

12º Congresso de Inovação, Ciência e Tecnologia do IFSP - 2021

EMISSÕES DE POLUENTES NA FASE DE USO DE VEÍCULOS ELÉTRICOS HÍBRIDOS

JULIA MARIA MASSARELI COSTA¹, FABIANO TADEU MATHIAS COSTA²

¹ Graduando em Engenharia de Controle e Automação, Bolsista PIBIFSP, IFSP, Câmpus Catanduva, massareli.j@aluno.ifsp.edu.br

² Doutor em Ciências, Programa de Engenharia Mecânica, Docente, IFSP, Câmpus Catanduva, fabiano.tmc@ifsp.edu.br
Área de conhecimento (Tabela CNPq): 3.05.02.03-9 Aproveitamento de energia

RESUMO: O caminho da eletromobilidade no Brasil tem sido traçado, principalmente, por meio da inserção de veículos elétricos híbridos na frota de automóveis da última década. Dessa forma, propõe-se estudar como o consumo de energia e as emissões de gases de efeito estufa (GEE) serão afetadas pela penetração de veículos híbridos e híbridos *plug-in* na frota brasileira de automóveis. Para isso, estimativas foram elaboradas quanto ao futuro da frota brasileira de automóveis nos próximos trinta anos, e cenários do perfil de licenciamentos e estoque foram definidos. Ademais, o consumo energético de veículos convencionais, veículos híbridos comuns e híbridos *plug-in* foi estimado, e as emissões de GEE durante a fase de uso para cada um dos tipos de tecnologia também foram obtidas. Por fim, comparações entre os resultados obtidos em cada cenário foram realizadas. Os veículos híbridos, em comparação aos convencionais, demonstraram ser mais eficientes e consumir menos energia. Nos cenários estimados, a escolha pelo uso de etanol ou gasolina gera diferenças significativas no perfil da frota futura, e o uso de veículos híbridos causa reduções importantes na quantidade de energia necessária para abastecer a frota. No entanto, podem emitir mais GEE do que veículos convencionais que utilizam etanol, por serem abastecidos com gasolina. Assim, a fonte energética deve ser um fator a ser levado em consideração nas análises de impacto ambiental desses veículos, e combinações com a tecnologia *flex-fuel* devem se tornar um caminho importante para um melhor aproveitamento do potencial de veículos híbridos.

PALAVRAS-CHAVE: modelagem de frota; consumo energético; gases de efeito estufa.

POLLUTANTS EMISSION IN THE USE PHASE OF ELECTRIC HYBRID VEHICLES

ABSTRACT: The path of electromobility in Brazil has been traced, mainly, through the insertion of hybrid electric vehicles in the car fleet for the last decade. Thus, this paper proposes to study how energy consumption and greenhouse gas (GHG) emissions will be impacted by the penetration of plug-in hybrid and hybrid vehicles in the Brazilian car fleet. For this, estimates were elaborated regarding the future of the Brazilian car fleet in the next thirty years, and scenarios for the licensing and stock profile were defined. Furthermore, the energy consumption of conventional vehicles, common hybrid vehicles and plug-in hybrids was estimated, and the GHG emissions during the use phase for each type of technology were also obtained. Finally, comparisons between the impacts caused in each scenario were carried out. Hybrid vehicles, compared to conventional ones, have shown to consume less energy. In the estimated scenarios, choosing to use ethanol or gasoline generates significant differences in the profile of the future fleet, and the use of hybrid vehicles causes important reductions in the amount of energy needed to supply the fleet. However, they can emit more GHG than conventional vehicles that use ethanol, for they are fueled with gasoline. Thus, the energy source should be a factor to be taken into account when it comes to the environmental impact analysis of these vehicles, and combinations with flex-fuel technology should become an important path for a better use of the hybrid vehicles potential.

KEYWORDS: fleet modeling; energy consumption; greenhouse gases.

INTRODUÇÃO

Enquanto veículos convencionais (VMCIs – veículos movidos à combustão interna) fazem uso de um motor à combustão e utilizam combustíveis como a gasolina e o etanol, veículos híbridos combinam um motor elétrico e um motor mecânico. Veículos elétricos híbridos comuns (VEHs), em geral, podem utilizar dois tipos de motores elétricos. Esses podem ser do tipo gerador de arranque integrado ou motor de transmissão elétrica variável. Este último também pode ser empregado em veículos elétricos híbridos *plug-in* (VEHPs) (CHAU *et al.*, 2017).

