

Avaliação das emissões de escapamento veicular em condições específicas do motor: partida e marcha-lenta

Suzana de Oliveira Aguiar¹, Rinaldo dos Santos Araújo², Francisco Sales Ávila Cavalcante³, Bruno Vieira Bertoncini⁴, Rita Karolinny Chaves de Lima⁵ e Mona Lisa Moura Oliveira⁶

Resumo: O crescimento exponencial do quantitativo de veículos automotores no Brasil, sobretudo nos grandes centros urbanos, contribui com a emissão de elevadas taxas de poluentes atmosféricos comprometendo a qualidade do ar e, conseqüentemente, a saúde da população. Este trabalho possui como objetivo principal avaliar as emissões de poluentes atmosféricos oriundas de veículos automotores equipados com motor ciclo Otto (gasolina e álcool) e/ou ciclo Diesel em condições específicas do motor, nomeadamente, partida (a frio ou a quente) e marcha-lenta. Os resultados ratificam a importância de se considerar o adicional das emissões de poluentes da partida a frio, uma vez que os veículos a álcool e a gasolina atingiram elevadas concentrações de emissão de CO e HC e, no caso do diesel, o NOx. Em geral, o procedimento utilizado neste estudo para análise dos gases de escapamento de forma instantânea, mostrou-se eficiente na demonstração do adicional da partida a frio em relação às condições estabilizadas de operação do motor. Durante a partida a frio, observam-se os maiores níveis de emissões de HC e CO para o veículo movido a E100, o que se deve principalmente às características físico-químicas do etanol, como o alto calor latente de vaporização. Em termos gerais, a metodologia simples e acessível utilizada nesta pesquisa pode ser útil em diagnósticos de emissões veiculares, como também no monitoramento e manutenção veicular regular/preventiva de fontes móveis de emissão de poluentes, além de corroborar para o estudo do adicional de emissões nas condições avaliadas (i.e. inventários de emissões atmosféricas).

Palavras-chave: Emissão veicular, Poluição do ar, Ciclos Otto/Diesel, Combustão.

Abstract: The increased exponential of the quantitative of vehicles in Brazil, especially in great urban centers, contributes to high rates of emissions of atmospheric pollutants, increased poor air quality and affecting health of the population. This work has as main objective to evaluate the air pollutant emissions from automotive vehicles equipped with Otto (gasoline and ethanol) or Diesel cycle engine under to start (cold or hot engine) and idling conditions. The results showed the importance for cold start for emissions, once vehicles to ethanol and gasoline attained high emission concentrations of CO and HC and, in the case of diesel, NOx. The proceeding used to analysis of instantly pollutants from exhaust tip was efficient to cold start in relationship stabilization conditions engine. Through in the cold start engine have observed in higher levels emissions to HC and CO vehicle with E100, which in especially due to chemical and physic characteristics of ethanol, as well as high latent heat of vaporization. In general, the method used proved to be simple and affordable, it can be useful in diagnostics for vehicle emissions, as also in the monitoring and maintaining regular/preventive vehicular emission sources of pollutants, as well as to support for study of additional emissions to evaluate these conditions (i.e emission inventories).

Keywords: Vehicle emissions, Air Pollution, Otto/Diesel cycles, Combustion.

1. INTRODUÇÃO

No Brasil e no mundo, a má qualidade do ar nos centros urbanos, tem sido diretamente associada às emissões veiculares, sobretudo devido ao crescimento exponencial da frota de veículos nessas regiões, instituindo crescentes preocupações ambientais e de saúde pública (IBRAM, 2008; LISBOA et al., 2008; FENGER, 2009). Deste modo, diversos estudos relacionam as emissões poluentes por fontes

móveis, com a crescente incidência de doenças respiratórias, cardiovasculares e alérgicas, principalmente em grupos da população mais sensíveis, como crianças e idosos (LAUMBACH e KIPEN, 2012; ANDERSON, 2009; ARNEDO-PENA et al., 2009; YAMAMOTO, PHALKEY e MALIK, 2014).

Convém destacar que a Agência de Proteção Ambiental Americana (do inglês, EPA) reportou que veículos no modo marcha-lenta (permanência do regime de trabalho do motor sem carga) (WENZEL et al., 2000), consomem mais de 1,0 bilhão de litros de combustível por ano a um custo de mais de US\$ 2,5 bilhões nos Estados Unidos. Estes cenários foram estimados para os veículos em carregamento ou descarregamento de passageiros/mercadorias, engarrafamentos, etc. Igualmente, para os veículos pesados a diesel, são emitidas mais de 150 mil toneladas de óxidos de nitrogênio (NOx) e 5 mil toneladas de material particulado (MP) por ano para atmosfera (EPA, 2010).

1.1. O Brasil e as emissões veiculares

As emissões veiculares são decorrentes das reações entre o combustível e o ar atmosférico que ocorrem nos motores de combustão interna, seja a partir de motores ciclo

¹ Suzana de Oliveira Aguiar, Instituto Federal do Ceará (IFCE). (suzanaoliveira@ifce.edu.br)

² Rinaldo dos Santos Araújo, Instituto Federal do Ceará (IFCE). (rinaldo@ifce.edu.br)

³ Francisco Sales Ávila Cavalcante, Universidade Estadual do Ceará (UECE). (sales.avila@uece.br)

⁴ Bruno Vieira Bertoncini, Universidade Federal do Ceará (UFC). (bruviber@det.ufc.br)

⁵ Rita Karolinny Chaves de Lima, Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira (UNILAB). (karolinny@unilab.edu.br)

⁶ Mona Lisa Moura Oliveira, Universidade Estadual do Ceará (UECE). (mona.lisa@uece.br)

Otto (ignição espontânea) (MARTINS, 2013). Estes veículos são fontes relevantes e difusas de diversos poluentes gasosos, dentre os principais destacam-se: monóxido de carbono (CO), hidrocarbonetos (HC's), óxidos de nitrogênio (NO_x), dióxido de enxofre (SO₂), material particulado (MP). Podem emitir também compostos orgânicos voláteis (COV's), metais, entre outros (FERREIRA et al., 2008; VIEIRA, 2009).

No Brasil, desde o ano de 1992, os veículos estão equipados com um conversor catalítico de três vias que convertem simultaneamente NO_x, CO e HC's, em espécies não poluentes ou menos nocivas. Esses dispositivos têm sua eficiência minimizada com o tempo de uso e qualidade do combustível, associado às desativações térmicas, químicas e mecânicas (BRAVO, 2006; OLIVEIRA et al., 2009; GUIMARÃES e GOMES, 2011).

