico do filtro.

Este aspecto é particularmente importante porque a redução da emissão de MP em massa, a partir de técnicas associadas ao processo de combustão para promover uma queima melhor das partículas, como no caso dos catalisadores de oxidação, se dá às custas da redução do tamanho das partículas, mas mantém o mesmo número delas por metro cúbico de gás de escapamento. É importante ressaltar que, no processo de combustão nos motores, as partículas de fuligem se formam com diâmetros da ordem de $0,1\text{ }\mu\text{m}$ ($\text{MP}_{0,1}$), muito menores do que as partículas conhecidas como $\text{MP}_{2,5}$, isto é, com diâmetros de até $2,5\text{ }\mu\text{m}$. Com este diâmetro diminuto, o $\text{MP}_{0,1}$ apresenta toxicidade muito mais elevada, visto que as partículas sub-micrônicas penetram mais fundo nos pulmões e só podem ser eliminadas pela corrente sanguínea, potencializando a absorção de materiais estranhos nos tecidos, que geram doenças mais graves, ao invés de serem expelidas pelo muco nasal.

A formação de material particulado nos motores de combustão interna

Nos motores Diesel, o combustível é pulverizado diretamente no interior da câmara de combustão, formando uma mistura heterogênea de ar e líquido, cujas gotículas absorvem calor e se gaseificam produzindo uma nuvem de vapor no seu entorno, misturada com ar em concentrações decrescentes à medida que se distancia da gotícula. A combustão ocorre nesta área de vapores, aquecendo a gotícula e produzindo um núcleo de carbono pirolisado que constitui o material particulado, conforme mostrado na figura 3. Em outras palavras, cada gotícula é queimada por fora e “cozida” por dentro, restando um núcleo de carbono oriundo das frações mais pesadas do combustível. Este processo leva à formação mais elevada de fuligem conhecida como típica dos motores Diesel, que pode ser fortemente reduzida a partir do aumento da pressão de injeção do combustível, visando a sua melhor pulverização, e complementada por uma filtragem dos gases de escapamento nos motores mais modernos.

Nos motores de combustão por centelha, do ciclo Otto com injeção indireta (Multi Port Fuel Injection - MPFI), o combustível é misturado com o ar fora da câmara de combustão, sob melhores condições para produzir uma mistura mais homogênea, sendo grande parte dele vaporizada previamente. Por isso a emissão de material particulado deste tipo de motor é naturalmente muito mais baixa.

Entretanto, a injeção direta de combustível na câmara de combustão também tem sido aplicada recentemente aos motores Otto (GDI) para melhoria do torque e do consumo, à semelhança dos motores Diesel, o que também os assemelha na formação de material particulado, porém de forma menos intensa porque os combustíveis utilizados são mais voláteis, entre outras características desta concepção.

Por esta razão, a introdução de modelos GDI no mercado eleva as médias de emissão de material particulado dos veículos leves a gasolina, tradicionalmente próximas a 1mg/km, para 3 mg/km ou mais. Este fato foi observado no mercado americano na primeira década dos anos 2000 e agora se repete no Brasil, elevando a média dos motores Otto de forma significativa a partir de 2021, incluindo os veículos flex fuel.

O controle deste processo é feito predominantemente pelo aumento da pressão de injeção, para produzir gotículas menores, e da geometria dos componentes do motor, até um certo ponto quando a filtragem dos gases se faz necessária para o atendimento a limites mais exigentes.

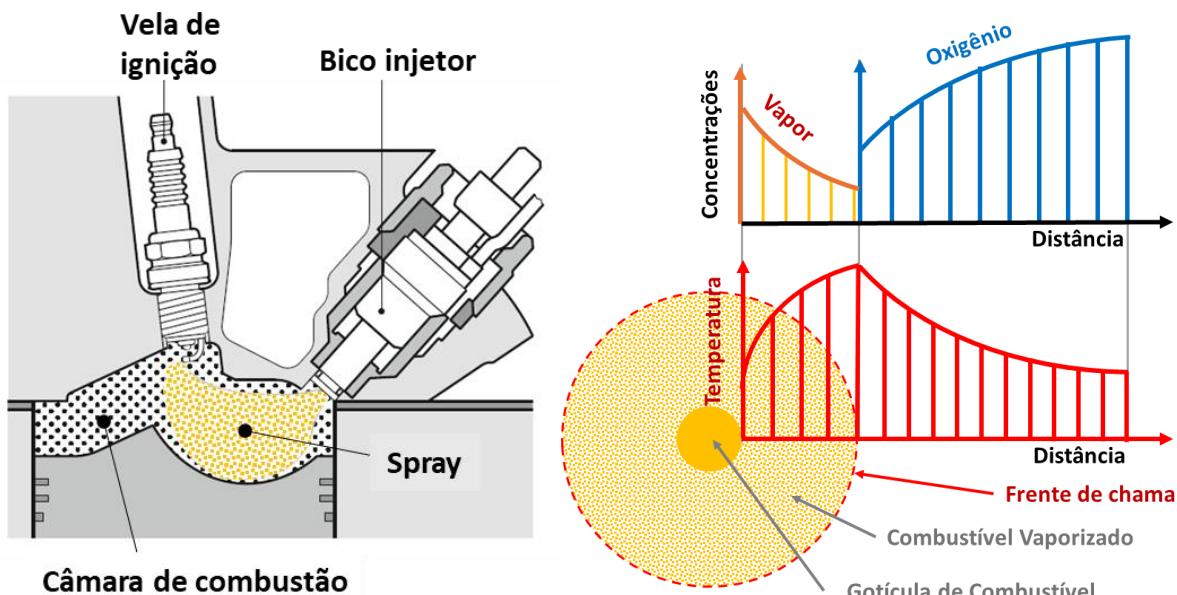


Figura 3 – Vaporização e queima do combustível nos motores com injeção direta

A evolução do controle da emissão de material particulado no Brasil

Desde o início do PROCONVE – Programa de Controle de Poluição do Ar por Veículos Automotores, a emissão de fuligem pelos motores Diesel de veículos pesados foi reduzida de 1500 mg/kWh na década de 80, quando o óleo diesel era de qualidade baixa e com 10.000 ppm de enxofre, para menos de 30 mg/kWh em 2012 com a introdução da fase P7, quando o Brasil pôde contar com o combustível de teor de enxofre ultrabaixo (10 ppm). Este processo reduziu drasticamente a emissão de MP, tanto na formação de sulfatos, quanto pela viabilização de tecnologias avançadas de injeção de combustível dos motores Diesel.

