

EMISSÕES POLUENTES DOS VEÍCULOS: impacto dos combustíveis utilizados e potencialidades da mobilidade elétrica

Túlio Augusto Castelo Branco Leal
Flávia Luciane Consoni

EMISSÕES POLUENTES DOS VEÍCULOS: impacto dos combustíveis utilizados e potencialidades da mobilidade elétrica

Túlio Augusto Castelo Branco Leal¹

Flávia Luciane Consoni²

¹ Consultor Legislativo do Senado Federal, do Núcleo de Economia. Engenheiro Civil (UnB); Mestre em Transportes Urbanos (UnB). E-mail: tbleal@senado.leg.br.

² Professora Doutora do Departamento de Política Científica e Tecnológica do Instituto de Geociências da Unicamp. Graduação em Ciências Sociais (UFSCar); Mestrado e Doutorado em Política Científica e Tecnológica (Unicamp); Pós-Doutorado em Sociologia (USP/SP). E-mail: fconsoni@unicamp.br.

SENADO FEDERAL

DIRETORIA GERAL

Ilana Trombka – Diretora-Geral

SECRETARIA GERAL DA MESA

Luiz Fernando Bandeira de Mello Filho – Secretário Geral

CONSULTORIA LEGISLATIVA

Danilo Augusto Barboza de Aguiar – Consultor-Geral

NÚCLEO DE ESTUDOS E PESQUISAS

Rafael Silveira e Silva – Coordenação

Brunella Poltronieri Miguez – Revisão

João Cândido de Oliveira – Editoração

CONSELHO EDITORIAL

Eduardo Modena Lacerda

Ivan Dutra Faria

Denis Murahovschi

Núcleo de Estudos e Pesquisas
da Consultoria Legislativa



Conforme o Ato da Comissão Diretora nº 14, de 2013, compete ao Núcleo de Estudos e Pesquisas da Consultoria Legislativa elaborar análises e estudos técnicos, promover a publicação de textos para discussão contendo o resultado dos trabalhos, sem prejuízo de outras formas de divulgação, bem como executar e coordenar debates, seminários e eventos técnico-acadêmicos, de forma que todas essas competências, no âmbito do assessoramento legislativo, contribuam para a formulação, implementação e avaliação da legislação e das políticas públicas discutidas no Congresso Nacional.

Contato:

conlegestudos@senado.leg.br

URL: www.senado.leg.br/estudos

ISSN 1983-0645

O conteúdo deste trabalho é de responsabilidade dos autores e não representa posicionamento oficial do Senado Federal.

É permitida a reprodução deste texto e dos dados contidos, desde que citada a fonte. Reproduções para fins comerciais são proibidas.

Como citar este texto:

LEAL, Túlio Augusto Castelo Branco; CONSONI, Flávia L. **Emissões Poluentes dos Veículos: impacto dos combustíveis utilizados e potencialidades da mobilidade elétrica.** Brasília: Núcleo de Estudos e Pesquisas/ CONLEG/Senado, Janeiro 2021 (Texto para Discussão nº 293). Disponível em: www.senado.leg.br/estudos. Acesso em: 29 jan. 2021.

EMISSÕES POLUENTES DOS VEÍCULOS: IMPACTO DOS COMBUSTÍVEIS UTILIZADOS E POTENCIALIDADES DA MOBILIDADE ELÉTRICA

RESUMO

Este Texto para Discussão trata da emissão de gases poluentes decorrentes do transporte, em função do tipo de combustível utilizado nos veículos, sejam fósseis (gasolina e diesel) ou biocombustíveis (etanol). Essa poluição gera impactos em duas escalas distintas: uma local/regional, e outra global. Em nível global, os biocombustíveis apresentam clara vantagem em relação aos combustíveis fósseis em função da menor geração de gases de efeito estufa (GEE). Quanto à poluição local, entretanto, o quadro é mais complexo, e, embora, os biocombustíveis tenham representado um avanço em relação ao cenário de décadas atrás, sua queima hoje também apresenta importantes classes de poluentes, como aqueles precursores da formação de smog fotoquímico nas grandes cidades. De fato, esses problemas decorrem não tanto dos biocombustíveis em si, ou mesmo de sua fabricação, mas da tecnologia dos motores a combustão interna, que sempre acarreta na emissão de poluição, particularmente no nível local. Assim, uma solução que tem sido adotada por diversos países na busca por um transporte de baixíssimas emissões é a eletrificação dos veículos de transporte, que pode ser utilizada tanto isoladamente, como em conjunto com os biocombustíveis (em veículos elétricos híbridos), de forma a mitigar o efeito deletério dos motores a combustão interna. A transição para esse cenário, contudo, exige um esforço de planejamento e alinhamento de interesses que deve ocorrer o mais breve possível.

PALAVRAS-CHAVE: biocombustíveis; poluição; transporte; veículos elétricos.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
2	BREVE HISTÓRICO DO CONTROLE DA POLUIÇÃO VEICULAR NO BRASIL	3
3	EMISSIONES VEICULARES E A POLUIÇÃO EM ESCALA LOCAL E REGIONAL	5
3.1.	PRINCIPAIS TIPOS DE POLUENTES DECORRENTES DAS EMISSIONES VEICULARES.....	6
3.2.	EMISSIONES POLUENTES DOS VEÍCULOS COM MOTOR A DIESEL.....	10
3.3.	EMISSIONES DOS VEÍCULOS DE MOTOR DO CICLO OTTO.....	13
4	GASES DE EFEITO ESTUFA DECORRENTES DAS EMISSIONES VEICULARES	16
4.1.	O EFEITO ESTUFA	16
4.2.	O IMPACTO DOS DIFERENTES COMBUSTÍVEIS NA EMISSÃO DE GEE	20
4.2.1.	COMBUSTÍVEIS FÓSSEIS	21
4.2.2.	BIOCOMBUSTÍVEIS	21
4.3.	ELETRIFICAÇÃO DOS TRANSPORTES E OS GEE.....	22
5	ANÁLISE E CONCLUSÕES.....	25

1 INTRODUÇÃO

O setor de transportes é elemento fundamental da vida moderna, tanto como suporte aos demais setores da economia, como para permitir a mobilidade das pessoas nas cidades ou entre elas. Entretanto, a despeito dessas externalidades positivas, desse subsistema resulta também uma miríade de impactos negativos para os quais se necessita mitigação. Entre esses, um dos mais relevantes a ser equacionado é a emissão de poluentes que decorre, basicamente, da queima de combustíveis no interior dos motores a combustão dos veículos.

Trata-se, contudo, de tema multidisciplinar e com diversas possibilidades de abordagem, em que, ao se escrever sobre ele, faz-se necessário um recorte claro do que será estudado, de forma a evitar que a discussão se torne muito difusa ou extensa.

Assim, este Texto para Discussão (TD) examina os poluentes que são gerados pela queima dos três principais combustíveis utilizados pelos veículos no Brasil (óleo diesel, gasolina e etanol) em duas escalas distintas, uma com impactos local, e mesmo regional, e outra com impactos globais. Perpassando o tema, é feita uma reflexão acerca de como a eletrificação dos veículos, ou seja, a substituição dos motores a combustão interna por motores elétricos alimentados por baterias, ainda que de forma híbrida, pode ajudar a reduzir as emissões poluentes. A perspectiva utilizada foi a do caso brasileiro, mas recorreu-se ao panorama mundial quando necessário.

Da necessidade de delimitar com clareza o enfoque do texto, decorre a primeira grande limitação deste artigo: não foi feita uma discussão sobre o evidente papel do “não-transporte”¹ e do estímulo ao uso do transporte público na redução das emissões poluentes decorrentes do transporte urbano de passageiros. De fato, os princípios colocados na Política Nacional de Mobilidade Urbana (PNMU)² priorizam os modos de transporte não motorizados sobre os motorizados e do transporte público coletivo sobre o transporte individual motorizado, com vistas à redução dos poluentes nos sistemas de transporte,

¹ Para uma introdução ao tema, vide <<http://antp.org.br/noticias/ponto-de-vista/o-nao-transporte-pode-ser-a-solucao-para-a-mobilidade-das-medias-e-grandes-cidades.html>>. Acesso em: 2 dez. 2020.

² Instituída pela Lei nº 12.587, de 2012.

princípios que também estão insculpidos nos compromissos assumidos pelo Brasil no âmbito do Acordo de Paris sobre mudanças climáticas, como será visto no Item 4 deste trabalho.

Outra limitação que pode ser apontada foi a de se desconsiderar o impacto ambiental da fabricação dos veículos elétricos, particularmente de suas baterias e dos elementos nelas utilizados³. Evitamos, entretanto, abordar esse aspecto porque se trata de campo em que rápidos avanços tecnológicos estão ocorrendo, que devem modificar o cenário atual pela mudança das químicas utilizadas nas baterias, ganhos de escala e eficiência ao longo de toda sua cadeia produtiva, e mesmo das várias possibilidades de reciclagem e reutilização das baterias⁴. Ou, seja, qualquer discussão que fosse feita sobre esse aspecto refletiria o contexto de poucos anos atrás, e não a realidade atual ou do futuro próximo.

De toda forma, o objetivo do presente artigo é oferecer um quadro de referência técnico acerca do tema que possa auxiliar e mesmo nortear aspectos específicos das discussões do Senado Federal quanto às políticas de transporte, de combustíveis e energia, automotiva, de ciência e tecnologia, de saúde e de meio ambiente.

Em termos de organização, o texto se inicia por um breve histórico do controle da poluição veicular no Brasil, seguido pela análise do impacto local e regional das emissões, para então tratar da questão dos gases de efeito estufa (GEE) e, por fim, tecermos algumas observações e recomendações a título de conclusão.

Como último elemento dessa introdução, é necessário conceituar os seguintes termos e expressões, para os fins deste artigo:

- Veículo com motor de ciclo diesel: sua propulsão decorre de um motor a combustão em que a ignição da massa formada por combustível mais ar se dá por compressão. Apesar de serem utilizados basicamente com óleo

³ Para uma reportagem que aborde essas questões, vide a Deutsche Welle em <https://www.dw.com/en/how-eco-friendly-are-electric-cars/a-19441437>. Acesso em: 19 nov. 2020.