Outra ação muito oportuna e de caráter mundial para reduzir as emissões derivadas dos veículos, foi a incorporação de álcool etílico na composição da gasolina, especialmente para mitigação das emissões de chumbo, composto adicionado anteriormente para melhorar o comportamento dos motores, conferindo-lhes basicamente maior potência e menor consumo de combustível, no entanto, altamente tóxico e proibido definitivamente a partir da década de 90 (THOMAS, 2004).

Desde março de 2015, o percentual obrigatório de etanol anidro combustível na gasolina comum é de 27% (em volume). Anteriormente, o teor oscilava entre 20 e 25%. Ademais, até hoje o Brasil é o único país que utiliza o etanol hidratado puro (E100) nos veículos equipados com motores *flex fuel* (ROCHA e SIMÕES-MOREIRA, 2005; SOUZA et al., 2013). Ao mesmo tempo, as emissões derivadas desses veículos podem sofrer variações, uma vez que ainda vem sendo objeto de estudo quando se trata de ciclos de condução real, bem como percentagens do biocombustível na composição da gasolina (TAKESHITA et al., 2008; FREITAS e KANEKO, 2011; XIAODONG e CARRIQUIRY, 2013; DARDIOTIS et al., 2015).

De fato, a quantidade dos compostos poluentes emitidos pelo escape dos veículos é dependente do tipo de motor e das condições de utilização (NEVERS, 2000; MARTINS, 2013). Portanto, existem inúmeros fatores que interferem quantitativamente e qualitativamente as emissões veiculares: a existência de injeção eletrônica, o modo de condução, o tipo de ignição do motor e o modo de operação do veículo (i.e partida a frio ou a quente), classificadas conforme a temperatura do motor e/ou catalisador. Além disso, o veículo pode operar em velocidade constante ou nula, aceleração e desaceleração (HANSEN, 2008; FAVEZ et al., 2009).

1.2. Ações e políticas públicas

No Brasil, tem sido realizada implantação de novas políticas públicas de monitoramento e controle de poluentes atmosféricos derivados de veículos automotores (CONAMA, 2009), sobretudo visando o aumento da frota em grandes centros urbanos.

O Programa de Controle da Poluição do Ar por Veículos Automotores (PROCONVE), adicionalmente a Resolução CONAMA N° 415/2009, dispõe os limites máximos de emissão para veículos leves novos relativos à nova fase deste programa, visando a redução da poluição do ar, bem

como a economia de combustível (conceito de eficiência energética dos veículos).

O CONAMA aprovou em 2009 a Resolução N° 418, que tornou obrigatória a inspeção veicular em toda a frota do país, em estados e municípios com mais de 3 (três) milhões de veículos. Já a Resolução N° 451/2012, determinou novos limites de emissão e procedimentos aplicados a motocicletas e veículos similares. Algumas cidades já implantaram a inspeção veicular, tais como São Paulo, Rio de Janeiro, Belo Horizonte, dentre outras (CNT, 2014). De acordo com a CONAMA N°418/2009, para inspeção veicular, os veículos ciclo Otto deverá ter limites máximo de emissões de escapamento para CO_{corrigido} e HC_{corrigido} em marcha lenta e/ou a 2500 rpm, enquanto que para os veículos a diesel são avaliados os limites de opacidade em aceleração livre.

Outra ação que vem sendo apresentada pelo IBAMA é a chamada "Nota Verde". Trata-se de uma ferramenta de informação à sociedade que se aplica a todos os modelos de veículos leves fabricados no Brasil, podem receber "estrelas verdes", concedidas conforme uma soma de critérios, relacionados aos níveis de emissões veiculares, em função da potência, consumo e tipo de combustível (IBAMA, 2015).

1.3. Cenário atual e desafios

De acordo com o Departamento Nacional de Trânsito (DENATRAN), no final do ano de 2013 o Brasil dispunha de uma frota de 81.600.729 veículos, no qual os mais utilizados em centros urbanos correspondem a: 55,7% automóveis, 22,2% motocicletas e 7,59% caminhonetes/utilitários. No caso de 2014, a frota acumulada superou 86 milhões de veículos. A Figura 1 ilustra a distribuição dessas viaturas por regiões da federação com destaque para a região sudeste (> 40 milhões de veículos) onde estão localizados os grandes centros urbanos do país.

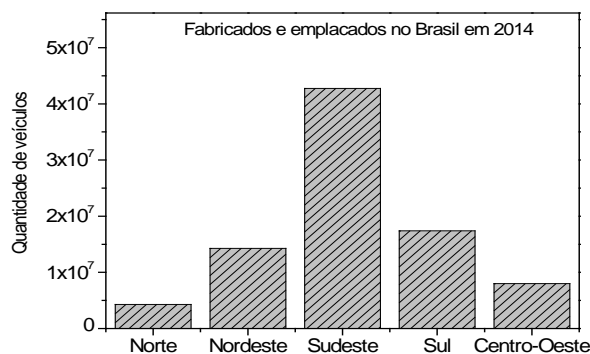


Figura 1. Frota nacional por região em 2014 (DENATRAN, 2014).

Diversos ensaios tentam estabelecer o perfil das emissões veiculares: dinamômetro de chassi, *on-board*, testes de banco de rolos e/ou estáticos. Na grande maioria utilizam como métodos homologados/padronizados em bancadas dinamométricas. São utilizados complexos sistemas de amostragem para gases de ensaios veiculares, nomeadamente, dinamômetros de chassi ou de bancada. Em geral, esses testes são uma tentativa de aproximar-se das condições reais de um veículo em movimento, ou seja, ensaios

dotados de meios de simulação de carga e de inércia, realizados através de sistemas com elevada infraestrutura e instrumentação laboratorial (EPA, 2009; GUARIEIRO et al., 2011). Outros, em menor número, utilizam analisadores portáteis para estimar as emissões gasosas decorrentes de veículos automotores em um ciclo de condução pré-definido (i.e. real), em marcha-lenta e/ou a 2500 rpm (HANSEN, 2008; ACHOUR, 2011; CONAMA N° 451/2012; TAVARES, 2011).

Em geral, as emissões durante a operação do veículo são classificadas em: (i) partida a frio; (ii) partida a quente e (iii) condições estabilizadas. Em função disto, o tempo de duração de uma dada viagem possui forte relação com os níveis de emissões de poluentes. Contudo, a maioria dos ensaios reportam as emissões em condições estabilizadas (WENZEL et al., 2000; RAKHA e DING, 2003; TU et al., 2013).