Em 2023 a fase P8 (padrões EURO VI) consolidou novas tecnologias reduzindo a emissão de MP ainda mais, permitindo o atendimento ao limite de 10 mg/kWh, com a exigência adicional de atendimento ao limite de 6×10^{11} partículas por quilowatt hora de energia mecânica produzida pelo motor, o que tem sido cumprido com a aplicação de filtros cerâmicos. A tabela 1, construída a partir dos dados históricos do PROCONVE, ilustra esta evolução do controle da emissão de material particulado nos motores pesados brasileiros.

Tabela 1 - Emissão típica e limites de material particulado para veículos pesados

Fase	MP mg/kWh	Observação
Pré PROCONVE	1500	
P3 - 1996	1100	Dados típicos antigos, convertidos para valores equivalentes no ensaio ETC
P4 - 2000	250	
P5 - 2005	160	Limite - Introduzido o óleo Diesel S500
P6 - 2009	30	Fase cancelada por indisponibilidade do óleo Diesel S50
P7 - 2012	30	Limite - Introduzido o óleo Diesel S10
P8 - 2023	10	Limite em massa, além do limite de 6×10^{11} partículas/ kWh

Ao mesmo tempo, a emissão certificada de material particulado pelos automóveis a gasolina, etanol e flexfuel manteve-se sistematicamente em 1 mg/km até o ano de 2021, cuja média começou a crescer atingindo 3mg/km para os veículos a gasolina em 2023, segundo os dados médios de certificação de veículos com motores MPFI e GDI, publicados pela CETESB. É importante observar que os veículos leves comerciais a diesel apresentavam valores muito mais elevados em 2011, mas já atingiram o nível de 1 mg/km desde 2023.

Portanto, observa-se o mesmo comportamento ocorrido nos Estados Unidos com a introdução dos motores GDI, que vem se intensificando nos últimos anos no Brasil, embora a CETESB não tenha explicitado as proporções entre ambos. No caso brasileiro ainda existe um atenuante quando esses motores (MPFI e GDI) utilizam etanol hidratado, mas mesmo neste caso emitem particulados entre 1 e 2 mg/km, ainda abaixo dos limites corporativos exigidos na fase L8, que são de 4 mg/km atualmente e 3 mg/km a partir 2029. Esses limites da fase L8 são lenientes e abrem espaço para uma elevação da emissão média de MP nos próximos anos, permitindo valores acima desses limites para um modelo em particular, a serem compensados por outro do mesmo fabricante.

Tabela 2 - Emissão típica de material particulado por veículos leves⁴

Ano	Emissão média de MP - mg/km							
	Veículos de Passageiros				Veículos Comerciais			
	Flex-Etanol	Gasolina C	Flex-Gasol C	Diesel	Flex-Etanol	Gasolina C	Flex-Gasol C	
1997 a 2011	1,1	1,1	1,1	65	1,1	1,1	1,1	
2011 a 2021	1,1	1,1	1,1	13,6	1,1	1,1	1,1	
2022 (L7)	1,6	1,3	3,0	2,0	1,6	2,3	3,0	EFEITO GDI
2023	2,4	1,3	2,9	1,1	1,0	1,7	3,5	
2024	1,7	1,2	2,4	0,7	1,0	1,8	3,5	
Média 2022-24	1,9	1,3	2,8	1,2	1,2	1,9	3,3	

Fonte: dados de certificação, CETESB, 2024

Comparações tecnológicas entre veículos de categorias diferentes

A CETESB apresenta à sociedade a melhor informação sobre a atividade veicular, publicando anualmente os valores médios dos fatores de emissão certificados para cada categoria de veículo e ano de fabricação para que a sociedade, a comunidade científica e os administradores públicos possam conhecer, avaliar e propor as políticas públicas para a manutenção da qualidade ambiental⁵.

Apesar de ser a fonte de dados mais completa publicamente disponível, várias categorias não apresentam todos os dados em algumas fases do PROCONVE, entretanto categorias semelhantes podem ser agrupadas para oferecer uma visão geral evolutiva do programa. Desta forma, o significado estatístico não é uniforme para todos os casos, mas descreve bem o histórico dos valores típicos, especialmente sob os aspectos da sua progressividade e evolução tecnológica da frota brasileira.

As emissões de escapamento e seus respectivos limites fixados pelo PROCONVE são expressos em gramas por quilowatt hora para veículos pesados e em gramas por quilômetro para veículos leves e motociclos, o que torna difícil a comparação entre os níveis de emissão de todas as categorias. Estas formas de medir as emissões são associadas a ciclos de condução característicos das cargas do motor praticadas no uso quotidiano das diversas categorias de veículos. Assim, os motores pesados são ensaiados em cargas mais elevadas do que os leves e motociclos, cada um à sua maneira, mas da forma mais representativa do uso real da categoria de veículos para a determinação das emissões e do consumo de combustível.

Consequentemente, o quociente entre os fatores de emissão e o consumo de combustível nas mesmas condições de carga no teste, que corresponde à emissão por kg de combustível também é representativo do uso real. Para este cálculo, ambos medidos e expressos nas mesmas unidades, seja em g/km ou g/kWh. Convém salientar que este fator é muito mais estável do que os primeiros ao longo do mapa do motor, isto é, os resultados médios do ciclo de ensaio são representativos de uma grande variedade de regimes de funcionamento.

O fator obtido em g_{poluente}/kg_{combustível} multiplicado pelo consumo real total de uma dada categoria de veículo, seja numa frota ou numa região, resulta numa estimativa bastante precisa da emissão total de poluentes dessa frota, ou na região considerada.

Com esta técnica, contorna-se a dificuldade de comparar emissões de qualquer tipo de veículos e motores, de categorias, tamanhos e aplicações diferentes, sem a necessidade da elaboração de inventários tradicionais, permitindo a comparação da “eficiência ambiental” entre eles.

Esta técnica também se aplica para as comparações com o monitoramento de emissões por sensoriamento remoto, cujas medições são expressas diretamente em g/Mol de carbono, facilmente convertida para g/kg de combustível queimado⁶. A partir desta técnica, a figura 4 compara as emissões médias de certificação publicadas pela CETESB e convertidas para g/kg_{combustível} a partir dos consumos de combustível determinados nos mesmos ensaios de certificação.