⁴ As baterias, depois de cumprir sua vida útil nos veículos, o que compreende cerca de oito a dez anos, ainda mantêm entre 80% e 70% da sua capacidade energética. Isso potencializa o seu uso como segunda vida, sobretudo em aplicações estacionárias (como nas residências) para armazenagem de energia, prolongando a decisão em torno de seu descarte e da reciclagem final por muitos anos.

diesel, a tecnologia poderia ser utilizada com outros combustíveis, como o etanol. Para os fins desse artigo, contudo, entende-se que seja utilizado somente com diesel ou biodiesel.

- Veículo com motor de ciclo Otto: sua propulsão decorre de um motor a combustão em que a ignição da massa formada por combustível mais ar se inicia por meio de uma centelha em uma vela de ignição. Normalmente no Brasil é utilizado com gasolina, etanol, ou qualquer mistura dos dois (motor *flex fuel*).
- Veículo elétrico (VE): Define-se VE como aquele cuja propulsão de pelo menos uma de suas rodas ocorre por meio de um motor elétrico⁵, ainda que limitado a determinadas fases de sua utilização. Inclui as três categorias a seguir descritas.
 - Veículo elétrico híbrido (VEH): apresenta um motor elétrico associado a um motor a combustão. O motor a combustão pode servir somente para recarregar as baterias veiculares (híbrido serial), ou também como fonte de propulsão, além de recarregar as baterias (híbrido paralelo). Em última análise, a energia das baterias será sempre recarregada por um gerador acoplado ao motor a combustão por não haver conexão com a rede elétrica.
 - Veículo elétrico híbrido *plug-in* (VEHP): similar à categoria anterior (VEH), mas com a peculiaridade de que a bateria pode ser carregada diretamente por uma fonte de eletricidade externa, e não somente pelo gerador acoplado ao motor a combustão.
 - Veículos elétricos puros: sua propulsão é gerada somente por energia elétrica. Essa categoria, por sua vez, pode ser subdividida em veículos elétricos movidos a bateria (VEB) e a células de combustível (VECC).

2 BREVE HISTÓRICO DO CONTROLE DA POLUIÇÃO VEICULAR NO BRASIL

O controle e a redução das emissões de substâncias nocivas no escapamento veicular já são preocupações de várias décadas, tendo ganhado destaque desde pelo menos os idos de 1970, com a aprovação do *Clean Air Act*^{6,7}

⁵ Bermúdez-Rodríguez e Consoni (2020). Disponível em: <<https://periodicos.sbu.unicamp.br/ojs/index.php/rbi/article/view/8658394>>. Acesso em: 7 dez. 2020.

⁶ O *Clean Air Act* pode ser traduzido como “Lei do Ar Limpo”. Segundo a Agência de Proteção Ambiental (EPA) daquele país, trata-se da lei federal que regula as emissões de ar de fontes estacionárias e móveis. Entre outros itens, esta lei autoriza a EPA a estabelecer normas nacionais de qualidade do ar ambiente (NAAQS) para proteger a saúde pública e o bem-estar coletivo e regular as emissões dos poluentes atmosféricos mais perigosos. Vide <<https://www.epa.gov/laws-regulations/summary-clean-air-act>>. Acesso em: 13 dez. 2020.

nos EUA, que iniciou um contínuo processo de redução de poluentes emitidos naquele país e, por consequência, no restante do mundo.

Especificamente no Brasil, o Programa de Controle da Poluição do Ar por Veículos Automotores (PROCONVE) e o uso do etanol combustível ajudaram a reduzir a poluição produzida pelos escapamentos veiculares ao longo das últimas quatro décadas.

O Proconve foi instituído em 1986⁸, e está dividido em oito etapas, sendo que a sétima entrará em vigor em 2022. O objetivo do programa é a redução faseada (nas etapas) de poluentes como monóxido de carbono, hidrocarbonetos e óxidos de nitrogênio. Em cada uma delas, ocorre tanto o estabelecimento de limites para a emissão desses poluentes, como a determinação da utilização de tecnologias específicas para garantia de uma queima mais eficiente, como a injeção de combustível ou a sonda lambda (sensor de oxigênio).

Já o Programa Nacional do Álcool (PROÁLCOOL) foi criado em 1975 para viabilizar o uso do etanol como alternativa aos combustíveis baseados no petróleo. A mola propulsora desse programa foi a chamada “crise do petróleo” ocorrida desde o início daquela década, que elevou sobremaneira o preço desse recurso, acarretando em crescentes dificuldades econômicas ao Brasil, devido ao aumento dos deficits em sua balança comercial⁹.

Embora a preocupação inicial do Proálcool tenha sido de natureza econômica e estratégica, com vistas à segurança energética do país, rapidamente se percebeu que esse biocombustível seria um importante aliado para a redução da poluição do ar de origem automotiva, graças à substituição do chumbo tetraetila por etanol na gasolina¹⁰ e pela redução na emissão de poluentes como monóxido de carbono e hidrocarbonetos¹¹ ao ser queimado, em substituição ao combustível fóssil.

⁷ Disponível em: <<https://www.epa.gov/transportation-air-pollution-and-climate-change/accomplishments-and-success-air-pollution-transportation>>. Acesso em: 1 dez. 2020.

⁸ Disponível em: <<https://cetesb.sp.gov.br/veicular/proconve/>>. Acesso em: 1 dez. 2020.

⁹ Vide, por exemplo, Távora (2011). Disponível em: <<https://www12.senado.leg.br/publicacoes/estudos-legislativos/tipos-de-estudos/textos-para-discussao/td-89-historia-e-economia-dos-biocombustiveis-no-brasil>>. Acesso em: 1 dez. 2020.

¹⁰ Távora (2011), *op. cit.*

¹¹ Disponível em: <<https://revistapesquisa.fapesp.br/perigo-no-ceu-de-sao-paulo/>>. Acesso em: 1 dez. 2020.

Mais recentemente, vale também mencionar os programas Inovar-Auto¹² e o Rota 2030¹³, como foco na política automotiva, que propuseram metas de eficiência energética para os veículos, redundando em controle indireto da emissão de poluentes (menos combustível consumido, menos emissões de escapamento). Por fim, a Política Nacional de Biocombustíveis (RenovaBio)¹⁴ é composta por três eixos estratégicos¹⁵ que visam, entre outros objetivos, a contribuir com o cumprimento dos compromissos de redução de emissões de gases de efeito estufa assumidos pelo Brasil no Acordo de Paris de 2015.

3 EMISSÕES VEICULARES E A POLUIÇÃO EM ESCALA LOCAL E REGIONAL

A poluição do ar afeta a humanidade em duas escalas distintas, uma global, e outra local e regional. Embora, nos últimos tempos, o efeito nocivo da poluição global venha ganhando merecido destaque na mídia e nas discussões políticas, como será visto no próximo item, não se pode esquecer da importância de se combater também a poluição nas escalas regional e principalmente local, pois ela tem um grave impacto sobre a saúde das populações próximas de onde os poluentes são emitidos.

De fato, em uma grande cidade como São Paulo, trata-se da principal fonte de poluição do ar¹⁶, que causa não apenas desconforto e redução da qualidade de vida de seus habitantes, mas é também responsável por um elevado número de internações e por cerca de cinco mil mortes prematuras a cada ano, somente naquele município¹⁷.

¹² Criado pela Lei nº 12.715, de 17 de setembro de 2012.

¹³ Criado pela Lei nº 13.755, de 10 de dezembro de 2018.

¹⁴ Criado pela Lei nº 13.576, de 26 de dezembro de 2017.

¹⁵ De acordo com o Ministério das Minas e Energia (<http://www.mme.gov.br/web/guest/secretarias/petroleo-gas-natural-e-biocombustiveis/acoes-e-programas/programas/renovabio>), são elas: 1) Metas de Descarbonização; 2) Certificação da Produção de Biocombustíveis; e 3) Crédito de Descarbonização (CBIO). Acesso em: 16 dez. 2020.

¹⁶ Qualidade do Ar no Estado de São Paulo, 2019. Disponível em: <<https://cetesb.sp.gov.br/ar/wp-content/uploads/sites/28/2020/07/Relat%C3%B3rio-de-Qualidade-do-Ar-2019.pdf>>. Acesso em: 17 nov. 2020.

¹⁷ Abe e Miraglia (2017). Disponível em: <<https://www.mdpi.com/1660-4601/13/7/694>>. Acesso em: 7 dez. 2020.

3.1. PRINCIPAIS TIPOS DE POLUENTES DECORRENTES DAS EMISSÕES VEICULARES

A poluição local e regional ocasionada pelos veículos decorre de substâncias que são geradas pelo funcionamento de seus motores a combustão. Ao serem lançadas na atmosfera atuam direta ou indiretamente sobre a saúde das pessoas próximas à sua emissão.

Do ponto de vista regional, a principal consequência dessas emissões é o desencadeamento da chamada “chuva ácida”, que ocorre quando alguns tipos de compostos químicos como o dióxido de enxofre (SO₂) ou os óxidos de nitrogênio (NO_x) são levados por correntes de ar que, ao entrarem em contato com a água das nuvens, formam ácidos que reduzem seu pH (ou seja, a água nas nuvens se torna mais ácida)¹⁸, o que, por sua vez, provoca danos diversos quando ocorre a precipitação, como corrosão em estruturas e queimaduras na vegetação.

É necessário, portanto, descrever os principais tipos e classes de poluentes decorrentes das emissões lançadas pelos escapamentos veiculares. Evidentemente, o tipo e quantidade delas varia bastante em função do combustível utilizado. O Quadro 1, descrevendo-os, foi resumido a partir de conteúdo que constava no site do Ministério do Meio Ambiente (MMA)¹⁹:

Quadro 1: Principais tipos e classes de poluentes com impacto local ou regional decorrentes das emissões produzidas pelos motores a combustão

Tipos de Poluentes	Definição	Efeitos Nocivos
Aldeídos (RCHO)	Compostos químicos resultantes da oxidação parcial dos álcoois ou de reações fotoquímicas na atmosfera, envolvendo hidrocarbonetos. São emitidos na queima de combustível em veículos automotores, principalmente nos veículos que utilizam etanol.	Causa irritação das mucosas, dos olhos, do nariz e das vias respiratórias em geral. Podem causar crises asmáticas e têm potencial carcinogênico.
Dióxido de Enxofre (SO ₂)	Gás tóxico e incolor, de origem natural (como vulcões) ou antropogênica. No caso do transporte, decorre da queima de combustíveis com enxofre em sua composição.	Causa agravamento da asma e de problemas respiratórios. São precursores da formação de material particulado

¹⁸ Disponível em: <<https://www.epa.gov/acidrain/what-acid-rain>>. Acesso em: 25 nov. 2020.