Embora se tenha alcançado avanços na legislação quanto às emissões veiculares e desenvolvimento de novos motores/tecnologias para reduzir o lançamento de poluentes na atmosfera, faz-se necessário conhecer os perfis de emissão veicular atuais, a fim de identificar impactos ambientais e propor alternativas mais simples de monitoramento veicular, além de complementar e ajudar nos estudos de inventários de emissões que permitam adotar ações de controle e monitoramento do meio ambiente pelos órgãos públicos legais (CNT, 2014; DARDIOTIS et al., 2015). Ou seja, em função da indisponibilidade de dados detalhados a cerca da caracterização da frota dos veículos e padrões de emissão, sobretudo no caso do Brasil, deve-se então buscar alternativas que utilizem variáveis adicionais às análises dessas emissões.

Assim, neste estudo, foram avaliadas as emissões veiculares de CO, HCs, NOx e SO₂, conforme os diferentes tipos de veículos/combustíveis testados mediante testes estáticos com partida a frio (período inicial de funcionamento do motor), a quente e no modo marcha-lenta de funcionamento do motor. Em tempo, ratifica-se que estudos em condições reais podem vir a contribuir nas avaliações futuras em adotar limites mais restritivos de emissões veiculares que vão além do avanço tecnológico e da melhoria da qualidade dos combustíveis.

2. PARTE EXPERIMENTAL

2.1. Veículos e Combustíveis

Do ponto de vista experimental foram avaliados os níveis de emissões de poluentes (CO, SO₂, NOx e HCs) derivadas de veículos automotores: um veículo leve de passageiros (gasolina e álcool) e um veículo utilitário/passageiro a diesel. Os dados foram obtidos mediante condições de arranque a frio, a quente e marcha lenta, de acordo com o veículo/combustível avaliado. O teste de rotação em “marcha lenta” do veículo ciclo Otto foi realizado conforme CONAMA N°418/2009, ou seja, com velocidade angular na

faixa de 600 a 1200 rpm (estável dentro de ± 100 rpm) e fator de diluição no máximo de 2,5 para as emissões de CO e HC, conforme apresentando nas Eq.(1) e (2), respectivamente.

$$CO_{\text{corrigido}} = \frac{15}{(CO + CO_2)_{\text{medidos}}} \times CO_{\text{medido}} \quad (1)$$

$$HC_{\text{corrigido}} = \frac{15}{(CO + CO_2)_{\text{medidos}}} \times HC_{\text{medido}} \quad (2)$$

A Tabela 1 apresenta as principais características dos veículos dos sistemas testados. Convém ressaltar que todos os combustíveis utilizados foram previamente analisados.

2.2. Determinações das emissões do escapamento veicular e modo de operação

Em todos os veículos, a coleta dos dados iniciou-se com a partida do motor a frio e estendeu-se até atingir a temperatura normal de trabalho do sistema de arrefecimento do motor, entre 80–90 °C. As amostragens foram realizadas até 120 segundos, conforme a rotação de marcha-lenta do motor (sem carga), partida a frio (arranque do motor na temperatura ambiente) e a quente (arranque do motor na temperatura acima da ambiente).

Em cada teste, os veículos passaram por um pré-condicionamento, com verificação das condições externas de temperatura (28–30 °C) e umidade (74–76%). Os primeiros 60 segundos caracterizaram-se pelas análises da corrente dos gases de escape durante os arranques do motor (partidas), enquanto que no período seguinte o veículo permanece em marcha-lenta (do inglês, *idling vehicle*) (FAVEZ et al., 2009).

As determinações das emissões de escapamento veicular foram realizadas mediante o uso de um analisador de gases portátil modelo *Greenline 8000 (Eurotron Instruments, ECIL)*, constituído por células eletroquímicas de NOx, CO e SO₂ e sensor de infravermelho não dispersivo (NDIR) para análise de hidrocarbonetos (HCs). Uma sonda tipo *Pitot* conectada a um termopar (tipo K) foi inserida no escapamento veicular para amostragem dos gases de combustão. Ao longo dos testes a aquisição instantânea dos dados foi realizada através do *software* do analisador.

É importante destacar que no modo de funcionamento do motor em marcha-lenta não há solicitação de potência. Este teste é geralmente empregado em veículos ciclo Otto nos programas de inspeção e manutenção veicular (programas I/M), para atender padrões de emissões estabelecidos por órgãos regulamentadores (CONAMA N°418/2009). Uma variante deste teste consiste em testar o veículo até 2500 rpm com o objetivo de simular as condi-

Tabela 1. Tipos de veículos, características e combustíveis utilizados

| Veículo | Características | Ano | Combustível |
|---|---|---------------|-------------------|
| Leve (passageiros) | Fiat Pálio 1.0, 8V, Flex | 2012/ 2013 | Gasolina e Álcool |
| Utilitário/ caminhonete (carga e passageiros) | Mitsubishi L200 GLS 3.2 180 cv, Diesel | 2012 | Diesel |

Tabela 2. Parâmetros físico-químicos dos combustíveis utilizados

| Tipo de combustíveis | Massa específica 20 °C (kg/m ³) | Viscosidade cinemática a 40 °C (mm ² /s) | Enxofre total (mg/kg) | Teor de etanol (% vol.) | Teor Alcoólico (% massa) |
|-------------------------|---|---|-----------------------|-------------------------|--------------------------|
| Álcool ^(a) | 809,9 | * | * | * | 92,9 |
| Gasolina ^(b) | 715,2 | * | 5,6 | 26 | * |
| Diesel ^(c) | 834,2 | 2,6250 | 9,1 | * | * |

(a) Conforme a especificação exigida pela Resolução ANP N° 07/2013.

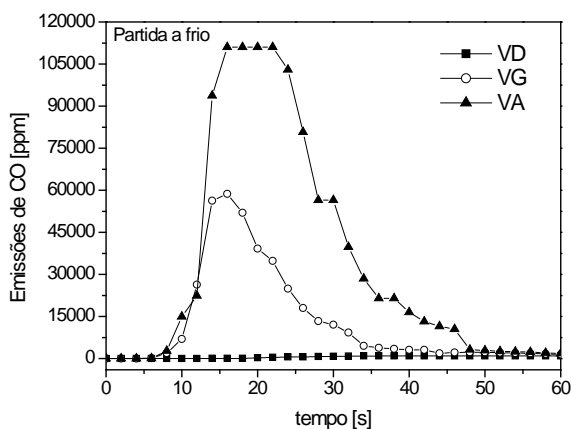
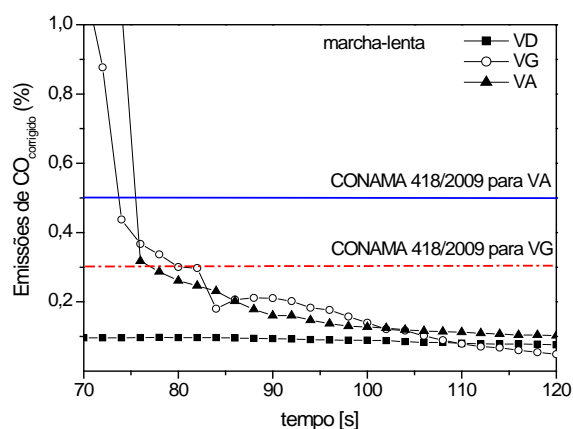
(b) Conforme a especificação exigida pela Resolução ANP N° 40/2013.