Por conta das características intrínsecas da construção desses veículos e da possibilidade do uso de energia elétrica, esses veículos têm se tornado particularmente populares. De acordo com Von Bun (2015), no entanto, a avaliação do impacto real desses veículos depende da matriz energética do local em que são empregados. No Brasil, país em que a matriz energética é composta principalmente por fontes energéticas renováveis ((EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA, 2021), o potencial de mitigação do consumo energético e emissões de poluentes veiculares é significativo.

Diante do cenário energético brasileiro e da inserção crescente de veículos elétricos e híbridos na frota do país (ASSOCIAÇÃO NACIONAL DOS FABRICANTES DE VEÍCULOS AUTOMOTORES, 2021a), propõe-se comparar as estimativas de consumo energético e emissão de GEE da inserção de veículos híbridos e híbridos *plug-in* da frota de automóveis do país. Além disso, pretende-se comparar essas estimativas aos resultados obtidos para veículos convencionais, e projetar as emissões de gases de efeito estufa da frota brasileira em um futuro próximo.

MATERIAL E MÉTODOS

Estimativas sobre o perfil da frota brasileira de automóveis foram realizadas com base na modelagem do Ministério do Meio Ambiente (2013) e dados de licenciamento de automóveis de 1957 a 2020 da Associação Nacional Dos Fabricantes De Veículos Automotores (2021b).

Para as projeções futuras, uma taxa de crescimento anual sobre as vendas de automóveis foi especificada, e dois possíveis cenários para a inserção de veículos híbridos na frota foram definidos. Em ambos os cenários, considerou-se que a venda de híbridos e híbridos *plug-in* cresce igualmente. No cenário pessimista, no entanto, a taxa de crescimento anual de vendas desses veículos foi estabelecida em 5%, enquanto no cenário otimista considera-se que as vendas anuais de híbridos cresçam a uma taxa de 30%.

Posteriormente, o consumo energético de veículos convencionais, híbridos e híbridos *plug-in* foi definido. Para isso, dados de eficiência energética do Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia (2019; 2020) foram utilizados no cálculo de consumo energético anual (γ) da frota. Esse cálculo é apresentado na equação (1).

$$\gamma = \alpha \cdot d \text{ [kWh/ano]} \quad (1)$$

Nessa equação, α é a eficiência média dos veículos [kWh/km] e d é a distância média percorrida anualmente pela frota [km/ano]. Com base na curva de intensidade de uso de automóveis *flex-fuel* da Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (2017), o valor da distância média percorrida obtido foi de, aproximadamente, 13 654 km/ano.

Para o cálculo de emissões geradas por veículos que utilizam um motor a combustão, as equações (2) e (3) foram utilizadas.

$$E_{km} = \alpha \cdot IC \text{ [gCO}_{2eq}/km] \quad (2)$$

$$E_{anual} = E_{km} \cdot d \text{ [gCO}_{2eq}/ano] \quad (3)$$

Nessas equações, E_{km} é a emissão de GEE por quilômetro, E_{anual} é a emissão anual de GEE gerada por um veículo, α é a eficiência média dos veículos [MJ/km], e IC é a intensidade de carbono do combustível utilizado [gCO_{2eq}/MJ].

Os dados de intensidade de carbono foram obtidos a partir do relatório da Associação Brasileira de Engenharia Automotiva (2020), e variam conforme o tipo de combustível utilizado. Assim, para a gasolina como combustível, a intensidade de carbono foi estabelecida em 87,6 gCO_{2eq}/MJ. Para o etanol

hidratado de primeira geração, já estabelecido no Brasil (Associação Brasileira de Engenharia Automotiva, 2020), esse valor foi de 20,79 gCO_{2eq}/MJ .

Para os veículos híbridos *plug-in*, que também podem percorrer percursos apenas com eletricidade, o perfil de uso definido foi baseado em Mariotto, Silva e Trindade (2017). Assim, designou-se que os VEHPs percorrem em média 37% do seu percurso com eletricidade, e 63% com combustíveis.

