



Guilherme Henrique Castro

**Descarbonização do setor de transporte –
Comparação das emissões de veículos
leves convencionais, híbridos e elétricos**

Dissertação de Mestrado

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, do Departamento de Engenharia Mecânica da PUC-Rio.

Orientador: Prof. Sergio Leal Braga

Rio de Janeiro

maio de 2023



Guilherme Henrique Castro

**Descarbonização do setor de transporte –
Comparação das emissões de veículos
leves convencionais, híbridos e elétricos**

Dissertação de Mestrado

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, do Departamento de Engenharia Mecânica da PUC-Rio.

Prof. Sergio Leal Braga

Orientador

Departamento de Engenharia Mecânica – PUC-Rio

Prof. Rodrigo Flora Calili

Departamento de Engenharia Mecânica – PUC-Rio

Prof. Marcos Sebastião de Paula Gomes

Departamento de Engenharia Mecânica – PUC-Rio

Prof. Juan José Milon Guzman

Departamento de Engenharia Mecânica – UTP Peru

Rio de Janeiro, 10 de maio de 2023

Todos os direitos reservados. A reprodução, total ou parcial do trabalho, é proibida sem a autorização da universidade, da autora e do orientador.

Guilherme Henrique Castro

Graduado em Engenharia Mecânica pela Universidade Católica de Petrópolis em 2014. Pós-graduado em Engenharia de Segurança do Trabalho pela Universidade Federal do Rio de Janeiro em 2022. Atualmente trabalha como Engenheiro Mecânico na área de gestão de contratos e no desenvolvimento de projetos sustentáveis, enquanto cursa o mestrado em Engenharia Mecânica na PUC-Rio.

Ficha Catalográfica

Castro, Guilherme Henrique

Descarbonização do setor de transporte: comparação das emissões de veículos leves convencionais, híbridos e elétricos / Guilherme Henrique Castro; orientador: Sergio Leal Braga. – 2023.

122 f. : il. color. ; 30 cm

Dissertação (mestrado) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Mecânica, 2023.

Inclui bibliografia

1. Engenharia Mecânica – Teses. 2. Descarbonização. 3. Eficiência energética. 4. Emissões. I. Braga, Sergio Leal. II. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Mecânica. III. Título.

CDD: 621

Agradecimentos

Agradeço a minha família pelo amor, carinho, apoio e ensinamentos passados ao longo da vida. Agradeço aos meus pais Leandra e Marco, a minha irmã Carolina, aos meus avós Maria Auxiliadora, Antônio e Sônia e a minha noiva Bárbara, por sempre me incentivarem e acreditarem em mim.

Agradeço aos meus amigos e colegas de trabalho pela amizade, parceria e conselhos distribuídos ao longo de diversos anos.

Agradeço ao CNPq e à PUC-Rio, pelos auxílios concedidos, sem os quais este trabalho não poderia ter sido realizado. Além disso, agradeço aos professores e demais profissionais da instituição, pelo suporte prestados e pelas experiências compartilhadas ao longo desta jornada.

Agradeço ao professor orientador Dr. Sergio Braga, pelas aulas lecionadas, as quais, despertaram interesse e motivação para o desenvolvimento deste trabalho. Além de todo o suporte prestado para atingir o presente resultado.

“O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001”

Resumo

Castro, Guilherme Henrique; Braga, Sergio Leal. **Descarbonização do setor de transporte – Comparação das emissões de veículos leves convencionais, híbridos e elétricos**. Rio de Janeiro, 2023. 122p. Dissertação de Mestrado – Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

A mobilidade urbana possui significativa interação com o meio ambiente, seja através dos recursos extraídos para produção e abastecimento de frotas automotivas ou da poluição promovida pela circulação e descarte de resíduos. Sendo do conhecimento geral que os principais combustíveis utilizados atualmente são oriundos de fontes naturais finitas e de alto impacto ambiental, faz-se necessário a avaliação de outras alternativas de propulsão dos meios de transporte. Dentro dessas condições os veículos elétricos e os veículos movidos à etanol apresentam-se como opções consistentes sob o aspecto sustentável. A abordagem desenvolvida contempla as interações entre as matrizes energéticas e elétricas, as emissões de CO_2 dos diferentes tipos de propulsão, tendo em vista o comportamento de cada um desses fatores nos seguintes países: Estados Unidos, Alemanha, China, Japão, Índia e em especial o Brasil. Dessa forma, objetiva-se determinar o tipo de transporte individual com menor grau de emissões de CO_2 .

Palavras-chave

Mobilidade urbana; sustentabilidade; veículos elétricos; etanol.

Abstract

Castro, Guilherme Henrique; Braga, Sergio Leal (Advisor). **Decarbonization of the transport sector – Comparison of emissions from conventional, hybrid and electric light duty vehicles**. Rio de Janeiro, 2023. 122p. Dissertação de Mestrado – Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

The urban mobility has a significant interaction with the environment, it can be through resources extraction to manufacturing and to fuel automobile fleets or by pollution caused by its circulation and the waste disposal. Being common knowledge that the main fuel used nowadays are made of finite natural resources and its environmental impact, it is necessary to evaluate other alternatives to the propulsion of transportation facilities. Regarding these conditions the electrical vehicle and the ethanol powered vehicles presented themselves as consistent options from a sustainable perspective. The approach developed contemplate the interactions between the energetic and electric matrix, the CO_2 emissions and the different kind of propulsion, taking care about the behavior of each factor in the following countries: USA, Germany, China, Japan, India and in special, Brazil. Therefore, is aimed to define which kind of transportation has the lower amount of CO_2 released in the environment.

Keywords

Urban mobility; sustainability; electrical vehicles; ethanol.

Sumário

1	Introdução	15
1.1.	Motivação	20
1.2.	Contextualização histórica	23
1.3.	Dependência do petróleo	28
1.4.	Biocombustíveis	30
2	Matrizes energéticas	36
2.1.	Brasil	39
2.2.	Estados Unidos da América	43
2.3.	Alemanha	46
2.4.	China	47
2.5.	Japão	49
2.6.	Índia	50
3	Matrizes elétricas	54
3.1.	Brasil	56
3.2.	Estados Unidos da América	59
3.3.	Alemanha	61
3.4.	China	62
3.5.	Japão	65

3.6.	Índia	68
4	Emissões e o setor de transporte	71
4.1.	Emissões	71
4.2	Emissões do sistema elétrico	77
4.2.1.	Brasil	79
4.2.2.	Estados Unidos da América	80
4.2.3.	Alemanha	81
4.2.4.	China	82
4.2.5.	Japão	83
4.2.6.	Índia	84
4.3.	Setor de transporte	86
4.4.	Ciclo de vida dos biocombustíveis	91
5	Transição energética dos transportes	94
5.1.	Eficiência ambiental veicular	94
5.2.	Brasil	95
5.3.	Estados Unidos da América	97
5.4.	Alemanha	99
5.5.	China	101
5.6.	Japão	102
5.7.	Índia	104

5.8.	Resultados	105
6	Conclusão	109
7	Referências Bibliográficas	112

Lista de figuras

Figura 1: Triciclo movido a corda idealizado por Leonardo da Vinci.	24
Figura 2: Le Fardier, veículo a vapor concebido por Nicolas-Joseph Cugnot no século XVIII.	25
Figura 3: Benz Patent Car Model nº1.	26

Lista de gráficos

Gráfico 1: Matriz energética global por tipos de fonte no período de 1990 a 2018.

19

Gráfico 2: Emissão de **CO₂** por setor entre os anos de 1990 e 2018.. 21

Gráfico 3: o resultado do modelo elaborado por Hubbert a respeito das reservas mundiais de petróleo. 30

Gráfico 4: Composição energética Brasil 2021. 40

Gráfico 5: Consumo Energético por setor Brasil 2020. 41

Gráfico 6: Potencial de geração energética Brasil 2050. 42

Gráfico 7: Composição energética Estados Unidos da América 2019. 44

Gráfico 8: Consumo Energética Estados Unidos da América 2020. 45

Gráfico 9: Composição energética Alemanha 2019. 47

Gráfico 10: Composição energética China 2018. 49

Gráfico 11: Composição energética Japão 2019. 50

Gráfico 12: Composição energética Índia 2018. 52

Gráfico 13: Composição elétrica Brasil 2019. 57

Gráfico 14: Composição elétrica Estados Unidos da América 2019. 60

Gráfico 15: Composição elétrica Estados Unidos da América (a) e participação das renováveis (b) previsão para 2050. 61

Gráfico 16: Composição elétrica Alemanha 2019. 62

Gráfico 17: Composição elétrica China 2019. 64

Gráfico 18: Composição elétrica Japão 2019. 66

Gráfico 19: Composição elétrica Índia 2019. 69

Lista de tabelas

Tabela 1: Produção e rendimento da plantação de cana-de-açúcar entre os anos de 1975 e 2019	33
Tabela 2: Produção de etanol entre os anos de 1975 e 2019	33
Tabela 3: Produção de biodiesel entre os anos de 2005 e 2020	34
Tabela 4: Critérios para adição de biocombustíveis	35
Tabela 5: Principais fontes energéticas renováveis e não renováveis	37
Tabela 6: Composição energética por tipo de recurso	38
Tabela 7: Composição energética por tipo de recurso para as seis nações avaliadas	39
Tabela 8: Composição energética por tipo de recurso	55
Tabela 9: Composição da Matriz Elétrica por tipo de recurso para as seis nações avaliadas	56
Tabela 10: Total de emissão CO2 dos países avaliados entre os anos de 2015 e 2020	72
Tabela 11: Emissões atmosféricas por tipo	78
Tabela 12: Emissões do sistema elétrico brasileiro	79
Tabela 13: Emissões do sistema elétrico norte-americano	80
Tabela 14: Emissões do sistema elétrico alemão	81
Tabela 15: Emissões do sistema elétrico chinês	82
Tabela 16: Emissões do sistema elétrico japonês	84
Tabela 17: Emissões do sistema elétrico indiano	85

Tabela 18: Produção mundial de veículos entre 1999 e 2021	86
Tabela 19: Frota automotiva global em 2019	88
Tabela 20: Frota automotiva de propulsão alternativa	89
Tabela 21: Participação do setor de transporte na emissão total de poluentes.	90
Tabela 22: Emissões do setor de transporte entre os anos de 2015 e 2020	91
Tabela 23: Emissões veículos elétricos no Brasil	95
Tabela 24: Emissões veículos tradicionais Brasil	96
Tabela 25: Emissões veículos elétricos Estados Unidos da América	98
Tabela 26: Emissões veículos tradicionais Estados Unidos da América	98
Tabela 27: Emissões veículos elétricos Alemanha	100
Tabela 28: Emissões veículo tradicional Alemanha	100
Tabela 29: Emissões veículos elétrico China	101
Tabela 30: Emissão veículo tradicional China	102
Tabela 31: Emissão veículos elétrico Japão	103
Tabela 32: Emissão veículos tradicionais Japão	103
Tabela 33: Emissão veículos elétrico Índia	104
Tabela 34: Emissão veículo tradicional Índia	104
Tabela 35: Comparativo Geral de Emissões Atmosféricas	106

1

Introdução

A locomoção de pessoas e o transporte de cargas são essenciais a toda cadeia produtiva e social da humanidade. Em geral, os meios de transporte, sejam eles por via terrestre, marítima ou aérea, têm como principal fonte de energia para a locomoção os combustíveis de origem fóssil, que apesar de possuírem grande potencial energético, emitem grandes quantidades de materiais poluentes nocivos à saúde humana e ao meio ambiente. Somado a isto, há a preocupação quanto a dependência dos combustíveis fósseis para o segmento de transportes, dado que 95% das frotas mundiais utilizam desse recurso (EEA, 2020).

Essas características nocivas estão entranhadas em todo segmento de transportes, e em maior escala, presente nos veículos pessoais leves. Essa situação pode ser constatada nos Estados Unidos da América, onde no ano de 2019, essas fontes foram responsáveis por 58% das emissões de dióxido de carbono (CO_2) do total de 1,8 bilhão de tonelada métrica emitido (CBO, 2022). Essa situação demonstra a necessidade na busca de fontes alternativas para alimentação da frota global.

Preferencialmente, opta-se por recursos renováveis e sustentáveis. Além disso há de ser atendida às legislações ambientais, que se tornam cada vez mais restritivas quanto à emissão de poluentes e aos anseios de governos e sociedade por veículos “verdes”, tendo como ênfase a preservação do sistema ambiental. Nas últimas décadas grandes avanços foram feitos em torno dessa temática de avaliação das emissões atmosféricas de gases de efeito estufa (GEE) e na regulamentação de combustíveis para a frota de veículos leves. Ao longo de um período curto, mais de 80% do mercado consumidor de novos veículos já estão atendo de modo a atender a alguma legislação ambiental (Yang, 2017; Bandivadekar, 2017; McKinsey, 2021).

Face às demandas da sociedade, desde o início do século XXI, a indústria automotiva visa otimizar o gasto energético de seus veículos em produção. Concomitantemente, busca alternativas aos motores de combustão interna que, em sua grande maioria, utilizam-se de combustíveis fósseis, sendo estes, basicamente, o diesel e a gasolina. Diversas foram as alternativas propostas, desde veículos movidos a célula de hidrogênio até aqueles movidos a etanol e gás natural, sendo esses últimos com maior influência no Brasil.

No entanto, atualmente percebe-se que a preferência das montadoras, a nível mundial, visa explorar outra alternativa a partir da expansão da eletrificação dos veículos, com uso em três formatos (Casper, 2021; Sundin, 2021; McKinsey, 2021). O primeiro formato se refere ao uso misto, ou seja, vale-se dos atuais motores a combustão associados a motores elétricos, acionados por um pequeno banco de baterias. Nesse conjunto, a energia elétrica é gerada através do sistema de regeneração de energia durante uma frenagem, recuperando parte da energia cinética ocorrida pela desaceleração, esse sistema é utilizado em veículos do tipo híbrido convencional (AFDC, 2023).

Há também o veículo conhecido como híbrido *plug-in*, o qual possui um banco de baterias maior, associado ao conjunto à combustão. Nesta configuração o veículo pode ser conectado a um sistema de abastecimento por energia elétrica para rodar no modo exclusivamente elétrico. Por fim, o terceiro formato consiste nos veículos elétricos puros, movidos exclusivamente à bateria, os quais são propulsionados 100% por energia elétrica proveniente de recargas na rede (AFDC, 2023).

Os veículos híbridos e elétricos apresentam uma evolução frente a geração mais popular e comum de automóveis que estão atualmente inseridos na frota global, no que tange à eficiência energética e às emissões atmosféricas diretas (Requia et al., 2017).

Conforme os índices já reportados, nos últimos anos a popularização desses veículos no mercado ocorre de forma gradual, sendo tangível a produção em massa de veículos elétricos e a utilização desse tipo de automóvel à medida que a autonomia do sistema foi sensivelmente aumentada (IEA, 2021; IEA, 2022). Dessa forma, houve a possibilidade que as unidades do tipo elétrico, alcançassem por volta

de 500 quilômetros de autonomia com apenas uma recarga completa. Entretanto, a implementação de infraestrutura para instalações de linhas de transmissões e redes de abastecimento é complexa e altamente custosa (Unterluggauer et al., 2022).

No Brasil, a comercialização de veículos alternativos, como os elétricos, híbridos convencionais e híbrido plug-in seguem em franca expansão, apresentando um crescimento histórico nos últimos anos. Esses veículos já respondem por mais de 3,2% da comercialização de novos veículos no país, com expectativa de crescimento (ABVE, 2023).

Acredita que os veículos híbridos sejam um modelo de transição entre os veículos de motor à combustão tradicionais e os veículos elétricos (Crownhart, 2022; Sweeney, 2022). Isso se dá por diversos fatores de adaptação, desde os valores culturais e financeiros do mercado consumidor aos elevados custos de fabricação dos veículos elétricos, as incertezas a respeito dos descartes adequados de seus principais componentes ao final de sua vida útil e às redes de abastecimento, que necessitam de uma logística complexa de funcionamento.

Nos tempos atuais, o veículo elétrico foi concebido de modo a ser considerado um veículo “verde”, ou seja, com zero emissões atmosféricas. De fato, este tipo de transporte não emite qualquer tipo de poluente em sua forma direta, nem por isso, este pode ser considerado como um meio de transporte livre de emissões. Isso ocorre uma vez que a composição da matriz energética utilizada para a alimentação e recarga dessas baterias elétricas interfere diretamente nessa avaliação, podendo essas serem provenientes de fontes fósseis ou renováveis (Fernández, 2018; Requía et al., 2017). Desse modo, o aprofundamento desta análise referente às emissões indiretas dos veículos elétricos será discorrido mais adiante no texto.

Neste contexto, a composição da matriz energética de cada localidade, será fator preponderante para o sucesso ou fracasso ambiental do veículo elétrico. A avaliação de viabilidade sustentável não pode se ater apenas à fonte de abastecimento. Segundo Gil (2019), a transição energética será sustentável desde que os materiais utilizados no processo produtivo estejam na direção das práticas ambientais. Dessa forma, o veículo elétrico pode não ser a vertente mais apropriada para uma locomoção limpa, caso a extração dos elementos para a composição dos

circuitos e baterias elétricas seja mais invasiva e prejudicial ao meio ambiente do que a extração e transformação do combustível fóssil.

A questão que tange à formação e composição dos principais componentes de funcionamento dos veículos elétricos puros, traz consigo importantes questionamentos do ponto de vista ambiental. Para tal aplicação são extraídos diversos metais e minerais para a formação das baterias de íon-lítio, por exemplo.

Segundo dados divulgados pela *Allgemeiner Deutscher Automobil-Club* (ADAC, 2022), para a produção de uma bateria de 400 kg com capacidade de 50kWh, é demandado 33 kg de grafite, 12 kg de níquel, 12 kg de cobalto, 11 kg de manganês e 4 kg de lítio, além de alumínio, aço e plásticos.

De acordo com o relatório emitido pela *Fraunhofer Research Institution for Materials Recycling and Resources Strategies* (2021), é necessária atenção a todo o ciclo de vida das baterias de íon-lítio desde a produção até o seu descarte. Diante da significativa quantidade de materiais valiosos presentes em sua composição, conforme apresentado anteriormente pela ADAC, há a necessidade de se estabelecer um sistema de reciclagem em cadeia, de modo a reaproveitar parte desta matéria-prima.

A reciclagem das baterias dos veículos elétricos é extremamente importante do ponto de vista de impedir a falta de matéria prima. Cobalto e níquel, por exemplo, podem ser reciclados em uma taxa superior a 90 por cento a partir de uma bateria usada. Com o lítio, o processo é um pouco mais difícil, realisticamente é possível recuperar 70 por cento do material original (*Fraunhofer IWKS*, 2021).

Essas preocupações são altamente relevantes e devem ser levadas em consideração, devido à continua expansão na produção de veículos elétricos. Associado a isto, há ainda incertezas quanto ao tempo de vida útil dessas baterias. Para a comercialização de veículos elétricos no mercado norte-americano é instituído de forma governamental um período mínimo de oito anos ou 100.000 milhas para efeito de garantia (AFDC, 2023). Ao atingir esse estágio a capacidade da bateria é reduzida entre 20 e 30%, devendo ser retirada de circulação nos veículos elétricos para a garantia da segurança (Lai et al., 2022). Com isto, não

apenas as matrizes energéticas deverão ser levadas em conta para a avaliação ambiental e de sustentabilidade da mobilidade eletrificada, assim como a demanda do ciclo de vida completo do produto também deverá ser levada em consideração.

Diante disto, a utilização de veículos a combustão movidos a biocombustíveis poderá ter sua relevância aumentada, visto que a cadeia produtiva desses combustíveis pode ocorrer de forma sustentável. O plantio das principais matérias-primas para a produção dos biocombustíveis, tais como a cana de açúcar, o milho, a cevada, entre outros, são potenciais sequestradores de carbono na atmosfera, podendo influenciar positivamente a redução das emissões atmosféricas de forma indireta no transporte (Jaiswal et al., 2017; Soares et al., 2009). A análise mais aprofundada deste cenário será tratada ao longo do trabalho desenvolvido.

A matriz energética mundial é majoritariamente formada por produtos provenientes de fontes não renováveis, em especial, o petróleo e seus derivados, o carvão mineral e o gás natural. A energia gerada em 2018 por esses principais elementos foi similar ao total de 11.596.919.000 de toneladas equivalente de petróleo (tep), o que corresponde a 81,2% da matriz energética global (IEA, 2020). O Gráfico 1 apresenta a composição energética global por tipos de fonte no período de 1990 a 2018.

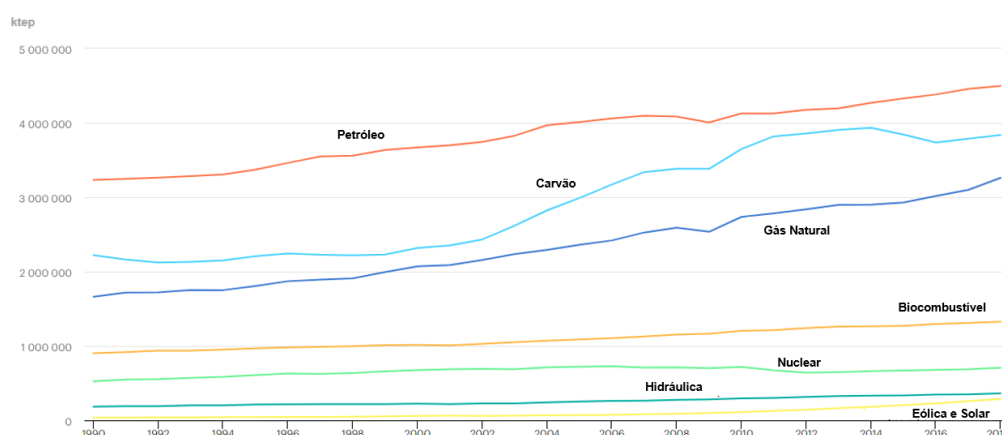


Gráfico 1: Matriz energética global por tipos de fonte no período de 1990 a 2018. Fonte: adaptado de IEA, 2020.

Por sua vez, a matriz energética brasileira é composta de 44,74% de fontes provenientes de energia renovável, o que equivale a 134.882.000 tep, sendo as hidrelétricas e bioenergias as fontes mais relevantes (BEN, 2021). Ainda segundo projeções realizadas pelo *World Energy Council* (2019), é estimado que a utilização de biocombustíveis na América Latina aumentará na ordem de seis vezes a demanda atual até 2050, bem como a ampliação das redes de usinas eólicas e solares, resultando em mais energia sustentável disponível.

1.1. Motivação

O aumento contínuo da comercialização dos veículos elétricos e híbridos, que é esperado e impulsionado pelo mercado automotivo, apresenta a necessidade de uma avaliação ambiental aprofundada referente à emissão de CO_2 em sua forma indireta, mais precisamente, na geração de energia elétrica necessária para a recarga das baterias.

As principais potências mundiais têm como base de suas matrizes energéticas os combustíveis fósseis, sendo essas altamente dependentes deles para a produção de energia elétrica. Esse ambiente poderá apresentar dados extremamente desfavoráveis do ponto de vista ambiental quanto à utilização dos automóveis elétricos, dado que serão demandados inúmeros recursos naturais esgotáveis, não renováveis e altamente poluentes para suprir a exigência energética desses meios de transporte eletrificados.

Conforme dados do Gráfico 2, pode-se observar que o ramo de transportes é atualmente o segundo maior emissor de CO_2 na atmosfera, perdendo apenas para o setor de geração de energia elétrica. Ambos estão correlacionados no que tange ao desenvolvimento de novos meios de transporte. Isso reflete a importância da amplificação do portfólio de geração de energia e para o transporte de cargas e pessoas.

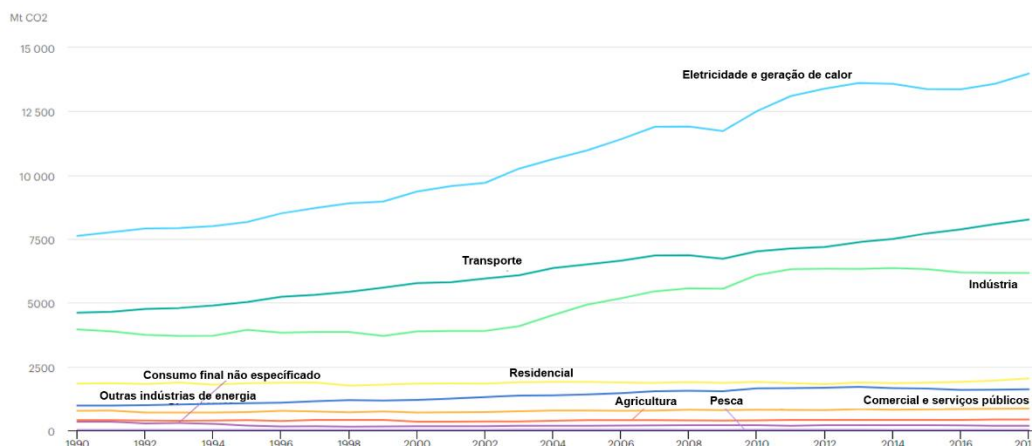


Gráfico 2: Emissão global de CO_2 por setor entre os anos de 1990 e 2018. Fonte: adaptado de IEA, 2018.