(c) Conforme a especificação exigida pela Resolução ANP N° 50/2013.

(*) Não específica para o combustível.

Tabela 3. Variação da temperatura na condição de partida a frio dos gases de exaustão

| Veículo Teste | Partida a frio | | | Partida a quente | | |
|------------------------------|------------------------|------------------------|---------|------------------------|------------------------|---------|
| | T _{min.} (°C) | T _{max.} (°C) | ΔT (°C) | T _{min.} (°C) | T _{max.} (°C) | ΔT (°C) |
| (VD) - Utilitário a Diesel | 29,4 | 34,2 | 4,8 | 31,9 | 47,0 | 15,1 |
| (VG) - Passageiro a gasolina | 29,3 | 35,7 | 6,4 | 52,2 | 55,3 | 3,1 |
| (VA) - Passageiro a álcool | 30,0 | 52,0 | 22,0 | 50,5 | 60,0 | 9,5 |


(a)

(b)
Figura 2. Perfil de emissões de CO durante a partida a frio (a) e marcha-lenta (b) para os veículos/combustíveis testados

ções de operação do veículo com condições de carregamento (potência requerida) (WENZEL et al., 2000; CALCAGNO, 2005).

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. Análises dos Combustíveis

Na Tabela 2 estão reportadas as análises de conformidade dos combustíveis utilizados no presente estudo.

Em todos os casos, os combustíveis apresentam-se em conformidade com as especificações exigidas pelas Resoluções ANP N° 07/2013, N° 40/2013 e N° 50/2013, respectivamente, álcool etílico, gasolina e diesel, para os parâmetros avaliados.

3.2. Análises das emissões do escapamento veicular

3.2.1. Modo de Partida do Motor e Perfil de Emissões

Na Tabela 3 estão relacionadas às temperaturas mínimas e máximas dos gases de exaustão na mesma condição de teste.

Observa-se que o veículo utilizando o álcool possui uma variação maior na temperatura dos gases de exaustão no modo partida a frio, enquanto o veículo movido a diesel

para o modo partida a quente, confirmando as características típicas de motor/combustível.

Emissões de CO e HC: partidas a frio/ quente e marcha-lenta

As Figuras 2 e 3 ilustram as emissões de monóxido de carbono e hidrocarbonetos, respectivamente, durante o modo de partida a frio e marcha-lenta para o veículo movido a diesel (VD), a gasolina (VG) e a álcool (VA).

Para veículos equipados com motores de ciclo Otto (neste caso, VG e VA), no Brasil se aplica fundamentalmente a resolução CONAMA N° 418/2009, a qual especifica os níveis máximos de emissão de CO e HCs. Estes valores dependem do ano de fabricação do veículo e do tipo de combustível utilizado, como já mencionado na seção anterior. Ressalta-se que o método de verificação adotado pela CONAMA é similar àquele especificado na norma americana BAR 90 (verificação de CO e HC na marcha lenta e a 2500 rpm) (FAIZ et al., 1996; EPA, 1998; EPA, 2015). Para ambas as espécies, o valor a ser considerado é o corrigido no teste de marcha-lenta, conforme as Figuras 2b e 3b.

Desta forma, observa-se nestas Figuras que os testes de marcha-lenta para os VG e VA apresentaram emissões abaixo do recomendado pela legislação após 80s de funcionamento. Porém é de ressaltar que VA contendo 100% eta-

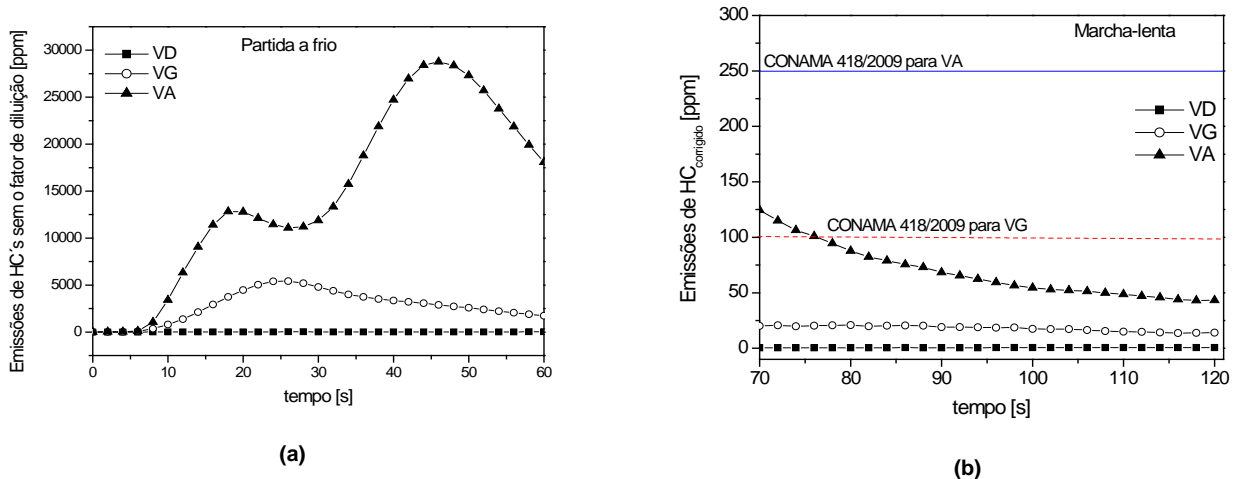


Figura 3. Perfil de emissões de HCs durante a partida a frio (a) e marcha-lenta (b) para os veículos/combustíveis testados