¹⁹ A página original, que se encontra desativada, estava disponível em: <<http://www.mma.gov.br/cidades-sustentaveis/qualidade-do-ar/poluente-atmosf%C3%A9ricos>>, mas uma versão dela, arquivada em 7 de julho de 2019, pode ser acessada em: <<https://web.archive.org/web/20190707064019/>http://www.mma.gov.br/cidades-sustentaveis/qualidade-do-ar/poluente-atmosf%C3%A9ricos>>. Este link, por sua vez, foi acessado em 26 de novembro de 2020.

Tipos de Poluentes	Definição	Efeitos Nocivos
		secundário, e quando reagem com a água na atmosfera, formam chuva ácida.
Óxidos de nitrogênio (NOx)	Compostos poluentes que podem ter causas naturais ou que são formados quando ocorre combustão a altas temperaturas, como no interior dos motores. Por serem extremamente oxidantes, desempenham papel fundamental na formação de ozônio (O ₃) troposférico (a baixa altitude), que desencadeia a formação do chamado <i>smog</i> fotoquímico.	São uma das principais causas das chuvas ácidas e reagem com outros compostos na atmosfera para gerar subprodutos ainda mais poluentes e tóxicos.
Hidrocarbonetos não metano (NMHC)	Compostos formados por carbono e hidrogênio, que podem se apresentar nos três estados físicos, gás, líquido e sólido. Nos centros urbanos sua principal fonte emissora é a queima incompleta e a evaporação de combustível veicular.	São precursores para a formação de ozônio troposférico e contribuem com o efeito estufa.
Material Particulado (MP)	Mistura complexa de sólidos com diâmetro reduzido, cujos componentes apresentam características físicas e químicas diversas. Em geral, o material particulado é classificado de acordo com o diâmetro das partículas, devido à relação existente entre seu tamanho e a possibilidade de penetração no trato respiratório. A queima de combustível fóssil veicular, particularmente diesel, é uma das principais fontes desse perigoso poluente nas grandes cidades.	Causam câncer, arteriosclerose, inflamação de pulmão e agravamento de sintomas de asma.
Monóxido de Carbono (CO)	Gás inodoro e incolor, formado no processo de queima incompleta de combustíveis, que ocorre em motores mais antigos ou desregulados.	Em baixa concentração causa fadiga e dor no peito, em alta concentração pode levar à asfixia e morte.
Ozônio (O ₃)	É um poluente secundário, ou seja, é formado a partir de outros poluentes atmosféricos, como o NO ₂ . Quando o ozônio está presente nas camadas mais baixas ²⁰ da atmosfera é altamente oxidante e nocivo.	Um longo tempo de exposição a esse gás pode resultar em redução da capacidade pulmonar, desenvolvimento de asma e redução na expectativa de vida.

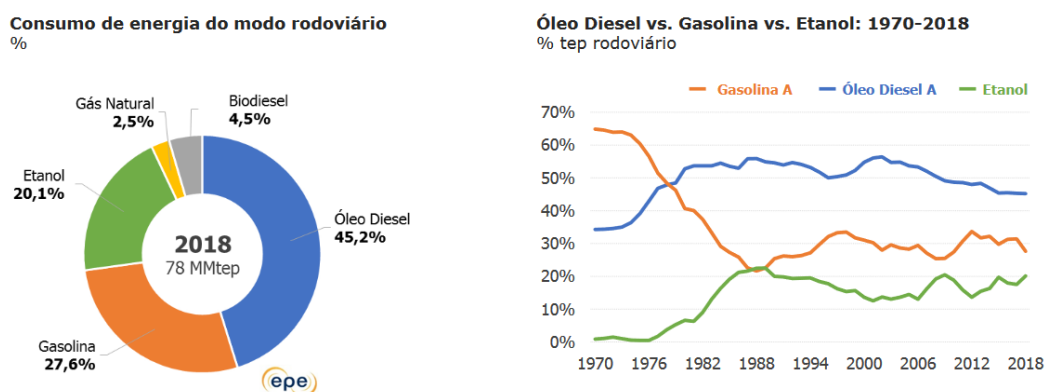
Fonte: Adaptado do Ministério do Meio Ambiente²¹.

²⁰ Embora se trate do mesmo composto (O₃), não se deve confundir o papel do ozônio próximo ao solo, que é poluente e tóxico, com o que decorre de sua presença na chamada “camada de ozônio”, localizada a dezenas de quilômetros de altitude, na estratosfera, em que é fundamental para filtrar radiações nocivas à vida na Terra. Vide, por exemplo, <<https://cetesb.sp.gov.br/solo/biomonitoramento/ozonio-troposferico/>>. Acesso em: 2 dez. 2020.

²¹ MMA, *op. cit.*

Os principais combustíveis utilizados no Brasil para movimentar os veículos automotores do transporte rodoviário são o óleo diesel, a gasolina e o etanol (vide Figura 1). Cada um deles apresenta um comportamento distinto no tocante às emissões veiculares, como será detalhado a seguir.

Figura 1: Participação dos combustíveis utilizados pelo modo rodoviário



Fonte: EPE²².

Ao se analisar a Figura 1, percebe-se que o consumo de óleo diesel vem se reduzindo desde o ano 2000, mas ainda é claramente o combustível mais utilizado entre todos, pois alimenta praticamente toda a frota brasileira de caminhões e ônibus. Pode-se perceber também a forte redução do consumo de gasolina desde meados dos anos 1970, e o crescimento do etanol para substituí-lo. De fato, desde o início do Proálcool, o que se verifica é quase um espelhamento da curva desses dois combustíveis, quando um sobe o outro desce, movimento que tem se intensificado graças à maior penetração dos veículos *flex fuel* no mercado, ou seja, que permitem ao consumidor realizar sua escolha no momento de cada abastecimento, e não durante a compra do veículo, como era o caso antes dessa tecnologia surgir.

A Tabela 1, por sua vez, visa mostrar a diferença de emissão de alguns poluentes selecionados para versões de um mesmo veículo. Ou seja, trata-se do mesmo modelo de carro, mas com motorizações distintas, justamente para que o leitor possa verificar de forma isolada como o motor e o combustível que o alimenta influenciam nas emissões. Assim, no primeiro caso são apresentados

²² Disponível em: <<https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-442/08%20-%20Abastecimento.pdf>>. Acesso em: 16 dez.2020.

os dados de duas versões a gasolina (uma 2.0 e outra 3.0) e uma a diesel (2.2) de uma Mitsubishi Outlander, e depois são comparadas as versões híbrida e convencional do Toyota Corolla (as duas com motor *flex*). Por fim, apenas a título de comparação, é apresentado um modelo elétrico puro que, evidentemente, não produz poluentes de escapamento.

Tabela 1: Comparação das emissões de escapamento decorrentes de diferentes motorizações em um mesmo tipo de veículo modelo 2020.

Marca/Modelo	Motor	Combustível	NMHC (g/km)	CO (g/km)	NOx (g/km)	CO ₂ (g/km)
Mitsubishi Outlander	2.0 monofuel	Gasolina	0,0150	0,1760	0,0080	124
	3.0 monofuel	Gasolina	0,0210	0,2290	0,0090	152
	2.2 diesel monofuel	Diesel	0,0010	0,0160	0,2570	167
Toyota Corolla	1.8 híbrido	Etanol ou gasolina	0,0080	0,0570	0,0010	84
	2.0 <i>flex</i>	Etanol ou gasolina	0,0090	0,0134	0,0070	107
Nissan Leaf	Elétrico	Bateria	0	0	0	0

Fonte: Elaboração própria a partir de dados do Inmetro²³.

Destaque-se que os testes do Inmetro não separam as emissões em função do motor *flex* ser abastecido somente com etanol ou com gasolina²⁴. De fato, como eles podem ser abastecidos com qualquer mistura entre esses dois combustíveis, a certificação do Proconve naturalmente exige que eles respeitem os limites de emissões nessas circunstâncias, ou seja, com qualquer proporção que seja utilizada no tanque de combustível.

Quanto aos veículos elétricos, embora não tenham escapamento, ainda assim, emitem pequenas quantidades de material particulado decorrentes, basicamente, do desgaste dos pneus e das pastilhas de freio, fato, aliás, comum a todos os demais veículos. Entretanto, no caso específico dos VE, o desgaste

²³ Disponível em: <http://www.inmetro.gov.br/consumidor/pbe/veiculos_leves_2020.pdf>. Acesso em: 27 nov. 2020. A Outlander 2.0 escolhida para ser apresentada foi a versão de 7 lugares, que tem peso mais próximo das duas outras versões. No caso do Corolla, ambas as versões apresentadas são “Altis Premium”.

²⁴ A rigor, nem a gasolina vendida no Brasil é “pura”, pois contém atualmente 27,5% de etanol em sua composição, e também nem o etanol é “puro”, uma vez que em sendo naturalmente higroscópico, isto é, atrai vapor de água do ar, é vendido nos postos com até 4,5% de água misturada (Resolução da Agência Nacional do Petróleo nº 19, de 2015. Disponível em: <http://legislacao.anp.gov.br/?path=legislacao-anp*resol-anp*2015*abril&item=ranp-19-2015>. Acesso em: 7 dez. 2020).

das pastilhas de freio é ainda menor que a dos demais veículos, uma vez que a frenagem eletromagnética é inerente à tecnologia de propulsão elétrica²⁵.

Embora um exame mais aprofundado das emissões dos motores a diesel e do ciclo Otto seja feito nos subitens seguintes, é pertinente já apontar duas rápidas observações sobre a Tabela 1. A primeira delas é que, como esperado, há um aumento no nível de emissões quando o motor aumenta sua cilindrada, de 2.0 para 3.0; ou seja, motores maiores são mais poluidores.