1.2. Objetivos

O presente trabalho visa realizar a avaliação comparativa das emissões de dióxido de carbono (CO_2) proveniente da utilização de veículos leves do tipo: convencional, híbrido leve e elétrico a bateria nos seguintes países: Brasil, Estados Unidos da América, Alemanha, China, Japão e Índia.

O escopo do trabalho desenvolvido limita-se a avaliação dessas emissões nos sistemas de geração de energia elétrica, nas emissões diretas de CO_2 oriundas da utilização de combustível fóssil e nas emissões indiretas de CO_2 decorrente do uso de biocombustíveis em veículos leves.

Ademais, busca-se como resultado do estudo a apresentação do tipo de veículo e sistema de propulsão que possui o melhor desempenho sob o aspecto de emissões de CO_2 nos países avaliados.

1.3. Metodologia

A partir da delimitação do escopo de trabalho, foi estabelecido a sistemática metodológica para o desenvolvimento da presente dissertação. De tal modo, a

abordagem definida baseia-se na aplicação do método quantitativo para a apuração dos dados coletados através da revisão sistemática da literatura.

Deste modo, a coleta de dados contempla informações oficiais apresentadas por instituições governamentais, organizações e institutos nacionais e internacionais, relatórios técnicos de especificações de montadoras automotivas, além de trabalhos acadêmicos.

Sendo assim, para cada tipo de sistema de propulsão avaliado a apreciação da eficiência ambiental foi baseada em suas fontes de alimentação. Portanto, há diferenças na metodologia de cálculo aplicada a cada um dos veículos, conforme demonstrado a seguir:

- Veículos convencionais: Os dados referentes as emissões de CO_2 estão baseados único e exclusivamente nos dados divulgados por instituições governamentais e relatórios técnicos divulgados pelas devidas montadoras;
- Veículos convencionais abastecidos com etanol: Tendo em vista que os institutos nacionais consideram os veículos abastecidos com etanol como zero emissões, para a elaboração do presente trabalho foi adotado os valores de referência aplicados aos veículos convencionais associados aos fatores de substituição de combustível fóssil por biocombustível apresentado por Soares et al. (2009);
- Veículos elétricos: As emissões de CO_2 para este tipo de veículo foram calculadas através das emissões oriundas do sistema elétrico. Para tal, foram utilizados dados técnicos apresentados por diversas instituições governamentais e institutos nacionais e internacionais associada a metodologia de cálculo apresentada por Carvalho (2011) e Fernández (2018);

Dessa forma, os impactos relativos aos distintos modos de condução, condições de tráfego e demais fatores adversos, não foram considerados na abordagem realizada.

1.4. Organização do trabalho

A presente dissertação desenvolvida está organizada em seis capítulos. No Capítulo 1 é feita a introdução ao tema objeto de estudo e são apresentadas as delimitações da abordagem desenvolvida, neste capítulo são explicitados as motivações, os objetivos, a metodologia adotada, além de breve contextualização do tema.

No Capítulo 2 é apresentado uma análise sobre os dados coletados referente ao consumo energético dos seis países em estudo, assim como os eventuais impactos e desafios enfrentados decorrente da composição energética local. Por sua vez, no Capítulo 3, uma análise similar é realizada contemplando os detalhamentos das interações das matrizes elétricas.

No Capítulo 4 é apresentada uma avaliação pontual das emissões de CO_2 decorrentes do sistema elétrico local e do setor de transportes. No Capítulo 5 é realizada a abordagem da eficiência ambiental veicular nos seis países em estudo, sendo apresentado os resultados compilados e detalhados, demonstrando qual tipo de veículo é adequado sob o aspecto ambiental para cada país avaliado.

Por fim, no Capítulo 6 são apresentadas as considerações gerais sobre a dissertação desenvolvida, bem como apresentando as conclusões que foram possíveis de serem obtidas através do estudo elaborado.

1.5. Contextualização Histórica

A humanidade, visando suprir suas necessidades, sempre buscou meios de facilitar a realização de suas atividades. Isso é visto desde os primórdios com a introdução de animais para a movimentação de insumos, deslocamento de pessoas e realização de atividades laborais (Hodges, 1999). Posteriormente, tendo em vista atender suas demandas, foi direcionado ao desenvolvimento das primeiras tecnologias, criação das primeiras ferramentas e maquinários, dentre outros.

Com a evolução cognitiva da espécie humana, maiores e mais inovadoras foram as ideias que se tornaram soluções para a execução das tarefas cotidianas, fato este que é perpetuado na atualidade, geração após geração, sempre buscando suprir a necessidade enfrentada no momento. Diante disto, o tema referente à mobilidade vem se desenvolvendo ao longo dos séculos conforme os novos desafios enfrentados pela sociedade. O propósito permanece o mesmo: deslocamento de cargas e pessoas. O meio e o formato, entretanto, foi sendo alterado durante esses períodos.

No século XV, com a invenção das primeiras máquinas mais complexas, o pintor e inventor Leonardo da Vinci idealizou um triciclo movido a cordas, com funcionamento similar ao de um relógio de cordas, conforme apresentado na Figura 1. Esta foi uma das primeiras alternativas imaginadas quanto ao futuro dos meios de transporte, no entanto, este projeto não tomou forma.

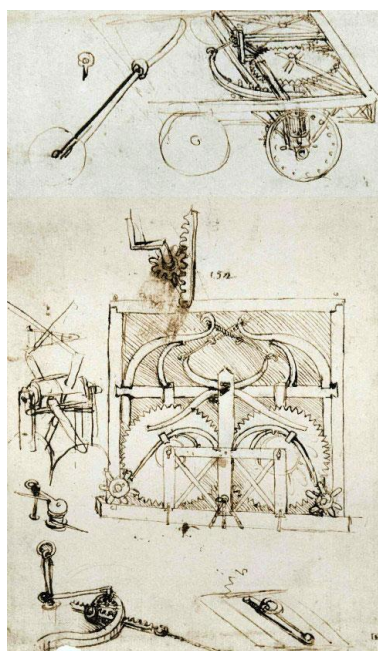


Figura 1: Triciclo movido a corda idealizado por Leonardo da Vinci. Fonte: *Codex Atlanticus*, século XVI.

A evolução da ideia concebida por Leonardo da Vinci foi retomada no século XVIII: era da máquina a vapor, apresentada pelo engenheiro francês Nicolas-Joseph Cugnot. Ele desenvolveu uma carruagem movida a vapor,

conhecida como *Le Fardier*, considerado este por muitos como o primeiro automóvel (Mansard, 2022). O veículo a vapor possuía grandes dimensões e era demasiadamente pesado, sua energia era gerada à base de carvão.

O propósito de Cugnot era utilizar esta máquina para o transporte de materiais militares (Mansard, 2022). A réplica do veículo construído por Cugnot, parcialmente original, encontra-se em exposição no “*Conservatoire National des Arts et Métiers*”, localizado em Paris, conforme representado pela Figura 2 (Britannica, 2021).



Figura 2: *Le Fardier*, veículo a vapor concebido por Nicolas-Joseph Cugnot no século XVIII.
Fonte: Wikipedia.

Já no século XIX, foi idealizado por inventores húngaros, holandeses e americanos um veículo movido à bateria. No entanto, acredita-se que foi com o escocês Robert Anderson que se deu o desenvolvimento da primeira carruagem elétrica, valendo-se de células não recarregáveis. Neste protótipo, a energia elétrica era gerada a partir da queima de óleo cru.

Em seguida, no ano de 1859, o físico francês Gaston Planté desenvolveu a primeira bateria recarregável utilizando chumbo e ácido. Em 1860, Planté apresentou o modelo de bateria recarregável de chumbo-ácido, contendo nove células conectadas em série em uma caixa de proteção com os terminais conectados em paralelo diante da Academia Francesa de Ciências (National Maglab, 2014).

Isto representou uma grande evolução para o desenvolvimento do veículo elétrico (BNDES, 2010).

O modelo de bateria concebido por Planté foi amplamente utilizado pelos automóveis elétricos no final do século. Ainda hoje, as baterias de chumbo e ácido, são utilizadas nos veículos a combustão, com poucas alterações em relação ao modelo desenvolvido em 1860.

Anos mais tarde, o inventor belga Étienne Lenoir desenvolveu o motor a combustão interna movido a gás, sendo aperfeiçoado posteriormente na Alemanha pelo engenheiro Nikolaus Otto, que descobriu uma melhor eficiência e maior segurança da utilização da gasolina frente ao gás, tendo este implementado e aplicado o ciclo termodinâmico Otto na construção do primeiro motor de combustão interna movido à gasolina de quatro tempos. À época, Otto observou que, com o aumento da razão de compressão, ocorria o aumento de potência no motor. Mais adiante, no final dos anos de 1800, os alemães Karl Benz e Gottlieb Daimler construíram os primeiros automóveis motorizados segundo a montadora Mercedes-Benz (2021).

A Daimler (2021) registra no histórico da companhia a data de 29 de janeiro de 1886 em que Karl Benz registrou a patente de número 37435, como o “veículo movido por um motor a gasolina”. Em julho deste mesmo ano, o veículo *Benz Patent Car Model n°1* teve sua primeira aparição pública, representado pela Figura 3.



Figura 3: Benz Patent Car Model n°1. Fonte: Daimler, 2021.

Em simultâneo, o também engenheiro alemão Rudolf Diesel desenvolveu um motor de combustão interna movido a combustível diesel, no qual o objetivo era comprimir rapidamente o ar no motor e, em sequência, alimentar com combustível, provocando assim a autoignição. O sistema desenvolvido por Rudolf Diesel apresentava um aumento consistente de eficiência econômica frente aos demais motores da época.

Em 1900, três eram as opções de motorização disponíveis: a vapor, elétrico e à combustão. De acordo com Anderson (2010), o mercado era dividido, sem indicação de prevalência entre eles e no ano de 1904, um terço dos veículos circulando por Nova Iorque, Chicago e Boston eram do tipo elétrico. Nessa época, os automóveis a vapor eram os mais rápidos, mas demandavam bastante tempo para entrarem em funcionamento e frequentemente necessitavam de paradas para abastecimento de água.

Por outro lado, os automóveis de motor de combustão interna emitiam mais poluentes e tinham dificuldades em dar partida. No entanto, sua principal vantagem era poder se deslocar por grandes distâncias, sem a necessidade de paradas, fator que até hoje é a principal razão da predominância deste tipo de veículos. Por sua vez, os veículos elétricos eram silenciosos e limpos, no entanto, eram mais caros e mais lentos.

Apesar dos principais desenvolvimentos terem ocorrido na Alemanha, foi nos Estados Unidos da América, que os veículos motorizados começaram a ser produzidos em larga escala no início do século XX. Impulsionado pela Revolução Industrial, Henry Ford apresentou um modelo de produção em massa, simplificado e com padronização de processos visando a redução de custos. Isso foi fundamental para a popularização dos automóveis: em poucos anos, o Ford Model T teve mais de quinze milhões de unidades comercializadas.

Os processos aplicados por Ford foram também fundamentais para a prevalência dos automóveis de combustão interna, frente aos demais. O impacto da supremacia da comercialização desses veículos é observado ainda nos tempos atuais, devido ao domínio eficiente do processo produtivo e aos custos serem inferiores, quando comparados às novas tecnologias de veículos híbridos e elétricos.

1.6. Dependência do Petróleo

Desde a descoberta do potencial energético do petróleo e seus derivados, esse produto se tornou soberano ao redor do globo. Diversas foram as guerras travadas entre nações visando aumentar suas reservas petrolíferas. O desenvolvimento mundial, nos séculos passados, foi acelerado justamente a partir do conhecimento das características de utilização desse material.

O primeiro registro histórico da utilização do petróleo é datado de 3000 A.C. pelo povo babilônio, que o utilizava para a impermeabilização de botes e para o uso na construção civil da época. Os egípcios também utilizaram para a preparação da conservação de corpos (BBC, 2021). O uso deste recurso para essas finalidades ainda estava muito aquém do potencial a ser extraído.

Em 1848 tem-se o registro da primeira mina de exploração de petróleo mundial, localizada em Baku no Azerbaijão (*Society of Petroleum Engineers – SPE*, 2021). Ainda na metade deste século, ocorreu a criação de novos produtos derivados do petróleo, um em especial foi o querosene. Este subproduto foi rapidamente popularizado pelo seu baixo custo, sendo utilizado para a iluminação residencial (BBC, 2021). Com isto, a ascensão deste insumo se deu de forma rápida, principalmente devido ao surgimento dos primeiros veículos ao final deste século.

No início do século XX, a demanda por petróleo foi se acentuando, e foram encontradas as primeiras reservas nos países árabes. O poder do petróleo ficou evidente na Primeira Guerra Mundial, pois os navios de guerra, movidos a derivados do petróleo, eram substancialmente mais velozes se comparados aos movidos a carvão mineral (BBC, 2021). Este fator foi considerado como um dos principais pontos estratégicos para a vitória dos países do grupo dos Aliados.

No período pós-guerra, a demanda por petróleo e seus subprodutos permaneceu em crescimento ao longo das décadas seguintes, havendo a necessidade de exploração em novas localidades e com novas tecnologias. Estes fatos provocaram ainda mais incertezas na produção e comercialização do petróleo em âmbito global diante da possibilidade de escassez do produto.

O mercado mundial sempre sofreu com as instabilidades provocadas pelo comércio de petróleo, sejam por fatores políticos, ambientais ou econômicos. Atualmente, esse produto é ainda insubstituível para os processos industriais e na geração de energia, demonstrando assim que, ainda no século atual, há alta dependência em torno desse insumo.

O petróleo e seus derivados, de origem fóssil e não renovável, é um dos principais insumos para a geração de energia elétrica, mas não apenas isso: ele é responsável por mais de 30,9% da composição da matriz energética mundial, segundo dados apresentados pela IEA (2019), o que reforça a importância na busca de fontes alternativas para a geração energética do planeta, antes que ocorra a escassez desse produto. A crise na oferta do insumo é suscetível à ocorrência nas décadas futuras e, assim, novas medidas e planejamentos devem ser iniciados de imediato; do contrário, poderá ser observada uma crise mundial nunca vivenciada pela sociedade moderna.

Em 1962, o geofísico Marion Hubbert elaborou uma teoria, conhecida como Pico de Hubbert, na qual diz respeito sobre o pico da extração de petróleo: ele desenvolveu um modelo para determinar o pico, o declínio e o término de produção em poços de petróleo. Esse modelo poderia ser replicado para as reservas mundiais de petróleo, que apresentaria uma curva de extração similar.

A veracidade de seu modelo foi verificada em solo norte americano, com uma grande proximidade do resultado do seu experimento e a realidade. Quanto às demais reservas mundiais, esse modelo pode não apresentar alta precisão e confiabilidade; no entanto, os resultados servem de alerta para a sociedade civil em torno da busca de novas alternativas para a redução da dependência do petróleo. No Gráfico 3, traz-se a representação do modelo de Hubbert para as reservas mundiais de petróleo.

Segundo dados da OPEC em 2019, as reservas mundiais provadas atingiram um patamar de $1.498,08 \times 10^9$ barris de petróleo, sendo a maior parte situada em países como a Venezuela, Arábia Saudita, Irã, Iraque, Kuwait e Emirados Árabes Unidos, sendo estes países responsáveis por aproximadamente 71,4% de todo o estoque mundial.

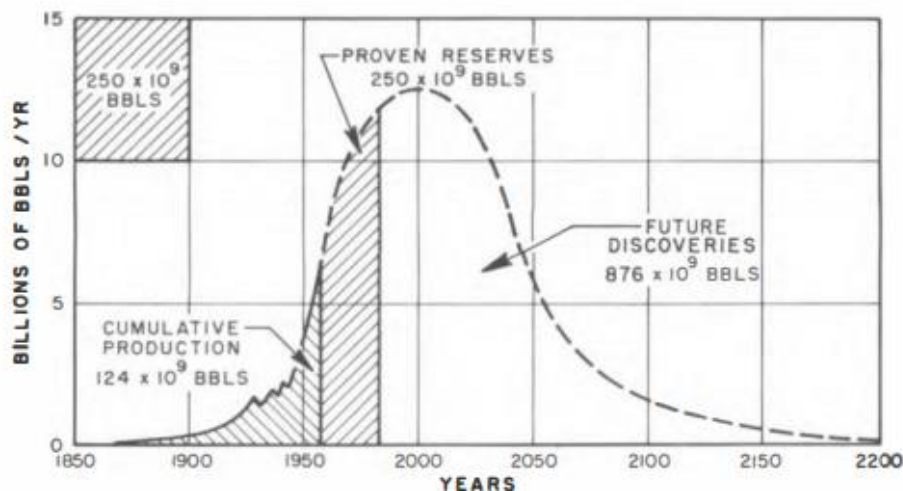


Gráfico 3: o resultado do modelo elaborado por Hubbert a respeito das reservas mundiais de petróleo. Fonte: Hubbert, 1962.

Face a isto, é de se ressaltar também que os fatores geopolíticos são altamente relevantes quando se trata do custo do barril de petróleo. Ao longo dos anos, devido às crises políticas e guerras instauradas pela disputa deste recurso, gera-se grande oscilação da oferta deste insumo que, até os dias de hoje, mantém-se imprevisível, o que acarreta ainda mais incertezas sobre o futuro e a disponibilidade deste produto.

A dependência dos derivados do petróleo para o setor de transportes é a maior se comparada a qualquer outro setor. Mais de 90% da frota mundial de automóveis é movida exclusivamente por combustível fóssil, sendo eles a gasolina ou o diesel (IEA, 2021), fazendo que quaisquer interferências relacionadas à extração e produção de petróleo afetem diretamente todo o ecossistema econômico global, trazendo desdobramentos incômodos à sociedade e à indústria como um todo. Diante desses fatores, é inimaginável a continuidade futura e sustentável do setor de transportes no modelo atual.

1.7. Biocombustíveis

Os combustíveis renováveis apresentam-se como uma alternativa de alimentação dos veículos à combustão.

Os biocombustíveis são derivados de biomassa renovável e podem substituir, parcial ou totalmente, combustíveis derivados de petróleo e gás natural em motores a combustão ou em outro tipo de geração de energia. São fontes de energia alternativa que apresentam baixo índice de emissão de poluentes. (MME, 2021).

Eles se apresentam de forma mais presente no etanol, biodiesel, biogás e óleo vegetal, sendo derivados, principalmente, das seguintes biomassas: cana-de-açúcar, milho, mamona e beterraba. O etanol é o biocombustível mais produzido em território nacional, estando disponível na forma de etanol hidratado, o qual é utilizado como combustível final em veículos movidos a álcool ou veículos *flex*, e na forma de etanol anidro, que faz parte da composição atual da gasolina C.

A inserção dos combustíveis renováveis no Brasil, que teve início em 1975, foi decorrente da crise energética enfrentada na época. Somado a isto, na mesma década, houve a adição de 2% de etanol anidro à gasolina A, através do programa governamental Proálcool, cujo objetivo era reduzir a dependência nacional no setor dos transportes dos derivados do petróleo. Assim, foram concedidos benefícios de modo a incentivar a produção de veículos movidos a etanol, ocasionando o aumento das áreas de plantação de cana-de-açúcar, bem como a criação de novas usinas de etanol.

Passados os anos, incrementou-se, a nível local, o percentual de etanol anidro na gasolina A, criando-se a gasolina C. Atualmente, no Brasil, o máximo percentual permitido pela legislação é 27% de etanol anidro na composição da gasolina. Mais recentemente, em 2004, foi instituído o Programa Nacional de Produção e Uso de Biodiesel (PNPB) no Brasil, com o objetivo de promover o uso de biocombustíveis na matriz energética brasileira e reduzir a dependência do país em relação aos combustíveis fósseis.

Em 2005, o programa iniciou a obrigatoriedade da adição de biodiesel ao diesel comercializado no país, começando com uma mistura de 2% de biodiesel (B2) e aumentando gradualmente até chegar a 10% (B10) em 2019.

Em 2018, uma resolução do Conselho Nacional de Política Energética (CNPE) determinou a adição obrigatória mínima de 13% de biodiesel ao diesel a partir de março de 2021; de 14% a partir de março de 2022, e de 15% a partir de março de 2023. Porém, em 2021, o mesmo CNPE decidiu manter a mistura em 10% devido aos impactos da pandemia de covid-19 no mercado de combustíveis, a alta no preço da soja no mercado internacional e a desvalorização cambial.

O programa teve impacto significativo na economia e no meio ambiente do Brasil. Em termos de economia, o PNPB criou um mercado para a produção de biocombustíveis, gerando novos empregos e impulsionando o desenvolvimento de tecnologias relacionadas à produção de biodiesel. Atualmente, o Brasil é um dos maiores produtores de biodiesel do mundo, com uma capacidade instalada de produção de mais de 9 bilhões de litros por ano. O programa tem sido bem-sucedido na promoção do uso de biocombustíveis e na redução da dependência do país em relação aos combustíveis fósseis.

Com a evolução das técnicas de cultivo, as lavouras produtoras dos principais insumos dos combustíveis renováveis se tornaram muito mais eficientes no Brasil. Segundo Cruz (2012), o rendimento das safras de cana-de-açúcar evoluiu de 46,82 toneladas por hectare em 1975 – início do Proálcool, para 81,29 toneladas por hectare em 2009, apresentando um incremento de eficiência em 73,6%.

Ao longo desses 34 anos, a área de plantio aumentou em aproximadamente 3,8 vezes, enquanto a produção partiu de 91.524.559 toneladas no ano de 1975 e alcançando o resultado de 612.211.200 toneladas no ano de 2009, um incremento de quase 669%. A Tabela 1, apresenta dados importantes quanto à evolução da área de plantio, produção e rendimento da cana-de-açúcar ao longo das fases do Proálcool.

Durante as cinco fases do programa Proálcool, a produção de etanol cresceu continuamente, apresentando, ano após ano, aumentos consecutivos, sendo estes, principalmente, motivados pelos incentivos concedidos através do programa. Isso fez com que a produção de etanol no ano de 1975 saísse de 580.000 m³ para alcançar o volume de 31.628.000 m³ no ano de 2019, um aumento de 5,45 vezes do montante inicial.

Ano	Fase	Área (Hectares)	Produção (Toneladas)	Rendimento (t/h)
1975	1 ^a	1.969.227,00	91.524.559,00	46,82
1985	2 ^a	3.912.042,00	247.199.474,00	63,22
1995	3 ^a	4.559.062,00	303.699.497,00	66,49
2000	4 ^a	4.804.511,00	326.121.011,00	67,51
2009	5 ^a	7.531.000,00	612.211.200,00	81,29
2019	5 ^a	9.911.700,00	630.000.000,00	63,56

Tabela 1: Produção e rendimento da plantação de cana-de-açúcar entre os anos de 1975 e 2019. Fonte: adaptado de Cruz, 2012 e Conab, 2019.

É certo que a evolução ocorreu em movimento similar e paralelo com o aumento das lavouras de plantio, com algumas exceções durante o período, onde ocorreu o decréscimo de produção mesmo com a expansão de área. Na Tabela 2, é possível acompanhar a evolução do volume de produção de etanol durante as cinco fases do programa Proálcool.

Ano	Fase	Área (Hectares)	Produção (m ³)
1975	1 ^a	1.969.227,00	580.000,00
1985	2 ^a	3.912.042,00	11.563.000,00
1995	3 ^a	4.559.062,00	12.745.000,00
2000	4 ^a	4.804.511,00	10.700.000,00
2009	5 ^a	7.531.000,00	26.683.400,00
2019	5 ^a	9.911.700,00	31.628.000,00

Tabela 2: Produção de etanol entre os anos de 1975 e 2019. Fonte: adaptado de Cruz, 2012 e Conab, 2019.

O biodiesel, segundo o Ministério de Minas e Energia (2020), é formado pela reação de óleo vegetal ou gordura animal com metanol ou etanol, e apresenta-se em duas formas: o éster e a glicerina. Apenas o primeiro pode ser utilizado para a composição junto ao diesel fóssil, isto é, após a realização de processos para atendimento à especificação de qualidade.

Desta forma, o biodiesel passou a compor o diesel tradicional de forma opcional em meados dos anos 2000 em território nacional, sendo na época,

acrescido em 2% na composição do diesel. A produção de biodiesel até então, apresentou uma enorme evolução, saindo de 736.160l no ano de 2005 e atingindo 6.432.008.047l em 2020, ano no qual o Brasil obteve seu recorde de produção. O percentual deste biocombustível na mistura foi elevado neste período, atingindo atualmente 13% da composição. A Tabela 3 apresenta a rápida evolução na produção deste combustível biodegradável, assim como o desenvolvimento do acréscimo na mistura.

Ano	Produção (m³)	% de Biodiesel na composição
2005	736,16	2%
2008	1.167.128,42	3%
2009	1.608.448,42	4%
2010	2.386.398,52	5%
2014	3.422.209,90	7%
2017	4.289.839,69	8%
2018	5.336.528,68	10%
2019	5.902.461,10	11%
2020	6.432.008,47	12%

Tabela 3: Produção de biodiesel entre os anos de 2005 e 2020. Fonte: BRASIL – MME, 2021.