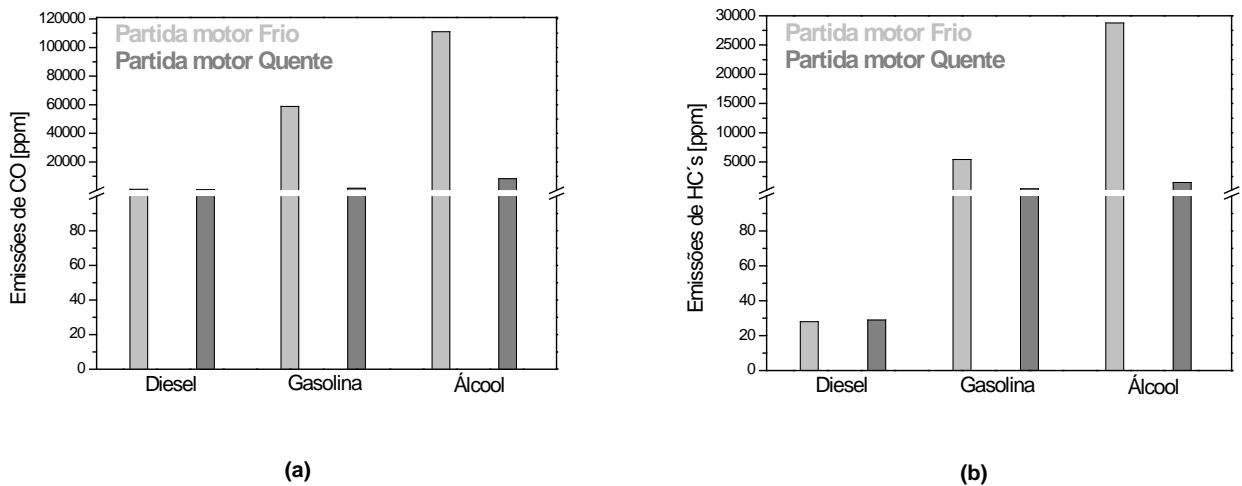


Figura 4. Valores médios das emissões de CO (a) e HCs (b) nas duas condições de partida dos veículos/combustíveis avaliados

nol (E100) possui um elevado adicional de emissões durante a partida a frio, chegando a valores superiores a 100 mil ppm para CO e 25mil ppm para HC. De fato, isto demonstra a ineficácia do sistema catalítico no arranque a frio, antes dos 80s, conforme relatado por Manzoli e Schaal (2009).

Em suma, para os veículos e seus respectivos combustíveis os níveis de emissões de CO e HCs obedeceram a ordem: VA > VG >> VD. Nos motores, o processo de combustão do álcool também está relacionado às emissões de gases orgânicos do tipo não-metano, como aldeídos (RCHO), cetonas e o álcool não queimado. Em geral, durante a combustão do álcool, o aumento da massa de combustível não queimado nas zonas de extinção de chama é a causa mais importante para formação de aldeídos (SILVA et al., 2014; HANSEN, 2008).

A Figura 4 ilustra o comparativo das emissões de CO e HCs entre os modos partida a frio e a quente.

Quando o motor está frio, a variável de maior importância em relação à produção desses poluentes é a temperatura, a qual ativa o sistema catalítico, reduzindo as emissões de CO e HC's. Em ciclos de condução, por exemplo, na medida em que ocorre o aquecimento do motor, outras variáveis ganham importância, como a velocidade e a inclinação da via (LIN et al., 2003; MANZOLI e SCHAAL, 2009; TAVARES et al., 2011).

Durante a partida e o período de aquecimento, os motores operando com etanol apresentam níveis elevados de emissões de HC, CO e CHO (aldeídos), comparados aos níveis de emissões provenientes da combustão da gasolina. Esta constatação se deve principalmente às características físico-químicas do etanol, como o alto calor latente de vaporização, que dificultam a combustão a frio (EPA, 2002).

É importante ressaltar que os recursos tecnológicos utilizados para corrigir os efeitos do etanol na partida e na dirigibilidade a frio têm atenuado os níveis de emissões (ROCHA E SIMÕES-MOREIRA, 2005; FAVEZ et al., 2009; MANZOLI e SHAAL, 2009; DARDIOTIS et al., 2015).

Emissões de NOx e SO₂: partidas a frio/ quente e marcha-lenta

Ao contrário das emissões de CO e HCs, as emissões de NOx e SO₂ não possuem uma legislação para emissão em testes em marcha-lenta, por este motivo a análise da partida a frio e marcha-lenta são ilustradas na mesma Figura 5 (a e b), separadas por uma linha tracejada. As emissões de SO₂ foram observadas somente para o veículo movido a diesel, ainda assim muito baixas, como resultado de políticas de públicas na redução de teores de enxofre no combustível (Resolução ANP N° 50/2013) (ver Figura 5b).

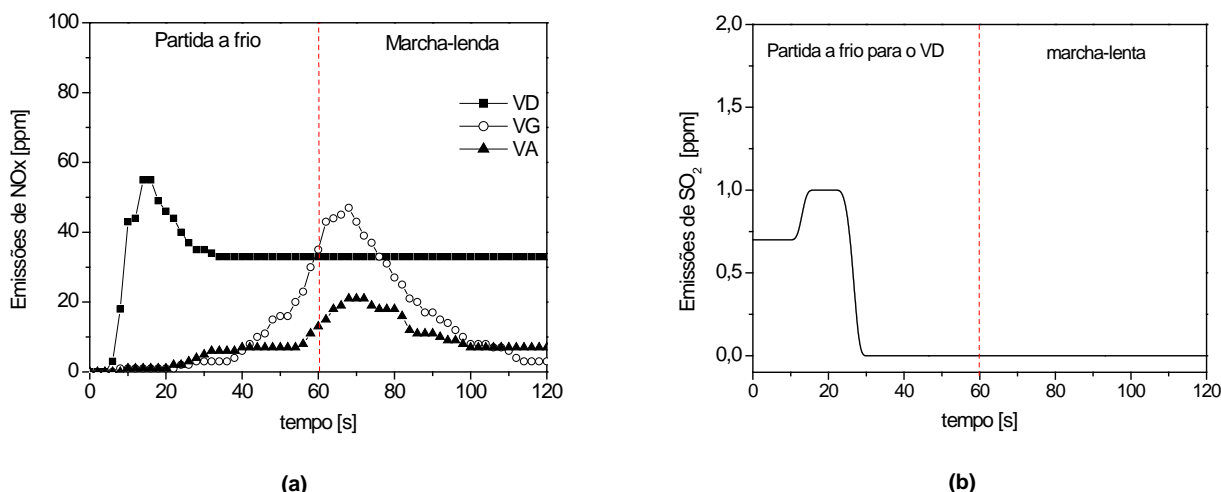


Figura 5. Valor médio para emissão de NO (a) e SO2 (b) durante a partida a frio e marcha-lenta para os veículos/combustíveis avaliados

Tabela 4. Relação entre as emissões de partida a frio e em condições estabilizadas

| Tipo de Veículo/Combustível | CO | HCS | NOx | SO2 |
|-----------------------------|-----|-----|-----|-----|
| VD | 1 | 1 | 2 | 5 |
| VG | 65 | 6 | 1 | - |
| VA | 101 | 10 | 1 | - |

Destaca-se que os veículos ciclo Otto normalmente operam próximos da relação estequiométrica, enquanto que os veículos com ciclo diesel operam com excesso de ar, reduzindo assim as emissões de CO e aumentando as emissões de NOx nessa classe de veículo, o que é confirmado na Figura 6 quando para o VD, a partida a quente favoreceu um aumento nas emissões de NOx.