Além disso, verifica-se que o Corolla híbrido emite ligeiramente menos NMHC, sete vezes menos NOx, e 21% a menos de CO₂ que sua versão não-híbrida, mas surpreendentemente, emite quatro vezes mais monóxido de carbono (CO) que sua versão não-híbrida. Ao se analisar a listagem completa do Inmetro, não se percebe, entretanto, um padrão em relação a outros modelos que podem ser comparados entre si, ou seja, há casos que não repetem o mesmo fenômeno, mas em outros, o híbrido emite mais CO que sua versão convencional. Embora não tenhamos resposta para interpretar esse ponto, entendemos que ele deveria ser mais bem aprofundado em outros estudos.

3.2. EMISSÕES POLUENTES DOS VEÍCULOS COM MOTOR A DIESEL

Ao se observar a Tabela 1, percebe-se que a Outlander a diesel emite pouquíssimos hidrocarbonetos (NMHC) e monóxido de carbono (isto é, produz uma queima mais completa que os demais motores Otto a gasolina ou *flex* apresentados), mas emite significativamente mais óxidos de nitrogênio (NOx).

De fato, o maior problema dos motores a diesel, quando comparados com aqueles movidos a gasolina e etanol, é a emissão de NOx²⁶ e de material particulado²⁷. A substituição do óleo diesel mineral pela variante obtida a partir

²⁵ A frenagem eletromagnética é basicamente fazer o motor de propulsão elétrica girar “ao contrário”. Nesse caso, em vez de consumir energia, ele retorna energia para recarregar suas baterias. Por não ter contato físico entre as partes, mas sim uma resistência eletromagnética, não há desgaste de peças, como no caso das pastilhas de freio que funcionam na base do atrito contra o disco de freio.

²⁶ Disponível em: <<https://theicct.org/cards/stack/vehicle-nox-emissions-basics#2>>. Acesso em: 26 nov. 2020.

²⁷ Vide, p. exemplo Braun *et al.* (2004). Disponível em: <https://www.scielo.br/scielo.php?pid=S0100-40422004000300018&script=sci_arttext&tlng=pt>. Acesso em: 26 nov. 2020.

de óleos vegetais (“biodiesel²⁸”) pode reduzir as emissões de material particulado²⁹, CO e NMHC, mas aumenta ainda mais a emissão de NO_x³⁰. Acredita-se, contudo, que haja espaço para se reduzir a emissão desse poluente tanto para o diesel comum, quanto para o biodiesel, pelo uso de determinadas opções tecnológicas³¹.

Deve-se assinalar, contudo, que a participação do biodiesel ainda é bastante tímida na matriz energética do transporte rodoviário nacional, como apontado na Figura 1. As razões para essa baixa inserção são múltiplas e fogem ao escopo desse trabalho analisar, mas é ponto que também mereceria destaque em outros trabalhos no futuro.

De todo modo, apesar de que as normas brasileiras e globais estejam ficando cada vez mais rigorosas em relação ao controle da poluição causada pelo uso do diesel – e também dos demais combustíveis –, ainda assim, levando-se em consideração tanto o cenário atual em que as emissões decorrentes de sua queima já vêm causando problemas de qualidade do ar no Brasil³² e no mundo^{33,34} e, particularmente, após o escândalo da fraude (conhecido por “Dieselgate”) nos testes de emissão dos veículos movidos a diesel da empresa Volkswagen, muitos já se questionam^{35,36} se haverá futuro para esse combustível fóssil, ao menos nas grandes cidades.

²⁸ O Decreto nº 10.527, de 22 de outubro de 2020, define biodiesel como sendo o “biocombustível derivado de biomassa renovável para uso em motores a combustão interna com ignição por compressão [motor de ciclo diesel] ou, conforme previsto em regulamento, para geração de outro tipo de energia, que pode substituir parcial ou totalmente combustíveis de origem fóssil”.

²⁹ Vide p. exemplo Guimarães *et al.* (2018). Disponível em: <https://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1413-41522018000200355>. Acesso em: 16 dez. 2020.

³⁰ Vide, p. exemplo Balakrishnan *et al.* (2016). Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/286624104_A_Review_on_the_Effects_of_Biodiesel_Blends_on_Compression_Ignition_Engine_NOx_Emissions>. Acesso em: 16 dez. 2020.

³¹ Vide, p. exemplo, <<https://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/agroenergia/arvore/CONT000fj2smqjw02wyiv802hvm3juqrz31h.html>>. Acesso em: 16 dez. 2020.

³² Disponível em: <<https://jornal.usp.br/ciencias/ciencias-ambientais/grande-sao-paulo-precisa-controlar-emissao-dos-veiculos-a-diesel/>>. Acesso em: 26 nov. 2020.

³³ P. exemplo em Paris: <<https://www.bbc.com/news/business-43925712>>. Acesso em: 26 nov. 2020

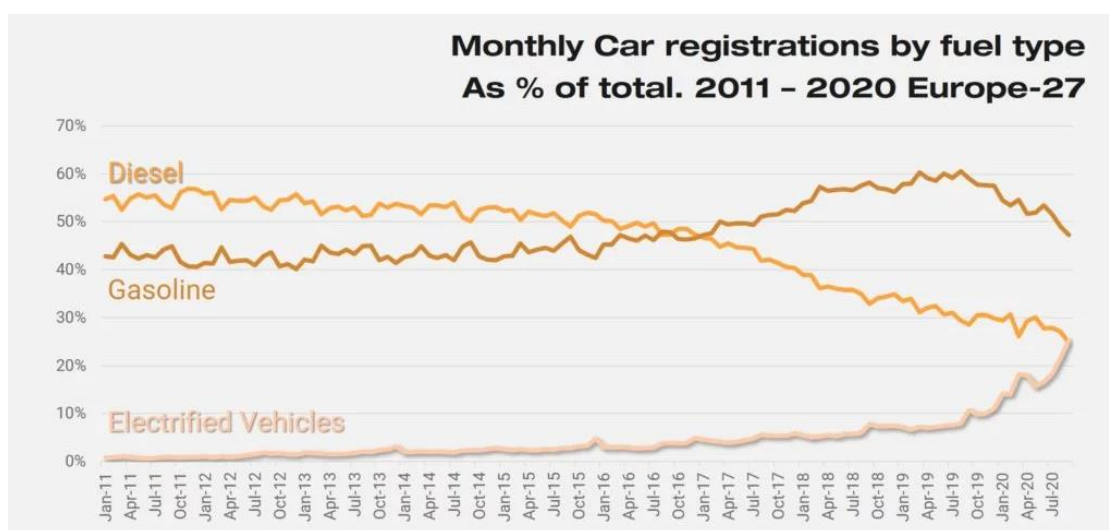
³⁴ A situação é problemática mesmo nos EUA, país em que o diesel é proporcionalmente menos utilizado que no Brasil, vide, por exemplo: <<https://www.ucsusa.org/clean-vehicles/vehicles-air-pollution-and-human-health/diesel-engines#.Wuykn39G34Y>>. Acesso em: 26 nov. 2020.

³⁵ Disponível em: <<https://www.theatlantic.com/business/archive/2017/06/diesel-smog-pollution-europe/528990/>>. Acesso em: 26 nov.2020.

³⁶ Disponível em: <<https://www.nytimes.com/2017/07/25/business/diesel-emissions-volkswagen-bmw-mercedes.html>>. Acesso em: 26 nov. 2020.

Em todo caso, esse questionamento já é reverberado pelo comportamento dos consumidores europeus de veículos de passeio (Figura 2), que vêm comprando cada vez menos carros com essa motorização. Perceba-se também que os veículos elétricos a bateria e híbridos já igualaram sua participação à dos movidos a diesel naquele mercado.

Figura 2: Vendas mensais de veículos na União Europeia por tipo de motorização



Fonte: Jato Dynamics ³⁷

No Brasil, contudo, o uso do diesel está concentrado em aplicações comerciais (caminhões, picapes e ônibus), nos quais a substituição por alternativas menos poluentes ainda está pouco desenvolvida, exceto pela mencionada política de substituição parcial da versão mineral pelo biodiesel, e por alguns ônibus movidos a eletricidade (trólebus) que ainda existem em determinadas cidades do país³⁸.

De fato, mesmo a nível mundial, os esforços para substituição do diesel, nos veículos comerciais, por alternativas menos poluentes ainda estão menos desenvolvidos que no caso dos veículos de passeio³⁹. Além dos trólebus, e do uso

³⁷ Disponível em: <<https://www.best-selling-cars.com/europe/2020-september-europe-car-sales-and-market-analysis/>>. Acesso em: 27 set. 2020.

³⁸ Disponível em: <<https://diariodotransporte.com.br/2019/04/21/trolebus-70-anos-um-meio-de-transporte-que-e-viavel-para-os-dias-de-hoje-e-para-o-futuro/>>. Acesso em: 19 dez.2020.

³⁹ No Brasil, como visto na Figura 1, o etanol reduz em quase 50% o uso de gasolina nos veículos leves. Na Europa, a Figura 2 mostra o rápido avanço da eletrificação nos veículos novos.

de biodiesel, que também ocorrem em outros países do mundo⁴⁰, existem muitas outras alternativas que vêm sendo propostas, dentre as quais pode-se destacar a eletrificação com baterias^{41,42}, o uso de células de hidrogênio^{43,44}, ou mesmo um trem de força elétrico híbrido a etanol⁴⁵.

Cada uma dessas alternativas tem seus desafios a serem vencidos antes que possam se massificar. Nesse sentido, o cenário da substituição do diesel nos veículos comerciais está ainda indefinido, podendo uma ou mais tecnologias se tornarem viáveis nos próximos anos, a depender dos avanços tecnológicos que sejam feitos, das aplicações dos veículos e das condicionantes locais (custo da eletricidade, existência de biocombustíveis alternativos, disponibilidade de hidrogênio para reabastecimento, etc.).