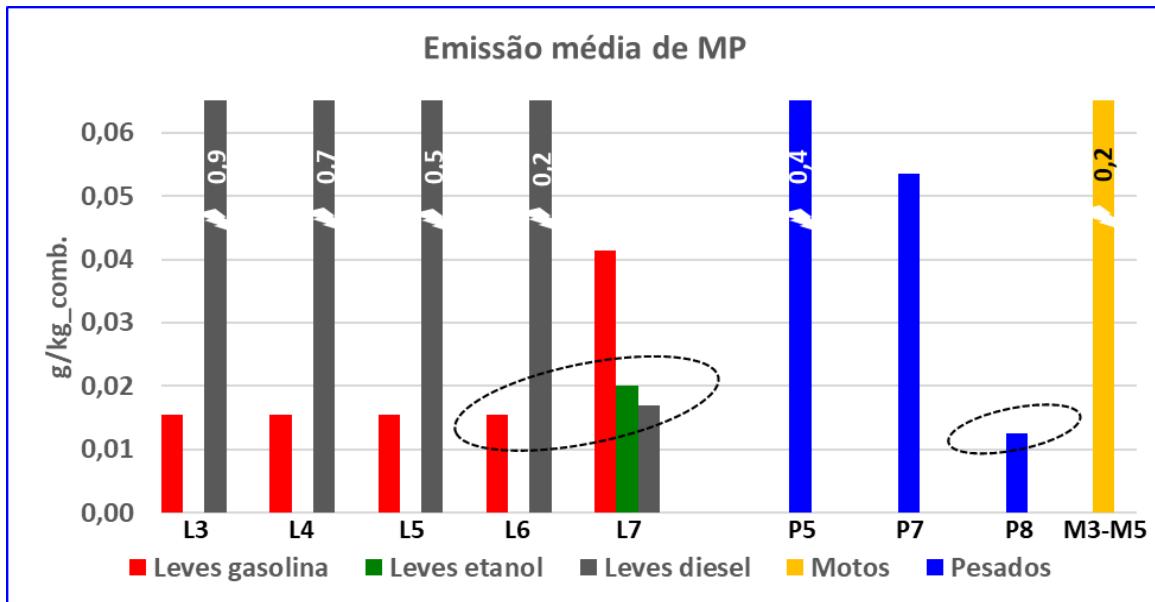


Figura 4 - Emissões médias de certificação expressas em g/kg_combustível

A partir destas comparações podem-se extrair algumas observações importantes:

- Os veículos leves com motor do ciclo Otto apresentaram as menores emissões de particulados até a fase L6, (dados disponíveis apenas para veículos a gasolina, flex abastecidos com gasolina e veículos Diesel);
- A partir da fase L7, a participação significativa de motores GDI no mercado elevou a emissão de MP dos motores a gasolina e flex abastecidos com gasolina em mais de 100%, atingindo níveis semelhantes ao dos motores pesados da penúltima fase do PROCONVE (P7);
- Ainda na fase L7, surgem os primeiros dados de veículos flex abastecidos com etanol, os quais apresentam emissão ainda compatível com a dos veículos a gasolina tradicionais (MPFI) das fases anteriores;
- Desde as fases iniciais do programa, a emissão de particulados pelos motores Diesel, tanto leves como os pesados, foram drasticamente reduzidas nas fases L7 e P8 (95% a 99%), atingindo níveis compatíveis aos dos motores Otto tradicionais (MPFI), considerados satisfatórios até então;
- As motocicletas ainda têm tecnologias que permitem alta emissão de MP, em níveis quase quatro vezes superiores aos dos motores pesados da fase P7.

As observações “a” e “b” sugerem a implantação imediata de tecnologias que reduzam a emissão de MP pelos veículos leves com motores do ciclo Otto. Entretanto, a observação “c” indica que a utilização de etanol representa uma possibilidade para a mitigação deste problema.

A observação “d” permite concluir que o Brasil já dispõe de soluções tecnológicas e sistemas de pós-tratamento para a redução da emissão de MP dos motores Diesel leves aos níveis necessários, que podem servir igualmente para os motores Otto GDI.

Estes fatos, já evidenciados pelos resultados das certificações de veículos novos, indicam a necessidade urgente e, também a viabilidade, da correção das distorções provocadas pelos motores GDI no controle das emissões de material particulado pelos veículos automotores em geral.

É importante considerar que, durante muito tempo, os veículos Diesel apresentaram, de longe, os maiores níveis de emissão de material particulado, até a entrada da fase P7 do PROCONVE, em 2012, quando esta foi reduzida abaixo do nível de emissão das motos, mas ainda muito acima dos veículos flex e a gasolina. Em 2023, a emissão dos veículos pesados foi reduzida a $\frac{1}{4}$ do limite P7, equivalente à dos automóveis com motor MPFI, praticamente eliminando este problema. Entretanto, os motores GDI estão elevando as médias dos veículos leves a níveis comparáveis aos da fase P7 dos veículos pesados já ultrapassados. Observa-se também, que os veículos leves a diesel também tiveram seus níveis de MP drasticamente reduzidos, muito abaixo dos limites estabelecidos, devido à generalização do uso de filtros cerâmicos, tendo atingido níveis de 1 mg/km, compatíveis com os dos veículos a gasolina e flexfuel tradicionais.

Em termos tecnológicos, estes números demonstram que o Brasil já dispõe de tecnologias suficientemente limpas para devolver os baixos níveis de emissão aos veículos leves com motores Otto, inclusive os GDI, sendo que os filtros apresentam a vantagem de também reduzir o número de partículas numa proporção de 10 até 500 vezes abaixo dos níveis atuais, dependendo da geração desta tecnologia a ser adotada e da impregnação do substrato com material catalítico.

A primeira recomendação resultante desta análise é o aprimoramento dos dados aqui utilizados, a partir de medições específicas de MP (massa) e de NP (número de partículas), distinguindo veículos GDI e MPFI funcionando com etanol e com a atual gasolina E30, para que seja realizado um estudo detalhado da viabilidade da aplicação das tecnologias contempladas até o momento e constantes do banco de dados de certificação da CETESB.

Complementarmente, a observação “e” indica que os motores de motocicletas ainda não têm tecnologias para controle mais severo da emissão de MP. Entretanto, as atuais regulamentações internacionais para motores de quatro tempos ainda não têm priorizado o controle de MP desta categoria, porque estes veículos têm limitações de espaço para os sistemas de controle e seus motores do tipo PFI já apresentam uma redução deste problema. Complementarmente, a maioria dos motociclos tem motores monocilíndricos que produzem fortes vibrações mecânicas e no fluxo de gases, o que reduz a durabilidade de substratos cerâmicos, dificultando a sua aplicação.

Comparação dos impactos ambientais

As análises tradicionais do impacto ambiental de frotas de veículos são feitas com base em inventários de emissões calculados a partir do número de veículos existentes, da sua utilização média anual e dos seus fatores reais de emissão em

gramas por quilômetro, sendo que todos estes dados precisam ser obtidos para cada ano-modelo. No caso dos veículos pesados os fatores de emissão são dados em gramas por quilowatt hora de energia produzida, que podem ser convertidos para g/km a partir dos consumos de combustível medidos no motor e no veículo.