A ascensão do biodiesel é fundamental, principalmente no que tange ao setor de transporte e as emissões atmosféricas, visto que esta área possui grande impacto na poluição ambiental. A conversão para a utilização dos biocombustíveis como o biodiesel e o etanol, podem ser essenciais para o desenvolvimento de meios de transporte com menor impacto ambiental.

Globalmente a adição de biocombustíveis apresenta regras distintas para a comercialização em cada país, conforme apresentado na Tabela 4. Através dos dados apresentados na Tabela 4, pode-se verificar que o Brasil é o principal utilizador de etanol anidro para compor seu combustível fóssil – gasolina, enquanto os Estados Unidos é o país que mais adiciona biodiesel na composição do diesel tradicional. A origem renovável e sustentável dos biocombustíveis é o principal trunfo para a sua maior difusão e utilização em escala global.

	Brasil	EUA	União Europeia	Outros
Mandatos	<p>o Teor de anidro (18-27,5%)</p> <p>o Percentual de biodiesel (10%)</p>	<p>o <i>Renewable Fuel Standard</i> - RFS (volume anuais);</p> <p>o Mistura E10 obrigatória (E15 e E85 facultativas);</p> <p>o biodiesel em diversos percentuais (B20, mais comum)</p>	<p>o Mandatos de mistura de biocombustíveis e participação de renováveis no consumo final em diversos países-membro</p>	<p>o E5: Argentina, Canadá, Etiópia e Sudão;</p> <p>o E8 (podendo subir para E10): Colômbia;</p> <p>o E10: Angola, Equador, Jamaica, China (facultativo em 4 províncias), Índia (não cumprido), Quênia, Malawi e Filipinas;</p> <p>o B2 a B5: Peru, Chile, Equador, Uruguai, Malásia, Filipinas, Coreia do Sul, África do Sul e Austrália;</p> <p>o B10: Argentina e Indonésia.</p>

Tabela 4: Critérios para adição de biocombustíveis. Fonte: adaptado de EPE, 2022.

2 Matrizes Energéticas

As matrizes energéticas são o somatório composto pelas mais variadas fontes primárias de energia disponíveis, que podem ser transformadas, distribuídas e consumidas em distintas formas pela sociedade e indústria. A definição de matriz energética é apresentada pela seguinte constatação: “representa o conjunto de fontes disponíveis em um país, estado, ou no mundo, para suprir a necessidade (demanda) de energia” (EPE).

A formação das matrizes energéticas está diretamente ligada às características geomorfológicas de formação de cada região. Com isso, a disponibilidade dos recursos naturais é distinta em cada continente. Portanto, a composição das matrizes energéticas se dá através dos recursos naturais renováveis e os recursos naturais não renováveis, que estão apresentados na Tabela 5. Sendo que o processamento das fontes não renováveis é a principal fonte emissora dos GEEs, que em altas concentrações devido a ação humana são altamente prejudiciais a sociedade, ao meio ambiente e promovem impactos direto na concentração dos gases para o efeito estufa (EPA, 2014).

Os gases de efeito estufa são aqueles constituintes gasosos da atmosfera, tanto naturais quanto antropogênicos, que absorvem e emitem radiação em comprimentos de onda específicos dentro do espectro da radiação infravermelha térmica emitida pela superfície da Terra, pela própria atmosfera e pelas nuvens. Esta propriedade causa o efeito estufa. Vapor de água (H_2O), dióxido de carbono (CO_2), óxido nitroso (N_2O), metano (CH_4) e ozônio (O_3) são os principais gases de efeito estufa na atmosfera terrestre. Além disso, há uma série de gases de efeito estufa inteiramente de origem humana na atmosfera, como os halocarbonos e outras substâncias contendo cloro e bromo, tratados sob o Protocolo de Montreal. Além de (CO_2), (N_2O) e (CH_4), o Protocolo de Kyoto trata dos gases de efeito estufa hexafluoreto de enxofre (SF_6), hidrofluorcarbonos (HFCs) e perfluorocarbonos (PFCs). (IPCC, 2019).

A matriz energética mundial é predominantemente formada pelos recursos naturais não renováveis (IEA, 2018), o que traz grande preocupação para o futuro da humanidade, já que a escassez destes insumos certamente acarretará uma crise mundial sem precedentes. Em virtude disto, estamos vivenciando a corrida pela energização limpa e renovável; no entanto, este ainda é um longo caminho, o qual nem todos poderão se adaptar, a depender de sua demanda energética e disponibilidade de recursos em sua região.

Fontes Energéticas	
Renováveis	Não renováveis
Energia Eólica	Petróleo e derivados
Energia Hidráulica	Carvão mineral
Energia Solar	Gás natural
Biomassas	Nuclear

Tabela 5: Principais fontes energéticas renováveis e não renováveis. Fonte: Autor.

Dentro deste contexto, há de se avaliar a composição de cada matriz energética mundial e o impacto desta formação no que tange às emissões atmosféricas e o gasto energético associado ao setor de transporte, de modo a identificar em quais países a utilização de veículos elétricos pode se apresentar de forma benéfica ou não. Na avaliação em questão, esses aspectos serão tratados nas seguintes nações: Estados Unidos da América, Brasil, Alemanha, Japão, Índia e China.

A demanda energética somada desses seis países, no ano de 2019, superou 7.000.000.000 tep, sendo que 87,72% desse montante foi oriundo de derivados do petróleo, carvão mineral, gás natural e energia nuclear, segundo informações compiladas através dos dados apresentados pela IEA (2020) e pelo BEN (2020). Esse cenário retrata, de forma clara, o grau de dependência dos recursos naturais não renováveis. A Tabela 6, apresenta a composição energética do grupo em estudo. As condições evidenciadas associadas as ponderações de Hubbert, são fatores de grandes incertezas para o futuro da economia mundial.

Composição Energética (10³ tep)		
Tipo	Total	%
Petróleo e derivados	1.996.424	27,24%
Carvão Mineral	2.853.674	38,94%
Gás Natural	1.222.782	16,68%
Nuclear	346.360	4,73%
Outras Não renováveis	1.693	0,02%
Hídrica	184.707	2,52%
Solar	164.483	2,24%
Eólica	4.906	0,07%
Produtos da Cana	511.556	6,98%
Lenha	25.710	0,35%
Outras Renováveis	16.410	0,22%
Total	7.328.705	100,00%

Tabela 6: Composição energética por tipo de recurso. Fonte: IEA, 2021 e BEN, 2021.

Dentre os países do grupo, o Brasil se destaca por possuir o maior percentual entre todos de uso energético oriundo de energias renováveis, atingindo cerca de 45% de sua demanda (BEN, 2021). A vastidão de recursos naturais disponíveis no país é fundamental para a estruturação e desenvolvimento de seu planejamento energético. Ressalta-se que este valor é muito superior quando comparado aos demais países do grupo, como evidenciado através da Tabela 7. Posteriormente, será apresentada, de forma detalhada, a composição da matriz energética de cada país.

O formato atual de como se apresentam as matrizes energéticas são insustentáveis. Primeiramente, por serem recursos finitos, sua escassez está diretamente associada ao grau de dependência que a sociedade possui sobre eles. Com isto, a velocidade para o desenvolvimento de novos meios eficientes para o atendimento a demanda energética global prolonga também a existência desses recursos não renováveis em nosso planeta, além de minimizar os severos danos ambientais e a saúde humana decorrente da sua utilização.

Composição Energética %						
Tipo	EUA (2019)	Japão (2019)	China (2018)	Alemanha (2019)	Brasil (2021)	Índia (2018)
Energia Não renovável	91,87%	92,23%	90,59%	84,11%	51,64%	77,38%
Energia Renovável	8,13%	7,77%	9,41%	15,89%	48,36%	22,62%

Tabela 7: Composição energética por tipo de recurso para as seis nações avaliadas. Fonte: IEA, 2021 e BEN, 2022.

2.1. Brasil

Dentro do cenário apresentado na Tabela 7, é possível verificar que o Brasil possui uma das matrizes energéticas mais limpas do mundo, muito à frente dos demais países avaliados. Isso se dá, principalmente, pela alta disponibilidade de recursos renováveis, tais como os recursos hídricos em abundância, áreas vastas e adequadas para a instalação de usinas eólicas e solares, que possuem um enorme potencial ainda a ser explorado, assim como o cultivo e utilização de biomassas, além da lenha e do carvão vegetal. Dessa forma, todos os recursos citados vêm apresentando aumentos regulares na participação da composição energética nacional.

Segundo dados do Balanço Energético Nacional, BEN-2022, desenvolvido pelo Ministério de Minas e Energia, no ano de 2021 a demanda energética brasileira foi de 301.478.000 tep. No Gráfico 4 é possível constatar o percentual entregue por cada uma das fontes.

A participação dos derivados da cana-de-açúcar é bastante relevante, correspondendo a 16,40% da demanda nacional; isso decorre principalmente da transformação deste insumo para a formação dos biocombustíveis que são utilizados em larga escala, como abordado anteriormente. Ressalta-se também a vasta disponibilidade de recursos hídricos permite a geração energética através das hidroelétricas, no entanto, esse sistema apresenta algumas fragilidades, devido a

dependência dos períodos chuvosos, gerando oscilação na geração de energia em períodos de seca.

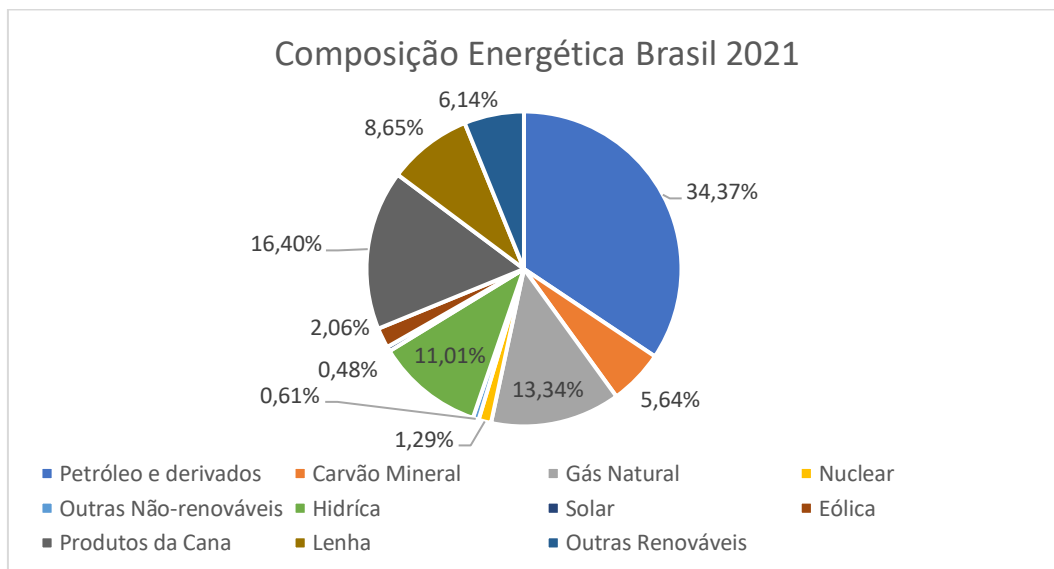


Gráfico 4: Composição energética Brasil 2021. Fonte: adaptado BEN, 2022.

Por sua vez, as usinas eólicas e solares estão em franca expansão, principalmente no nordeste do país e, em conjunto, apresentam aproximadamente 2% do total. Apesar dessa alta diversificação da matriz energética, a relevância do petróleo e seus derivados e gás natural ainda é significativa; mesmo assim há de se afirmar que o Brasil está no caminho certo para essa transição energética.

Dentro da demanda energética nacional, os recursos são transformados para diversas finalidades, seja para a geração de energia elétrica, para o uso nos transportes, para a produção industrial, para o uso residencial, comercial e demais finalidades conforme representadas pelo Gráfico 5.

Diante da realidade brasileira, percebe-se que a maior concentração de demanda energética se encontra no setor industrial e de transportes, sendo estes responsáveis por mais de 60% do consumo. Os setores de geração de energia elétrica e residencial complementam a formação da grande parte do consumo energético do Brasil (BEN, 2022).

Segundo o Plano Nacional de Energia 2050 – PNE-2050 (MME, 2020), o potencial energético anual oriundo de fontes renováveis estimado para o Brasil até o ano de 2050 é equivalente a 7.400.000.000 tep, valor aproximadamente cem vezes maior que a demanda energética no ano de 2020. O caminho para alcançar este potencial de forma eficiente ao aproveitamento desses recursos apresentará grandes desafios. Além dos altos investimentos que certamente serão requeridos, se apresentarão também as questões regulatórias e seus potenciais impactos socioambientais.

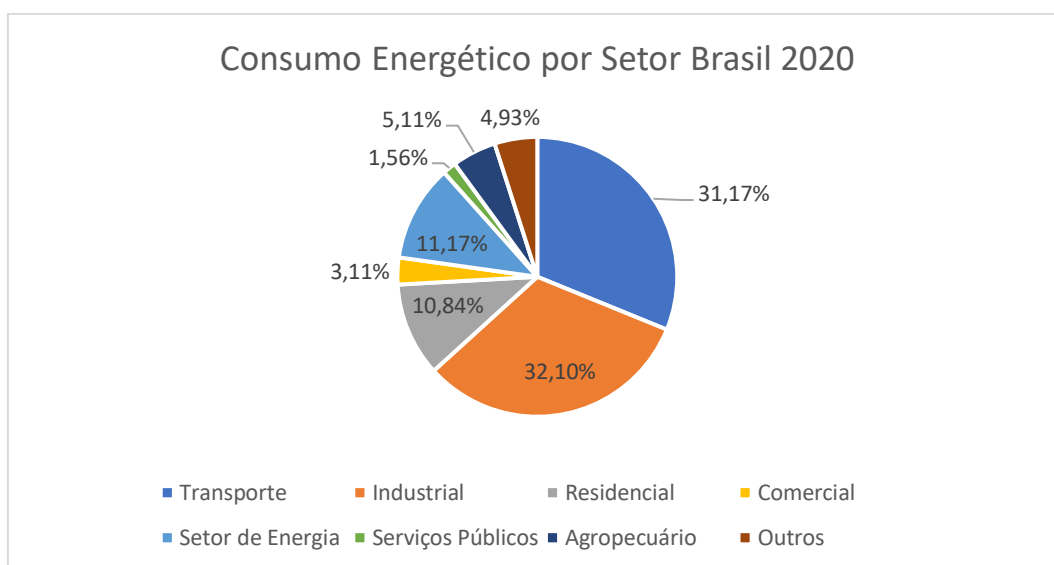


Gráfico 5: Consumo Energético por setor Brasil 2020. Fonte: adaptado BEN, 2021.

Neste cenário, a geração energética se dará majoritariamente através de usinas solares e eólicas *offshore*. Na projeção, as biomassas continuam em crescimento e se apresentando de forma considerável, com contribuição próxima a dos recursos naturais não renováveis conforme observado na Gráfico 6. Fator este primordial em relação à redução de emissões de poluentes atmosféricos, tendo em vista que a base energética nacional estará apoiada em fontes de energia renovável. A tríade solar-eólica-biomassa representa a oportunidade de desenvolvermos um futuro sustentável e eficiente, atendendo as demandas sociais, ambientais e econômicas.

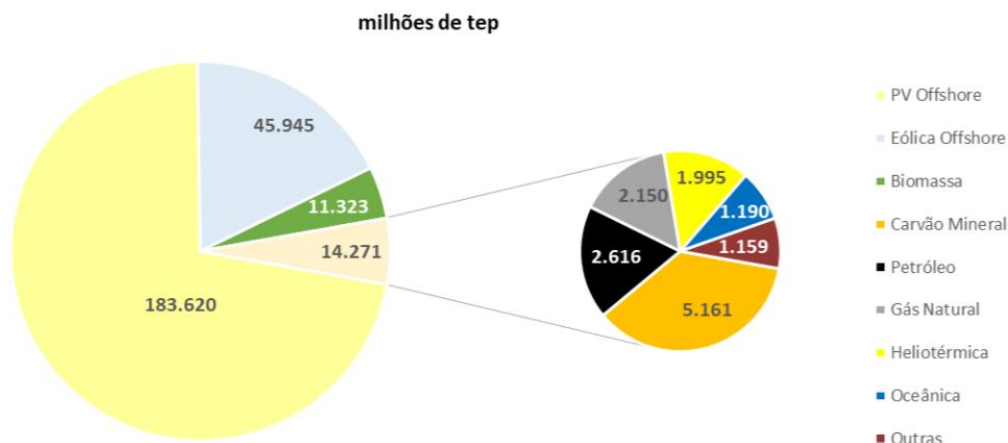


Gráfico 6: Potencial de geração energética Brasil 2050. Fonte: MME, PNE-2050, 2020.

É considerado nessa estimativa, além da grande expansão de aproveitamento dos recursos atualmente disponíveis, a intensificação de diversificação da matriz energética nacional, de modo a reduzir quaisquer possíveis fraquezas e dependências de algum determinado recurso, mantendo o patamar atual da composição energética entre fontes renováveis e não renováveis. Essa enorme expansão na geração permitirá que o Brasil, torne-se um grande exportador de energia, sendo grande parte dela “limpa”.

Pelo lado da demanda de petróleo, políticas para mitigar mudanças climáticas e poluição atmosférica podem contribuir para a desaceleração de seu crescimento, estimulando a substituição desta fonte, quando possível, por outras de menor impacto ambiental. Nesse sentido, destaca-se a inserção dos veículos híbridos e elétricos na frota mundial e a expansão competitiva da geração elétrica renovável (eólica, solar e biomassa). (MME – PNE-2050, 2020).

A questão energética é tema prioritário para todas as nações e, usualmente, está atrelada às políticas ambientais do país em questão e essa regulação é fundamental para direcionar as diretrizes estratégicas adotadas por cada país. As premissas estabelecidas são baseadas em acordos globais para a preservação das condições climáticas, de modo que as futuras gerações possam também usufruir dos recursos disponíveis atualmente.

No Brasil, ao longo das últimas décadas, as regulações ambientais vêm se apresentando cada vez mais restritivas, de modo a zelar e a proteger a sociedade civil, estabelecendo critérios rigorosos a serem atendidos, principalmente pelos grandes empreendimentos e indústrias, devido ao maior potencial de impacto ambiental por eles apresentado. Esses aspectos estão atrelados à estratégia de desenvolvimento sustentável, sendo ela vinculada à estruturação da matriz energética nacional.

Há de garantir o comprometimento em atender aos acordos internacionais firmados relativos à redução das emissões dos gases de efeito estufa sem que haja danos econômicos relevantes. A evolução econômica e a geração de renda são aspectos fundamentais para a criação de riquezas para o país, permitindo cada vez mais investimentos nas áreas ambientais para sua preservação e conservação. O equilíbrio entre esses temas é a chave para o sucesso para a propagação de uma política ambiental eficaz.

2.2.

Estados Unidos da América

Diferentemente do Brasil, a matriz energética norte-americana é altamente constituída por produtos derivados de recursos naturais não renováveis, possuindo 91,87% de sua composição oriunda desse tipo, advindo prioritariamente do petróleo e seus derivados, carvão mineral, gás natural e energia nuclear. As características geomorfológicas locais permitem e exigem que mudanças na composição energética ocorra, do contrário, os impactos decorrentes da poluição atmosférica acarretará desastres ambientais maiores, inclusive apresentando efeitos em escala global.

Segundo dados apresentados pela *International Energy Agency* (IEA, 2020), a demanda energética dos Estados Unidos da América no ano de 2019 foi de 2.200.788.000 tep, apresentando a segunda maior necessidade global, ficando abaixo apenas da China. A composição detalhada é apresentada na Gráfico 7.

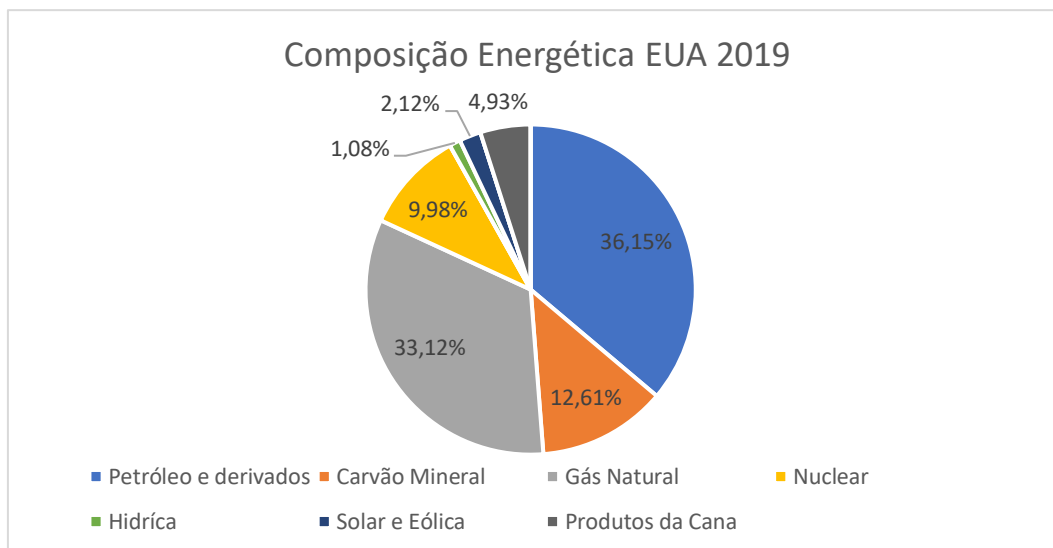


Gráfico 7: Composição energética Estados Unidos da América 2019. Fonte: adaptado IEA, 2020.

O conjunto da energia gerada pelo petróleo e seus derivados junto ao gás natural representa aproximadamente 70% da demanda norte-americana. Isso traz consigo um grande risco ao país e à economia mundial, diante da extrema dependência sobre esses recursos, certo de que estes são finitos.

A *U.S. Energy Information Administration* (2022) demonstrou que a produção recorde de gás natural se deu no ano de 2019, atingindo o montante de 961 milhões de m³. Já no ano de 2020 foi atingido o recorde da produção energética por meio de fontes solares e eólicas. A mesma agência apresentou, no ano de 2020, que mais de 90% dos recursos derivados do petróleo foram destinados para o setor de transportes, demonstrando assim a relevância e a dependência deste insumo para a cadeia de mobilidade norte-americana.

Diante da demanda energética norte-americana, percebe-se que a maior concentração de demanda energética se encontra no setor industrial. Já os setores de transportes e geração de energia elétrica apresentam valores muito próximos de consumo energético. Apenas estes três setores são responsáveis por mais de 80% da demanda norte-americana (IEA, 2021). Os setores comercial e residencial complementam a formação da grande parte do consumo energético dos Estados Unidos da América, conforme representado pela Gráfico 8.

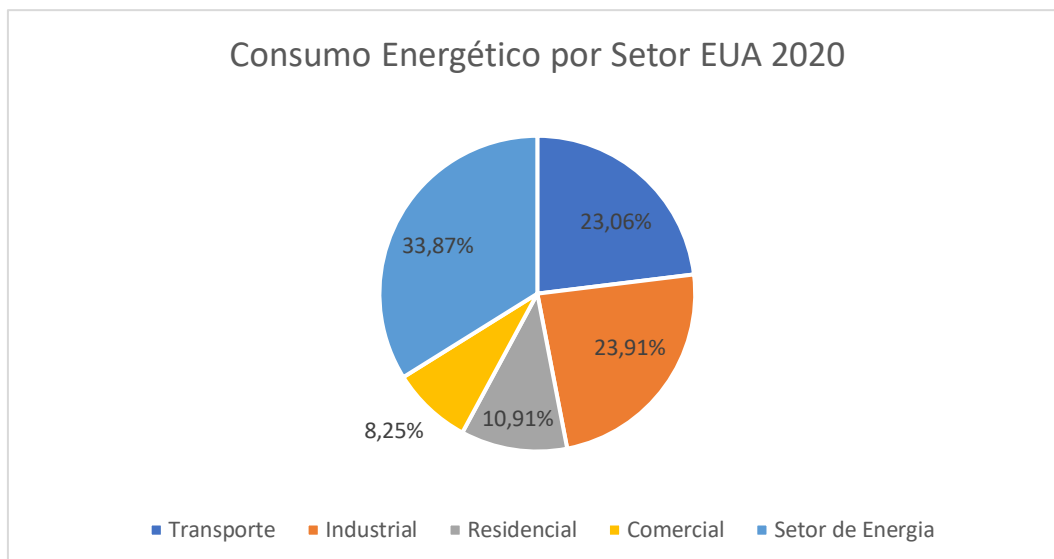


Gráfico 8: Consumo Energética Estados Unidos da América 2020. Fonte: adaptado IEA, 2021.

Ao longo de décadas, diversas disputas foram travadas entre as principais nações produtoras e consumidoras de petróleo, acarretando grandes desastres humanitários devido a essas batalhas. A necessidade por este recurso e o poder atribuído aos detentores do petróleo e seus derivados colocaram os Estados Unidos da América no centro dos principais eventos conflituosos, sempre como parte interessada em aumentar suas reservas.

No entanto, em anos mais recentes, principalmente devido ao aumento das preocupações com as questões ambientais e a clara noção de finitude das reservas petroleiras, a matriz energética norte-americana inicia um processo de busca por potencializar os recursos oriundos de outras fontes energéticas, certamente, renováveis.