3.3. EMISSÕES DOS VEÍCULOS DE MOTOR DO CICLO OTTO

Como visto, somente utilizando-se os dados de emissões do Inmetro, não é possível fazer uma comparação entre o grau de poluição gerado pelo uso do etanol ou da gasolina utilizados nos motores a combustão do ciclo Otto, sendo necessário o acesso a outras fontes para esse propósito.

Jacobson (2007)⁴⁶ e Ginnebaugh e Jacobson (2012)⁴⁷ buscaram comparar os efeitos sobre a poluição que resultaria da substituição, nos EUA, dos veículos movidos a gasolina pura por outros movidos a E85 (85% de etanol, mais 15% de gasolina). A conclusão desses autores foi preocupante, pois previu

⁴⁰ Disponível em: <<https://www.biodieselbr.com/biodiesel/mundo/biodiesel-no-mundo>>. Acesso em: 19 dez. 2020.

⁴¹ O Fórum Econômico Mundial faz algumas projeções para o futuro do segmento dos caminhões elétricos em <<https://www.weforum.org/agenda/2020/11/electric-trucks-vehicles-low-carbon-future/>>. Acesso em: 16 dez. 2020.

⁴² Brasília já tem alguns ônibus elétricos com bateria em operação: <https://www.cnt.org.br/agencia-cnt/brasil-avalia-eficiencia-onibus-eletricos>. Acesso em: 19 nov. 2020.

⁴³ Vide p. exemplo, <<https://www.theengineer.co.uk/worlds-first-hydrogen-truck-fleet-hyundai-xcient/>>. Acesso em: 16 nov. 2020.

⁴⁴ O Rio de Janeiro tem alguns ônibus com células de hidrogênio em operação: <<http://www.finep.gov.br/a-finep-externo/aqui-tem-finep/onibus-a-hidrogenio>>. Acesso em: 19 dez. 2020.

⁴⁵ Disponível em: <<https://www.automotivebusiness.com.br/noticia/28068/hibrido-volksbus-e-flex-projetado-no-brasil-e-surpresa-da-vwco-em-hannover>>. Acesso em: 16 dez. 2020.

⁴⁶ Disponível em: <<https://web.stanford.edu/group/efmh/jacobson/Articles/I/es062085v.pdf>>. Acesso em: 1 dez. 2020.

⁴⁷ Disponível em: <<https://web.stanford.edu/group/efmh/jacobson/Articles/I/GinnebaughERL2012.pdf>>. Acesso em: 1 dez. 2020.

que essa hipótese acarretaria forte aumento na presença de aldeídos e principalmente de ozônio troposférico (lembrando que essa substância é tóxica se inalada) na atmosfera, particularmente nos meses mais frios; e que, portanto, “nem o E85, nem a gasolina são combustíveis limpos”⁴⁸.

Embora tais conclusões tenham se baseado em simulações de computador, Salvo e Geiger (2014)^{49,50} secundaram esses estudos com uma análise dos dados da rede de medição da Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB) existente na cidade São Paulo. O estudo desses autores foi possível porque entre 2009 e 2011 houve grande variação nos preços do etanol, ao passo que o da gasolina se manteve mais ou menos constante, ou seja, o total do biocombustível consumido sofreu ampla flutuação em função do preço praticado no período analisado. Assim, o que os autores comprovaram é que, ao aumentar a venda de gasolina, houve concomitante aumento da emissão de NO_x e CO, e que, ao aumentar a venda de etanol, reduziu-se a concentração desses poluentes, mas houve aumento de precursores da formação de ozônio troposférico, como previsto nos ensaios de Jacobson e Ginnebaugh (*op. cit.*).

De todo modo, o Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA), preocupado com essa fonte de poluição, decretou limites mais rígidos para a emissão das substâncias precursoras da formação de ozônio (NMHC e NO_x) nas etapas L7 (que entra em vigor em 2022) e L8 (entra em vigor em 2025) do Proconve⁵¹. Tais limites vão exigir substanciais avanços tecnológicos nos motores atuais, ou mesmo um aumento no número de veículos elétricos comercializados pelas montadoras em nosso País (as metas passarão a ser contabilizadas pela média formada pela venda de todos os veículos da montadora e não mais por veículo).

⁴⁸ Ginnebaugh e Jacobson (2012), *op. cit.*

⁴⁹ Disponível em: <https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract_id=2581317>. Acesso em: 1 dez. 2020.

⁵⁰ <https://www.nature.com/news/ethanol-fuels-ozone-pollution-1.15111#/b1> traz uma reportagem sobre o artigo. Acesso em: 1 dez. 2020.

⁵¹ Disponível em:<<https://www.automotivebusiness.com.br/noticia/30275/etanol-pode-perder-vantagem-ambiental-na-nova-legislacao-de-emissoes>>. Acesso em: 1 de dez.2020.

Especula-se⁵², inclusive, que talvez seja necessário o abandono dos motores *flex* para se atingir as novas metas do Proconve, uma vez que essa tecnologia se baseia em um meio termo que impede a obtenção da máxima eficiência do etanol e da gasolina. Nesse sentido, uma das alternativas possíveis seria a adoção de trens de força elétricos e híbridos com motores monocombustíveis a etanol, que dispensariam o uso da gasolina, com uma opção *plug-in* de recarga das baterias por tomada elétrica, como substituto para o papel hoje desempenhado pela gasolina.

De fato, o motor bicombustível surgiu para permitir que, em havendo restrição na oferta ou no preço do etanol, a gasolina pudesse ser utilizada. Mas, nesse caso, a eletrificação veicular poderia substituir o uso da gasolina, isto é, em havendo algum impedimento ao uso do etanol, os consumidores poderiam recarregar as baterias com eletricidade e continuar a usar seus carros, como fazem hoje com a gasolina.

A longo prazo, uma solução interessante para a eliminação das emissões poluentes do etanol é sua utilização em células de combustíveis⁵³, que permitiriam, por exemplo, que caminhões e ônibus pudessem trafegar com autonomia e com possibilidade de rápido reabastecimento, usando a extensa rede de postos de combustíveis já existente. Entretanto, a despeito de suas inúmeras vantagens potenciais, ainda existem muitas barreiras tecnológicas a serem vencidas para que as células de combustível a etanol possam ser utilizadas em larga escala na frota automotiva⁵⁴. O desenvolvimento nesse campo tem sido contínuo^{55,56,57}, entretanto, é necessário um aumento substancial dos esforços de pesquisa (e recursos financeiros) no tema.

⁵² Automotive Business, *op. cit.*

⁵³ Em tese, as células de combustível, por serem tecnologia totalmente distinta daquela utilizada nos motores a combustão poderiam realizar a reação do etanol com o oxigênio do ar sem outros subprodutos, além de água e dióxido de carbono.

⁵⁴ Disponível em: <<https://www.novacana.com/n/combate/carro-eletrico/celula-combustivel-etanol-difilmente-sucesso-200617>>. Acesso em: 2 dez. 2020.

⁵⁵ Disponível em: <<http://www.automotivebusiness.com.br/noticia/30266/nissan-e-ipen-vaio-testar-etanol-em-celula-de-combustivel>>. Acesso em: 2 dez. 2020.

⁵⁶ Disponível em: <<https://www.greencarcongress.com/2020/05/20200505-defc.html>>. Acesso em: 2 dez. 2020.

⁵⁷ Disponível em: <<https://www.sciencedaily.com/releases/2019/06/190607140433.htm>>. Acesso em: 2 dez. 2020.

4 GASES DE EFEITO ESTUFA DECORRENTES DAS EMISSÕES VEICULARES

4.1. O EFEITO ESTUFA

O principal impacto global dos poluentes lançados pelos veículos automotores decorre da emissão dos chamados gases de efeito estufa (GEE), que têm a propriedade de reter o calor na atmosfera terrestre, impedindo-o de se dissipar pelo espaço sideral. Interessante notar que, apesar de *poluentes*, muitos desses gases, a exemplo do gás carbônico (também conhecido como dióxido de carbono ou CO₂), não são particularmente *tóxicos*; ou seja, embora causem efeitos indesejados sobre o meio ambiente, não geram efeitos negativos diretos sobre as pessoas, ao contrário de boa parte das substâncias que foram analisados no item anterior.

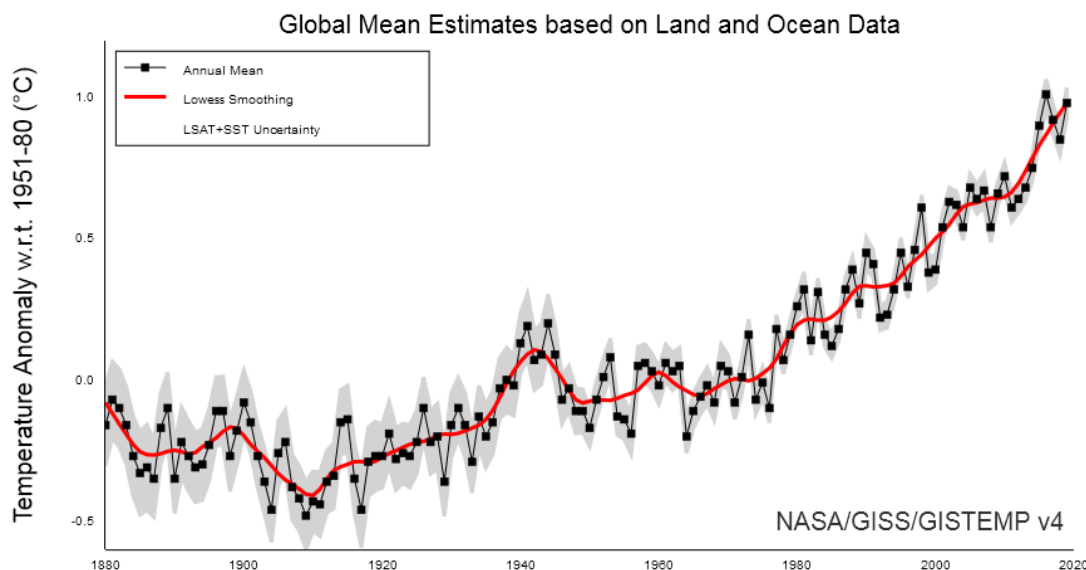
De todo modo, a correlação entre a presença de alguns compostos na atmosfera e sua capacidade de reter calor já é conhecida e cientificamente mensurada desde pelo menos o fim do século XIX. De fato, o sueco Svante Arrhenius, ainda em 1896⁵⁸, propôs um modelo para estimar o impacto quantitativo do gás carbônico atmosférico sobre o clima, e como essa variável poderia impactar nas “eras do gelo” que a Terra atravessa de tempos em tempos.