A equação (4) apresenta o cálculo para estimativa de emissões para a parte do percurso percorrido por esses veículos com eletricidade.

$$E_{elet} = FE \cdot \alpha \text{ [g } CO_{2e}/km] \quad (4)$$

Na equação (4), E_{elet} é a emissão de GEE por quilômetro, α é a eficiência média dos veículos [kWh/km] e FE é o fator de emissão da rede elétrica local [gCO_{2eq}/kWh].

Por fim, os dados de consumo energético e emissões de GEE foram aplicados aos cenários estimados.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A partir dos dados de veículos reais brasileiros, a eficiência energética de cada tecnologia veicular foi obtida. Dessa forma, observou-se que veículos convencionais *flex-fuel* consomem 1,6814 MJ/km percorrido (0,4669 kWh/km), enquanto VEHs e VEHPs consomem, respectivamente, 1,404 MJ/km (0,39 kWh/km) e 1,1429 MJ/km (0,3174 kWh/km).

A melhor eficiência dos veículos híbridos, consequentemente, se refletiu no consumo energético necessário para abastecer cada tipo de veículo. Enquanto VMCIIs consomem até 6 375,3558 kWh/ano, os VEHs e VEHPs consomem em média 5 323,5849 kWh/ano e 4 333,4025 kWh/ano.

As emissões veiculares, no entanto, dependem principalmente da fonte energética com a qual esse consumo será suprido. Enquanto veículos convencionais *flex* apresentam a possibilidade de abastecimento com etanol, os veículos híbridos comercializados no Brasil, conforme dados do Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia (2019; 2020), podem apenas ser abastecidos com gasolina ou gasolina e eletricidade, no caso de VEHPs.

Em vista da menor intensidade de carbono apresentada na formulação de biocombustíveis, a taxa de emissões de gases de efeito estufa geradas com veículos movidos a etanol é menor que a de veículos movidos a gasolina.

Dessa forma, apesar de emitirem menos poluentes em comparação a veículos convencionais que utilizam gasolina, veículos híbridos geram mais emissões do que convencionais abastecidos com etanol. Enquanto VMCIIs movidos a gasolina e etanol emitem, respectivamente, 2 011 095,3 gCO_{2eq}/ano e 477 290,77 gCO_{2eq}/ano , veículos híbridos e híbridos *plug-in* emitem até 1 679 315,95 gCO_{2eq}/ano e 981 439,58 gCO_{2eq}/ano .

A figura 2, a seguir, representa o cenário pessimista estimado.

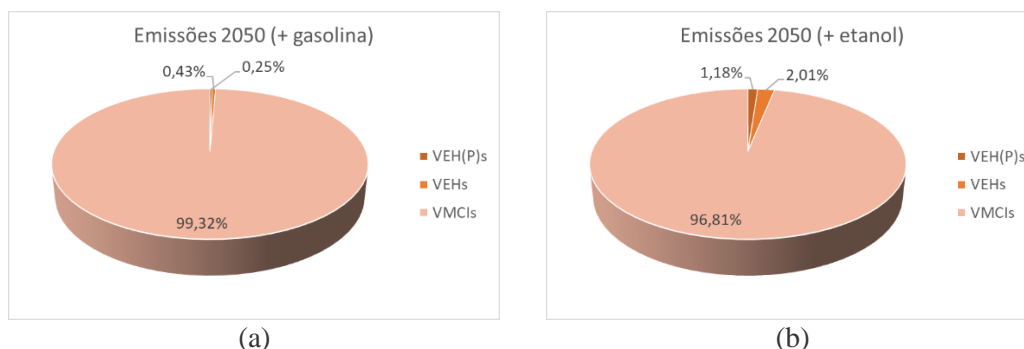


FIGURA 2. Cenário pessimista: emissões de GEE por tecnologia no ano de 2050, com variações no abastecimento da parcela de VMCIIs.

Nesse cenário, com uma baixa penetração de híbridos até o ano de 2050, estima-se que a frota de VMCIIs seja responsável por mais de 99% do consumo energético (420 108 620 MWh), enquanto VEHs consumirão 0,51% (2 165 019 MWh) e VEHPs, 0,4% (1 687 969 MWh).