Dentro deste cenário, o *Center for Sustainable Systems* da Universidade de Michigan (2022), apresentou as principais alternativas potenciais, dentre elas, destacando a energia eólica, que pode ter sua capacidade expandida em aproximadamente 100 vezes. Dentre as biomassas, é projetado que a produção diária de etanol combustível atinja 189.270 m³ no ano de 2050. Nesse sentido, a energia geotérmica apresenta potencial para aumentar em ao menos 3 vezes sua capacidade atual de geração de energia até 2050.

2.3. Alemanha

A Alemanha, por sua vez, apresentou a demanda energética de 303.636.000 toneladas equivalentes de petróleo, segundo dados apontados pela *International Energy Agency* (IEA, 2020) para a referência do ano de 2019. Sendo que deste total, acima de 84,0% foi oriundo de fontes energéticas não renováveis, sendo os principais: o petróleo e seus derivados, o carvão mineral, o gás natural e fontes nucleares. A Alemanha, assim como a grande maioria das principais nações globais, também se apresenta altamente dependente de recursos naturais e promotora do aumento da poluição global. O país, em virtude da necessidade de diversificação de suas fontes energéticas, vem implementando grandes mudanças nas últimas décadas, centrando seus investimentos na cadeia de geração eólica, nos sistemas fotovoltaicos e nas biomassas.

Dentre os países membros da União Europeia, se apresenta como a pioneira nos movimentos de transição energética. Isto se dá principalmente devido à política estabelecida pelo *German Renewable Energy Act*, o qual apresenta os meios e objetivos para incrementar o suprimento energético por fontes renováveis. Essa evolução pode ser constada através da Gráfico 9, o qual apresenta os dados da composição energética alemã por cada tipo-fonte no ano de 2019.

Segundo o *Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz*, equivalente ao Ministério Federal de Assuntos Econômicos e Ação Climática alemão, o plano estabelecido através do *German Renewable Energy Act* vem evoluindo de forma exitosa, atingindo parte do objetivo de transição energética em um período 35,0% menor que o projetado.

Os combustíveis fósseis têm como principal usuário o setor de transportes. Este por sua vez é responsável pelo consumo de aproximadamente 18% da demanda energética alemã (IEA, 2020). No entanto, esse cenário tende a mudar em um futuro próximo. As políticas alemãs vêm incentivando a migração para a utilização dos biocombustíveis e dos veículos elétricos, a fim de mitigar os efeitos ambientais.

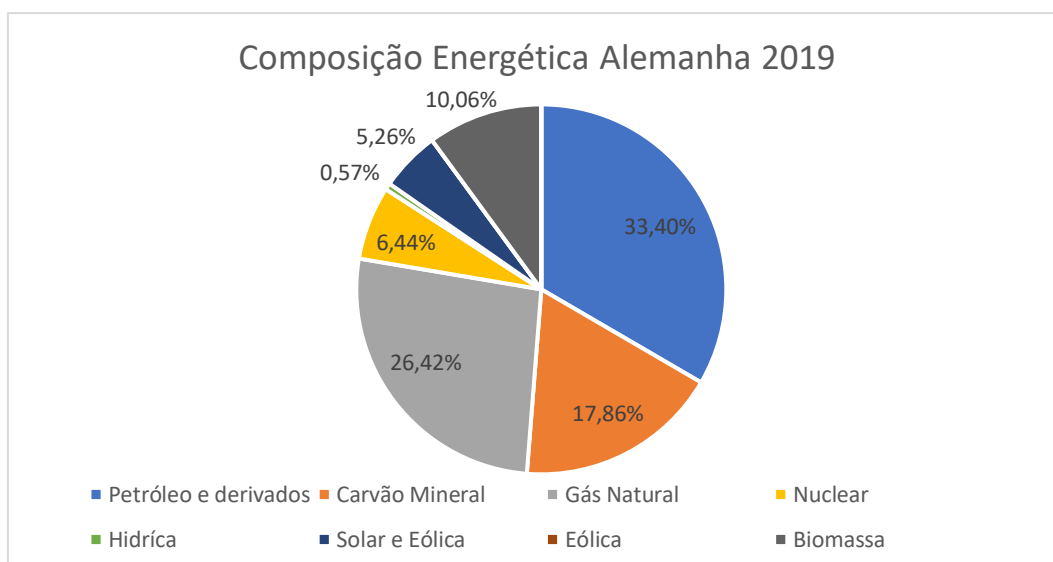


Gráfico 9: Composição energética Alemanha 2019. Fonte: adaptado IEA, 2020.

Esse movimento é fundamental para a estratégia alemã, visando a reduzir sua dependência dos derivados do petróleo e de seus respectivos fornecedores no mercado global. Essa é uma posição importante, principalmente pelo fato de a Alemanha, quando comparada aos demais países, possuir uma pequena parcela de reservas petrolíferas mundiais.

2.4. China

A China, conforme dados apresentados pelo *International Energy Agency* (IEA, 2020) no ano de 2018, foi a detentora da maior demanda energética mundial com aproximadamente 3.197.811.000 milhões de tep. Assim como as principais potências mundiais, a fonte energética concentrou-se em fontes não renováveis, sendo acima de 90% oriundos desses recursos. A China diferencia-se do restante do mundo devido ao principal insumo energético ser o carvão mineral, que representa mais de 60% da matriz energética local. Além deste, o petróleo e seus derivados, bem como o gás natural, possuem relevância significativa na composição chinesa.

A China é a principal produtora e consumidora de carvão mineral em nível mundial, e tal aspecto se deve majoritariamente ao abastecimento de termoeletricas e das indústrias de metais; no entanto, isso acarreta grandes impactos ambientais, fazendo que o país seja o maior poluidor na esfera global, sendo o responsável pelas maiores emissões de gases de efeito estufa. Isso tanto afeta diretamente a população local, com altos índices de problemas respiratórios, como ao restante do mundo com a destruição de partes da camada de ozônio, promovendo maiores desequilíbrios ambientais.

Apesar dos crescentes e volumosos investimentos na geração de energia renovável e limpa, a demanda energética chinesa é extremamente alta devido aos altos níveis produtivos da indústria local, que fornece recursos para toda a cadeia global. Isso traz consigo um grande desafio para as questões sobre o combate aos impactos climáticos. No ritmo atual, à medida que ocorre o aumento populacional mundial, maior será a demanda industrial na China e, conseqüentemente, maior será o impacto ambiental. A transição energética de uma nação é um processo que vai demandar algumas décadas até ser totalmente implementada.

O setor de transportes contribuiu com o consumo de aproximadamente 10% da demanda da matriz energética chinesa no ano de 2018 (IEA, 2020). A formação da composição energética local, neste ano, é apresentada de forma detalhada na Gráfico 10. É importante ressaltar, como previamente descrito, a importância do carvão mineral para a matriz energética chinesa, e a baixa prevalência dos recursos oriundos de fontes renováveis.

Apesar das necessidades de atender as grandes demandas industriais mundiais, a China possui um vasto território para aumentar sua capacidade energética proveniente de fontes renováveis. O cultivo de insumos para biomassas, e a expansão das fazendas eólicas e solares, que podem ser instaladas em localidades pouco povoadas do país, possibilita o desenvolvimento das novas regiões e descentraliza a poluição nos grandes centros.

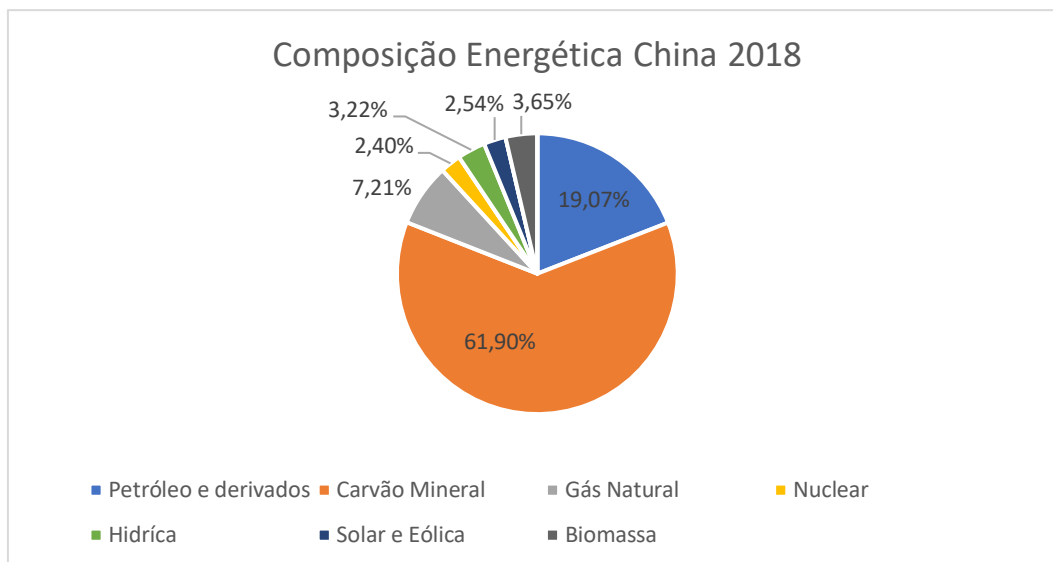


Gráfico 10: Composição energética China 2018. Fonte: adaptado IEA, 2020.

2.5. Japão

O Japão segue a linha das principais potências mundiais. Possuindo a maior parte da sua matriz energética centrada em fontes não renováveis, estando ela centralizada principalmente no petróleo e seus derivados, no carvão mineral e no gás natural; estes recursos somados representam mais de 88% da demanda energética japonesa.

Dentre os países avaliados neste estudo, o Japão é o que possui a composição energética mais poluente. Ainda segundo dados apresentados pela *International Energy Agency* (IEA, 2020), a demanda energética do Japão, no ano de 2019, foi de 419.083.000 tep, conforme detalhamento apresentado na Gráfico 11.

O Japão apresentou-se na década de 1950 como um dos pioneiros na geração energética a partir da energia nuclear. No entanto, graves eventos e desastres, frearam essa evolução. Atualmente, apenas 15% das usinas nucleares estão em pleno funcionamento. Este percentual tende a se elevar, assim como a participação da energia nuclear na composição japonesa na próxima década, em detrimento ao petróleo e seus derivados.

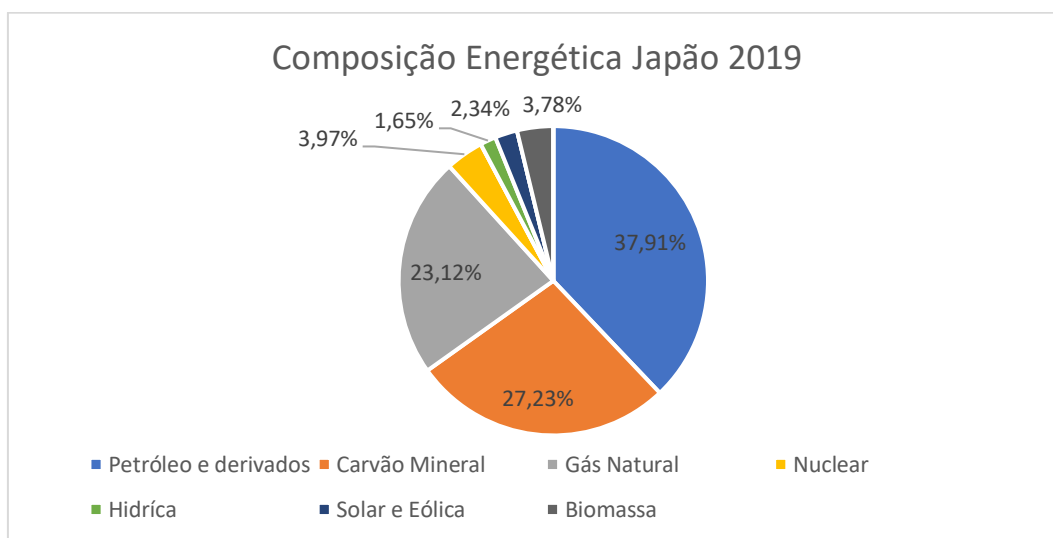


Gráfico 11: Composição energética Japão 2019. Fonte: adaptado IEA, 2020.

A estratégia japonesa aproxima-se bastante do objetivo traçado pela Alemanha: focando os investimentos na geração energética através de fontes renováveis via unidades de painéis solares, usinas eólicas *off-shore*, este se dá principalmente pelo grande potencial eólico nas costas do país e na produção de biocombustíveis.

O segmento de transportes foi responsável por 17% da demanda energética japonesa (IEA, 2020). O tema da mobilidade é altamente relevante aos aspectos relativos à matriz energética tendo em vista a grande demanda e impacto que este setor origina, seja nas questões ambientais, com a emissão de poluentes atmosféricos, seja no consumo por transporte. Diante disto, aumentar a eficiência energética e ambiental desses meios deve ser tratado de forma prioritária para a redução dos impactos ambientais de forma geral.

2.6. Índia

A Índia desponta atualmente como um dos principais países em desenvolvimento, e isso se deve, inicialmente, ao aspecto populacional. O país

possui a segunda maior população mundial e realiza grandes investimentos no desenvolvimento de novas tecnologias. Sua rápida ascensão e crescimento econômico, nos últimos anos, colocam o país em um ponto de destaque na economia mundial.

Como na maioria dos países em ascensão, a Índia enfrenta diversos desafios sociais e de infraestrutura ao longo de seu vasto território. O acesso a recursos básicos como eletricidade, alimentação adequada, tratamento médico, água potável e tratamento de esgoto ainda são limitados aos grandes centros, e demonstra estruturas bastante precárias no restante do país, fator este que se apresenta como uma grande oportunidade de investimentos e que vem atraindo diversos interessados ao redor do globo.

Segundo dados do Banco Mundial (2020), entre os anos de 2009 e 2019, o PIB *per capita* indiano aumentou na ordem de aproximadamente 70%; neste período, se comparado a 1999, o aumento de receitas foi superior a 265%. A tendência é a continuidade do incremento financeiro *per capita* do povo indiano, fato que afetará diretamente a demanda energética do país. Com maiores possibilidade financeiras, maior será o acesso aos recursos básicos, maior possibilidade de aquisição de bens de consumo, maior demanda por sistemas de mobilidade.

O cenário atual, conforme apresentado pela *International Energy Agency* (IEA, 2020) em 2018, indica que a demanda energética da Índia atingiu o montante de 919.771.000 tep. Sendo que, deste total, acima de 77% é oriundo de fontes não renováveis, sendo os principais o carvão mineral, o petróleo e seus derivados. Em outro aspecto, desta vez positivo, é o fato de que a participação de biomassas na matriz energética indiana apresenta um valor bastante expressivo, sendo este superior a 20% da composição local, como pode ser verificado com detalhes através do Gráfico 12.

No que tange ao setor de transportes, este é responsável por 11% da demanda energética nacional (IEA, 2020). O consumo foi correspondente a 103.767.000 tep no ano de 2018. Com o constante desenvolvimento da localidade, e incremento nas receitas do povo indiano, este montante absoluto tende a crescer substancialmente nas próximas décadas.

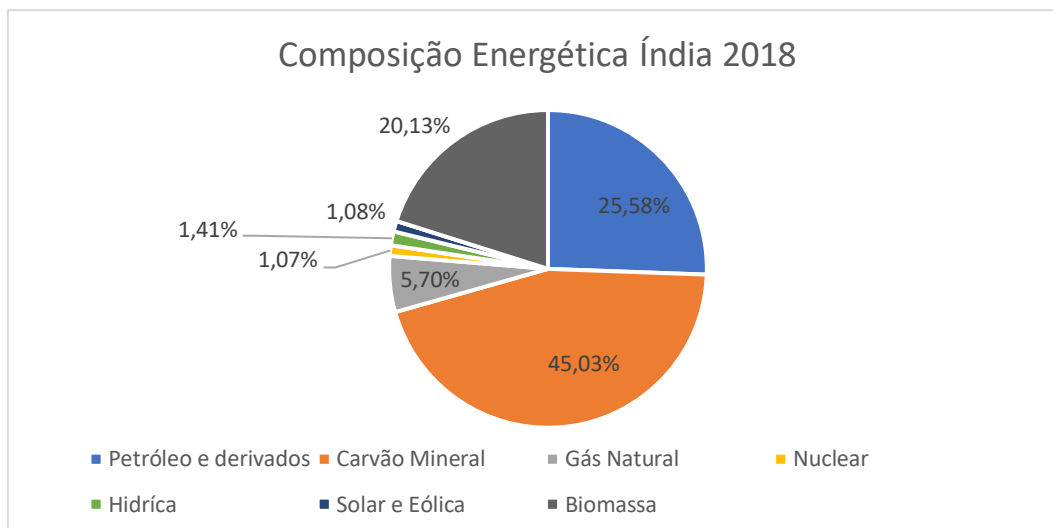


Gráfico 12: Composição energética Índia 2018. Fonte: adaptado IEA, 2020.

Segundo dados do Ministério de Energia Novas e Renováveis do Governo da Índia (2021), o país aumentou sua capacidade de geração energética oriunda de fontes renováveis em 286% nos últimos sete anos. Dentro deste cenário, e neste mesmo período, a matriz solar cresceu em aproximadamente 18 vezes. A prospecção é de aumentos contínuos e significativos até o ano de 2030.

Para lidar com este incremento, o país busca atingir os objetivos estabelecidos pelo Acordo de Paris para o ciclo de 2021-2030. Desse modo, a Índia mantém-se em uma crescente para se tornar referência mundial na geração energética a partir de energia solar. Segundo o último reporte anual emitido pelo Ministério de Energia Novas e Renováveis do Governo da Índia (2021) com ano base 2020-2021, o programa PM-KUSUM, representa uma das maiores iniciativas mundiais na utilização de fazendas solares, sendo essa energia voltada para a utilização na agricultura local. Além deste, há diversos subsídios concedidos a empresas e residências para instalarem sistemas de painéis solares, além da intenção de atendimento a três localidades apenas com o fornecimento de energias renováveis nos próximos meses.

Diante do apresentado, apesar da necessidade de sua estruturação, a Índia vem caminhando a passos largos para se tornar uma das principais potências mundiais, quando se trata de energia renovável, o que traz consigo a redução na dependência de recursos altamente poluentes, como o carvão mineral e o petróleo

e seus derivados, deixando o caminho livre para um desenvolvimento mais sustentável.

3 Matrizes Elétricas

Os componentes que constituem as matrizes energéticas podem ser transformados de maneiras distintas, entre elas a possibilidade de serem aplicadas para a geração de energia elétrica. Portanto, a formação de uma matriz elétrica está diretamente associada à formação das matrizes energéticas. Segundo a Empresa de Pesquisa Energética (EPE), a definição de matriz elétrica é representada por: “a matriz elétrica é formada pelo conjunto de fontes disponíveis apenas para a geração de energia elétrica em um país, estado ou no mundo”.

Sendo assim, o percentual de cada uma das fontes que compõem determinada matriz energética, a qual é direcionada para ser transformada em energia elétrica, influencia diretamente a avaliação ambiental de uma matriz elétrica, podendo ela ser mais ou menos poluente conforme sua composição.

Em países nos quais a geração elétrica é principalmente oriunda de recursos naturais esgotáveis – como o carvão mineral, o gás natural, o petróleo e seus derivados –, esses devem apresentar um cenário desfavorável quando da utilização de veículos elétricos. Desta forma, para o abastecimento deste tipo de veículo, haverá a ocorrência de grande quantidade de poluentes atmosféricos em sua forma indireta e, assim, contrária às aspirações e princípios utilizados na concepção para este tipo de transporte.

Por outro lado, em países onde a produção da eletricidade é advinda de meios naturais, renováveis e sustentáveis – como as fontes hídricas, eólicas, solares e biomassas – é possível que apresentem resultados positivos no aspecto ambiental para esse tipo de mobilidade eletrificada, pois a geração elétrica será dada de forma limpa e a alimentação deste tipo de veículo impactará menos o meio ambiente do que os veículos movidos a gasolina e diesel.

A demanda elétrica somada dos seis países, no ano de 2019, superou a 15.000.000 GWh, onde praticamente metade deste montante foi oriundo da queima

do carvão mineral, sendo essa a fonte com a maior emissão de poluentes, comparada às demais origens avaliadas (BEN, 2021; IEA, 2020).

Tal cenário retrata, de forma crítica, o grau de dependência dos recursos naturais não renováveis que, juntos, foram responsáveis por mais de 70% da geração elétrica dos seis países apresentados neste estudo. A Tabela 8, apresenta a composição da matriz elétrica do grupo em estudo.

Matriz Elétrica (GWh)		
Tipo	Total (GWh)	%
Petróleo e seus derivados	120.161	0,76%
Carvão Mineral	7.571.734	48,18%
Gás Natural	2.448.394	15,58%
Nuclear	1.393.010	8,86%
Hídrica	2.293.079	14,59%
Solar	495.380	3,15%
Eólica	962.457	6,12%
Biomassas	317.811	2,02%
Resíduos	70.891	0,45%
Outras	43.668	0,28%
Total	15.716.585	100,00%

Tabela 8: Composição energética dos países avaliados por tipo de recurso. Fonte: IEA, 2021 e BEN, 2021.

No que diz respeito à composição da matriz elétrica das nações em estudo, é possível observar na Tabela 9 que o Brasil, assim como na composição de sua matriz energética, possui o maior percentual entre os países desta análise no que tange à geração elétrica limpa, com mais de 80% de sua geração elétrica proveniente de fontes renováveis.

Ainda tomando a Tabela 9 como base para avaliação, pode-se notar que, com exceção dos Estados Unidos da América, todos os demais países possuem acima de 20% da sua produção elétrica oriunda de fontes renováveis. Destaca-se neste cenário a Alemanha, que está próxima de alcançar metade de sua geração elétrica a partir de fontes sustentáveis.

Este cenário não deve ser tomado como o principal fator para a decisão da viabilidade e eficiência ambiental dos meios de transporte eletrificados. Entretanto, esses dados apresentam alguns indicativos que permitem explorar mais a fundo a possibilidade de um uso ecológico dos veículos elétricos.

Composição da Matriz Elétrica %						
Tipo	EUA (2019)	Japão (2019)	China (2019)	Alemanha (2019)	Brasil (2019)	Índia (2019)
Energia Não renovável	81,90%	76,94%	72,73%	58,25%	17,10%	78,91%
Energia Renovável	18,10%	23,06%	27,27%	41,75%	82,90%	21,09%

Tabela 9: Composição da Matriz Elétrica por tipo de recurso para as seis nações avaliadas. Fonte: IEA, 2021 e BEN, 2021.

3.1. Brasil

Dentro do cenário apresentado na Tabela 9, é possível verificar que o Brasil possui uma das matrizes elétricas mais limpas do mundo. A demanda elétrica nacional é de 626.301GWh, conforme apresentado no Balanço Energético Nacional. As fontes renováveis representam mais de 80% da composição da geração de energia elétrica.

Entretanto, apesar de a composição brasileira se apresentar bem desenvolvida no aspecto ambiental, percebe-se a grande dependência dos recursos hídricos. Essa fonte é responsável por aproximadamente 65% da geração elétrica nacional. Em períodos de estiagem, a geração por esta fonte é reduzida significativamente, quando é necessário migrar para outras fontes geradoras do sistema nacional de energia, sendo essas usualmente mais poluidoras.

As demais fontes renováveis são responsáveis apenas por 18% da produção elétrica, e se destacam as fontes eólicas, as biomassas e as solares. A composição detalhada da matriz elétrica é apresentada no Gráfico 13, e o restante da geração elétrica é oriundo das fontes não renováveis.

A composição elétrica nacional apresenta diversos desafios a serem superados no que diz respeito à diversificação de suas fontes. Entretanto, dados apresentados pela ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica em 2021, demonstram que o crescimento na geração elétrica através de pequenas centrais solares foi superior a 2.000% nos últimos três anos. Com a aplicação de incentivos fiscais, apenas em agosto de 2021, iniciou-se a operação em usina solares com capacidade de produção de aproximadamente 200MW.

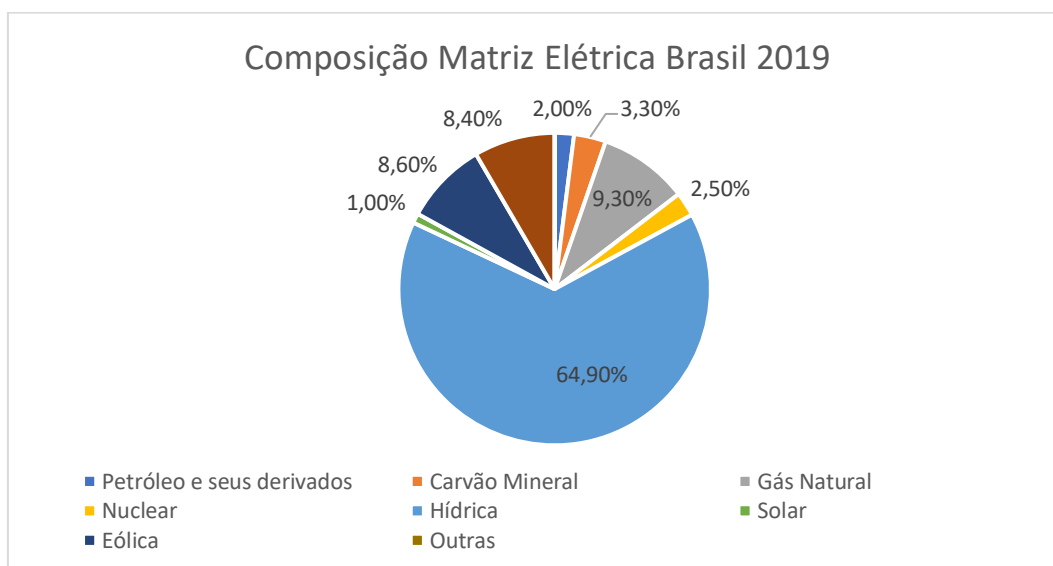


Gráfico 13: Composição elétrica Brasil 2019. Fonte: BEN, 2021.