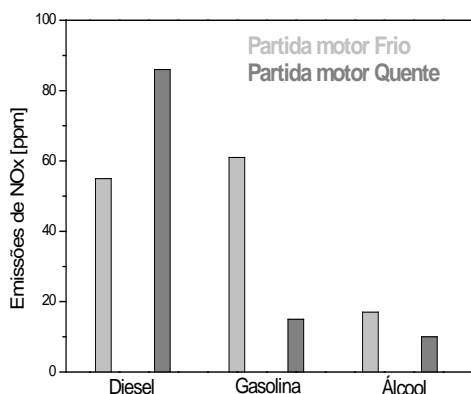


Figura 6. Valores médios das emissões de NOx nas duas condições de partida dos veículos/combustíveis avaliados

Os óxidos de nitrogênio não se formam a temperatura ambiente, mas ao considerar que os motores, sobretudo a diesel, funcionam em temperaturas elevadas, pode ocorrer a combinação do nitrogênio com o oxigênio formando tais óxidos. Quanto mais elevada for a temperatura de combustão, maior será a produção de NO na corrente dos gases de escape (OLIVEIRA et al., 2009; MARTINS, 2011). Na atmosfera o NO pode oxidar-se para NO₂, um dos principais precursores da formação do *smog* fotoquímico, fenômeno

de poluição do ar muito comum em centros urbanos de grandes metrópoles (MANAHAN, 2000).

Rotações mais baixas geralmente produzem uma maior concentração de NOx para uma dada potência devido ao maior tempo disponível para que as reações ocorram. Além disso, o ar e o combustível nos motores diesel são raramente misturados completamente antes de autoignição, o que possibilita também algumas espécies não queimadas do combustível nas regiões mais frias do cilindro, de modo a formar fuligem durante certas combinações de carga e velocidades do motor (EPA, 2002; CALCAGNO, 2005; MARTINS, 2011).

Na Tabela 4 apresenta-se a relação entre as emissões oriundas da partida a frio e as emissões em condições estabilizadas de funcionamento do motor, calculada pela Eq. (3):

$$R_{vce} = \frac{Ef_{VE} \sum x_i}{Ece_{VE} \sum y_i} \quad (3)$$

Onde,

R_{vce} : Relação entre as emissões da partida a frio e nas condições estabilizadas de funcionamento do motor para cada tipo de combustível;

$Ef_{VE} \sum x_i$: Emissões durante a partida a frio para o veículo analisado;

$Ece_{VE} \sum y_i$: Emissões durante as condições estabilizadas para cada veículo.

As emissões produzidas por um veículo possuem um alto grau de variabilidade, de fato existe um grande número de fatores que podem afetar o nível da formação das emissões veiculares (FAIZ et al., 1996; SOUZA et al., 2013). Contudo, nota-se que as emissões oriundas a partida a frio em relação às condições estabilizadas de funcionamento do motor para o VA são cerca de cem vezes maiores para CO e dez vezes para os HCs, enquanto que para o VG foram sessenta e cinco vezes maiores para o CO e seis vezes para os HCs, o que sugere uma fração maior de combustível não queimado no perfil da partida a frio.

O VD apresentou emissões de NOx duas vezes maiores para a partida a frio. A quantidade de poluentes emitidos na partida a frio torna-se significativamente maior em comparação às condições estabilizadas de temperatura do

motor. Com base no efeito da partida a frio, a quantidade de poluentes emitidos torna-se consideravelmente maior em comparação às condições estabilizadas do motor, o que sugere este efeito bastante representativo em se tratando de viagens de curta duração, como é o caso dos deslocamentos urbanos (HANSEN, 2008; TAVARES et al., 2011; TU et al., 2013).

Conforme reportado por alguns autores, um motor a diesel em marcha-lenta pode consumir cerca de 2,5 litros por hora, enquanto que um motor a gasolina pode chegar a um consumo de 3,5 litros por hora. Propõem ainda que, desligar e ligar o veículo sucessivamente não prejudica o motor de partida e não consome mais combustível do que operar o veículo em marcha-lenta por mais de 10 segundos. (BRETT et al., 1999; EPA, 2002; WALLINGTON et al., 2008; NRCan, 2014). Nesta condição, como apresentado pela EPA, as emissões típicas de poluentes veiculares (em g/hora) são da ordem de: 3,2 de HC; 71 de CO e 3,5 de NOx, para os veículos movidos a gasolina (passageiro); Enquanto que para os veículos a diesel (comercial/passageiro), estes valores são da ordem de 3,0 de HC, 6,0 de CO e 4,0 NOx. Já para um veículo a Diesel pesado (i.e. ônibus), cerca de 3 de HC, 27 de CO, 34 para o NOx e 3,0 para as Partículas (MP 2,5 e MP 10) (EPA, 2002; EPA, 2008; NRCa, 2014).

Como já tratado em seção anterior, existem uma série de metodologias para quantificação e avaliação de emissões veiculares, na grande maioria utilizando-se ensaios de bancada em conjunto com modelos de simulações (RAKHA e DING, 2003; CALCAGNO, 2005; HANSEN, 2008; TAVARES et al., 2011; SOUZA et al., 2013; XIAODONG e CARRIQUIRY, 2013). Alguns modelos de emissão presentes na literatura levam em consideração o adicional de partida a frio dos veículos, contudo, muitas vezes não reproduzem as condições reais de operação do veículo, como por exemplo, as características regionais. De fato, há entre os autores a preocupação na contabilização das emissões da fase fria e fase estabilizada, porém, o uso de metodologias mais simples e robusta torna-se cada vez mais necessárias de forma a facilitar esta análise.