Para o caso de a frota de VMCI's de 2050 ser principalmente abastecida com gasolina, como mostrado na figura 2 (a), essa parcela de veículos também pode ser responsável por 99,32% (98 712 226 t CO_{2eq}) das emissões de GEE da frota, enquanto VEHs e VEHPs corresponderiam a 0,43% (426 376 t CO_{2eq}) e 0,25% (249 186 t CO_{2eq}), respectivamente.

Já para o caso de o abastecimento de VMCI's ocorrer com o uso de etanol (figura 2 (b)), veículos híbridos seriam responsáveis por uma parcela maior nas emissões da frota. Enquanto VMCI's emitiriam 96,81% do total (31 451 416 t CO_{2eq}), VEHs emitiriam 2,01% (654 136 t CO_{2eq}) e VEHPs, 1,18% (382 295 t CO_{2eq}).

No cenário otimista, estima-se que o perfil de consumo energético da frota de 2050 seja composto por 32,99% de VMCI's (117 381 955 MWh), 36,94% de VEHs (131 432 178 MWh) e 30,07% de VEHPs (106 985 900 MWh). Da mesma maneira, caso a gasolina seja o principal combustível utilizado por VMCI's, as emissões serão provenientes, de maneira majoritária, de veículos híbridos comuns. Assim, VMCI's serão responsáveis por 34,62% (34 786 808 t CO_{2eq}) das emissões, VEHs por 41,26% (41 460 061 t CO_{2eq}) e VEHPs, apenas por 24,12% (24 230 428 t CO_{2eq}).

No entanto, caso o etanol seja o combustível mais utilizado, estima-se que os VMCI's emitam apenas 11,16% dos poluentes causados pela frota (8 255 910 t CO_{2eq}), enquanto VEHs emitam 56,07% (41 460 061 t CO_{2eq}) e VEHPs, 32,77% (24 230 428 t CO_{2eq}). A figura 3 apresenta dos dados obtidos para o cenário otimista.

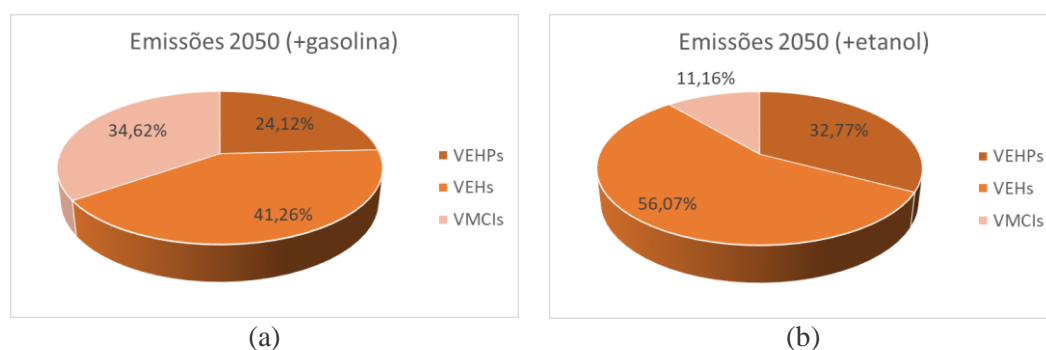


FIGURA 3. Cenário otimista: emissões de GEE por tecnologia no ano de 2050, com variações no abastecimento da parcela de VMCI's.

CONCLUSÕES

Apesar de consumirem menos energia e serem mais eficientes, os veículos híbridos, tanto comuns quanto *plug-ins*, não necessariamente gerarão menos poluição do que os modelos convencionais. Esse fenômeno ocorre, principalmente, por conta da fonte energética utilizada para abastecer os veículos.

Enquanto, no Brasil, veículos *flex-fuel* compõe uma parcela significativa da frota e podem ser abastecidos com biocombustíveis como o etanol, a maioria dos veículos híbridos ainda não apresentam essa possibilidade. Assim, além do uso da eletricidade em alguns modelos, esses carros normalmente são abastecidos com gasolina, fator que os leva a emitir mais durante fase de uso do que um veículo movido a etanol.

Dessa forma, a fonte energética escolhida e sua pegada de carbono se tornam um fator essencial na determinação do impacto real da transformação da frota brasileira. No país, para que os veículos híbridos se tornem verdadeiramente competitivos no quesito ambiental, a combinação da tecnologia *flex-fuel* com a propulsão elétrica se torna uma solução viável.