A diversificação energética será primordial para o sucesso de qualquer potência mundial em um futuro próximo. Dentro deste cenário, há grandes expectativas quanto ao Brasil, pois a vastidão de seu território, associada às características naturais e o enorme potencial energético ainda a ser explorado, trazem a esta nação a possibilidade de estar à frente no que diz respeito ao desenvolvimento energético.

Os mais de 8.500 km de extensão da zona costeira brasileira são propícios para a instalação de usinas eólicas *on-shore*. O princípio de funcionamento destas unidades é de baixa complexibilidade ambiental se comparada aos impactos provocados pelas usinas hidrelétricas.

Segundo a holding Iberdrola (2022), operadora do grupo Neoenergia Brasil, os sistemas eólicos “são projetados e construídos uma série de elementos capazes de transformar primeiro a energia cinética do vento em energia elétrica, para logo convertê-la em eletricidade apta para consumo, e finalmente integrá-la na rede de distribuição.”

Os sistemas eólicos apresentaram incríveis evoluções nos últimos 20 anos. Segundo a Associação Europeia de Energia Eólica *WindEurope* (2021), a potência unitária de uma turbina eólica no início dos anos 2000 era próxima a 0,66MW. Já em 2020, a potência deste sistema se aproxima de 4,5MW, um resultado superior a 680% de crescimento, trazendo maior eficiência ao processo e redução do custo final. Deste modo, a viabilização de projetos de usinas solares vem se tornando mais atrativo ao mercado investidor.

Já as usinas eólicas *offshore*, tiveram recentemente a autorização legal para o início de sua implementação em âmbito nacional. Conforme decreto nº10.946/2022, publicado em 25 de janeiro de 2022, permite a exploração de águas sobre o domínio do Governo Federal para instalação de usinas eólicas *offshore*. Tal decreto, entrou em vigor a partir de 15 de junho de 2022.

Dispõe sobre a cessão de uso de espaços físicos e o aproveitamento dos recursos naturais em águas interiores de domínio da União, no mar territorial, na zona econômica exclusiva e na plataforma continental para a geração de energia elétrica a partir de empreendimento *offshore* (BRASIL, 2022).

A incidência dos raios solares no país é altamente atrativa para a instalação de sistemas de geração de energia através dos painéis fotovoltaicos. Esse recurso vem apresentando aumento gradual de sua exploração nos últimos anos, atingindo tanto a iniciativa privada quanto o público comum. A simplicidade de implementação do sistema permite a fácil instalação dos painéis em diversos locais. É certo também que as maiores usinas solares estão situadas próximas ao nordeste do país devido a maior incidência solar.

Assim como as usinas eólicas *offshore*, a geração própria de energia solar também passou a ser regulamentada em 2022, por meio da Lei nº14.300/2022, garantindo a todos os usuários que implementarem essas instalações até o ano de 2023 estejam sujeitos a esta regulamentação e sem alterações até o ano de 2045. Segundo a Associação Brasileira de Energia Solar Fotovoltaica (Absolar), a potência operacional solar superou 14GW, sendo esta superior à potência instalada na usina de Itaipu (14GW).

Dado o cenário favorável, a tendência para expansão verde do setor energético brasileiro é positiva, principalmente em virtude da vasta quantidade de opções aplicáveis em território nacional. A independência energética é fundamental para a prosperidade e segurança de qualquer nação. Além disto, suporta o desenvolvimento geral dos demais setores da sociedade.

3.2. Estados Unidos da América

A demanda elétrica norte-americana é a segunda maior do mundo e sua composição é altamente proveniente de fontes não renováveis como constatado nos dados apresentados na Tabela 9. No ano de 2019, a demanda elétrica dos Estados Unidos da América foi de 4.361.950 GWh. Deste montante, mais de 61% foram originados a partir da geração elétrica através de carvão mineral e gás natural, apresentando assim um alto grau de dependência desses recursos e que indicaram alto grau de poluição em sua geração.

As fontes renováveis colaboram com aproximadamente 18% da geração de energia, na qual o uso de fontes hídricas e eólicas predominam essa composição. O restante da composição dos Estados Unidos está diversificado em fontes nucleares, no petróleo e seus derivados, nas biomassas e nas fontes solares. O detalhamento das contribuições de cada fonte é apresentado no Gráfico 14.

Segundo projeções desenvolvidas pela U.S. *Energy Information Administration* (2022), a matriz elétrica norte americana apresentará grande evolução até o ano de 2050. A geração elétrica esperada para esse período é de aproximadamente 5.300.000 GWh, sendo 21,5% maior que o atual. A previsão

indica que a influência das fontes renováveis apresentará grande alta, sendo responsável por 44% da composição da matriz elétrica dos Estados Unidos da América, onde as fontes solar e eólica predominarão. O Gráfico 15 apresenta com detalhes a evolução energética.

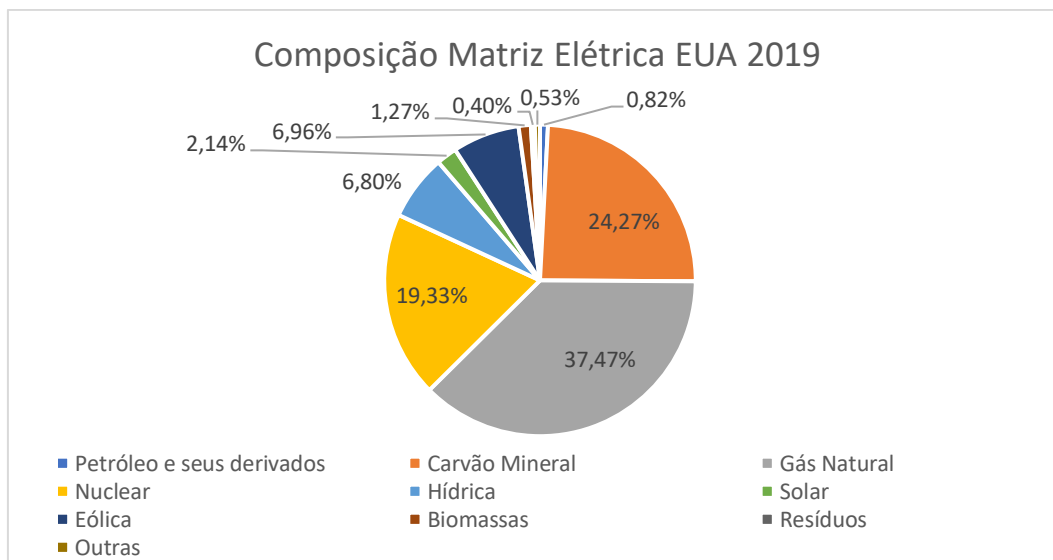


Gráfico 14: Composição elétrica Estados Unidos da América 2019. Fonte: adaptado IEA, 2020.

Ainda segundo os dados apresentados neste estudo, o incremento da participação da energia solar é altamente significativo e ambicioso, quase triplicando sua contribuição para a geração energética limpa. A tendência é de alta também para a geração elétrica através das fontes eólicas. No entanto, é esperada menor relevância na composição se comparada ao cenário atual, apresentando ligeira queda de 43% para 31% na participação energética norte-americana. As demais fontes renováveis, por sua vez, não apresentam evoluções significativas para os próximos anos, e apresentam uma condição de estabilidade.

Comparando o cenário atual com a expectativa futura, pode-se observar que o uso do carvão mineral e da energia nuclear vão apresentar quedas significantes na sua relevância para a matriz elétrica, fator importante para a transição energética “verde”. Esta redução do uso de carvão mineral é de fundamental importância no aspecto ambiental, visto que esta é a fonte com maior potencial de emissões atmosféricas.

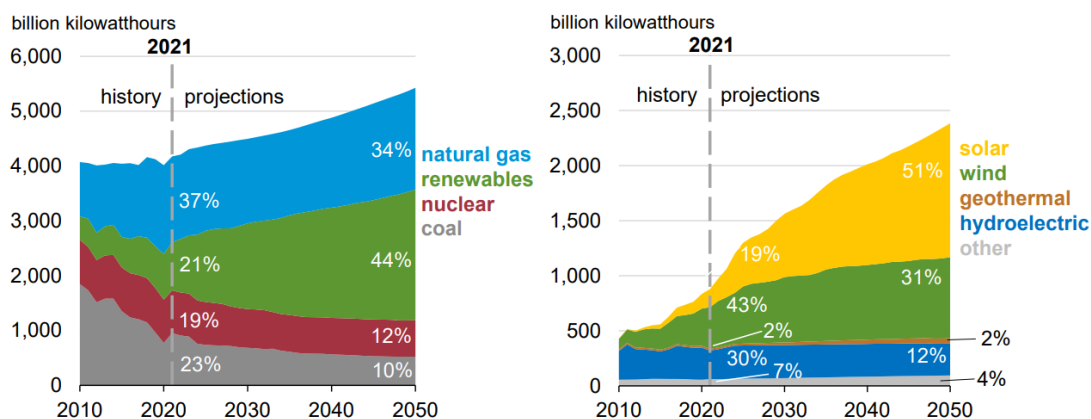


Gráfico 15: Composição elétrica Estados Unidos da América (a) e participação das renováveis (b) previsão para 2050. Fonte: EIA, 2022.

3.3. Alemanha

Em 2019 a Alemanha apresentou uma demanda elétrica de 618.223GWh. Dentre os países em avaliação neste estudo, a Alemanha possui percentualmente, a segunda maior participação das fontes renováveis na sua geração energética, sendo esta responsável por aproximadamente 41% do montante total. As fontes não renováveis ainda são a principal fonte de geração elétrica alemã. Neste cenário, o carvão mineral, o gás natural e a energia nuclear são os que possuem maior participação, e não apenas isso, também são as fontes mais nocivas ao meio ambiente, motivo que justifica a aceleração da transição energética local.

Entre as fontes renováveis, o resultado apresentado pelas fontes eólicas se sobressai sobre as demais, sendo responsável por praticamente metade da geração elétrica alemã oriunda de fontes verdes. Outras fontes tais como as biomassas, hídricas e solares também são representativas nesta composição, no entanto, em menor escala. O Gráfico 16 apresenta detalhadamente a contribuição de cada fonte energética para a produção de energia elétrica na Alemanha.

Ao longo das últimas décadas, a Alemanha busca tornar-se referência mundial na geração elétrica sustentável. Segundo a agência federal alemã *Auswärtiges Amt* (AA), o programa *Energiewende* é o formato estratégico proposto para o desenvolvimento de geração elétrica de forma segura, ambientalmente amigável e economicamente bem-sucedida.

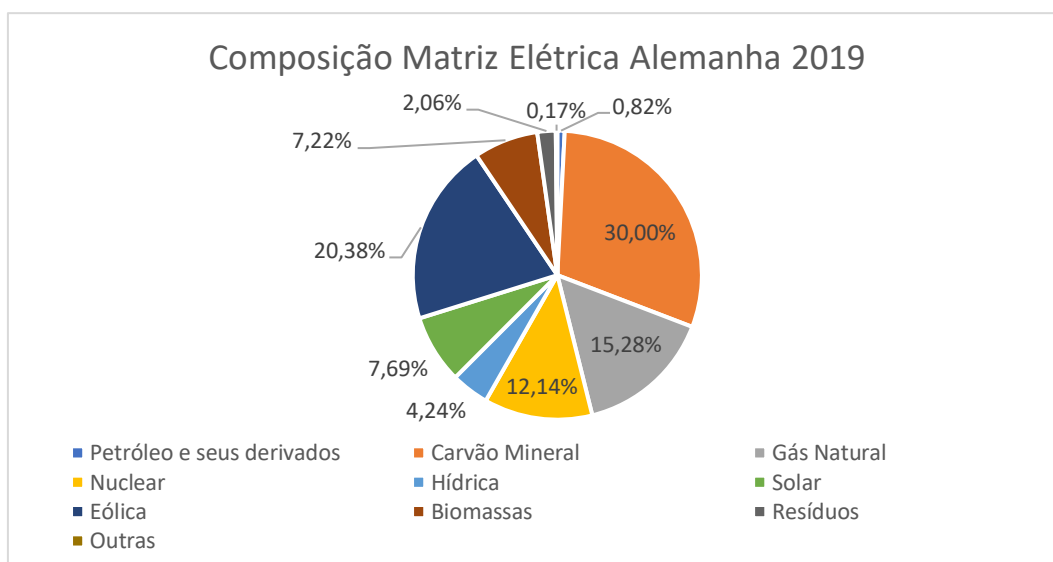


Gráfico 16: Composição elétrica Alemanha 2019. Fonte: IEA, 2021.

A política estabelecida é fundamentada nos seguintes princípios: medidas governamentais para incentivar a geração de energia elétrica renovável, associada com a eficiência energética, através da modernização de processos e instalações, a descentralização do mercado de energia elétrica e a substituição das fontes nucleares de forma definitiva.

Um dos objetivos do programa é que, até o ano de 2030, metade da energia elétrica consumida na Alemanha deverá ser provida por fontes eólicas e solares. Além disto, o *Energiwende* ainda objetiva a redução das emissões dos gases de efeito estufa, reduzir a dependência energética alemã das importações de petróleo e gás natural e, com isto, incentivar investimentos em geração elétrica sustentável. Dentre as premissas estabelecidas para o sucesso destas iniciativas, inclui-se forte investimento nos sistemas das linhas de transmissão elétrica.

3.4. China

Por sua vez a China, que é a maior consumidora mundial de energia elétrica, conforme dados apresentados pelo *International Energy Agency* (IEA, 2020), demonstrou um consumo de 7.519.344 GWh no ano de 2019, resultado

ligeiramente inferior ao somatório de todos os demais países envolvidos no estudo. A origem desta energia vem, principalmente, do uso do carvão mineral, fator preocupante diante do espectro ecológico.

Por se tratar de uma nação ainda em desenvolvimento e seguindo as projeções atuais, a demanda elétrica chinesa ainda aumentará de forma significativa nas próximas décadas, o que volta a atenção mundial para as altas emissões atmosféricas lançadas ao ambiente por esse país.

Segundo anunciado pelo presidente chinês Xi Jinping, em setembro de 2020, a China “objetiva atingir o pico de emissões de CO_2 antes do ano de 2030 e atingir a neutralidade de carbono até 2060”. Diante de sua presença no cenário mundial, e por justamente ser o maior consumidor de energia elétrica e maior emissor de poluentes atmosféricos, qualquer esforço feito pela China para reduzir as emissões atmosféricas será fundamental para conter o avanço dos impactos ambientais em escala global.

O Conselho de Energia Elétrica Chinês (2020) registrou que 74,7% do montante total de energia elétrica consumida no país é oriundo de processos de manufatura de produtos. Na sequência, apresentando 19,7% do consumo há os sistemas de produção e abastecimento de água, energia, gás e sistema de aquecimento. O restante da energia consumida é destinado ao ramo da mineração.

As fontes renováveis já apresentam aproximadamente 27% da geração elétrica chinesa, índice que vem evoluindo ao longo desta década. O principal recurso das fontes renováveis na China são os recursos hídricos, que são transformados em energia elétrica através das usinas hidrelétricas e que colaboram com aproximadamente 17% da geração elétrica local. O Brasil e a China são, atualmente, os países que dispõem das usinas hidrelétricas de maior capacidade instaladas em escala mundial.

Segundo a Sunwise (2022), a China concentra as usinas de Três Gargantas, *Baihetan* e *Xiloudou*, respectivamente a 1^a, 2^a e 4^a maiores usinas, enquanto o Brasil dispõe de Itaipu – em conjunto com o Paraguai e Belo Monte, como as 3^a e 5^a posições no rank. Os impactos sentidos decorrentes das ausências de chuva não são similares em ambos os países, pois, apesar de grande relevância dos recursos hídricos, o grande responsável pela geração elétrica chinesa é o carvão mineral, que

possui mais de 64% de participação na composição elétrica. O Gráfico 17 apresenta detalhadamente a contribuição de cada fonte para o suprimento elétrico chinês no ano de 2019.

A matriz elétrica da China apresenta diversas oportunidades de expansão, visto que mais de 81% da geração elétrica do país está centrada em apenas duas fontes, o carvão mineral e os recursos hídricos. Assim, a vastidão de seu território permite um melhor aproveitamento das fontes solares, eólicas e a transformação das biomassas e resíduos.

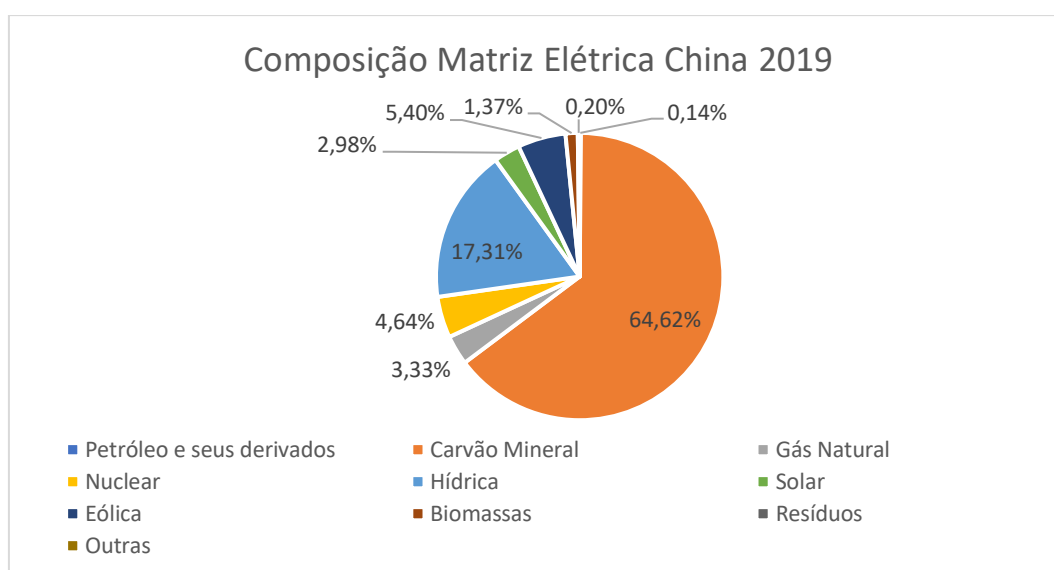


Gráfico 17: Composição elétrica China 2019. Fonte: EIA, 2022.

A IEA (2021), através do relatório *An Energy Sector Roadmap to Carbon Neutrality in China*, apresenta alguns cenários estratégicos para a China atingir a neutralidade de emissões de carbono em seu setor energético. Este tópico é considerado como um dos principais objetivos de desenvolvimento da nação e, neste contexto, as inovações tecnológicas são fundamentais para a eficácia em atingir esses objetivos.

Ainda segundo este relatório, os meios para acelerar a transição energética envolvem, de forma significativa, melhorias nos sistemas de geração de energia limpa atualmente disponíveis. Baseado nisto, a expectativa para o aumento da capacidade instalada das fontes eólicas e solar é de 10% ao ano, seguindo essa

tendência até 2030, de modo a atingir 25% da geração energética oriunda de fontes renováveis.

O cenário de transição acelerada desenvolvido pela IEA considera os seguintes aspectos para a efetivação do eficiente do projeto:

Incluindo a redução do uso de carvão mineral, melhorando a eficiência do uso dos recursos, promovendo a eficiência energética, construindo sistemas de transporte de baixas emissões de carbono, promovendo inovação tecnológica em energia limpa, desenvolvendo a economia verde, introduzindo e suportando política econômicas, melhorar a precificação do carvão mineral e implementando soluções naturais (IEA, 2021).

Caso esses objetivos sejam atingidos, eles fomentarão uma alta expectativa na narrativa ecológica global, o que tornará a China uma potência econômica e ambiental, conciliando os dois maiores desafios impostos a todas as nações mundiais, que é o desenvolvimento de forma sustentável, ofertando condições de prosperidade financeira associado à preservação ambiental.

3.5. Japão

Dentre as nações em estudo, o Japão apresenta dados que o coloca como o quarto maior consumidor de energia elétrica, em que o consumo registrado no ano de 2019 foi 997.068GWh. O padrão energético segue em linha com os demais países desenvolvidos sob avaliação: sua matriz elétrica demonstra alta dependência do carvão mineral e do gás natural que, juntos, representam mais de 65% da geração elétrica nacional. Além da dependência, estes também são grandes emissores de poluentes ambientais. As fontes renováveis contribuem com aproximadamente 23% da demanda local.

A política de geração elétrica japonesa sofreu significativas alterações nas últimas duas décadas, principalmente na parte de que envolve as fontes nucleares,

que atualmente só contribuem com aproximadamente 6% da energia elétrica gerada localmente. A utilização deste recurso recuou abruptamente neste período, mas aos poucos vem retomando sua importância, a partir do desenvolvimento de novas técnicas de exploração.

Dentre as fontes renováveis, aquelas que apresentam maiores destaques são as fontes hídricas e solares, contribuindo respectivamente com aproximadamente 9% e 7% da geração elétrica do Japão. Um fator interessante a se ressaltar é o aproveitamento das biomassas e dos resíduos em geral para a conversão em energia, que juntos representam pouco mais de 4% da matriz elétrica conforme observado no Gráfico 18.

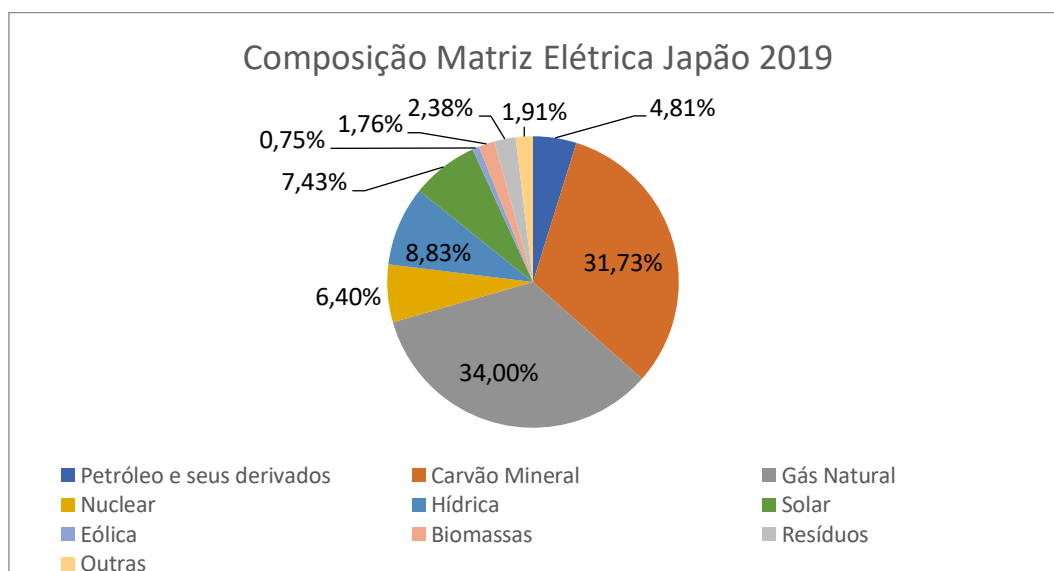


Gráfico 18: Composição elétrica Japão 2019. Fonte: EIA, 2022.

“No início do milênio, em meio a crescente conscientização sobre a ligação entre as emissões de gases de efeito estufa e as mudanças climáticas [...] cientistas identificaram a energia nuclear como um potencial protagonista para a transição de energia limpa” (IAEA – *International Atomic Energy Agency*, 2021).

Assim sendo, a transição energética japonesa apresentava um cenário altamente voltado para o aproveitamento da energia nuclear, replicando os mesmos padrões disponíveis até os anos de 2010. Contudo, após o acidente nuclear da usina de Fukushima em 2011, a qual permanece em processo de descomissionamento,

alterou-se fortemente os planos de desenvolvimento energético. Desde então, apenas 18% das usinas nucleares japonesas estão em funcionamento.

O impacto do acidente foi altamente significativo para frear e retardar o desenvolvimento da geração de energia elétrica através de fontes nucleares. Desde a ocorrência, o sistema vem sendo retrabalhado, de modo a resgatar a credibilidade junto a sociedade e ao mercado financeiro, além de processar operações mais seguras.