Assim, os GEE na atmosfera causam o aquecimento das temperaturas médias do planeta e, a partir desse fenômeno, decorrem outras mudanças climáticas secundárias, tais como alterações nos padrões de pluviosidade e eventos extremos como furacões, entre outros ainda não facilmente previsíveis.

A Figura 3 mostra, na forma de gráfico, a evolução do aquecimento das temperaturas médias no planeta. Perceba-se que essa medida subiu pouco mais de 1°C desde meados de 1910.

⁵⁸ Disponível em: <https://www.rsc.org/images/Arrhenius1896_tcm18-173546.pdf>. Acesso em: 17 de nov.2020.

Figura 3: Histórico do aumento médio do índice de temperatura global (a base da medição é a média entre os anos de 1951 a 1980)



Fonte: NASA⁵⁹

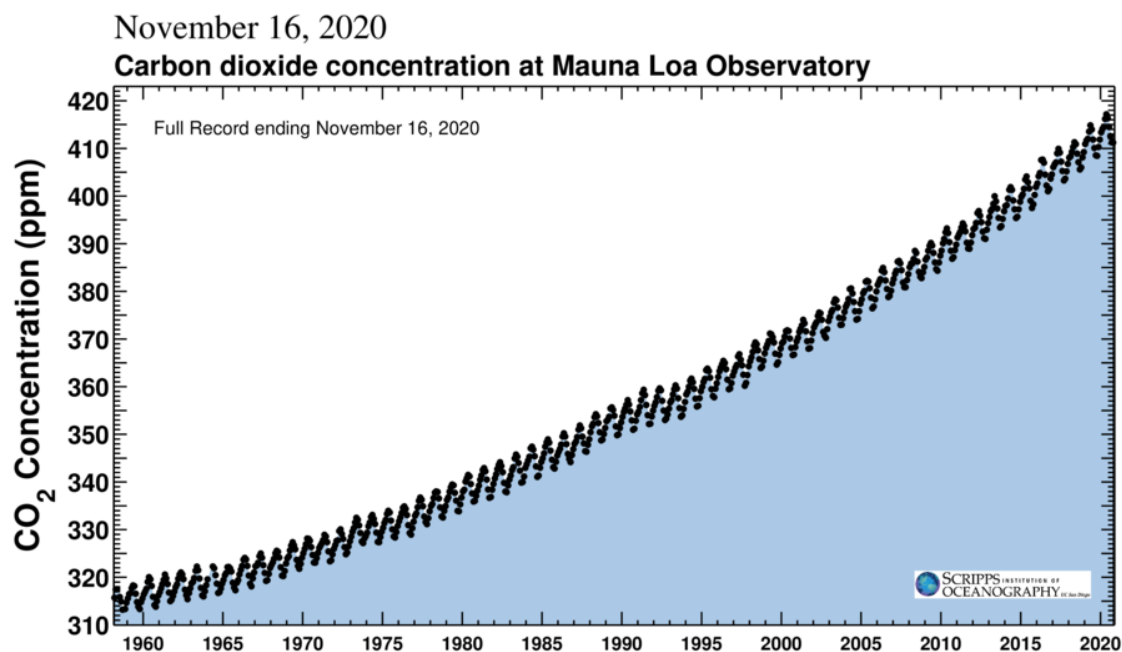
Assim, desde Arrhenius, o aumento das temperaturas médias do planeta tem sido cientificamente correlacionado ao aumento da concentração dos GEE na atmosfera (principalmente do CO₂, que decorre dos processos de combustão). A rigor, é possível correlacionar o aumento das temperaturas com o processo de intensificação das emissões de causas antropogênicas, decorrentes da Primeira Revolução Industrial, em meados dos anos 1750⁶⁰.

Nesse sentido, é importante apresentar a chamada curva de Keeling (Figura 4), que mostra o aumento da concentração de dióxido de carbono (CO₂) na atmosfera desde 1958, quando este valor começou a ser medido de forma sistemática. O aspecto mais impactante nesse gráfico é perceber a velocidade com que a concentração do CO₂ atmosférico tem aumentado desde o início dessa medição (aumento de 33% somente desde 1958).

⁵⁹ Disponível em: <<https://data.giss.nasa.gov/gistemp/graphs/>>. Acesso em: 17 de nov.2020.

⁶⁰ Disponível em: <<https://climate.nasa.gov/causes/>>. Acesso em: 2 dez. 2020.

Figura 4: Curva de Keeling (concentração de CO₂ na atmosfera)



Fonte: Instituto Scripps de Oceanografia⁶¹.

Deve-se registrar, contudo, que os GEE também são emitidos em processos naturais⁶², como o vulcanismo, e que essas emissões, por várias vezes na história planetária, foram tão intensas que contribuíram para diversos eventos de extinção em massa, como durante o fim do período permiano, há cerca de 250 milhões de anos.

Assim, embora em tese, haja espaço para se debater se as causas antrópicas são ou não preeminentes, e em que proporção, no aumento da concentração de CO₂ demonstrado pela curva de Keeling (Figura 4), ou mesmo se há correlação efetiva entre GEE e efeito estufa, o fato é que nada menos que 99,94% dos artigos científicos produzidos sobre o tema, entre 1991 e 2015, são da opinião que há um aquecimento global com origem nas atividades humanas⁶³.

⁶¹ Disponível em: <https://scripps.ucsd.edu/programs/keelingcurve/wp-content/plugins/sio-blumoon/graphs/mlo_full_record.png>. Acesso em: 17 nov. 2020.

⁶² Para uma discussão acerca das fontes naturais de emissão de GEE, vide por exemplo https://ieaghg.org/docs/general_publications/naturalreleases.pdf. Acesso em: 17 nov. 2020.

⁶³ Disponível em: <<http://journals.sagepub.com/doi/abs/10.1177/0270467617707079?journalCode=bs-ta>>. Acesso em: 17 nov.2020.

De todo modo, o Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC), organização científico-intergovernamental criada sob o guarda-chuva das Nações Unidas e que reúne os principais cientistas do clima do mundo, afirmou que é “extremamente provável que a influência humana tenha sido a causa dominante do aquecimento observado desde meados do século XX”⁶⁴.

Nesse sentido, controlar o aumento da concentração de CO₂ na atmosfera é fundamental para se combater o problema do aquecimento global, uma vez que se estima que esse gás seja o responsável por três quartos do impacto humano sobre o clima⁶⁵.

Em linha com essa visão, ou seja, limitar o aquecimento global até o ano de 2100, é que aconteceu em 2015 a 21^a Conferência das Partes da Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudanças do Clima (COP 21). O tratado resultante da COP 21 foi chamado de Acordo de Paris, no qual o Brasil se comprometeu a reduzir suas emissões de GEE, por meio de sua Contribuição Nacionalmente Determinada (NDC, na sigla em inglês), em 37% em 2025 e, de forma escalonada, em 43% até 2030, tendo como base os níveis de 2005.

Para o alcance dessas metas, houve a apresentação de propostas setoriais alinhadas com o desenvolvimento nacional sustentável. Antes da NDC brasileira, o País não havia assumido compromissos internacionais para reduzir as suas emissões, embora devesse estabelecer metas voluntárias, conforme determinado pela Lei nº 12.187, de 29 de dezembro de 2009, que instituiu a Política Nacional sobre Mudança do Clima (PNMC)⁶⁶.

Uma vez que o setor de transporte contribui com 14% das emissões mundiais⁶⁷ de CO₂, e representa 22,8% especificamente no caso do Brasil (Figura 5), é fácil perceber a importância da redução da emissão dos GEE do

⁶⁴ Relatório sobre as alterações climáticas (2013). Disponível em: <<https://www.ipcc.ch/pdf/reports-nonUN-translations/portuguese/ar4-wg1-spm.pdf>>. Acesso em: 17 nov.2020.

⁶⁵ Disponível em: <http://ar5-syr.ipcc.ch/topic_observedchanges.php>. Acesso em: 17 nov.2020.

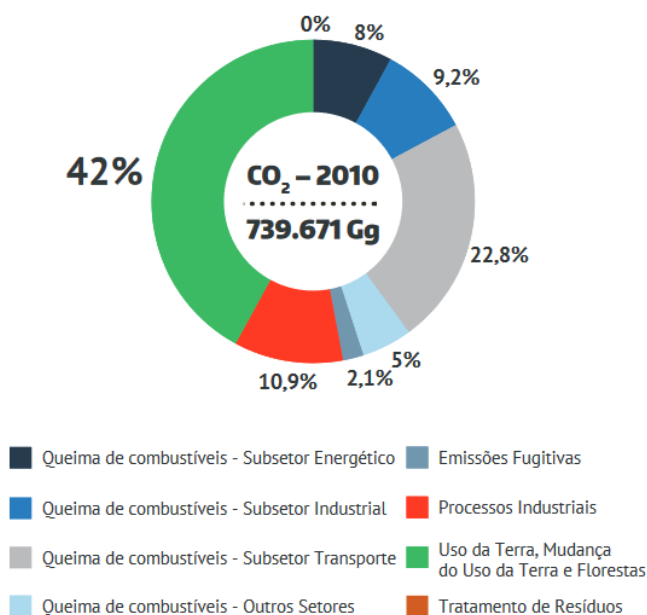
⁶⁶ Käsmayer e Fraxe Neto (2016) fazem ampla e aprofundada discussão acerca do Acordo de Paris, da NDC do Brasil e dos complexos desafios para a redução dos GEE. Disponível em: <<https://www12.senado.leg.br/publicacoes/estudos-legislativos/tipos-de-estudos/textos-para-discussao/td215/view>>. Acesso em: 18 nov.2020.