AGRADECIMENTOS

Ao IFSP pela oportunidade e pela bolsa de iniciação científica (PIBIFSP).

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENGENHARIA AUTOMOTIVA. **Roadmap tecnológico automotivo brasileiro**. [S.l.]: AEA, 2020. Disponível em: <https://aea.org.br/inicio/wp-content/uploads/2020/12/WhitePaperRoadmap.pdf>. Acesso em: 10 ago. 2021.

ASSOCIAÇÃO NACIONAL DOS FABRICANTES DE VEÍCULOS AUTOMOTORES. **Carta da ANFAVEA 420**. São Paulo: ANFAVEA, 2021a. Disponível em: <https://www.anfavea.com.br/cartas/carta420.pdf>. Acesso em: 04 mai. 2021.

ASSOCIAÇÃO NACIONAL DOS FABRICANTES DE VEÍCULOS AUTOMOTORES. **Séries mensais a partir de janeiro/1957, de autoveículos por segmento (automóveis, comerciais leves, caminhões, ônibus, total) de produção; licenciamento de nacionais; importados e total; exportações em unidades**. São Paulo: ANFAVEA, 2021b. Disponível em: <https://anfavea.com.br/estatisticas>. Acesso em: 25 mar. 2021.

CHAU, K. T. *et al.* State of the art electromagnetics research in electric and hybrid vehicles. **Progress in Electromagnetics Research**, [S.l.], v. 159, p. 139-157, 2017. DOI 10.2528/PIER17090407. Disponível em: <http://www.jpier.org/PIER/pier159/10.17090407.pdf>. Acesso em: 29 mai. 2021.

COMPANHIA AMBIENTAL DA CIDADE DE SÃO PAULO. **Intensidade de uso em 2017**. São Paulo: CETESB, 2017. Disponível em: <https://cetesb.sp.gov.br/veicular/relatorios-e-publicacoes/>. Acesso em: 17 mai. 2019.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Balço energético nacional 2020**. Rio de Janeiro: EPE, 2020. Disponível em: https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-479/topico-521/Relato%CC%81rio%20Si%CC%81ntese%20BEN%202020-ab%202019_Final.pdf. Acesso em: 15 jan. 2021.

INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA, QUALIDADE E TECNOLOGIA. **Tabelas de consumo/ eficiência energética: veículos automotores leves**. Brasil: INMETRO, 2019. 46p. Disponível em: http://www.inmetro.gov.br/consumidor/pbe/veiculos_leves_2019.pdf. Acesso em: 20 out. 2019.

INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA, QUALIDADE E TECNOLOGIA. **Tabelas de consumo/ eficiência energética: veículos automotores leves**. Brasil: INMETRO, 2020. 47p. Disponível em: [inmetro.gov.br/consumidor/pbe/veiculos_leves_2020.pdf](http://www.inmetro.gov.br/consumidor/pbe/veiculos_leves_2020.pdf). Acesso em: 20 abr. 2020.

MARIOTTO, F. T.; SILVA, L. C. P.; TRINDADE, F. C. L. Impactos econômicos de veículos elétricos na rede de distribuição de energia elétrica brasileira. *In: LATIN AMERICA CONGRESS ON ELECTRICITY GENERATION AND TRANSMISSION*, 12., 2017, Mar del Plata. **Anais Eletrônicos** [...]. Mar del Plata: CLAGTEE, 2017. Disponível em: <http://www3.fi.mdp.edu.ar/clagtee/2017/articles/12-040.pdf>. Acesso em: 20 set. 2019.

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. **Inventário nacional de emissões atmosféricas por veículos automotores rodoviários 2013: ano-base 2012**. Brasil: MMA, 2013. 115 p. Disponível em: http://www.feam.br/images/stories/inventario/inventario_Ar/20140527%20inventrio%202013.pdf. Acesso em: 10 fev. 2021.

VON BUN, C. **Impactos ambientais e econômicos dos veículos híbridos elétricos e híbridos plug-in: uma revisão da literatura**. Brasília: Instituto de pesquisa econômica aplicada, 2015. 48 p. Disponível em: http://repositorio.ipea.gov.br/bitstream/11058/5328/1/td_2123.pdf. Acesso em: 05 jun. 2021.