O reporte “*Japan’s Energy Transition towards Carbon Neutrality by 2050*”, apresentado no Centro de Cooperação Industrial Japão-União Europeia 2021, demonstra que, até o ano de 2030, é esperado que as fontes renováveis sejam responsáveis por 22% a 24% da composição da geração elétrica. O crescimento para o uso da energia nuclear é expressivo, atingindo um patamar de 20% a 22%. Por sua vez, a expectativa é que o combinado de carvão mineral e gás natural seja responsável por 53%, com uma redução de aproximadamente 20% no período de 2019 a 2030. Este fator é extremamente importante no ponto de vista da redução da emissão dos gases de efeito estufa.

Ainda segundo o reporte, a estratégia apresentada se assimila, em alguns pontos, com as demais potências mundiais, com investimentos na geração eólica *on shore* e *off shore* e no aproveitamento da energia solar em habitações e indústrias. Entretanto, algumas outras fontes vêm sendo desenvolvidas de modo a viabilizar novas alternativas tecnológicas para a geração de energia. Dentre elas, pode-se citar a utilização de hidrogênio, que pode ser convertido para a utilização de energização dos meios de transporte, além do uso para aquecimento e geração de eletricidade. Nesse sentido, diversas inovações para o uso das fontes nucleares foram desenvolvidas após o acidente registrado em Fukushima em 2011, sendo apresentadas novas tecnologias que contam com sistemas modularizados, dispondo de maiores quantidades de itens de segurança passiva, dimensões mais compactas e, conseqüentemente, custos menores se comparado à construção de grandes reatores.

3.6. Índia

Através dos dados apresentados na Tabela 9, é possível verificar que a Índia possui uma das matrizes elétricas mais poluentes entre os países do presente estudo, estando atrás apenas dos Estados Unidos da América. A demanda elétrica indiana no ano foi de 1.593.709 GWh, na qual aproximadamente 79% da geração elétrica foi oriunda de fontes não renováveis. A Índia, por se tratar de um país em desenvolvimento, ainda conta com oportunidades para a migração e transição energética de modo a promover a evolução de energia local.

As questões energéticas são um grande desafio para todas as nações, entretanto, para países em desenvolvimento, isto se apresenta de forma crítica, pois no mesmo instante em que é necessário aumentar seus níveis financeiros e sua competitividade produtiva frente a outras nações, contribuindo no aumento do PIB *per capita*, apresenta-se também uma maior necessidade energética para atendimento à população local, possibilitada de dispor de maiores bens de consumo, gerando uma demanda energética ainda maior, evento similar a este já ocorrido no Brasil nos anos 2000.

Em países como a Índia, muitos investimentos são necessários no que tange à infraestrutura em geral, desde moradias, saneamento básico, redes de transmissão de dados e elétrica. Apesar de existir a oportunidade para transição energética, a demanda por tantos investimentos pode dispersar o direcionamento de recursos para a geração de energia verde.

A Índia se apresenta como um país muito limitado no que diz respeito à composição de sua matriz elétrica. O país é altamente dependente do carvão mineral sendo este responsável por mais de 71% da composição elétrica. Na sequência as fontes renováveis no geral se apresentam em desenvolvimento, e sua composição geral atinge aproximadamente 21% do total, no qual o maior destaque é para as fontes hídricas. O detalhamento da geração elétrica é registrado no Gráfico 19.

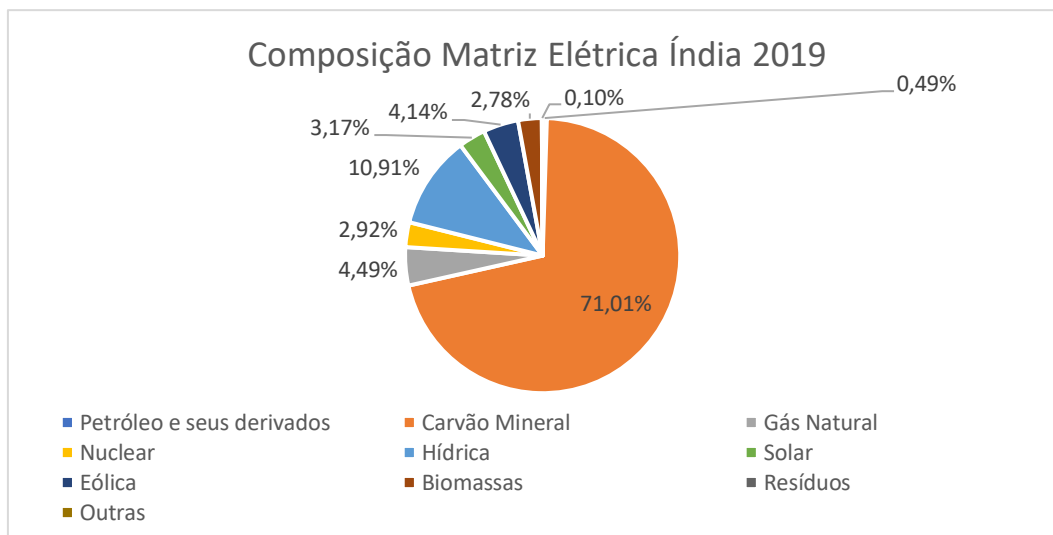


Gráfico 19: Composição elétrica Índia 2019. Fonte: EIA, 2022.

Segundo o *National Investment Promotion & Facilitation Agency* (2022), a agência governamental indiana para captação de recursos para investimentos em território local, destaca-se que o país possui grande interesse na diversificação das suas fontes energéticas. O governo indiano almeja atingir a 500.000 MW de capacidade de geração elétrica oriunda de fontes renováveis até o ano de 2030, sendo esta expectativa extremamente ousada quando comparada aos níveis de geração atual. Em curso, este é considerado o maior projeto de expansão energética em escala mundial.

O Governo da Índia estabeleceu objetivos para a redução da emissão total de carbono em 1 bilhão de toneladas em 2030, redução da intensidade de carbono da economia nacional em 45% até o final da década, atingir emissão zero de carbono em 2070 e expandir a capacidade instalada de energia renovável para 500 GW em 2030. (ÍNDIA, 2022).

Alguns métodos estão traçados neste plano de desenvolvimento energético, que engloba a instalação de uma cidade de geração de energia solar em cada um dos 45 estados indianos, e o potencial estimado neste projeto é de captar aproximadamente 37.000 MW. O país visa também aproveitar outras possibilidades nos meios de desenvolvimento de unidades de geração de energia híbrida eólico-

solar e a exploração das usinas eólicas *off-shore*. Através da evolução destes projetos, é esperada, assim, a consumação do ambicioso objetivo energético.

4

Emissões e o setor de transporte

As emissões atmosféricas estão presentes em todas as ações antropogênicas, desde os primórdios da humanidade através da produção de fogo para a sobrevivência. Entretanto, houve um aumento exponencial com a Revolução Industrial no século XVIII, que causou grandes transformações e geração de novas indústrias (Seinfeld, 2006; IPCC, 2007). Além disso, essa era proporcionou um maior fluxo de pessoas e materiais, tendo em vista o desenvolvimento da cadeia de transporte através da evolução de veículos, os quais passaram a ser propulsionados por motores de combustão interna.

Dessa forma, não apenas foram gerados novos empregos e tecnologias, como também houve um aumento significativo de poluentes atmosféricos. Atualmente, a queima de combustíveis fósseis, através de veículos utilizados para transporte da população em geral, é um dos principais meios de emissões de poluentes nos grandes centros urbanos associado ao uso inadvertido de terras (IPCC, 2021).

4.1.

Emissões

A formação das emissões resulta da reação química da mistura comburente-combustível. Segundo a Agência de Proteção Ambiental Norte Americana (EPA), emissões podem ser definidas como gases e partículas inseridos no ar ou emitidos por fontes diversas.

Os produtos das combustões dependem tanto do tipo de combustível como da forma como ocorre a combustão, que pode ser completa ou incompleta. Neste cenário, a combustão completa é aquela em que há suplemento de oxigênio suficiente para a reação, tendo como produtos finais o dióxido de carbono, calor e água, diferentemente da combustão incompleta, em que há formação de compostos

mais prejudiciais ao meio ambiente, como monóxido de carbono e fuligem (Greiner, 1997).

A partir da transformação de fontes combustíveis em energia, a liberação de GEEs ocorre diante de todos os processos, em maior ou menor grau, dependendo da composição energética oriunda e da atividade empregada. Os potenciais efeitos do descontrole das emissões poluentes podem direcionar a desastres catastróficos e irreversíveis no âmbito socioambiental.

Os GEEs estão presentes naturalmente na atmosfera, decorrentes das ações biogênicas. A presença equilibrada desses gases é fundamental para a existência de vida na Terra. No entanto, as ações antropogênicas acentuam sua concentração no ambiente, tornando-os nocivos e intensificando o efeito estufa (Seinfeld, 2006). Este fato põe em risco a manutenção de todo ecossistema terrestre.

As principais formas de liberação dos GEEs são decorrentes da queima de combustíveis fósseis, os quais, em grande maioria, estão empregados para geração de energia e sendo a principal força motriz dos meios de transporte (IPCC, 2007).

Os principais poluentes resultantes das combustões são: monóxido de carbono (CO), dióxido de carbono (CO_2), metano (CH_4), hidrocarbonetos (HC), óxido nitroso (N_2O), óxidos de enxofre (SO_x), óxidos de nitrogênio (NO_x) e material particulado (MP) (IPCC, 2007; CDC, 2022).

Dentre os seis países em estudo (Alemanha, Brasil, China, Estados Unidos Índia e Japão), a China é o que principal emissor de CO_2 em número absoluto, sendo responsável por mais da metade do total de emissões referentes a esses países no ano de 2020, conforme apresentado na Tabela 10.

Total emissão (MtCO ₂)						
Ano	EUA	Japão	China	Alemanha	Brasil	Índia
2015	4.929	1.152	9.133	730	458	2.036
2016	4.839	1.139	9.114	735	422	2.068
2017	4.761	1.124	9.328	719	433	2.185
2018	4.910	1.085	9.777	695	411	2.317
2019	4.745	1.048	9.932	645	411	2.278
2020	4.258	990	10.081	590	389	2.075

Tabela 10: Total de emissão CO_2 dos países avaliados entre os anos de 2015 e 2020. Fonte: IEA, 2022.

É importante salientar que houve queda de emissões CO_2 nos Estados Unidos, Japão, Alemanha, Brasil e Índia, com leves variações ao longo do período avaliado. Por sua vez, a China foi o único país que apresentou uma crescente em relação à taxa de emissão de CO_2 , superando a de gás carbônico emitido por todos os países ao longo dos anos avaliados.

Grande parte da emissão gerada pelos Estados Unidos, China, Japão e Índia é decorrente do processo de geração de energia elétrica, oriundo principalmente da queima do carvão mineral. Associado a isto, o elevado grau de industrialização tanto dos Estados Unidos quanto da China é um fator de influência nos altos níveis de emissões de poluentes atmosféricos.

Brasil e Alemanha foram os países em estudo que apresentaram a menor quantidade total de emissões totais de CO_2 . Esse fato pode ser constatado visto que parte significativa da matriz elétrica desses países é proveniente de fontes renováveis, representando respectivamente 82,90% e 41,75% da composição de sua fonte de geração elétrica, conforme apresentado na Tabela 9.

Face ao grande potencial de impacto socioambiental, a participação dos países avaliados é notória frente a comunidade mundial. Dessa forma, estes países contribuem significativa e ativamente nas questões de regulamentação dos níveis de controle das emissões atmosféricas. Apesar disto, nota-se que alguns acordos foram descumpridos ao longo de décadas, sendo algumas dessas nações os maiores poluidores mundiais.

Anualmente são realizadas conferências mundiais sobre as alterações climáticas, com seu início em 1995, sediada na Alemanha, através da COP (Conferência das Nações Unidas sobre Mudanças Climáticas). Esses eventos servem para a realização de debates a respeito dos impactos das mudanças climáticas a nível mundial, além de contribuir para a revisão e definição de estratégias para o atingimento do objetivo de redução das emissões aliada ao desenvolvimento econômico de forma sustentável das nações.

Através dessas conferências foram estabelecidos importantes acordos e regulamentações a respeito do estabelecimento de metas de redução das emissões dos gases de efeito estufa, como o Protocolo de Quioto (1997), o Acordo de Copenhague (2009) e o Acordo de Paris (2015).

O Protocolo de Quioto foi o primeiro tratado internacional que estabelecia metas para a redução da liberação de gases de efeito estufa pelos países participantes do grupo. Inicialmente 84 países aderiram ao programa, com atenção especial ao atingimento das metas principalmente pelas nações desenvolvidas. O percentual de diminuição da emissão variava entre nações conforme alinhado entre as partes. Este tratado visava também à expansão de políticas de desenvolvimento sustentável, além de ter promovido o início da comercialização dos créditos de carbono.

O Acordo de Copenhague não apenas reforçou os itens dispostos no Protocolo de Quioto, como também definiu metas para a redução do desmatamento e estabeleceu a necessidade de conter o aumento da temperatura global a 2°C comparados aos níveis pré-industriais.

Por sua vez, o Acordo de Paris, além de ter sido o sucessor do Protocolo de Quioto, no qual abrangeu mais rigorosamente o controle de poluentes atmosféricos aos países em desenvolvimento, revisou a meta de contenção do incremento da temperatura global, limitando-a em 1,5°C.

Além dos acordos internacionais estabelecidos, ao longo de décadas, importantes legislações nacionais foram criadas, de forma a regular as emissões atmosféricas. Foram definidos parâmetros de controle, visando a promoção da preservação ambiental, dentre os quais podem ser citadas as seguintes legislações: *Clean Air Act*, desenvolvida nos Estados Unidos e CONAMA, que rege as diretrizes ambientais no Brasil.

O *Clean Air Act* é a lei norte-americana que regulamenta as emissões atmosféricas provenientes de fontes móveis e fontes estacionárias. Essa foi a primeira legislação federal com este intuito desenvolvida nos Estados Unidos, no ano de 1963. Sua criação foi decorrente da presença de altas concentrações de fumaça densa e visível em diversas cidades e centros industriais.

Fontes móveis são definidas por elementos emissores de poluentes em deslocamento, tais como os meios de transporte, enquanto fontes estacionárias são definidas por elementos emissores de poluentes fixos, como indústrias, grupo moto gerador, dentre outros (MMA – Ministério do Meio Ambiente).

Essa legislação permitiu a EPA estabelecer o NAAQS (Padrão Nacional de Qualidade do Ar), que foi desenvolvido para a proteção da saúde pública, e para regular a emissão de poluentes perigosos. Através desse ato, foram definidas as estratégias, padrões e medidas de controle para conter os impactos decorrentes da poluição atmosférica gerada. A EPA definiu uma normatização para seis principais elementos: os materiais particulados (*MP*), o ozônio (*O₃*), o dióxido de enxofre (*SO₂*), o dióxido de nitrogênio (*NO₂*), o monóxido de carbono (*CO*) e o chumbo (*Pb*).

No Brasil a legislação ambiental encontra-se como uma das mais desenvolvidas e completas quanto à abordagem de seus tópicos. A Política Nacional do Meio Ambiente (PNMA) estabelece as diretrizes e, através do CONAMA (Conselho Nacional do Meio Ambiente), define normas e padrões para licenciamento de atividade potencialmente agressivas ao meio ambiente.

As Resoluções CONAMA estabelecem criteriosos padrões ambientais objetivando a manutenção da conservação natural. As principais Resoluções referentes às emissões atmosféricas são: CONAMA nº18/86, CONAMA nº5/89, CONAMA nº297/02, CONAMA nº382/06, CONAMA nº418/09, e CONAMA nº491/18.

A Resolução CONAMA nº18/86 instituiu o Programa de Controle da Poluição do Ar por Veículos Automotores (PROCONVE), visando à redução dos níveis de emissões de poluentes por veículos automotores, considerando que esses são fontes de significativa emissão de monóxido de carbono (*CO*), hidrocarbonetos (*HC*), óxidos de nitrogênio (*NO_x*), fuligem e aldeídos. Essa resolução, além de definir limites máximos de emissão dos poluentes mencionados, objetivou também a criação de programas de inspeção e manutenção da frota em circulação, e a promoção do desenvolvimento de combustíveis com melhores características técnicas.

Nesse sentido, a resolução CONAMA nº5/89 instituiu o Programa Nacional de Controle da Qualidade do Ar (PRONAR), que objetiva a proteção da saúde e bem-estar da sociedade, buscando a melhoria da qualidade do ar, mediante o atendimento aos padrões estabelecidos, sem afetar a qualidade do ar em áreas não degradadas.

Em seguida, a resolução CONAMA nº297/02 definiu os limites máximos de emissões de gases poluentes pelo escapamento para motocicletas e veículos novos. Portanto, a comercialização desses meios de transporte em território nacional só é permitida mediante o atendimento aos critérios homologados.

Assim, a resolução CONAMA nº382/06 estabeleceu os limites máximos de emissão de poluentes atmosféricos para fontes fixas, e considera, dentre os diversos fatores de impacto, as seguintes condições: os altos níveis atmosféricos apresentados decorrentes da crescente industrialização, os impactos na saúde pública, meio ambiente e na economia, visando à promoção do desenvolvimento econômico-social, preservando a qualidade do meio ambiente e seu equilíbrio ecológico. Através dela foram definidos valores de referência sobre os limites de emissão de poluentes atmosféricos dos compostos orgânicos voláteis, o enxofre reduzido total-ERT, os materiais particulados (*MP*), os óxidos nitrosos (*NO_x*) e os óxidos de enxofre (*SO_x*).

Na sequência, a resolução CONAMA nº418/09 definiu critérios para a elaboração do Planos de Controle de Poluição Veicular (PCPV), com objetivo da implementação de Programas de Inspeção e Manutenção de Veículos em uso, de modo a determinar novos limites de emissões atmosféricas e novos procedimentos para a avaliação da manutenção da frota em uso. São estabelecidos programas de inspeção e fiscalização, que devem ser implantados pelos órgãos estaduais e municipais responsáveis.

Por fim, a resolução CONAMA nº491/18 apresentou os critérios para controle sobre os padrões de qualidade do ar; nela são definidos, através do Anexo I, os valores-limite para os seguintes tipos de poluentes atmosféricos: os materiais particulados (*MP₁₀*) e (*MP_{2,5}*), dióxido nitrosos (*NO₂*), dióxido de enxofre (*SO₂*), ozônio (*O₃*), monóxido de carbono (*CO*), partículas totais em suspensão (*PTS*) e chumbo (*Pb*).

4.2. Emissões do Sistema Elétrico

Como mencionado anteriormente, é sabido que a composição das matrizes elétricas incide diretamente na efetividade ambiental do veículo elétrico. Desta forma, os países que possuem em sua geração elétrica significativa participação de fontes não renováveis, emitirão mais poluentes do que um país de matriz mais limpa, para a recarga de um mesmo veículo elétrico. Adicionalmente, tem-se que levar em conta, na comparação das emissões decorrentes do uso de veículos elétricos, híbridos ou convencionais, o tipo de combustível utilizado nos dois últimos. Possivelmente, em alguns casos, um veículo elétrico poderá ser mais poluidor do que alguns veículos convencionais. Este trabalho visa, exatamente, fazer esta comparação.

Diante da fundamental importância deste setor, e enquanto novas alternativas não são desenvolvidas, é necessário avaliar os cenários mais favoráveis para viabilizar uma frota automotiva menos agressiva ao meio ambiente. Para tal constatação, faz-se necessária a avaliação de emissões poluentes pelo sistema de geração de energia elétrica. Este apresentará rumos para a avaliação da eficiência ambiental dos veículos elétricos.

Segundo Carvalho (2011), é possível calcular as emissões de CO_2 do sistema elétrico a partir da seguinte equação:

$$EmissõesSE = \sum_i^n (efi \times pfi) \quad (Eq. 01)$$

Onde:

EmissõesSE: emissões de CO_2 do sistema elétrico (g/kwh)

efi: emissões da fonte energética *i* (g/kwh)

pfi: participação proporcional na matriz elétrica da fonte *i*

Segundo Schlömer (2014), o potencial de liberação de emissões atmosféricas compreende em consistentes variações por cada tipo de fonte geradora de energia elétrica. Foi observado na análise desenvolvida a avaliação média de emissões, tendo destaque os seguintes componentes: carvão mineral ($820gCO_2/kWh$), gás natural ($490gCO_2/kWh$), solar ($48gCO_2/kWh$), eólica ($12gCO_2/kWh$), hidroelétrica ($24gCO_2/kWh$) e nuclear ($12gCO_2/kWh$).

Por sua vez, a Associação Brasileira de Energia Nuclear, conduziu em 2008, estudo similar, e em geral, encontrou parâmetros aproximados aos dispostos por Schlömer. Desta forma, para a base de cálculo das emissões por tipo de fonte energética (*pfi*) foi adotado o uso da Tabela 11.

Fonte	Emissões (g/kwh)	Média (g/kwh)
Usina nuclear	5 a 33	19
Hidrelétricas	4 a 36	20
Eólica	10 a 38	24
Solar	78 a 217	147,5
Gás natural	399 a 644	521,5
Óleo combustível	550 a 946	748
Carvão mineral	838 a 1.231	1.035,5

Tabela 11: Emissões atmosféricas de CO₂ por tipo. Fonte: Associação Brasileira de Energia Nuclear, 2008.

Deste modo, através dos dados individuais de geração elétrica, foi possível determinar a participação proporcional (*pfi*) das fontes energéticas na composição total da matriz elétrica. Sendo assim, foram estabelecidas as emissões do sistema elétrico para cada nação em estudo. Para a análise a seguir, devido à pequena contribuição das biomassas, resíduos e outras fontes na composição da matriz elétrica, estes foram desprezados da contabilização.

4.2.1. Brasil

Dentre todos os países avaliados, o Brasil possui a matriz elétrica mais limpa em termos de emissão de poluentes. Isso se dá, principalmente, pela grande participação de fontes hídricas e eólicas na utilização para geração de energia elétrica. Combinados, esses meios são responsáveis por aproximadamente 82,9% do total gerado nacionalmente. Dessa forma, tal resultado era esperado, tendo em vista que a composição da matriz brasileira é formada essencialmente por fontes renováveis. Esse resultado é demonstrado através dos dados apresentados na Tabela 12. Para a confecção da referida tabela foi realizado a compilação dos dados apresentados em BEN (2020) e ABEN (2008), associado ao modelo apresentado por Carvalho (2011).

Brasil-2019				
Tipo	Geração Elétrica (GWh)	<i>efi</i> (g/kWh)	<i>pfi</i>	<i>efi x pfi</i> (gCO ₂ /kWh)
Petróleo e seus derivados	12.526	748,00	1,96%	15
Carvão Mineral	20.668	1035,50	3,23%	33
Gás Natural	58.246	521,50	9,10%	47
Nuclear	15.658	19,00	2,45%	0
Hídrica	406.469	20,00	63,50%	13
Solar	6.263	147,50	0,98%	1
Eólica	53.862	24,00	8,41%	2
Total	640.092	-	-	130

Tabela 12: Emissões de CO₂ do sistema elétrico brasileiro. Fonte: autor, 2022.

É possível observar que diante da baixa contribuição na participação da geração elétrica de elementos como carvão mineral, gás natural e petróleo e seus derivados, a expectativa era do encontro de um coeficiente de baixa emissão de CO₂. Isso foi comprovado utilizando os dados da Tabela 11, que disponibilizou os valores de *efi*; além disso foi determinado o *pfi* e, através do uso da equação 01, sendo assim, obtido o resultado de 130gCO₂/kWh emitidos no sistema elétrico brasileiro.

4.2.2. Estados Unidos da América

O sistema elétrico dos Estados Unidos da América, dentre os países avaliados, possui a terceira menor emissão de poluentes. Apesar de o país contar com grandes contribuições de elementos como carvão mineral e gás natural – duas das fontes mais nocivas ao meio ambiente –, esses são ligeiramente compensados pelo uso da energia nuclear, emitindo 19g de CO_2 por kWh gerado, sendo essa a fonte a mais limpa conforme demonstrado na Tabela 11. Para a confecção da referida tabela foi realizado a compilação dos dados apresentados em IEA (2020) e ABEN (2008), associado ao modelo apresentado por Carvalho (2011).

EUA-2019				
Tipo	Geração Elétrica (GWh)	<i>efi</i> (g/ kWh)	<i>pfi</i>	<i>efi x pfi</i> (g CO_2 / kWh)
Petróleo e seus derivados	35.964	748,00	0,82%	6
Carvão Mineral	1.058.637	1035,50	24,27%	251
Gás Natural	1.634.595	521,50	37,47%	195
Nuclear	843.330	19,00	19,33%	4
Hídrica	296.701	20,00	6,80%	1
Solar	93.129	147,50	2,14%	3
Eólica	303.410	24,00	6,96%	2
Total	4.361.950	-	-	466

Tabela 13: Emissões de CO_2 do sistema elétrico norte-americano. Fonte: autor, 2022.

A composição de elementos com fontes originárias de unidades nucleares, hídricas e eólica já excede a 33% da participação na matriz elétrica norte-americana, sendo essas as fontes menos emissoras de dióxido de carbono, o que pode ser verificado através da Tabela 13. Isso impacta positivamente e diretamente o resultado encontrado para o somatório de emissões do sistema elétrico dos Estados Unidos da América, onde para cada kWh gerado são emitidos 460g CO_2 .