⁶⁷ Disponível em: <<https://www.epa.gov/ghgemissions/global-greenhouse-gas-emissions-data>>. Acesso em: 17 nov. 2020.

setor para se atingir as metas acordadas pelo Brasil em Paris⁶⁸. Para isso, evidentemente, é necessário examinar as contribuições que tanto a queima dos combustíveis, como a da geração da eletricidade utilizada pelos veículos elétricos têm no lançamento de GEE na atmosfera.

Figura 5: Fontes emissoras de CO₂ no Brasil no ano de 2010

Participação dos setores e subsetores nas emissões líquidas de CO₂ em 2010



Fonte: MCTI⁶⁹.

4.2. O IMPACTO DOS DIFERENTES COMBUSTÍVEIS NA EMISSÃO DE GEE

Toda queima de combustível produz CO₂, mas nem todo CO₂ emitido nesse processo acarreta aumento líquido da concentração desse gás na atmosfera. De fato, é necessário saber sua fonte e como foi produzido, para se avaliar seu impacto em relação ao efeito estufa.

⁶⁸ De acordo com a NDC, para alcançar essas metas, o Brasil irá “promover medidas de eficiência, melhorias na infraestrutura de transportes e no transporte público em áreas urbanas”. A NDC está disponível em <<https://www4.unfccc.int/sites/ndcstaging/PublishedDocuments/Brazil%20First/BRAZIL%20iNDC%20english%20FINAL.pdf>>. Acesso em: 18 dez. 2020.

⁶⁹ Disponível em: <http://antigo.mctic.gov.br/mctic/export/sites/institucional/ciencia/SEPED/clima/arquivos/Comunicacoes_Nacionais/TCN_port/MCTI_TCN_SUMARIO-EXECUTIVO_port.pdf>. Acesso em 18 dez. 2020.

4.2.1. Combustíveis fósseis

Assim, iniciando-se pelo caso mais simples, que é o da combustão de combustíveis fósseis, sempre haverá aumento líquido de GEE na atmosfera, tanto pela contribuição dos processos para sua produção e transporte, mas principalmente pela queima do combustível em si, uma vez que o CO₂ emitido nesse processo decorre de carbonos que faziam parte de hidrocarbonetos que se encontravam estocados no subsolo, ou seja, há uma redução líquida de carbonos “inertes” (isto é, que não contribuía para o efeito estufa) e um aumento líquido de CO₂ na atmosfera.

É necessário mencionar, que na década de 2000, particularmente fora do Brasil, havia a expectativa de que o diesel pudesse ajudar o sistema de transportes a emitir menos GEE⁷⁰, se substituísse a gasolina. De fato, as vendas dos veículos movidos a esse combustível cresceram, particularmente na Europa, como resposta a essa possibilidade.

Entretanto, na esteira do mencionado escândalo do “Dieselgate”, alguns estudos vieram a questionar tanto a afirmação de que o diesel geraria uma menor “pegada de carbono”⁷¹, e mesmo de que emitiria menos CO₂⁷² que a gasolina. Vale frisar que no caso brasileiro essa possível superioridade do diesel em termos de emissão de GEE seria ainda mais questionável, uma vez que a gasolina vendida no Brasil é misturada em média com cerca de 25% de etanol em sua composição (proporção que tem variado ao longo dos anos), e, portanto, tem menor “pegada de carbono” que aquela que é vendida pura no exterior.

4.2.2. Biocombustíveis

No caso dos biocombustíveis em relação aos GEE, a situação é mais complexa. De fato, embora sua queima também gere gás carbônico, como é natural em uma combustão, todo o CO₂ emitido nessa etapa tem origem em um processo anterior de fotossíntese que já sequestrou carbonos presentes na

⁷⁰ Vide por exemplo, Sullivan *et. al.* (2004). Disponível em: <<https://pubs.acs.org/doi/pdf/10.1021/es04928d>>. Acesso em: 3 dez. 2020.

⁷¹ Disponível em: <<https://news.stanford.edu/pr/02/jacobsonJGR1023.html>>. Acesso em: 3 de dez. 2020.

⁷² Disponível em: <<https://theicct.org/publications/gasoline-vs-diesel-comparing-co2-emission-levels>>. Acesso em: 3 dez. 2020.

atmosfera, resultando, portanto, em um ciclo fechado, sem aumento ou redução na quantidade de GEE.

Entretanto, não se pode analisar apenas essa etapa, que vai do tanque à roda, mas sim todo o processo de produção do etanol, para se verificar sua contribuição em relação aos GEE. Nesse caso, é necessário analisar também sua produção, por meio da ferramenta denominada “avaliação do ciclo de vida do produto” (ACV⁷³), que contabiliza o impacto da utilização de fertilizantes no campo, do uso de maquinário agrícola e de caminhões para o seu transporte (normalmente movidos a óleo diesel), e até do desmatamento para a expansão da fronteira agrícola, entre outros.

Como essa ferramenta é, de certa forma, uma aproximação de uma realidade mais complexa, não há um consenso acerca do impacto que o etanol apresenta em relação ao efeito estufa. Um dos estudos mais aprofundados sobre o tema foi feito pela Embrapa⁷⁴ (2009), que estimou que o etanol de cana de açúcar⁷⁵ do Brasil seja capaz de reduzir cerca de 73% do total de GEE emitidos em comparação com a utilização exclusiva de gasolina. Entretanto, a depender do estudo, e dos parâmetros utilizados para a quantificação da ACV, esse valor é estimado entre pouco menos de 50% a até 90%. De todo modo, é evidente que a utilização do etanol de cana é muito mais eficiente para o combate do efeito estufa do que o uso de combustíveis fósseis.

4.3. ELETRIFICAÇÃO DOS TRANSPORTES E OS GEE

O caso do veículo elétrico a bateria é também mais complexo, pois embora não gere emissão na etapa de consumo que vai da bateria até as rodas, a contabilização de sua contribuição para o efeito estufa depende da análise tanto da fabricação da bateria, que requer processos complexos ligados a mineração dos materiais de sua composição, como depende também do quão “limpa” é a geração da energia elétrica utilizada, ou seja, se ela advém de fontes fósseis ou de fontes renováveis.

⁷³ Conhecido, no inglês, como LCA “Life Cycle Assessment”.

⁷⁴ Disponível em: <<https://www.embrapa.br/busca-de-noticias/-/noticia/18044516/estudo-mostra-que-etanol-de-cana-emite-menos-gas-carbonico-para-a-atmosfera-do-que-a-gasolina>>. Acesso em: 18 nov. 2020.

⁷⁵ Nos EUA o etanol é majoritariamente decorrente do cultivo do milho e tem desempenho muito menos positivo que o combustível brasileiro no tocante à emissão de GEE.

Assim, em um país como o Brasil, no qual 82,9% da eletricidade produzida em 2017⁷⁶ decorreu de fontes renováveis ou de energia nuclear⁷⁷, o impacto dos veículos elétricos é pequeno em termos de aumento da emissão de GEE.

De todo modo, podemos comparar a emissão de CO₂eq⁷⁸ para se trafegar mil quilômetros utilizando-se gasolina, etanol ou eletricidade. Para isso, no caso da gasolina, utilizaremos uma ferramenta de cálculo que é oferecida pelo Laboratório de Silvicultura Tropical, da Esalq⁷⁹. Assim, seriam emitidos aproximadamente 190 kg de CO₂eq para um carro pequeno com um consumo de 12 km/l. No caso do etanol, ajustando-se para um consumo equivalente a 70% do modelo a gasolina, e emissões 73% menores, de acordo com o já citado estudo da Embrapa (*op. cit.*), teríamos uma emissão de cerca de 73 kg de CO₂eq. No caso de um veículo elétrico a bateria, seriam consumidos menos de 200 kWh para se rodar os mesmos mil quilômetros. Essa energia, por sua vez, geraria de 10⁸⁰ a 59⁸¹ kg de CO₂eq, a depender da calculadora utilizada.

Essa conta, que visa apenas a ser exemplificativa e demonstrar o potencial da eletromobilidade para a redução da emissão de GEE, é secundada por estudos como os de Gonçalves *et al.* (2018)⁸², que compararam cenários com maior ou menor proporção de VE na frota circulante brasileira para o ano de 2050 e confirmam que a eletrificação dos veículos é importante instrumento na redução da emissão de CO₂ na atmosfera.

É necessário salientar que para o uso veicular tanto o etanol de cana-de-açúcar, como a eletricidade, causam significativamente menor impacto que os

⁷⁶ Disponível em: <<https://www.epe.gov.br/pt/abcdenergia/matriz-energetica-e-eletrica>>. Acesso em: 18 nov.2020.

⁷⁷ A energia nuclear, embora decorrente de fonte não renovável, não tem combustão envolvida e não emite GEE. Mesmo numa análise ACV, é considerada como de “baixo carbono”. Sobre o assunto, vide, por exemplo: <https://www.iaea.org/topics/nuclear-power-and-climate-change>. Acesso em: 18 nov. 2020.

⁷⁸ CO₂eq é uma medida utilizada para comparar as emissões de vários gases de efeito estufa, baseada no potencial de aquecimento global de cada um, de acordo com a Decisão 17/COP-8. Serve para se comparar fontes distintas de emissão, como na queima de biocombustíveis, gasolina, ou na geração de energia elétrica.

⁷⁹ Disponível em: <http://esalqlastrop.com.br/capa.asp?pi=calculadora_emissoes>. Acesso em: 20 nov. 2020.

⁸⁰ Disponível em: <<https://idesam.org/calculadora/>>. Utilizamos o DF como base. Acesso em: 20 nov. 2020.

⁸¹ Disponível em: <<https://www.tjpr.jus.br/web/gestao-ambiental/calculadoraco2>>. Acesso em: 20 nov. 2020.

⁸² Disponível em: <http://146.164.5.73:30080/tempsite/anais/documentos/2018/Gestao%20de%20Transportes/Metodos%20e%20Tecnicas%20de%20Gestao%20de%20Transportes%20I/2_232_AC.pdf>. Acesso em: 2 dez. 2020.

combustíveis fósseis no tocante ao efeito estufa. Em ambos os casos, etanol e eletricidade, inclusive, há ainda bastante espaço para reduções de suas “pegadas de carbono”, seja descarbonizando o processo produtivo do etanol, seja aumentando a eficiência dos veículos (por meio de hibridização, ou uso de células de combustível de etanol), e no caso da eletricidade, por meio da redução de fontes fósseis em sua geração.