4. CONCLUSÕES

Neste estudo foi possível apresentar dados de emissão de veículos equipados com motor ciclo Diesel e Otto quanto ao adicional de emissões veiculares em partida a frio, a quente e na rotação em marcha lenta do motor. A disponibilidade dos dados pode ser adaptada a diferentes realidades com características de motor/classe de veículo semelhantes, sobretudo com relação às condições avaliadas. Durante a partida a frio e o de estabilização do motor, o veículo operando com etanol apresentou o maior nível emissões de HC e CO, ou seja, VA>VG>VD. Apesar dos avanços tecnológicos veiculares, esta constatação se deve, principalmente, às características físico-químicas do etanol (alto calor latente de vaporização, que dificultam a combustão a frio), além da ineficiência do sistema catalítico nesta condição. Este comportamento sugere que o efeito da partida e marcha-lenta devam ser adequadamente ponderados nos estudos de emissões veiculares, uma vez que são representativos nas emissões globais, sobretudo quando em viagens de curta duração, estacionamentos, engarrafamento, embarque e desembarque de passageiros/carga. Apesar de

não se tratar de uma metodologia homologada, é de ratificar a importância da implantação de programas de inspeção veicular no âmbito nacional, se possível, através de uma metodologia alternativa, simples e robusta, capaz de fornecer informações relevantes.

AGRADECIMENTOS

Ao CNPQ e CAPES pelo apoio financeiro concedido a pesquisa e ao Laboratório de Combustíveis e Lubrificantes (LCL) da Universidade Federal do Ceará pelas análises dos combustíveis.

REFERÊNCIAS

- ABNT- Associação Brasileira de Normas Técnicas. *NBR6601: Veículos rodoviários automotores leves — Determinação de hidrocarbonetos, monóxido de carbono, óxidos de nitrogênio, dióxido de carbono e material particulado no gás de escapamento*. Rio de Janeiro, RJ: ABNT, 2012.
- Achour, H.; Carton, J.G.; Olabi, A.G. Estimating vehicle emissions from road transport, case study: Dublin City. *Applied Energy*, v. 88, p. 1957-1964, 2011. DOI:10.1016/j.apenergy.2010.12.032
- Anderson, H.R. (2009). Air pollution and mortality: a history. *Atmospheric Environment*, v. 43, p. 142-152. DOI:10.1016/j.atmosenv.2008.09.026.
- ANP - Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis. *Resolução ANP Nº 50, DE 23.12.2013*, especificações do óleo diesel de uso rodoviário (teor de enxofre no óleo diesel).
- Brett C. Singer, Thomas W. Kirchstetter, and Robert A. Harley. Gary R. Kendall and James M. Hesson (1999). A Fuel-Based Approach to Estimating Motor Vehicle Cold-Start Emissions. *Journal of the Air & Waste Management Association*, n. 49, p. 125-135. DOI:10.1080/10473289.1999.10463785.
- Calcagno, James A., *Evaluation of Heavy-Duty Diesel Vehicle Emissions During Cold-Start and Steady-State Idling Conditions and Reduction of Emissions from a Truck-Stop Electrification Program*. PhD diss., University of Tennessee, 2005. http://trace.tennessee.edu/utk_graddiss/1892.
- CETESB (2013) - Companhia Ambiental do Estado de São Paulo, *Fatores médios de emissão de veículos leves novos*. Disponível em: <http://veicular.cetesb.sp.gov.br/wp-content/uploads/sites/35/2013/12/relatorio-emissoes-veiculares-2011.pdf>. Acesso em: 01/08/2014.
- Confederação Nacional do Transporte (CNT). Maioria dos estados já conta com planos para controlar poluição veicular. 2011. Disponível em: http://www.cnt.org.br/Paginas/Agencia_Noticia.aspx?n=7728. Acesso em: 15 dez. 2014.
- Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA). Resolução Nº 451/2012- Dispõe sobre critérios para a elaboração de Planos de Controle de Poluição Veicular-PCPV e para a implantação de Programas de Inspeção e Manutenção de Veículos em Uso-I/M. Brasília, DF: CONAMA. Disponível em: <http://www.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=675>. Acesso em: 10 dez. 2014.