Trata-se de um trabalho extenso e dependente de várias estatísticas, muitas vezes afetadas de erros significativos. Entretanto, com o conceito desenvolvido acima, um inventário comparativo entre diferentes combustíveis para uma região pode ser fácil e rapidamente estimado a partir dos consumos totais de combustíveis verificados na região, multiplicado pela relação entre os fatores de emissão em gramas por quilo de combustível queimado, que podem ser ponderados por categoria. Esta aproximação reduz algumas incertezas do inventário e tem grande importância para a detecção de falhas pontuais na legislação ambiental e para o planejamento de estratégias futuras, antes que se tenha dados para a elaboração mais precisa de um inventário detalhado. Além disso, também permite a análise de máquinas muito diferentes entre si, como automóveis, caminhões, trens, geradores etc.

No caso da presente análise, pretende-se comparar apenas as tendências futuras da emissão de material particulado dos veículos pesados contra as dos veículos leves, agrupadas somente por ano de fabricação. A análise das duas últimas fases do PROCONVE prevê que a evolução de cada uma dessas categorias inverterá o equilíbrio do controle de material particulado nas duas frotas.

Considerando, ainda, que o consumo nacional de combustíveis se subdivide em 50% de óleo diesel, 33% de gasolina e 16% de etanol, como mostra a tabela 3, estas frotas terão, a médio prazo, metade do consumo de combustível (ou da energia despendida nos transportes) sujeita aos menores fatores de emissão de material particulados (veículos Diesel P8) e a outra metade queimando em veículos com motor do ciclo Otto da fase L8, que são menos controlados.

Desta forma, à medida que o tempo passar sem uma correção dos limites de MP para motores a gasolina principalmente, as suas emissões se aproximam das características destas duas fases, tornando os veículos leves os maiores responsáveis pela emissão de material particulado.

Este efeito anulará completamente os benefícios conquistados com muito esforço para o controle dos veículos pesados a diesel, à medida que ambas as frotas se modernizem, conforme indicam as médias gerais mostradas na figura 5.

Tabela 3 – Consumo de combustíveis por região em 2024 – ANP

Ano base: 2024	ETANOL HIDRATADO	GASOLINA C	ÓLEO DIESEL
BRASIL	16%	33%	50%
ESTADO DE SÃO PAULO	31%	28%	41%
REGIÃO SUDESTE	25%	30%	46%
REGIÃO NORDESTE	8%	44%	49%
REGIÃO SUL	7%	40%	53%
REGIÃO CENTRO-OESTE	21%	22%	57%
REGIÃO NORTE	4%	33%	63%

Fonte: modificado de ANP⁷

No estado de São Paulo estas percentagens assumem posições ainda piores, com 59% do consumo de combustíveis concentrados nos veículos Otto, assim como é previsível que isto também ocorra nas maiores cidades. Nas demais regiões, estes efeitos são similares porque os veículos Otto ainda mantêm participações significativas, mesmo em nível médio regional.

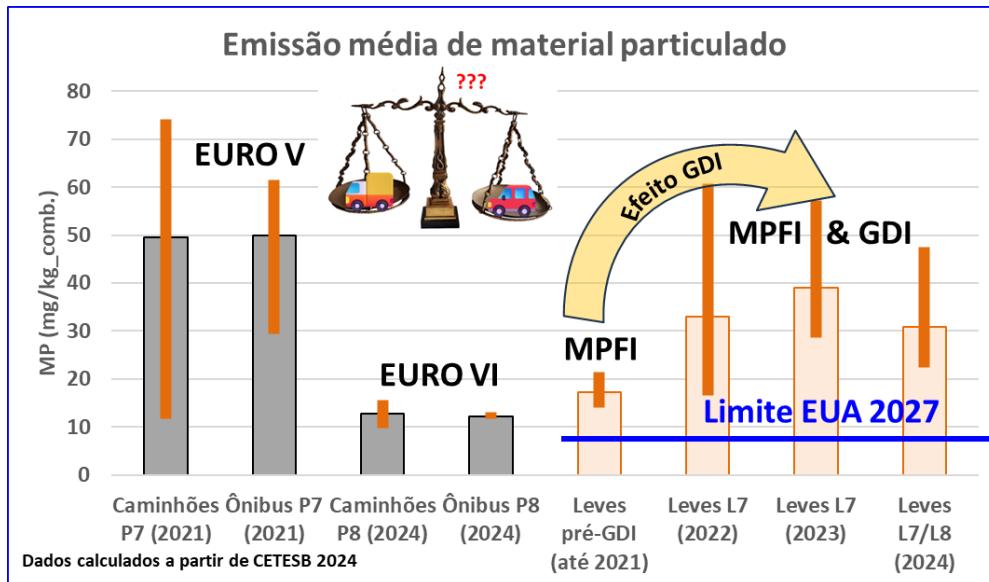


Figura 5 – Emissão média de MP expressa em g/kg de combustível queimado

Em resumo, esta situação mostra a disparidade entre as estratégias de controle da emissão de MP adotadas para os veículos leves e pesados, o que pode ser corrigido com a limitação da emissão de MP dos veículos leves em 0,3 mg/km (06 g/kg de combustível), como previsto nos EUA para entrar em vigor em 2027.

Impactos sobre a saúde

Tradicionalmente as análises e regulamentações sobre a emissão de material particulado têm focalizado a massa de partículas emitidas por quilometragem percorrida, no caso dos veículos leves ou por quilowatt hora de energia gerada, no caso dos motores Diesel pesados. No caso das análises ambientais, os parâmetros de avaliação da qualidade do ar baseiam-se nas concentrações atmosféricas de MP₁₀ e de MP_{2,5} medidas em $\mu\text{g}/\text{m}^3$, ou seja, na massa de partículas com diâmetro inferior a 10 μm ou 2,5 μm , respectivamente. Entretanto, conforme comentado anteriormente, com o aumento significativo da pressão de injeção de combustível, inicialmente nos motores Diesel e mais recentemente nos Otto de injeção direta, o tamanho das partículas tem se reduzido fortemente, levando à formação de material particulado com diâmetro da ordem de 0,1 μm (MP_{0,1}), de maneira que mesmo uma emissão que apresente pequena massa de partículas pode conter um número muito grande de partículas ultrafinas.

Em termos de saúde pública este fato adquire extrema importância uma vez que estas partículas penetram no nível dos alvéolos pulmonares e somente podem ser

eliminadas através da corrente sanguínea, carregando sempre uma carga de hidrocarbonetos que podem levar a consequências muito mais graves do que o particulado mais grosso, como o desenvolvimento de diversos tipos de câncer.