Por fim, é necessário examinar a crítica que é levantada contra os veículos elétricos, de que uma rápida eletrificação do transporte no país induziria a um súbito aumento na demanda por energia elétrica que, por sua vez, somente poderia ser mais prontamente atendida pelo aumento da geração de eletricidade a partir de fontes fósseis. Em outras palavras, o cerne dessa crítica é que se estaria substituindo um biocombustível avançado (etanol) por combustíveis fósseis, com evidentes perdas para o meio ambiente.

Essa crítica, embora tenha seu mérito com a preocupação acerca da relativa inelasticidade da oferta de energia (ao menos no curto prazo), não considera, entretanto, a complementariedade dos VE com a geração de energia eólica e solar, nem a revolução de custos e eficiência que ambas as fontes vêm tendo, o que se reflete na rápida instalação de dispositivos para sua geração.

Em síntese, o aumento da frota de VE pode ser o elemento que falta para se estimular uma participação ainda maior do sol e do vento na matriz elétrica nacional, pois o conjunto das baterias de toda a frota de VE, conectadas bidirecionalmente à rede elétrica, poderia ajudar a suavizar as flutuações de geração inerentes a essas fontes⁸³. Trata-se, contudo, de tema que foge ao escopo do presente artigo, mas que certamente merece ser abordado com mais profundidade no futuro.

De todo modo, poder-se-ia argumentar que o caso brasileiro é bastante peculiar porque tanto o etanol utilizado, quanto nossa geração de energia elétrica, têm “pegada de carbono” relativamente leves. Mas mesmo em um país com elevada proporção de combustíveis fósseis na produção de energia elétrica e nos tanques de combustíveis, como os EUA, caso sua frota fosse totalmente

⁸³ Vide, por exemplo, Villar *et al.* (2016). Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1876610216316630>>. Acesso em: 4 dez.2020.

eletrificada, haveria redução da emissão de GEE^{84,85,86} a partir da fonte veicular, o que demonstra o valor intrínseco da eletrificação dos veículos (leves, pesados e levíssimos) como estratégia para a mitigação das mudanças climáticas.

5 ANÁLISE E CONCLUSÕES

Neste texto buscamos apresentar, de forma sistemática, uma reflexão sobre as emissões poluentes decorrentes dos veículos, em função de suas fontes de geração de energia, sob a perspectiva do Brasil. Esperamos que um de seus méritos tenha sido o de tratar de forma unificada o problema das emissões tanto em uma escala local, como também global. De fato, ao se pesquisar acerca da bibliografia do assunto, o mais comum é encontrar essas duas dimensões abordadas de forma separada.

De todo modo, por ser um artigo produzido no âmbito Senado Federal, toda a discussão aqui tratada deve se articular com o papel do Congresso como fórum privilegiado para o debate das questões estratégicas para o País. Nesse sentido, buscaremos apontar algumas reflexões que podem ser obtidas da discussão que foi colocada.

Em primeiro lugar, é necessário destacar a importância que o etanol teve ao longo das últimas quatro décadas tanto para a redução das emissões a nível local, como para ter dado destaque ao Brasil como um dos países com matriz energética mais renovável e sustentável. Particularmente em comparação com o uso da gasolina e diesel em motores mais antigos, o etanol permitiu reduções significativas da emissão de determinadas classes de poluentes.

Entretanto, o que pode ser verificado é que o motor a combustão, ainda que movido a etanol, sempre apresentará algum tipo de emissão poluente decorrente da queima, da alta pressão e da alta temperatura, das “impurezas” do ar atmosférico (basicamente tudo que não é oxigênio) no interior das câmaras

⁸⁴ Disponível em: <http://www.adlittle.cn/sites/default/files/viewpoints/ADL_BEVs_vs_ICEVs_FINAL_November_292016.pdf>. Acesso em: 19 nov. 2020.

⁸⁵ Disponível em: <<https://www.sciencedaily.com/releases/2019/04/190412122912.htm>>. Acesso em: 19 nov.2020.

⁸⁶ Disponível em: <<https://blog.ucsusa.org/dave-reichmuth/are-electric-vehicles-really-better-for-the-climate-yes-heres-why>>. Acesso em: 25 nov. 2020.

de combustão dos motores⁸⁷. Colocando-se de outra forma, embora o etanol seja uma fonte de energia com inúmeras vantagens, como baixa toxicidade, baixa pegada de carbono, facilidade de manejo e estocagem, entre outras, encontra-se limitado pela tecnologia tradicional dos motores a combustão interna, particularmente daqueles bicomustíveis (*flex*), que geram importantes classes de poluentes no ar das cidades.

Nesse sentido, questiona-se se haveria futuro para a própria tecnologia dos motores a combustão⁸⁸; ou seja, embora o País já tenha evoluído bastante ao longo dos últimos quarenta anos em função das determinações do Proconve⁸⁹ e da adoção do etanol como combustível, isoladamente, ou misturado à gasolina, para que se possa avançar para um futuro com baixíssimas emissões veiculares, faz-se necessário romper os atuais paradigmas tecnológicos da indústria automotiva nacional.

Nesse contexto, merece destaque o papel de tecnologias como as dos veículos elétricos, que podem reduzir a praticamente zero as emissões veiculares no âmbito urbano. Ou seja, a eletrificação dos veículos é instrumento para se permitir a redução de poluentes nocivos que são gerados com o funcionamento dos motores a combustão, e, portanto, cabe ao governo facilitar o processo de adoção dessas tecnologias inovadoras. Nesse sentido, vários países já se comprometeram com a proibição das vendas de veículos novos que emitem poluentes, começando em 2025, no caso da Noruega, ou em 2030, com o Reino Unido, entre vários outros países com compromissos já assumidos (IEA, 2020)⁹⁰.

A despeito disso, o que Consoni *et al.* (2018)⁹¹ demonstram, em estudo sobre a governança e as políticas públicas para os VE, é justamente a ausência de metas e objetivos claros por parte do Governo Federal em relação à promoção da eletromobilidade. Esse estudo também destacou os impasses

⁸⁷ Disponível em: <<https://theicct.org/cards/stack/vehicle-nox-emissions-basics>>. Acesso em: 1 dez. 2020.

⁸⁸ Vide, por exemplo, Consoni *et al.* (2018). Disponível em: <<http://www.promobe.com.br/wp-content/uploads/2018/06/2018-06-04-PROMOB-e-Estudo-de-Governanca.compressed.pdf>>. Acesso em: 2 dez. 2020.

⁸⁹ Disponível em: <<https://revistapesquisa.fapesp.br/ar-mais-limpo/>>. Acesso em: 1 dez. 2020.

⁹⁰ Disponível em: <<https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2020>>. Acesso em: 7 dez. 2020.

⁹¹ *Op. cit.*

vividos pela indústria automotiva nacional, que deveria exportar mais para não ficar refém das cíclicas crises econômicas que assolam o Brasil. Entretanto, com cada vez mais países do mundo rumando para a eletrificação dos veículos, é questionável como o Brasil poderá exportar os produtos de sua indústria automotiva se não tiver produtos capazes de atender a essa demanda.

De todo modo, a eletrificação dos veículos não deve ser encarada como antagônica ao uso do etanol nos transportes, pois existem oportunidades, potencialidades e sinergias que devem ser aproveitadas. Ademais, o Brasil apresenta dimensões continentais e dificilmente uma única solução para o transporte de baixa emissão atenderá a todas as suas especificidades. A título de exemplo, a hibridização com uso do etanol e mesmo o desenvolvimento das células de combustível a etanol oferecem alternativas de médio e longo prazo para se manter a relevância desse biocombustível no futuro.

Por fim, podemos sistematizar os seguintes encaminhamentos e sugestões que decorrem da discussão que foi aqui proposta:

- É necessária a criação de uma política pública mais clara em direção à eletrificação veicular (carros, ônibus, caminhões, bicicletas, etc.). Essa política:
 - é fundamental para a definição dos aspectos conexos das políticas de transporte, de combustíveis e energia, automotiva, de ciência e tecnologia e, sobretudo, de saúde e meio ambiente;
 - devido ao seu impacto e alcance, deve ser amplamente discutida não só pelo próprio Governo e Congresso, mas também envolver indústria e sociedade;
 - deve conter metas acerca do avanço da mobilidade elétrica, assim como ações de médio e longo prazo que permitam a transição do país em direção a um futuro com mínimas emissões veiculares;
 - Essas metas devem ser claras o suficiente para permitir a segurança jurídica necessária aos investimentos de longo prazo do setor automotivo, evitando que essa indústria se torne defasada tecnologicamente em relação às economias mais avançadas.
 - deve buscar a padronização (normatização) das tecnologias a serem adotadas no Brasil, como plugues e protocolos de recarga em pontos públicos, para facilitar as trocas e intercâmbios de bens e tecnologias com os nossos parceiros comerciais e evitar a dispersão de esforços e investimentos em múltiplos padrões;

- deve aproveitar as janelas de oportunidades no campo da mobilidade elétrica para se posicionar como liderança entre os países em desenvolvimento que demandam veículos adaptados às suas realidades locais;
- Para que essa política tenha êxito, é fundamental avançar em acordos de livre-comércio que permitam a inserção e integração da indústria automotiva nacional às cadeias globais de valor, e permitam ao país se tornar polo exportador e de desenvolvimento tecnológico.
- É necessário aumentar substancialmente o volume de investimentos no desenvolvimento de tecnologias que permitam ao etanol livrar-se das limitações dos motores a combustão, como é o caso das células de combustível.
- É necessário, desde já, começar a debater e propor novas opções estratégicas para a Petrobras, a fim de garantir o valor e o futuro da empresa em um cenário de paulatina redução da importância do petróleo no Brasil e no mundo.

Missão da Consultoria Legislativa

Prestar consultoria e assessoramento especializados ao Senado Federal e ao Congresso Nacional, com o objetivo de contribuir com o aprimoramento da atividade legislativa e parlamentar, em benefício da sociedade brasileira.



Núcleo de Estudos
e Pesquisas

Consultoria
Legislativa

SENADO
FEDERAL



ISSN 1983-0645