Ainda assim, o resultado é aproximadamente quatro vezes superior ao encontrado no Brasil, demonstrando que há um grande espaço para transição energética. A implementação de mais dispositivos de geração renovável

possibilitará essa migração de forma efetiva, deste modo, visando a reduzir a emissão atmosférica pelo sistema elétrico.

4.2.3. Alemanha

Dos países em estudo, a Alemanha possui a segunda maior participação de fontes renováveis em seu sistema de geração de energia elétrica. No entanto, a grande participação do uso de carvão mineral, aproximadamente 30% da composição em sua matriz elétrica impacta significativamente o quantitativo de poluentes emitidos. Os dados detalhados são encontrados na Tabela 14. Para a confecção da referida tabela foi realizado a compilação dos dados apresentados em IEA (2020) e ABEN (2008), associado ao modelo apresentado por Carvalho (2011).

Alemanha-2019				
Tipo	Geração Elétrica (GWh)	<i>efi (g/kWh)</i>	<i>pfi</i>	<i>efi x pfi (gCO₂/kWh)</i>
Petróleo e seus derivados	5.083	748,00	0,82%	6
Carvão Mineral	185.495	1035,50	30,00%	311
Gás Natural	94.461	521,50	15,28%	80
Nuclear	75.071	19,00	12,14%	2
Hídrica	26.201	20,00	4,24%	1
Solar	47.517	147,50	7,69%	11
Eólica	125.975	24,00	20,38%	5
Total	618.223	-	-	432

Tabela 14: Emissões de CO₂ do sistema elétrico alemão. Fonte: autor, 2022.

A geração elétrica, através do carvão mineral e gás natural, é responsável pela produção de 45% da energia elétrica alemã, entretanto, as emissões dessas fontes representam pouco acima de 90% da emissão de poluentes e, portanto, os dados demonstram a nocividade dessas fontes energéticas.

Por outro lado, é percebida a efetividade da matriz elétrica oriunda de fontes nucleares, hídricas, solares e eólicas, as quais são encarregados pela geração de

aproximadamente 44% do restante da energia elétrica da Alemanha enquanto a emissão é extremamente reduzida, com apenas 4% do total dos poluentes emitidos.

O somatório das emissões do sistema de geração elétrico da Alemanha são de $432gCO_2/kWh$. O processo de transição energética nessa nação encontra-se em curso, e diante da formação da matriz, é notório o interesse na propagação de uso de energia verde, principalmente oriundo das fontes eólicas. Dentre os países em estudo, a Alemanha tem nas usinas eólicas a maior participação percentual, e diante do baixo volume de poluentes emitidos por esse uso, apresenta-se essa fonte como uma solução ecologicamente adequada.

4.2.4. China

A China, como principal consumidora elétrica do mundo, demanda energia oriunda de diversas fontes e, mesmo detentora de algumas das maiores usinas hidrelétricas instaladas no mundo, elas são responsáveis por suprir apenas 17% da necessidade. Majoritariamente o uso de carvão mineral é o principal ativo energético em uso no país, sendo responsável por mais de 64% do total gerado. Isso traz como resultado uma matriz elétrica altamente poluente, sendo a segunda pior do ponto de vista ambiental, quando comparada aos demais países em estudo. Esse fato pode ser constatado na Tabela 15. Para a confecção da referida tabela foi realizado a compilação dos dados apresentados em IEA (2020) e ABEN (2008), associado ao modelo apresentado por Carvalho (2011).

China-2019				
Tipo	Geração Elétrica (GWh)	<i>efi</i> (g/kWh)	<i>pfi</i>	<i>efi x pfi</i> (gCO ₂ /kWh)
Petróleo e seus derivados	10.750	748,00	0,14%	1
Carvão Mineral	4.858.880	1035,50	64,62%	669
Gás Natural	250.544	521,50	3,33%	17
Nuclear	348.700	19,00	4,64%	1
Hídrica	1.301.900	20,00	17,31%	3
Solar	223.800	147,50	2,98%	4
Eólica	405.700	24,00	5,40%	1
Total	7.519.344	-	-	701

Tabela 15: Emissões de CO₂ do sistema elétrico chinês. Fonte: autor, 2022.

A diversificação da matriz elétrica chinesa ainda está aquém das condições que podem ser desenvolvidas pelo país, pois é praticamente concentrada no carvão mineral e nas fontes hídricas. As emissões provenientes do sistema de geração elétrico chinês é de $701gCO_2$ para cada quilowatt-hora gerado. Se comparada aos Estados Unidos da América, a matriz elétrica chinesa emite 66% de poluentes a mais, por unidade de energia elétrica gerada.

Diante das condições apresentadas, e a magnitude do setor industrial chinês, é explícita a necessidade de expansão energética de fontes renováveis. Ao longo do território nacional, vastas áreas são desocupadas, as quais podem ser potenciais locais para instalação de usinas eólicas e solares, caso as condições sejam favoráveis para estas aplicações.

4.2.5. Japão

A geração elétrica japonesa é altamente apoiada pelo uso de carvão mineral e gás natural, o que vai ao encontro com o que foi apresentado na maior parte dos países em avaliação. O Japão concentra o quarto sistema elétrico mais poluente e, além dos itens mencionados anteriormente, esta nação possui o maior nível percentual de participação de petróleo e seus derivados para utilização na geração de energia elétrica, sendo responsável por quase 5% do total gerado; logo, essa fonte é a segunda mais poluente, atrás apenas do carvão mineral. Os dados referentes à geração elétrica e às emissões decorrentes podem ser encontrados na Tabela 16. Para a confecção da referida tabela foi realizado a compilação dos dados apresentados em IEA (2020) e ABEN (2008), associado ao modelo apresentado por Carvalho (2011).

Não se pode afirmar, mas possivelmente, sob influência das limitadas condições territoriais do país, ocorreu a centralização da geração de energia em usinas termoeletricas. Dadas essas circunstâncias, o resultado de emissões provenientes do sistema elétrico japonês é alto, sendo de $560gCO_2/kWh$.

Japão-2019				
Tipo	Geração Elétrica (GWh)	<i>efi (g/kWh)</i>	<i>pfi</i>	<i>efi x pfi (gCO₂/kWh)</i>
Petróleo e seus derivados	47.990	748,00	4,81%	36
Carvão Mineral	316.393	1035,50	31,73%	329
Gás Natural	338.984	521,50	34,00%	177
Nuclear	63.779	19,00	6,40%	1
Hídrica	88.005	20,00	8,83%	2
Solar	74.114	147,50	7,43%	11
Eólica	7.502	24,00	0,75%	0
Total	997.058	-	-	560

Tabela 16: Emissões de CO₂ do sistema elétrico japonês. Fonte: autor, 2022.

O programa de geração de energia elétrica através das usinas nucleares foi extremamente impactado pelo desastre ocorrido em Fukushima em 2011. Inclusive, as fontes nucleares poderiam ser um importante instrumento para a redução do uso de fontes mais poluidoras. O fato de o país estar rodeado pelo oceano pacífico pode influenciar um possível programa para desenvolvimento de usinas eólicas *off-shore* que, certamente, contribuiriam para a redução da geração de emissões do sistema elétrico.

4.2.6. Índia

Dentre todos os seis países em estudo, a Índia apresentou os piores indicadores, no que se refere às emissões atmosféricas originárias do sistema elétrico. A Índia é um país que está em estado de desenvolvimento, despontando principalmente através da criação de novas tecnologias e, além disso, atualmente possui a segunda maior população mundial e a maior frota automotiva mundial, como demonstrado anteriormente.

A infraestrutura presente é bastante rudimentar, carecendo de estrutura para transportes, saúde e saneamento, educação, fornecimento elétrico e de dados. Diante da necessidade de investimento em diversos setores essenciais para a sociedade, é justificável a priorização de investimentos a essas demandas.

A composição da geração elétrica é dominada pelo uso de usinas termoeletricas: o carvão mineral é responsável por aproximadamente 71% da energia produzida localmente. O percentual encontrado e centralizado neste insumo é o maior se comparado a qualquer outra fonte dos demais países em estudo. Isso demonstra a alta dependência deste recurso que é bastante impactante sob o aspecto ambiental. É possível verificar que o detalhamento da composição é apresentado na Tabela 17. Para a confecção da referida tabela foi realizado a compilação dos dados apresentados em IEA (2020) e ABEN (2008), associado ao modelo apresentado por Carvalho (2011).

A centralização da geração elétrica indiana em fontes de carvão mineral resultou na emissão de 776g de CO_2 por quilowatt-hora gerado pelo sistema elétrico. Esse valor apresenta dados alarmantes, principalmente ao se tratar de um país que ainda está em desenvolvimento industrial que certamente será expandido nas próximas décadas. Além disso, com o enriquecimento da nação, é esperado que a condição humana venha a ser melhorada, possibilitando maior poder aquisitivo, o que estimula a indústria de bens de consumo e, conseqüentemente, irá gerar uma demanda elétrica ainda maior.

Índia-2019				
Tipo	Geração Elétrica (GWh)	<i>efi (g/kWh)</i>	<i>pfi</i>	<i>efi x pfi (gCO₂/kWh)</i>
Petróleo e seus derivados	7.848	748,00	0,49%	4
Carvão Mineral	1.131.661	1035,50	70,96%	735
Gás Natural	71.564	521,50	4,49%	23
Nuclear	46.472	19,00	2,91%	1
Hídrica	173.803	20,00	10,90%	2
Solar	50.557	147,50	3,17%	5
Eólica	66.008	24,00	4,14%	1
Total	1.594.749	-	-	776

Tabela 17: Emissões de CO₂ do sistema elétrico indiano. Fonte: autor, 2022.

Esse movimento e a possibilidade do aumento das emissões atmosféricas seguramente será avaliado pelos seus parceiros comerciais, mas as possíveis restrições decorrentes do grande impacto poluidor poderão auxiliar no processo de

transição energética local. Isto inclusive pode garantir ao país maior segurança energética em caso de sucesso.

4.3. Setor de Transporte

A frota automotiva global aumenta de forma significativa década após década, desde os primórdios da invenção do automóvel. A globalização e a alta interação entre os mercados propiciou a rápida propagação dessas tecnologias em nível mundial. Em um período pouco superior a 20 anos, a comercialização de veículos leves e comerciais já superou o montante de 1.500.000.000 (um bilhão e quinhentos milhões) de unidades produzidas, segundo dados registrados pela *International Organization of Motor Vehicle Manufacturers* (OICA, 2022). Os dados são apresentados com detalhes na Tabela 18.

Ano	Produção Mundial
1999	56.258.892
2000	58.374.162
2001	56.304.925
2002	58.994.318
2003	60.663.225
2004	64.496.220
2005	66.719.519
2006	69.222.975
2007	73.266.061
2008	70.729.696
2009	61.762.324
2010	77.583.519
2011	79.880.920
2012	84.236.171
2013	87.595.998
2014	89.776.465
2015	90.780.583
2016	94.976.569
2017	97.302.534
2018	95.634.593
2019	91.786.861
2020	77.621.582
2021	80.145.988

Tabela 18: Produção mundial de veículos entre 1999 e 2021. Fonte: OICA, 2022.

É possível constatar que, entre os anos de 1999 e 2017, a produção mundial de veículos aumentou usualmente de forma consistente, com acréscimo no período de aproximadamente 73%, sendo no ano de 2017 o atingimento do nível recorde de produção global. Os números expressados nos períodos de 2009, 2020 e 2021 não representam a linha de tendência de produção, tendo em vista o acontecimento da crise financeira internacional ocorrida em 2008 e da crise ocasionada pela pandemia do COVID-19 iniciada no final do ano de 2019.

O incremento significativo na demanda por automóveis em geral, constatado nas últimas duas décadas, reflete, em parte, o crescimento populacional global, que no mesmo período aumentou em torno de 31% – acréscimo aproximado de 1,87 bilhão de indivíduos, segundo dados da Organização das Nações Unidas (ONU). Este fator, associado ao aumento da capacidade financeira da população global, corrobora para o aumento da demanda.

Assim, como as questões econômicas, sociais e ambientais estão em discussão em nível mundial, os desafios relativos à mobilidade urbana são pautas altamente relevantes e associadas intrinsecamente nessas três principais questões. Em todas as principais metrópoles mundiais, por melhores que sejam desenvolvidas suas redes de transporte público, o volume de veículos em circulação é suficiente para gerar congestionamentos quilométricos.

Sabe-se que a cadeia automotiva global é grande emissora de gases de efeito estufa, sendo a frota atual formada principalmente por veículos propulsionados por derivados do petróleo. Embora haja tendência de migração para a eletrificação dos transportes, isso não necessariamente solucionará ou amenizará os impactos da poluição ambiental.

Os seis países em estudo concentram aproximadamente 1.068.186.430 veículos na sua frota em circulação, conforme demonstrado na Tabela 19. Para a realização deste levantamento, foram levados em conta todos os tipos de transportes terrestres comercializados, como: automóveis de todos os tipos, motocicletas, caminhões e ônibus. Para a confecção das Tabelas 19 e 20, foi realizado a compilação dos dados apresentados em IBGE (2022), ABVE (2020), CEIC (2022), *Deutschland – Das Kraftfahrt-Bundesamt* (2016-2020), IEA (2020), JAMA (2021), Statista (2022) e USA – *Department of Transportation* (2020).

Frota Automotiva Global (2019)						
Tipo	EUA	Japão	China	Alemanha	Brasil	Índia
Híbrido Elétrico, Híbrido <i>Plug In</i> e Elétrico	6.776.932	588.000	6.698.190	778.175	22.524	22.490
Convencional	269.714.242	74.328.489	243.715.626	65.032.401	104.761.851	295.747.510
Total	276.491.174	74.916.489	250.413.816	65.810.576	104.784.375	295.770.000

Tabela 19: Frota automotiva global em 2019. Fonte: autor, 2022.

Diante deste cenário e dentre os países avaliados, a Índia possui a maior frota global em números totais, no entanto, deste montante 74,8% representam motocicletas, sendo aproximadamente 220 milhões. Estados Unidos e China possuem frotas bem similares tanto em nível de diversificação quanto da utilização de veículos híbrido-elétrico, híbrido *plug in* e elétricos. Esses tipos de veículos representam respectivamente 2,5% e 2,7% da frota em circulação nesses países.

O Brasil, assim como a Índia, dispõe de uma grande quantidade de motocicletas em sua frota automotiva, respondendo por aproximadamente 22% do montante em circulação. Em ambos, a diversificação de motorização da frota está muito aquém se comparada aos demais países em estudo. Apesar disto, diante do franco desenvolvimento dessas nações, esses podem ser pioneiros na transição energética na renovação de frotas automobilísticas.

Tendo em vista as características e potencial de desenvolvimento de determinados países como Brasil, China e Índia, é fato a existência de uma tendência de crescimento na comercialização de maior volume de automóveis nesses locais nas próximas décadas, o que é decorrente do aumento populacional e da geração de riquezas esperados. Esse fato reforça a necessidade da evolução dos meios de transporte convencionais, de modo que estes emitam menores níveis de poluição.

As principais alternativas, frente aos veículos movidos a combustão, tais como os veículos híbrido-elétrico, híbrido *plug in* e elétricos, apresentam-se cada vez mais presentes na sociedade. É notória a expansão deste nicho de mercado nos últimos anos como pode ser observado na Tabela 20.

Frota automotiva (Híbrido Elétrico, Híbrido Plug In e Elétrico)						
Tipo	EUA	Japão	China	Alemanha	Brasil	Índia
2015	4.323.699	252.800	585.400	96.220	2.309	8.750
2016	4.830.304	302.450	1.257.400	220.411	3.400	9.600
2017	5.388.847	410.650	2.415.400	335.235	6.696	14.000
2018	6.057.875	510.200	4.577.590	491.583	10.666	18.200
2019	6.776.932	588.000	6.698.190	778.175	22.524	22.490

Tabela 20: Frota automotiva de propulsão alternativa. Fonte: autor, 2022.

A partir do ano de 2015, os veículos propulsionados por formas alternativas apresentam níveis de comercialização em crescente expansão. O desenvolvimento e barateamento dessas novas tecnologias associadas, com a expectativa da aquisição de veículos com maior eficiência energética, impulsionou a comercialização de automóveis deste tipo.

Em mercados mais estáveis e maduros, como Estados Unidos, Japão e Alemanha, o aumento no período de 5 anos foi de respectivamente 57%, 133% e 709%. A China, em um curto espaço de tempo, alcançou o montante similar ao dos Estados Unidos, com crescimento acima de 1000% no intervalo avaliado.

Por sua vez, Brasil e Índia possuem números absolutos praticamente iguais. Dentre os países em desenvolvimento, neste período, a Índia foi onde ocorreu o menor aumento da frota de veículos híbrido-elétrico, híbrido *plug in* e elétricos, contando com aumento de apenas 157%. A tendência no Brasil já segue mais contundente, com avanço total no intervalo de 5 anos de 875%.

Devido às características encontradas na frota automobilística atual, na qual aproximadamente 98,8% dos veículos são movidos exclusivamente por combustíveis fósseis, observa-se o setor de transporte como um grande gerador de emissões atmosféricas prejudiciais à saúde humana e ao meio ambiente. Este fato pode ser constatado através da Tabela 21. Para a confecção das Tabelas 21 e 22, foi realizado a compilação dos dados apresentados em IEA (2016-2021),

Em geral, pode-se verificar que, dentre os seis países em estudo, as emissões decorrentes do setor de transportes apresentam-se percentualmente de forma estável. Além disto, é identificado que, no Brasil, este segmento possui a maior

participação na emissão de poluentes atmosféricos – CO_2 ; este fator é esperado em virtude de o setor de geração elétrica ser altamente renovável.

Participação do Setor de Transporte na Emissão Total de CO_2 (%)						
Tipo	EUA	Japão	China	Alemanha	Brasil	Índia
2015	34%	18%	9%	22%	44%	13%
2016	35%	18%	9%	22%	47%	13%
2017	36%	18%	9%	23%	46%	13%
2018	36%	19%	10%	23%	47%	13%
2019	37%	19%	9%	25%	47%	14%
2020	35%	18%	9%	24%	47%	13%

Tabela 21: Participação do setor de transporte na emissão total de CO_2 . Fonte: IEA, 2021.

Quanto à Índia, detentora da maior frota mundial, a baixa contribuição percentual encontrada é refletida justamente pelo alto volume de circulações de motocicletas que, em geral, possuem potenciais de poluição de CO_2 reduzidos frente a outros tipos de veículos.

A respeito dos Estados Unidos, o valor identificado representa explicitamente o impacto ambiental de possuir uma frota automobilista volumosa, repleta de veículos com grandes dimensões e altas potências em circulação, resultando na participação de 36% das emissões totais emitidas pelo país.

Nos dados absolutos, dispostos na Tabela 22, é possível verificar uma ligeira redução na emissão de CO_2 no ano de 2020, fato esperado em virtude das paralisações e fechamentos de diversos negócios decorrentes da pandemia do COVID-19.

Salvo aquele ano, nos demais, o cenário apresentou-se de forma estável, com exceção da China e da Índia, países nos quais houve aumento de aproximadamente 13,5% e 19,3% respectivamente, na emissão total de poluente entre os anos de 2015 e 2019. Diante do cenário apresentado, com o aumento de renda *per capita* e com a expectativa do aumento de comercialização de veículos nestes países, há uma tendência de crescimento nas emissões totais.

Transporte (MtCO ₂)						
Tipo	EUA	Japão	China	Alemanha	Brasil	Índia
2015	1.700	211	828	158	200	258
2016	1.710	209	845	161	199	269
2017	1.724	207	878	163	200	291
2018	1.762	205	948	158	192	305
2019	1.757	200	940	160	194	308
2020	1.508	181	896	142	183	270

Tabela 22: Emissões do setor de transporte entre os anos de 2015 e 2020. Fonte: IEA, 2021.

Dentre os países avaliados, os Estados Unidos emitem aproximadamente pouco acima de 50% das poluições atmosféricas totais de CO_2 associadas ao setor de transportes, dados extremamente expressivos e que indicam a necessidade imediata da redução desses poluentes em virtude do devastador potencial dessa atividade.

Diante da análise crítica dos dados e fatores levantados no presente estudo, fica explícita a necessidade de rápida adaptação das principais nações ao redor do globo para diminuírem as suas emissões de CO_2 referentes à cadeia de transportes. Os dados apresentam frotas majoritariamente propulsionadas por motores de combustão interna, abastecidos por combustíveis fósseis e que são responsáveis pela emissão de aproximadamente 18,7% de CO_2 na atmosfera. Logo, apresenta uma grande oportunidade de redução deste montante diante da adequada escolha para a transição da frota atual.

4.4. Ciclo de Vida dos Biocombustíveis

A utilização de biocombustíveis é uma alternativa para a redução das emissões atmosféricas provenientes do setor de transportes (MME, 2021). O processo produtivo para a fabricação desses combustíveis, através do cultivo de diferentes tipos de plantações, é capaz de absorver CO_2 na atmosfera, sendo destinado como parte de sua fonte de alimentação no processo de fotossíntese das espécies cultivadas (EPE, 2005).

No caso dos combustíveis derivados de biomassa renovável, a quantidade de dióxido de carbono emitida na combustão é compensada pela absorção deste gás através da fotossíntese no crescimento da planta energética da espécie vegetal, desde o plantio até a colheita. (EPE, 2005).

Como descrito anteriormente, os biocombustíveis podem ser derivados de distintas origens, sendo as principais a cana-de-açúcar, o milho, a mamona e a beterraba (EPE, 2005; MME, 2021). Apesar de todos esses elementos poderem ser processados em biomassa, o impacto ambiental de cada um é diferente. Tal fato pode ser observado através da avaliação do ciclo de vida do produto (EPA, 2023).

Cada uma das matérias-primas requer uma determinada técnica de plantio – ocasionando a utilização em menor ou maior escala do uso de maquinários agrícolas e fertilizantes acarretando novas emissões atmosféricas diretas e indiretas, deste modo contribuindo para a análise total do impacto processo de produção dos biocombustíveis.

Além disto, a transformação da biomassa passa por processos distintos até que se dê origem ao biocombustível, sendo que cada uma delas requer diferentes etapas de processamento. Desta forma, a transformação da matéria-prima é impactada de forma semelhante ao que ocorre no processo do plantio e colheita. Somado a este fato, é importante ressaltar que a absorção de CO_2 na atmosfera não é a mesma para cada fonte. Deste modo, apesar de todos os biocombustíveis terem propriedades e origens naturais, as emissões atmosféricas derivadas em todas as etapas de fabricação impactam diretamente na avaliação ambiental do ciclo de vida do produto.

Segundo Soares et al. (2009) em estudo desenvolvido pela Embrapa – Empresa Brasileira de Agropecuária, a substituição dos combustíveis diesel e gasolina por etanol, pode reduzir as emissões de GEE no ciclo de vida do combustível em até 76%. No experimento em questão, as análises foram realizadas no veículo *Chevrolet S10* cabine simples com potência disponível similar sendo abastecido com diesel, gasolina pura, gasolina com 23% de etanol e 100% etanol.

Em Jaiswal et al. (2017), foi analisado o potencial de substituição dos combustíveis fósseis por etanol proveniente da cana-de-açúcar brasileira. Neste estudo, o resultado apresentado demonstra que 86% das emissões de CO_2 poderiam ser compensados. As restrições apresentadas relatam sobre a incerteza do potencial de expansão, tendo vista os possíveis impactos na produção de alimentos, as mudanças climáticas e a proteção do ecossistema.

Por sua vez, a Única – União da Indústria da Cana-de-Açúcar (2019), apresentou um levantamento sobre a redução das emissões atmosféricas pelo uso do etanol, em comparação com a gasolina e o diesel. Conforme apresentado, ao longo de 2003 e 2019, foram evitadas a emissão de 533 toneladas de CO_{2eq} pelo uso do etanol derivado da cana-de-açúcar. No estudo em questão, afirma-se que através da utilização do etanol, em substituição aos combustíveis fósseis, há uma redução em 90% da emissão de GEE.

Diante desses dados, é necessário que seja dada a devida atenção aos biocombustíveis, como um potencial alternativo sustentável para mitigar o impacto ambiental promovido pelo setor de transportes. Pois além de emitirem menos poluentes, em sua forma final, é possível absorver e compensar parte de sua pegada de carbono através do seu processo de cultivo.

5

Transição Energética dos Transportes

A transição energética para o setor de transportes permanece um desafio, pois não há única solução efetiva para atendimento a toda a cadeia automobilística global. É fato que o forte movimento promovido por diversas empresas do ramo em direcionar a eletrificação de frotas como uma solução ambiental ideal não é, necessariamente, a alternativa mais efetiva para todas os países em estudo neste momento.

Apesar do cenário apresentado e comercialmente expandido, no qual os veículos elétricos não promovem emissões de forma direta, essa situação não retrata a realidade, uma vez que esses são grandes emissores de forma indireta de poluentes atmosféricos conforme a origem das fontes geradoras de energia elétrica, o que foi explicitado através do cálculo de emissões do sistema elétrico, apresentado no capítulo anterior.

5.1.