A figura 6 compara as distribuições estatísticas do tamanho das partículas para diferentes métricas de número, área superficial das partículas, área superficial depositada nos pulmões (LDSA) e massa. As áreas integradas sob as distribuições dessas variáveis (C_{total}) foram normalizadas em relação aos respectivos totais. A linha preta na parte superior da figura mostra a probabilidade de deposição respiratória baseada no modelo ICRP (International Commission on Radiological Protection, 1994), para a condição de exercícios leves com respiração nasal a 25 L/min. As partículas foram modeladas como esféricas, com densidade de 1 g/cm³.

É importante ressaltar que o eixo horizontal tem escala logarítmica, de forma que as áreas sob as curvas de distribuição estatística mencionadas são efetivamente menores nas porções esquerdas dos gráficos do que nas da direita.

Esta modelagem evidencia três zonas do controle da emissão material particulado associadas ao tamanho das partículas com as seguintes características:

- a) As partículas de diâmetro superior a 1000 nm (zona vermelha) apresentam grande probabilidade de deposição no pulmão (curva preta), dada pela grande parcela de massa presente nesta classe, apesar do baixo número de partículas. Esta emissão corresponde à faixa visível e sua correção é geralmente realizada pelo controle da combustão.
- b) As partículas de diâmetro entre 23 nm e 1000 nm (zona amarela) ainda apresentam uma parcela considerável de massa e o seu número de partículas começa a se tornar expressivo para diâmetros abaixo de 200 nm. Entretanto, as partículas maiores desta faixa (>200nm) apresentam menor área superficial e de deposição nos pulmões (curvas verde e amarela) e baixa probabilidade de deposição nos pulmões (curva preta). Esta zona intermediária ainda está na faixa de diâmetros na qual o parâmetro de controle é a massa e não o número de partículas. A utilização de combustíveis limpos, como o etanol, ou a utilização de filtros de partículas permite grau intermediário de controle nesta categoria ainda mediante a limitação da massa de MP com requisitos mais restritivos.
- c) As partículas de diâmetro inferior a 23 nm (zona azul) são formadas a partir de precursores semi-voláteis que apresentam massa desprezível, mas com alto número de partículas (curva azul) com grande superfície e alta probabilidade de deposição nos pulmões (curvas amarela e preta). Neste caso, o controle do processo de combustão não é suficiente e deve ser realizado mediante limites do número de partículas, que vem sendo implantado internacionalmente com padrões de contagem de partículas de diâmetro superior a 10 nm (ou NP₁₀) possivelmente pelas limitações tecnológicas de medição e controle do processo. Este requisito geralmente leva à aplicação de filtros cerâmicos, muitas vezes impregnados com catalisadores para facilitar a queima das partículas.

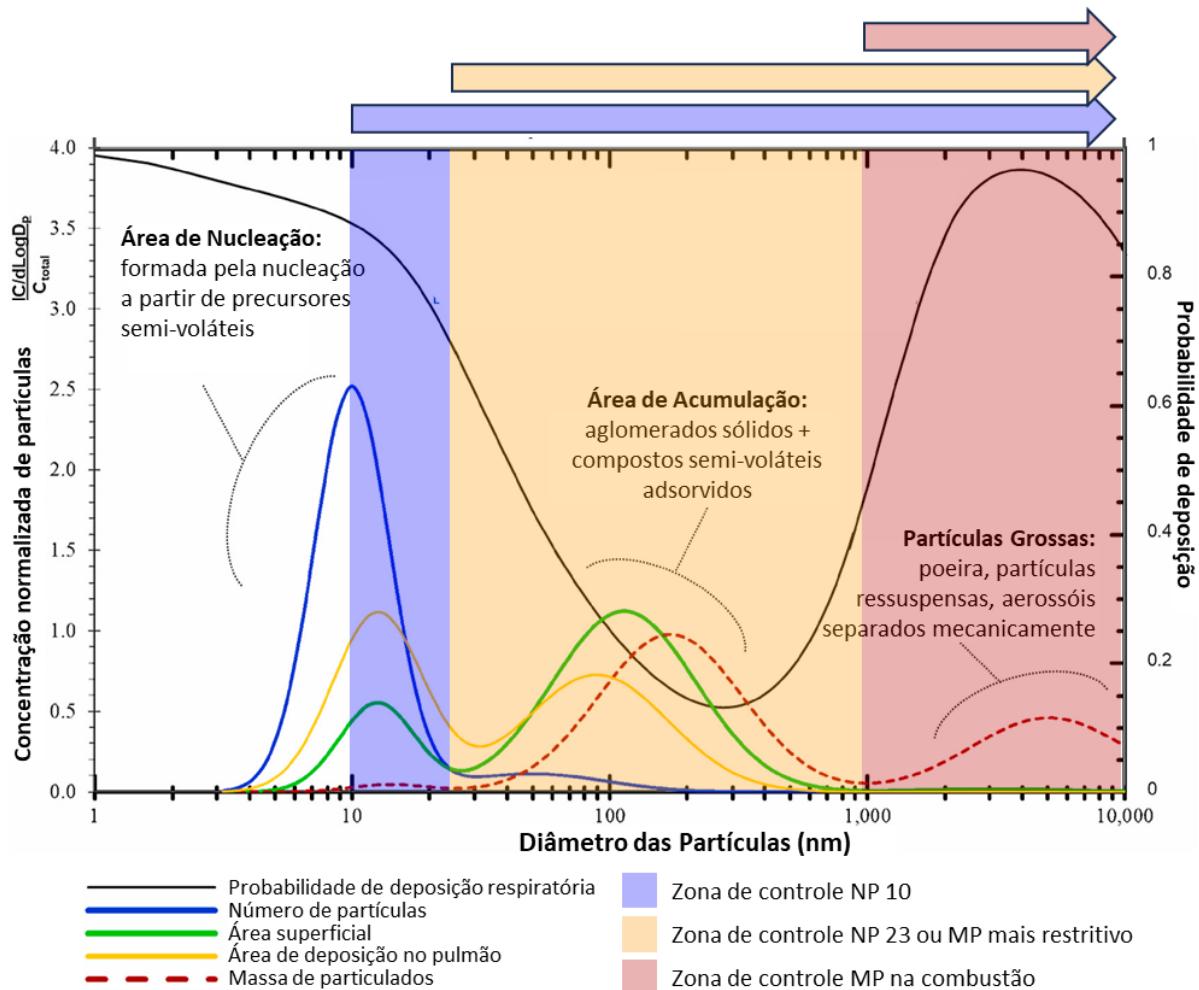


Figura 6: Distribuição do tamanho das partículas nas emissões de escapamento de um motor típico (Adaptado de Kassel, 2013)⁸

O correto entendimento dos mecanismos que explicam a deposição das partículas em função do seu diâmetro depende de um conhecimento mais aprofundado da fisiologia do aparelho respiratório e sua modelagem. Entretanto, dessas três características, pode-se concluir que o controle da emissão em massa é importante, mas o controle do número de partículas torna-se o foco, do ponto de vista de saúde pública, à medida em que o diâmetro das partículas se reduz como consequência do avanço tecnológico dos sistemas de injeção, embora a massa de partículas ultrafinas tenda a ser, neste caso, praticamente desprezível em relação à massa total de particulados.