- Dardiotis C., Fontaras G., Marotta A., Martini G., (2015). Urbano Manfredi: Emissions of modern light duty ethanol flex-fuel vehicles over different operating and environmental conditions. *Fuel*, v. 140, n. 15, p. 531–540. DOI:10.1016/j.fuel.2014.09.085
- Departamento Nacional de Trânsito (DENATRAN). Estatística da frota nacional em dezembro de 2013. Brasília, DF: DENATRAN. Disponível em: <<http://www.denatran.gov.br/frota2013.htm>>. Acesso em: 12 jan. 2015.
- ECIL Temperatura Industrial. Chemist 400: analisador portátil de gases de combustão: manual de operações. Disponível em: <<http://pt.scribd.com/doc/269124124/Mannual-Portugues-Chemist-rev1#scribd>>. Acesso em: 08 abr. 2014.
- EPA (1998). Emission facts: idling vehicle emissions. United States Environmental Protection Agency. Air and Radiation. EPA420-F-98-014 April 1998. Office of Mobile Sources. Washington, DC, 1998. Disponível em: <<http://www3.epa.gov/otaq/consumer/f98014.pdf>>. Acesso em: 22 nov. 2015.
- EPA (2008). Emission facts: idling vehicle emissions for passenger cars, lightduty trucks, and heavy-duty trucks. Office of Transportation and Air Quality. United States Environmental Protection Agency. Air and Radiation. EPA420-F-08-025 October 2008. Office of Mobile Sources. Washington, DC, 1998. Disponível em: <<http://www3.epa.gov/otaq/consumer/420f08025.pdf>>. Acesso em: 21 nov. 2014.
- EPA. Principles for Greener Cleanups; August 27, 2009; http://www.epa.gov/sites/production/files/2015-01/documents/epa_r3_greener_cleanup_sustainable_reuse_policy.pdf. Acesso em Janeiro de 2015.
- Faiz A., Weaver C. S., Walsh, M.P. (1996) *Air pollution from motor vehicles*: standards and technologies for controlling emissions. Technical Report. The World Bank, Washington, D.C., 1996. Disponível em: <www.un.org/esa/gite/iandm/faizpaper.pdf>. Acesso em: 11 dez. 2014.
- Fenger, J. (2009). Air pollution in the last 50 years – From local to global. *Atmospheric Environment*, v. 43, p. 13-22. DOI:10.1016/j.atmosenv.2008.09.061.
- Freitas L. C., Kaneko S. (2011). Ethanol demand under the flex-fuel technology regime in Brazil. *Energy Economics*. v. 33, n. 6, p. 1146–1154. DOI:10.1016/j.eneco.2011.03.011
- Favez J.-Y., Weilenmann M., Stilli J. (2009). Cold start extra emissions as a function of engine stop time: Evolution over the last 10 years. *Atmospheric Environment*, v. 43, p. 996–1007. DOI:10.1016/j.atmosenv.2008.03.037.
- Silva, Katia C.C.; Daemme, Luiz Carlos; Macedo, Valeria; Pentead, Renato; Corrêa, Sergio Machado (2014). Estudo das emissões de álcool não queimado e aldeídos em veículo Flex analisadas pelas técnicas de Cromatografia e FTIR.. In: *Anais do XXII Simpósio Internacional de Engenharia Automotiva – SIMEA 2014*. São Paulo: Blucher. p. 471-480. DOI 10.5151/engpro-simea2014-67.
- Guarheiro, L. L. N.; Vasconcellos, P. C.; Solci, M. C. (2011). Poluentes atmosféricos provenientes da queima de combustíveis fósseis e biocombustíveis: uma breve revisão. *Ver. Virtual Química*, v. 3, n. 5, p. 434 – 445. DOI: 10.5935/1984-6835.20110047
- Hansen, M. (2008). *Proposição de um método para avaliação de adicional de emissões veiculares em partida a frio*. Dissertação
- (Mestrado em Engenharia de Produção) – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.
- IBAMA – Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis. http://www.ibama.gov.br/servicosonline/ctf/publico/sel_marca_modelo_rvep.php. acesso em Janeiro de 2015.
- IBRAM. Instituto do Meio Ambiente e dos Recursos Hídricos do Distrito Federal (2008). *Relatório de Monitoramento da Qualidade do Ar no Distrito Federal*. Distrito Federal, 2008.
- Lim, H. (2003) *Study of exhaust emissions from idling heavy duty diesel trucks and commercially available idle reducing devices*. SAE Technical Paper 2003-01-0288, USA. DOI:10.4271/2003-01-0288.
- Lisboa, H. M. Schirmer, W. N.; Kawano, M.; Quadros, M. E. (2008). *Controle da poluição atmosférica*. Florianópolis: [s.n], v. 1, p. 352.
- Martins J. (2013). *Motores de Combustão Interna*. 4. ed. Publindústria.
- Manzoli, A.; Schaal, R. E. (2009). Circulação de veículos com motores frios: o problema da emissão de CO e HC. *Revista Minerva*, v. 6, n. 1, p. 31 – 38.
- Ministério do Meio Ambiente (MMA) (2009). *Consulta dos níveis de emissão dos veículos novos brasileiros*. Disponível em: <http://www.ibama.gov.br/servicosonline/ctf/publico/sel_marca_modelo_rvep.php>. Acesso em: 13 out. 2014.
- Natural Resources Canada (NRCAN) (2014). *Bulletins*. July and August 2004. Disponível em: <<http://nrcan.gc.ca/energy/regulations-codes-standards/7015>>. Acesso em: 09 jun. 2015.
- Oliveira, M. L. M.; Silva, C. M.; Moreno-Tost, R.; Farias, T. L.; Jiménez-López, A.; Rodríguez-Castellón, E. (2009). Simulation of SCR equipped vehicles using iron-zeolite catalysts. *Applied Catalysis A: General*, v. 366, p. 13 – 21, DOI:10.1016/j.apcata.2009.06.020
- Rakha, H.; Y. Ding. (2003) Impact of Stops on Vehicle Fuel Consumption. *Journal of Transportation Engineering* v. 129, n. 1, p. 23-32. DOI:10.1061/(ASCE)0733-947X(2003)129:1(23).
- Rocha M.S.; Simões-Moreira J.R. (2005). A simple impedance method for determining ethanol and regular gasoline mixtures mass contents. *Fuel*, v. 84, p. 447– 452. DOI:10.1016/j.fuel.2004.09.011.
- Souza, C. D. R.; Silva, S. D.; da Silva, M. A. V., D’Agosto, M. A., Barboza, A. P. (2013) Inventory of conventional air pollutants emissions from road transportation for the state of Rio de Janeiro. *Energy Policy*. v. 53, p. 125–135. DOI:10.1016/j.enpol.2012.10.021.
- Takeshita, E. V.; Rezende, R. V. P.; Souza, S. M. A. G. U.; Souza, A. A. U. (2008). Influence of solvent addition on the physicochemical properties of Brazilian gasoline. *Fuel*, v. 87, p. 2168 – 2177. DOI:10.1016/j.fuel.2007.11.003
- Tavares, J. R.; Sthel, M. S.; Campos, L. S.; Rocha, M. V.; Lima, G. R.; Silva, M. G.; Vargas, H. (2011). Evaluation of Pollutant Gases Emitted by Ethanol and Gasoline Powered Vehicles. *Procedia Environmental Sciences*, v. 4, p. 51-60. DOI:10.1016/j.proenv.2011.03.007.

Thomas, V. (2004). *Leaded Gasoline Phase-Out*. Princeton Environmental Institute. Princeton University.

Tu J., Wayne W. S., Perhinschi M. G.. Correlation Analysis of Duty Cycle Effects on Exhaust Emissions and Fuel Economy. *JTRF*, v. 52, n. 1, Spring, 2013. DOI:10.1.1.308.6174.

Wallington T.J., Sullivan J.L., Hurley Michael D. (2008). Emissions of CO₂, CO, NO_x, HC, PM, HFC-134a, N₂O and CH₄ from the global light duty vehicle fleet. *Meteorologische Zeitschrift*, v. 17, n. 2, p. 109-116. DOI: 10.1127/0941-2948/2008/0275.

Wenzel, T., Singer, B. C., Slott, R. (2000). Some Issues in the Statistical Analysis of Vehicle Emissions. *Journal of Transportation and Statistics*. v. 3, p. 1-14. DOI: 10.1.1.120.9877.

Xiaodong D., Carriquiry, M. A. (2013). Flex-fuel vehicle adoption and dynamics of ethanol prices: lessons from Brazil. *Energy Policy*, v. 59, p. 507–512. DOI: 10.1016/j.enpol.2013.04.008.

Yamamoto, S. S.; Phalkey, R.; Malik, A. A. (2014). A systematic review of air pollution as a risk factor for cardiovascular disease in South Asia: Limited evidence from India and Pakistan. *International Journal of Hygiene and Environmental Health*, v. 217, p. 133 – 134. DOI:10.1016/j.ijheh.2013.08.003.