É importante observar que, também para as partículas de 10nm, a área superficial volta a assumir valores significativos, o que é um indicador da capacidade de adsorção de hidrocarbonetos por estas partículas, que agrava sobremaneira a toxicidade das mesmas.

Por estes motivos, a Comunidade Europeia passou a dar mais ênfase ao controle do número de partículas ultrafinas dos veículos GDI, deixando em segundo plano o controle da massa propriamente dita, e estabeleceu o limite de 6×10^{11} partículas por quilometro rodado na regulamentação Euro 6, implantada em 2017.

No Brasil, o crescimento das vendas de veículos com motor GDI leva à necessidade de seguir o enfoque europeu, de modo a controlar as emissões de particulado ultrafino, reduzindo não apenas a massa de partículas, mas o seu impacto sobre a saúde pública.

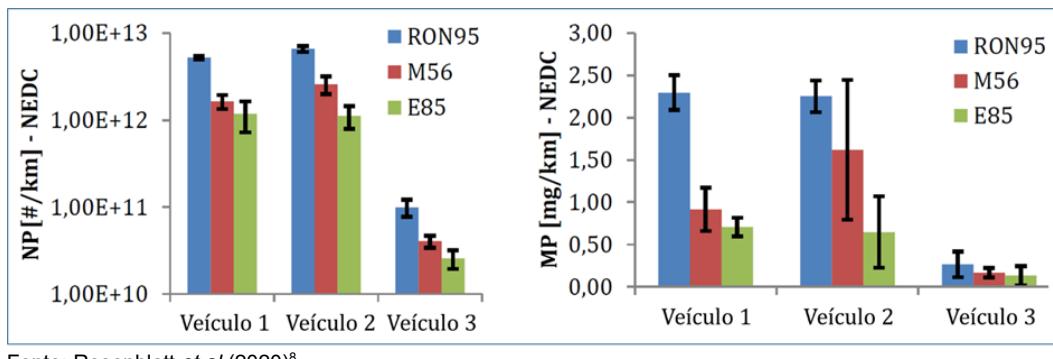
Entretanto, como se observa uma emissão em massa de MP ainda muito elevada e crescente, é importante o estabelecimento de uma estratégia urgente para sustar este efeito, através da redução da emissão em massa, retornando aos níveis constatados antes da entrada dos motores GDI no mercado, a ser complementada pelo estabelecimento de limites do número de partículas para solucionar efetivamente o problema.

Os combustíveis brasileiros são parte da solução

Um estudo conduzido pela Ford demonstrou que o aumento do teor de etanol na gasolina reduz a emissão de material particulado dos motores GDI, de forma que a gasolina brasileira já propicia valores de MP inferiores aos internacionais. Esta redução é pequena até teores de 20%, mas as gasolinas com teores acima de 30% de etanol reduzem a massa e o número de partículas entre 30% e 45%, tendo pouca influência no tamanho das partículas e um leve aumento da fração orgânica da fuligem⁹. O baixo teor de enxofre de todos os combustíveis brasileiros também colabora para a redução da emissão de particulados pela ausência de sulfatos.

Estes fatores levam à recomendação de que a gasolina de referência seja atualizada para os teores comerciais de etanol, atualmente em 25% e 30% para os combustíveis premium e comum, respectivamente, para que os resultados obtidos sejam representativos da realidade brasileira e permitam a escolha mais adequada da tecnologia a ser empregada para o controle de MP e de NP.

No caso do veículo abastecido com etanol, o relatório da International Energy Agency¹⁰ apresenta uma comparação da emissão de material particulado, expressa em massa e em número de partículas, para gasolina (RON 95), etanol (E85) e metanol (M56), que indicaram emissões bem mais elevadas nos motores GDI, mas significativamente reduzidas quando se utiliza o combustível E85, conforme mostrado na figura 7. Os ensaios foram realizados seguindo o ciclo de ensaio Europeu NEDC, em dois veículos GDI (2.4 L, US standard, naturalmente aspirado, 2014 e 2.0 L, Euro 5, turbo, 2011) e um MPFI (1.6 L, EURO 5, 2012).



Fonte: Rosenblatt *et al.*(2020)⁸

Figura 7 – Emissões de MP e NP em três veículos segundo o ciclo europeu NEDC

Estes resultados indicam que o uso de etanol reduz a emissão de particulados dos motores GDI em 70% do MP e 80% do NP, enquanto no motor MPFI estas reduções foram de 55% e 75%, respectivamente, apesar destas serem originalmente uma ordem de grandeza menores do que nos motores GDI.

Apesar de estas medições terem sido realizadas em testes segundo o ciclo europeu NEDC, que as subestimam, as proporções relativas entre os resultados permitem assumir que o etanol potencializa o atendimento dos veículos GDI ao limite de 1mg/km, correspondente aos atuais veículos MPFI brasileiros, pelo menos para os motores flexfuel com etanol, numa fase de transição para os limites de 0,3 mg/km e 6×10^{11} part/km, desejáveis numa fase definitiva a ser implantada progressivamente.

Recomendações estratégicas para veículos leves

Tecnologicamente falando, a melhor solução para a correção definitiva do aumento das emissões de material particulado dos veículos leves nos últimos anos é a aplicação de filtros cerâmicos nos veículos com motores Otto GDI, tal como já se faz para os motores Diesel leves e pesados.

Esta tecnologia, desde a sua primeira geração, reduz a emissão de MP, em massa, para valores abaixo de 0,3 mg/km, equivalente a 6 mg/kg de combustível, que são compatíveis com os níveis praticados em todos os motores Diesel comercializados atualmente no Brasil, e serão exigidos para todos os veículos leves na fase Tier 4 dos EUA a partir de 2027 e também Euro7 em 2028.

Além disso, a aplicação de filtros cerâmicos nos motores GDI reduzirá concomitantemente o número de partículas nos gases de escapamento - NP em cerca de 90%, ou seja, tipicamente de $(2 \text{ a } 5) \times 10^{12}$ part/km (característico para motores sem controle de NP)¹¹ para 6×10^{11} part/km (limite atualmente viável para a tecnologia de filtros cerâmicos de 1^a geração), podendo reduzir mais ainda e chegar a 1×10^9 com filtros de 4^a geração, como mostram os gráficos^a da figura 8. Este limite corresponde a uma proteção à saúde pública expressivamente maior pela redução de toxicidade. É importante observar que o limite europeu, para número de partículas, e o americano, para a massa, são atingíveis pela mesma tecnologia de filtros de 1^a geração.

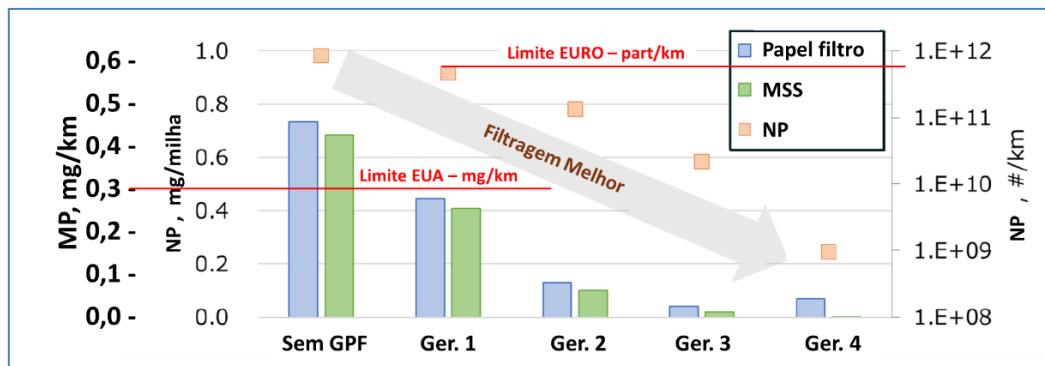


Figura 8 – Níveis de MP e NP após o filtro cerâmico (1^a a 4^a geração - ciclo FTP)¹²

^a As medições em papel de filtro correspondem ao método de medição oficial para certificação, que incluem fuligem e componentes orgânicos, enquanto que as realizadas por MSS (Micro Soot Sensor) medem apenas a parcela de carbono, sendo utilizadas para avaliações em tempo real.

Considerando que esta evolução envolve a revisão do projeto do veículo e do motor, será necessário considerar um prazo mínimo para que tais modificações sejam implantadas. Entretanto, parece razoável implantar imediatamente um estágio intermediário na regulamentação, com a exigência do limite de 1,0 mg/km para retornar os motores Otto aos níveis costumeiros e praticados no Brasil até 2021, o que será naturalmente atendido pelos motores MPFI tradicionais e pelos utilitários a diesel. Este limite pode ser considerado viável imediatamente, visto que já existem veículos com motores GDI que o atendem, especialmente quando funcionam com etanol sendo, portanto, razoável que esta exigência entre em vigor em curíssimo prazo para, pelo menos, 80% da produção de veículos leves de cada fabricante. A parcela restante de até 20% dos veículos, poderá manter os motores GDI inalterados por um prazo adicional até a fase seguinte, quando todos deverão cumprir o limite de 0,3 mg/km, mesmo que necessitem de alterações mais profundas para esta redução.

Esta estratégia apresenta a vantagem de impor uma ação imediata para interromper a escalada já verificada da emissão de MP dos veículos leves, ao lado de não impedir a produção desses veículos com motores GDI, mas força o seu desenvolvimento progressivo voltado ao controle mais severo da emissão de material particulado, que pode ser introduzido à medida que os planos comerciais de cada fabricante priorizem o interesse por estes motores. É importante ressaltar que os limites de 0,3 mg/km e de 6×10^{11} partículas/km comentados acima podem ser atendidos simultaneamente com filtros cerâmicos de 1^a geração, que são suficientes para o caso brasileiro atual, mas já existem tecnologias até de 4^a geração capazes de atingir reduções consideravelmente maiores, como indicado na figura 8.

Considerando a contagem do número de partículas, esta abordagem foi liderada pela Europa, estabelecendo limites de material particulado para motores do ciclo Otto, definidos pela exigência conjunta dos limites em massa e em número de partículas. O quadro abaixo apresenta os valores atuais em diversas partes do mundo.

Tabela 4 - Limites de material particulado para veículos leves a gasolina

Regulamento	mg/km	partículas/km
EURO 6/7	4,5	6×10^{11}
EUA Tier 3	1,9	---
EUA Tier 4 - 2027	0,3	---
Califórnia - 2023	0,6	---
CHINA 6 - 2023	3	6×10^{11}
CHINA 7 - previsto	1 a 2	1 a 3×10^{11}

Dante das sugestões propostas acima, a tabela 5 apresenta um resumo dos valores praticados atualmente no Brasil e das correções necessárias ao reequilíbrio das

exigências de controle de material particulado para todas as categorias de veículos, a serem implementadas mediante as seguintes etapas:

- um ajuste urgente a ser aplicado ainda na fase L8, para evitar que as emissões continuem aumentando;
- uma nova fase L9 para reduzir as emissões de MP dos veículos leves de acordo com as melhores tecnologias práticas disponíveis e economicamente viáveis, equiparando-as às dos veículos Diesel mais avançados.

Tabela 5 - Emissão típica de material particulado por veículos e motores

PROCONVE	Categoria	Emissão de Material Particulado		
		Limites	mg/kg_combustível	
Fase P8	caminhões e ônibus	10mg/kWh	6×10^{11} part/kWh WHTC	10 a 16 (médias 2024)
Fase L8	automóveis e caminhonetes	4mg/km	---	29 a 57 (médias 2024)
Ajuste da fase L8	automóveis e caminhonetes	1mg/km	---	18 (médias até 2021)
Nova Fase L9	automóveis e caminhonetes	0,3mg/km	6×10^{11} part/km (NP ₁₀)	06 (~ 1/3 dos pré-GDI)

Além destas exigências, é recomendável aproveitar a criação desta nova regulamentação para instituir os fundamentos para a fiscalização de emissões de veículos e motores por sensoriamento remoto, que é uma ferramenta fundamental para o monitoramento dos resultados do PROCONVE efetivamente para evitar distorções como a apontada neste trabalho. Este tipo de monitoramento deve contar com valores de referência calculados para todas as categorias, tal como conceituado neste trabalho e expressos em gramas de poluente por quilograma de combustível, ou por Mol de Carbono, que é a unidade nativa da medição por este método e também aplicável diretamente para todos os combustíveis, sejam oxigenados ou não. Tais valores de referência devem ser propostos de acordo com a severidade desejada para o programa de fiscalização, mas respeitando os limites mínimos obtidos pela divisão dos valores de emissões pelos de consumo expressos nas mesmas unidades, ambos certificados pelo PROCONVE¹³.

Conclusões finais

Este trabalho apresenta um método, baseado na demanda energética, que converte os fatores de emissão de particulados de qualquer categoria de veículo ou motor para uma unidade comum, expressa em g_poluente/kg_combustível, a qual permite uma avaliação em termos da produção energética dos motores, isto é, da “eficiência ambiental” das diversas tecnologias empregadas. Este método é particularmente útil para a comparação de motores de diferentes categorias e para o monitoramento de emissões por sensoriamento remoto.

O presente trabalho comparou a importância das emissões de material particulado por veículos pesados a diesel com a dos veículos leves a álcool e gasolina, ambas expressas em $g_{MP}/kg_{combustível}$, e detectou uma distorção na estratégia de controle de material particulado por veículos leves, causada pela introdução de motores do ciclo Otto com injeção direta no mercado, já verificada nos Estados Unidos há mais de uma década e que se apresentou de maneira crescente recentemente no Brasil. É recomendável que esta análise seja estendida aos demais poluentes, visando o equilíbrio completo do controle de emissões de todos os veículos e máquinas que utilizam motores de combustão interna.

Esta análise demonstrou que o padrão tecnológico dos veículos pesados da fase P8 já supera os recursos atualmente aplicados aos veículos leves a gasolina e flexfuel e sugere o estabelecimento de novos limites de emissão e estratégias para o controle da emissão de material particulado para os veículos leves, em duas etapas para induzir a implantação das melhores práticas disponíveis e economicamente viáveis para motores GDI, equiparando-os tecnologicamente aos veículos Diesel. Assim, a estratégia sugerida para o Brasil deve seguir as seguintes etapas, comprovando os valores por ensaios em dinamômetro segundo os procedimentos das normas ABNT NBR 6601 e no ciclo ABNT NBR 16567, a serem complementadas futuramente por exigências cabíveis a partir de ensaios em tráfego real (RDE).

a) Correção da Rota: 01/01/2029 - alteração em BIN 30 e BIN 20 para veículos leves de passageiros e aquisição de equipamentos e expertise para o controle do número de partículas:

- Correção do limite corporativo de MP para 1 mg/km (massa);
- Fornecimento de valores típicos de NP_{10} para veículos com motores MPFI e GDI, medidos em dinamômetro.

b) Redução do limite: 01/01/2031 - junto com BIN 30 para veículos leves de passageiros e comerciais:

- Limite de 0,3 mg/km para MP (massa);
- Limite de 6×10^{11} partículas/km NP_{10}

Como os dados brasileiros correspondem às médias de certificação obtidas com gasolina E22 e os dados internacionais tomam por base a gasolina RON95, é recomendável estender esta análise a resultados individuais de medições específicas da massa de MP e do número de partículas – NP em veículos brasileiros atuais, distinguindo veículos GDI e MPFI, utilizando etanol E100 e gasolina E30, para que seja realizado um estudo detalhado da viabilidade da aplicação das tecnologias contempladas.

As tecnologias de filtragem associadas aos catalisadores têm levado às reduções mais expressivas da emissão de material particulado e propiciam a melhor proteção à saúde pública e a viabilização do atendimento aos Padrões de Qualidade do Ar estabelecidos pela legislação recente. Entretanto, o uso de etanol e das misturas com

teor de álcool mais elevado constituem importantes fatores auxiliares para viabilização dos limites sugeridos.

Além disso, a introdução do limite de NP harmoniza o Proconve com os padrões internacionais mais modernos (Euro 6 e 7, China 6 e 7, entre outros), abrindo portas para novos mercados potenciais. Outro aspecto importante é a valorização do papel estratégico do etanol e do Brasil com seus biocombustíveis, que já apresentam desempenho superior em termos de emissões de partículas. Assim, o controle de partículas por número e massa é um passo necessário para reduzir impactos ambientais e de saúde pública e garantir que a frota brasileira acompanhe as melhores práticas globais.

A análise desenvolvida neste trabalho foi voltada ao caso brasileiro, mas levanta alguns aspectos estratégicos que são importantes para outros países, como o caso da Índia, que já vem intensificando o uso de etanol como combustível e poderá incluir em suas estratégias a previsão do controle de MP e NP nos veículos com motores GDI e a utilização de teores de etanol até 30% na gasolina em benefício deste controle, aproveitando a experiência brasileira que já chegou nesta proporção.

Este trabalho foi elaborado pela EnvironMentality, por solicitação da AFEEVAS em agosto de 2025, para subsidiar as discussões sobre o reequilíbrio do controle de material particulado no âmbito do PROCONVE, face ao crescimento da participação de motores GDI no mercado de veículos leves.

Referências

- ¹ California Air Resources Board (CARB) - EMission FACtors (EMFAC) model - database 2014
- ² Meyer, M.; Khan, T.; Dallmann, T; Yang, Z. – “Particulate matter emissions from U.S. gasoline light-duty vehicles and trucks” – TRUE Initiative Case Study, junho de 2023.
- ³ EPA - <https://www.epa.gov/air-trends/particulate-matter-pm25-trends>
- ⁴<https://cetesb.sp.gov.br/veicular/relatorios-e-publicacoes/> - Relatórios de Emissões Veiculares no Estado São Paulo – 2024 – fatores de emissão
- ⁵ CETESB – Emissões Veiculares no Estado de São Paulo - Série Relatórios -2024
- ⁶ Branco, F.C.; Branco, G.M.; Branco, R.A.R.; Szwarc, A. - Monitoramento de Emissões Veiculares por Sensoriamento Remoto – SIMEA 2020.
- ⁷ ANP <https://www.gov.br/anp/pt-br/centrais-de-conteudo/dados-abertos/vendas-de-derivados-de-petroleo-e-biocombustiveis>
- ⁸ Kassel, R. - Ultrafine Particulates Update: Health and Environmental Impacts, Technical Solutions, and the Regulatory Outlook. February 12, 2013
- ⁹ M. Matti Maricq, Joseph J. Szente, and Ken Jahr - Research & Advanced Engineering, Ford Motor Company, Dearborn, Michigan, USA - Aerosol Science and Technology, 46:576–583, 2012
- ¹⁰ Rosenblatt, D. (Environment and Climate Change Canada); Karman,D. (Carleton University) - GDI Engines and Alcohol Fuels - A Report from the Advanced Motor Fuels Technology Collaboration Programme –International Energy Agency - fevereiro 2020
- ¹¹ AVL List GmbH - PETROBRAS PARTICULATE WORKSHOP - May, 4th 2015
- ¹² K. Sugiura, Y. Uesaka, Y. Furuta, T. Aoki, M. Ito, Y. Hamazaki - Gasoline Particulate Filter for Tier4 regulation - SAE Paper ORAL ONLY (NUP-24090) 17
- ¹³ Branco, F.C.; Branco, G.M.; Hager, J.S. e Azevedo, I.P. - A Importância Estratégica do Monitoramento por Sensoriamento Remoto para o Controle de Emissões Veiculares para Atingir as Metas de PQAr - SIMEA 2025.