Eficiência Ambiental Veicular

Os impactos ambientais das emissões atmosféricas são evidentes e foram devidamente explanadas ao longo deste trabalho. Assim sendo, foram preparadas análises a respeito da eficiência ambiental veicular. Para tal fim, foram realizados levantamentos sobre as características de emissões de CO_2 diretas pelos veículos a combustão em geral e pelas emissões de CO_2 indiretas oriundas dos sistemas de geração elétrico para os veículos elétricos. Em geral, os veículos utilizados para fins de comparação possuem similaridades técnicas em grande parte dos países avaliados. Quanto aos elétricos, todos os modelos foram padronizados sendo eles: Volvo XC40 *Recharge*, Nissan Leaf, Tesla Model S *Long Range* e Chevrolet Bolt. Para esses veículos o consumo energético médio é de 0,16kWh/km, conforme dados

retirados das especificações técnicas do fabricante, independentemente do tipo de matriz elétrica.

Para os automóveis a combustão, foi arbitrada a escolha pelo Toyota Corolla em dois tipos de motorização: a gasolina e híbrido. Na avaliação deste modelo, mesmo que alguns países possuam o veículo com a mesma especificação, o resultado de emissão de poluentes é distinto devido a variação de concentração de aditivos no combustível.

Os dados apresentados representam uma visão geral e um indicativo da melhor opção veicular em termos da quantidade de emissões para cada país em avaliação. Através desta análise será possível verificar em quais países a utilização do veículo elétrico poderá ser uma solução efetiva.

5.2. Brasil

Diante do cenário que demonstra Brasil como possuidor do sistema elétrico com menor grau de emissões CO_2 , pode-se inferir que, potencialmente, será favorável a utilização dos veículos elétricos em relação aos demais tipos. Dado que as emissões calculadas do sistema elétrico brasileiro é de $130 \text{ gCO}_2/\text{kWh}$, foi realizada a análise de poluentes para cada um dos veículos elétricos avaliados, com os resultados apresentados na Tabela 23. Para a confecção da referida tabela foi realizado a compilação dos dados apresentados no Capítulo 4 associado com os dados técnicos de consumo apresentado pelas montadoras dos veículos selecionados para o presente estudo.

Emissões Veículos Elétricos Brasil			
Veículo	kWh/km	<i>efi x pfi</i> (gCO_2/kWh)	Emissões (gCO_2/km)
Volvo XC40 Recharge	0,19	130	24,30
Nissan Leaf	0,15		19,29
Tesla Model S Long Range Plus	0,16		20,75
Chevrolet Bolt	0,16		20,66

Tabela 23: Emissões veículos elétricos no Brasil. Fonte: autor, 2022.

Deste modo, é obtido o resultado que, em média, um veículo elétrico em território nacional emite $21,25 \text{ gCO}_2/\text{km}$. Esse dado representa um baixo nível de CO_2 frente aos movidos a combustível fóssil, quando comparados com o veículo convencional as emissões são praticamente reduzidas em 5 vezes. Se comparado ao automóvel com propulsão híbrido-convencional as emissões são reduzidas em 4 vezes, conforme é possível observar na Tabela 24.

Em território nacional, as emissões do veículo Toyota Corolla, conforme dados laboratoriais realizados pelo INMETRO (Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia), é de 77 e $103 \text{ gCO}_2/\text{km}$ para o modelo híbrido e para o modelo a combustão convencional respectivamente. Esses registros demonstram a efetividade ambiental do uso da tecnologia de propulsão híbrida, onde os poluentes atmosféricos do tipo CO_2 são aproximadamente 26% inferiores.

Para a comparação de avaliação das emissões de CO_2 , provenientes do mesmo veículo utilizando o combustível etanol, foi adotado como referência métrica o estudo relatado anteriormente desenvolvido pela Embrapa. Desta forma, baseando-se no resultado apresentado em que há redução de 76% nas emissões de CO_2 em veículos abastecidos a etanol do que os que utilizam gasolina, foi utilizado o indicador para determinação do cálculo.

A escolha para adoção deste estudo como referência teve como principal motivação a prudência pelos dados levantados, quando comparados com os demais textos de referência. Dessa forma, foi identificado que as emissões médias dos veículos movidos a etanol foi de $21,60 \text{ gCO}_2/\text{km}$.

Emissões Veículos Tradicionais Brasil		
Veículo	Combustível	Emissões (gCO_2/km)
2023 Toyota Corolla Hybrid 1.8 L	Gasolina Tipo C	77,00
2023 Toyota Corolla 2.0 L	Gasolina Tipo C	103,00
2023 Toyota Corolla Hybrid 1.8 L	Etanol	18,48
2023 Toyota Corolla 2.0 L	Etanol	24,72

Tabela 24: Emissões veículos tradicionais Brasil. Fonte: INMETRO e autor, 2022.

Apesar de os veículos elétricos serem uma alternativa ambiental para uso no Brasil, ainda há um grande desafio a ser superado: as redes de abastecimento, que estão em expansão, no entanto, até o momento limitadas. A participação dos veículos elétricos e híbridos é pouco relevante, sendo responsável por apenas 0,021% da frota em circulação.

Deste modo, apesar do grande potencial sob o aspecto ambiental dos veículos alternativos, alguns entraves como o alto custo de aquisição e a infraestrutura de energização podem dificultar e atrasar a transição energética veicular no país. Sendo assim, a melhor alternativa a ser adotada sob o aspecto ambiental é a expansão do uso do etanol proveniente da cana-de-açúcar, tendo em vista que se trata de um setor já estabelecido e o resultado ambiental foi similar quando comparado aos veículos elétricos.

5.3. Estados Unidos da América

Nos Estados Unidos da América, a participação dos veículos elétricos e híbridos já possui certa relevância, sendo responsável por aproximadamente 2,5% da frota em circulação. Dentro do cenário energético norte-americano, o uso de veículos elétricos pode significar em uma redução das emissões de CO_2 . A geração do sistema elétrico do país emite $466 \text{ gCO}_2/\text{kWh}$, assim sendo, os veículos elétricos sob avaliação emitem em média $75,97 \text{ gCO}_2/\text{km}$, como pode ser observado na Tabela 25. Este montante, mesmo maior que o apresentado no Brasil, permanece sendo benéfico diante do aspecto ambiental quando comparado ao veículo à combustão. Para a confecção da referida tabela foi realizado a compilação dos dados apresentados no Capítulo 4 associado com os dados técnicos de consumo apresentado pelas montadoras dos veículos selecionados para o presente estudo.

Para a redução das emissões dos veículos elétricos, é necessária uma alteração da matriz elétrica local para, dessa forma, quanto maior for a participação de fontes renováveis no sistema de geração elétrico, menor será a emissão indireta desses automóveis.

Emissões Veículos Elétricos EUA			
Veículo	kWh/km	<i>efi x pfi</i> (gCO ₂ /kWh)	Emissões (gCO ₂ /km)
Volvo XC40 <i>Recharge</i>	0,19	466	86,87
Nissan Leaf	0,15		68,97
Tesla Model S <i>Long Range Plus</i>	0,16		74,19
Chevrolet Bolt	0,16		73,86

Tabela 25: Emissões veículos elétricos Estados Unidos da América. Fonte: autor, 2022.

Por sua vez, os veículos a combustão apresentam dados de poluição atmosférica preocupantes, tendo em vista que as emissões apresentadas por veículos semelhantes aos utilizados para avaliação no experimento apresentem grau de poluição tão elevado, como pode ser observado na Tabela 26.

Emissões Veículos Tradicionais EUA		
Veículo	Combustível	Emissões (gCO ₂ /km)
2022 Toyota Corolla <i>Hybrid</i> 1.8 L	Gasolina	105,63
2022 Toyota Corolla 2.0 L	Gasolina	155,96

Tabela 26: Emissões veículos tradicionais Estados Unidos da América. Fonte: *U.S. Department of Energy*, 2022.

É importante ressaltar que o combustível gasolina não é essencialmente o mesmo utilizado em todos os países do mundo, pois o padrão de octanagem e o percentual de álcool inserido na mistura afeta diretamente a quantidade de emissões. Dentro desta análise, foi identificado que o mesmo veículo Toyota Corolla emite mais poluentes atmosféricos nas versões híbrida e convencional quando comparado ao Brasil segundo os dados apresentado pela EPA.

Nos Estados Unidos, a utilização de veículos elétricos e híbridos possui maior grau de acesso do consumidor local, um fator que pode suportar a transição energética dos meios de transporte. As redes de abastecimento elétrico estão sendo cada vez mais difundidas ao longo do país, sendo este um dos polos com maior disponibilidade deste recurso, um fator primordial para a adaptação à utilização desses veículos alternativos.

A substituição de 2,5% da frota de veículos convencionais por veículos híbridos e elétricos em proporções idênticas permitiria significativa a redução de emissão de CO_2 provenientes dos transportes. Tendo em vista o crescimento da oferta destes automóveis nos últimos anos, onde os modelos deste tipo aumentaram sua comercialização em 56%, isso permite que o cenário de transição seja viável e realista em um período curto. Segundo dados da IHS Markit, é esperado que até 2035 a venda de veículos elétricos represente 45% do mercado local.

5.4. Alemanha

A análise da situação de transição energética na Alemanha requer certa cautela. O país está em franca expansão de sua matriz energética, de modo a reduzir sua dependência de gás natural, em virtude da Guerra da Ucrânia, que afeta a cadeia energética como um todo.

Os movimentos de geração alternativa estão em andamento. No entanto, a prioridade do uso dessa energia é para atividades essenciais, visando garantir segurança energética. Então, mesmo que atualmente o veículo elétrico seja ambientalmente mais eficiente, e até incentivado localmente, deverá sofrer alguns impactos decorrente daquele conflito.

O sistema elétrico alemão promove a emissão de $432 \text{ gCO}_2/kWh$, bem similar ao que está implementado nos Estados Unidos da América, e em média a emissão veicular elétrica emite $70,46 \text{ gCO}_2/km$. Acompanhando o cenário encontrado em demais países desse estudo, o desempenho ambiental dos veículos elétricos é mais eficiente do que os veículos convencionais. As emissões para os quatro automóveis em estudo podem ser encontradas na Tabela 27. Para a confecção da referida tabela foi realizado a compilação dos dados apresentados no Capítulo 4 associado com os dados técnicos de consumo apresentado pelas montadoras dos veículos selecionados para o presente estudo.

Emissões Veículos Elétricos Alemanha			
Veículo	kWh/km	$efi \times pfi$ (gCO ₂ /kWh)	Emissões (gCO ₂ /km)
Volvo XC40 <i>Recharge</i>	0,19	432	80,57
Nissan Leaf	0,15		63,97
Tesla Model S <i>Long Range Plus</i>	0,16		68,81
Chevrolet Bolt	0,16		68,51

Tabela 27: Emissões veículos elétricos Alemanha. Fonte: autor, 2022.

Mediante os investimentos realizados no campo de geração elétrica, é esperado que no futuro, em um cenário pós-guerra, a matriz elétrica alemã esteja em um grau de maturidade e diversificação elevados, o que acarretará um sistema elétrico menos poluente, e tornará ainda mais interessante o incentivo ao uso de veículos elétricos.

Na Alemanha, a comercialização do veículo Toyota Corolla se dá apenas na versão híbrida. Segundo dados técnicos ambientais da fabricante, o veículo registrou a emissão de 110,00 gCO₂/km, como apresentado na Tabela 28. Esse valor é aproximadamente 50% maior que comparado aos veículos elétricos.

Emissões Veículo Tradicional Alemanha		
Veículo	Combustível	Emissões (gCO ₂ /km)
2023 Toyota Corolla <i>Touring Hybrid</i> 1.8 L	Gasolina	111,00

Tabela 28: Emissões veículo tradicional Alemanha. Fonte: Toyota, 2022.

Deste modo, diante dos dados apresentados, é explícita a eficiência ambiental do veículo elétrico na Alemanha. A transição veicular no país ocorre de forma acelerada, pois entre 2015 e 2019 o aumento na comercialização dos veículos elétricos e híbridos foi de 1927%, com a tendência de seguir aumentando essa participação nos próximos anos. Caso houvesse uma maior segurança energética, essa expectativa de crescimento poderia ser ainda mais expressiva; no entanto, tal situação deverá levar alguns anos para ser reestabelecida.

5.5. China

Conforme apresentado no capítulo 4, a China possui um dos sistemas de geração elétrica mais poluentes do mundo com a emissão de $701 \text{ gCO}_2/\text{kWh}$, fator que atinge diretamente a eficiência ambiental dos veículos elétricos no país. Em média os automóveis deste tipo emitem $114 \text{ gCO}_2/\text{km}$, sendo essa quantidade bem superior ao encontrado para os seus similares no Brasil, Estados Unidos da América e Alemanha. Logo, essa emissão inclusive é superior aos poluentes atmosféricos relativos aos veículos convencionais e híbridos no Brasil e Alemanha. Os dados detalhados são apresentados na Tabela 29. Para a confecção da referida tabela foi realizado a compilação dos dados apresentados no Capítulo 4 associado com os dados técnicos de consumo apresentado pelas montadoras dos veículos selecionados para o presente estudo.

Emissões Veículos Elétricos China			
Veículo	kWh/km	<i>efi x pfi</i> (gCO_2/kWh)	Emissões (gCO_2/km)
Volvo XC40 <i>Recharge</i>	0,19	701	130,74
Nissan Leaf	0,15		103,80
Tesla Model S <i>Long Range Plus</i>	0,16		111,65
Chevrolet Bolt	0,16		111,16

Tabela 29: Emissões veículos elétrico China. Fonte: autor, 2022.

O comportamento dos veículos convencionais é similar aos veículos elétricos e, em alguns casos, apresentam resultados ambientais até superiores. Apesar da comercialização do veículo Toyota Corolla no país, devido à ausência de dados oficiais, foi utilizado como referência o valor médio de emissões pelos automóveis em circulação, sendo ele de $130 \text{ gCO}_2/\text{km}$, conforme demonstrado na Tabela 30.

Deste modo, apesar da pouca diferença o veículo convencional é menos agressivo ao meio ambiente que o Volvo XC40 *Recharge* na China. Comparado

aos demais elétricos, as emissões são aproximadamente 15% superiores. Esse fato demonstra, de forma visível, o impacto da geração elétrica “suja”.

Emissões Veículos Tradicionais China		
Veículo	Combustível	Emissões (gCO_2/km)
Média de veículos produzidos em 2020	Gasolina	130,00

Tabela 30: Emissão veículo tradicional China. Fonte: *The International Council on Clean Transportation*, 2022.

Deste modo, sob o ponto de vista ambiental, a escolha pelo veículo elétrico permanece uma melhor alternativa, dependendo do tipo do automóvel escolhido. Apesar disto, o cenário de emissões atmosféricas decorrentes do setor de transportes na China é altamente ineficiente, já que a matriz elétrica chinesa é altamente comprometida e abastecida por fontes não renováveis. Sendo assim, independente do uso do veículo convencional ou elétricos, as emissões são basicamente oriundas de fontes fortemente poluidoras.

5.6. Japão

O Japão, assim como outros países do estudo, possui sua geração elétrica com grande participação de fontes altamente poluentes e não renováveis, resultando em emissões deste sistema na ordem de $560 \text{ } gCO_2/kWh$. Deste modo, os veículos elétricos em avaliação emitem, em média, $91,37 \text{ } gCO_2/km$, como demonstrado na Tabela 31. Para a confecção da referida tabela foi realizado a compilação dos dados apresentados no Capítulo 4 associado com os dados técnicos de consumo apresentado pelas montadoras dos veículos selecionados para o presente estudo.

Emissões Veículos Elétricos Japão			
Veículo	kWh/km	<i>efi x pfi</i> (gCO ₂ /kWh)	<i>Emissões</i> (gCO ₂ /km)
Volvo XC40 <i>Recharge</i>	0,19	560	104,48
Nissan Leaf	0,15		82,95
Tesla Model S <i>Long Range Plus</i>	0,16		89,22
Chevrolet Bolt	0,16		88,83

Tabela 31: Emissão veículos elétrico Japão. Fonte: autor, 2022.

Por sua vez, os veículos tradicionais apresentam em determinado cenário elementos vantajosos. Levando em consideração o automóvel Toyota Corolla em sua versão aspirada, as emissões são superiores às de veículos elétricos, com 30% mais poluentes atmosféricos sendo emitidos. Frente a essa versão, os automóveis elétricos levam ampla vantagem.

No entanto, quando tratamos da versão híbrida a situação se inverte, pois nesse modelo as emissões atmosféricas são de 77 gCO₂/km, o que representa um resultado aproximadamente 16% mais eficiente sob o aspecto ambiental. Dentro deste cenário, o veículo híbrido apresenta-se como a melhor alternativa veicular para o Japão. Os dados detalhados são demonstrados na Tabela 32.

Emissões Veículos Tradicionais Japão		
Veículo	Combustível	<i>Emissões (gCO₂/km)</i>
2023 Toyota Corolla <i>Hybrid</i> 1.8 L	Gasolina	77,00
2023 Toyota Corolla 1.5 L	Gasolina	120,00

Tabela 32: Emissão veículos tradicionais Japão. Fonte: Toyota, 2022.

Nota-se, portanto, que através deste cenário é possível observar o potencial e a eficiência ambiental dos veículos híbridos. A utilização destes automóveis é vantajosa em países onde o sistema elétrico emite grandes quantidades de poluentes. Desse modo, o veículo híbrido se posiciona de forma estratégica, e pode ser uma solução temporária até que ocorra a transição da matriz energética para fontes menos nocivas e, preferencialmente, renováveis.

5.7. Índia

Na Índia, por este local possuir a matriz elétrica com a maior emissão de poluentes entre os países em estudo, é esperado que os veículos elétricos não sejam a melhor alternativa. O sistema elétrico indiano é responsável pela emissão de $776 \text{ gCO}_2/\text{kWh}$, afetando diretamente a eficiência ambiental dos automóveis elétricos. Por lá esses veículos emitem em média $126,70 \text{ gCO}_2/\text{km}$, como pode ser observado na Tabela 33. Para a confecção da referida tabela foi realizado a compilação dos dados apresentados no Capítulo 4 associado com os dados técnicos de consumo apresentado pelas montadoras dos veículos selecionados para o presente estudo.

Emissões Veículos Elétricos Índia			
Veículo	kWh/km	<i>efi x pfi</i> (gCO_2/kWh)	Emissões (gCO_2/km)
Volvo XC40 <i>Recharge</i>	0,19	776	144,88
Nissan Leaf	0,15		115,02
Tesla Model S <i>Long Range Plus</i>	0,16		123,72
Chevrolet Bolt	0,16		123,18

Tabela 33: Emissão veículos elétrico Índia. Fonte: autor, 2022.

Para a avaliação dos veículos convencionais, foi utilizada a média nacional do ano fiscal 2020-2021, em decorrência da não comercialização do veículo Toyota Corolla no país. No geral, as emissões atmosféricas foram bem similares às dos veículos tradicionais, sendo mais vantajosa na maioria das comparações. Os detalhes relativos às emissões estão apresentados na Tabela 34.

Emissões Veículos Tradicionais Índia		
Veículo	Combustível	Emissões (gCO_2/km)
Média de veículos produzidos em 20/21	Todos	121,30

Tabela 34: Emissão veículo tradicional Índia. Fonte: *The International Council on Clean Transportation*, 2021.

O cenário ambiental para a Índia se mostra de forma preocupante, pois o país está em franco crescimento ao longo das últimas décadas e possui uma das maiores frotas mundiais, sendo ela altamente poluente. Além disto, o sistema elétrico é dependente de recursos prejudiciais ao meio ambiente.

Desta forma, dentre os países em estudo, a Índia possui o cenário mais desafiador em termos de alinhar o desenvolvimento local, à estratégia para redução da emissão de poluentes atmosféricos e à necessidade de realizar a transição energética. Com as condições atuais, é praticamente indiferente sob o aspecto ambiental o uso dos veículos elétricos ou convencionais no país.

5.8. Resultados

Diante do exposto na avaliação individual dos veículos em comercialização no Brasil, Estados Unidos da América, Alemanha, China, Japão e Índia, é possível observar que, de forma geral, cada tipo de unidade avaliada obteve um resultado ambiental distinto. Os dados apresentam explicitamente a diferença das emissões atmosféricas emitidas para cada tipo de veículo, e evidencia a importância das matrizes elétricas sustentáveis para o futuro do setor de transportes eletrificado.

Com isto em vista, através da Tabela 35, é possível visualizar, de forma centralizada, as emissões atmosféricas provenientes da circulação de cada veículo avaliado nos países em estudo. Há de se ressaltar que não necessariamente todos os veículos possuem suas características técnicas exatamente iguais aos outros. Nessa situação foi adotada a avaliação em veículos com o maior grau de similaridade.

Nos EUA, mesmo se tratando de um país que requer grande alteração da composição de sua matriz elétrica para se tornar sustentável, o desempenho ambiental dos veículos elétricos é superior que os veículos a combustão, inclusive que os do tipo híbrido. Em comparativo com o Nissan *Leaf*, veículo elétrico com menor montante de emissões atmosféricas, o automóvel Toyota Corolla 1.8l *Hybrid* é 53% mais poluente. Esses dados evidenciam, que de fato a eletrificação das frotas automotivas pode ser uma das soluções para o futuro do setor de transportes.

Comparativo Geral de Emissões Atmosféricas (gCO ₂ /km)							
Veículo	Combustível	EUA	Japão	China	Alemanha	Brasil	Índia
		<i>Emissões</i>	<i>Emissões</i>	<i>Emissões</i>	<i>Emissões</i>	<i>Emissões</i>	<i>Emissões</i>
Volvo XC40 Recharge	Elétrico	86,87	104,48	130,74	80,57	24,30	144,88
Nissan Leaf	Elétrico	68,97	82,95	103,80	63,97	19,29	115,02
Tesla Model S Long Range Plus	Elétrico	74,19	89,22	111,65	68,81	20,75	123,72
Chevrolet Bolt	Elétrico	73,86	88,83	111,16	68,51	20,66	123,18
2022 Toyota Corolla Hybrid 1.8 L	Gasolina	105,63	-	-	-	-	-
2022 Toyota Corolla 2.0 L	Gasolina	155,96	-	-	-	103,00	-
2023 Toyota Corolla Hybrid 1.8 L	Gasolina	-	77,00	-	-	77,00	-
2023 Toyota Corolla 1.5 L	Gasolina	-	120,00	-	-	-	-
Média de veículos produzidos em 2020	Gasolina	-	-	130,00	-	-	121,30
2023 Toyota Corolla Touring Hybrid 1.8 L	Gasolina	-	-	-	111,00	-	-
2023 Toyota Yaris 1.5 L	Gasolina	-	-	-	138,00	-	-
2023 Toyota Corolla Hybrid 1.8 L	Etanol	-	-	-	-	18,48	-
2023 Toyota Corolla 2.0 L	Etanol	-	-	-	-	24,72	-

Tabela 35: Comparativo Geral de Emissões Atmosféricas

No Japão, o resultado apresentado foi diferente do encontrado nos EUA. O sistema elétrico local é composto por fontes com alto teor de poluentes, tais como o carvão mineral e gás natural e isto afetou significativamente o desempenho ambiental do veículo elétrico. Ainda assim, todos os automóveis avaliados deste tipo possuíram menor emissão de poluentes atmosféricos do que o veículo convencional. O Toyota Corolla 1.8l *Hybrid*, dentre todos os veículos avaliados no país, obteve o melhor resultado, sendo o responsável pela menor poluição ambiental.

Na China, sem exceções, todos os tipos de veículo apresentaram um desempenho ambiental negativo, sendo superior apenas que o resultado encontrado

na Índia. De forma geral, independente da fonte de alimentação, a emissão média dos automóveis avaliados foi acima de $117 \text{ gCO}_2/\text{kWh}$. O veículo Nissan *Leaf* apresentou resultado ligeiramente melhor que a média, no entanto, quando comparado com a sua utilização nos EUA, Japão, Brasil e Alemanha, as emissões atmosféricas foram maiores em 50%, 25%, 537% e 62%, respectivamente.

Sendo assim, dentro das características identificadas, o uso de veículos convencionais ou elétricos na China não acarretará impactos muito distintos. Contudo, com a implementação estratégica para a substituição das atuais fontes energéticas do sistema elétrico para fontes de origem renovável, favorecerá significativamente a eletrificação das frotas automotivas.

Na Alemanha, a performance ambiental dos veículos elétricos foi significativamente superior aos convencionais e híbridos. Em média, a redução de poluentes atmosféricos emitidos foi de 37% em relação aos automóveis híbridos e 49% em relação aos convencionais. Ao mesmo tempo em que o país é um dos maiores incentivadores da migração da frota para veículos elétricos, há um grande desafio quanto a crise energética em curso na Europa, em especial no país. Há de se monitorar que a geração de energia elétrica não pode ser comprometida com o uso de fontes prejudiciais ao meio ambiente e garantir o funcionamento regular de todas as atividades essenciais sem nenhum dano.

Diante do cenário avaliado, o Brasil possui duas opções para a evolução de sua frota automotiva. Tanto os veículos elétricos, quanto os veículos convencionais abastecidos à etanol, são emissores de baixo grau de poluição atmosférica, comparado com os demais países em estudo. A maior parte da frota nacional já é adepta a tecnologia *flex*, o que favorece a continuidade e expansão do uso do etanol na frota nacional. Além disso, para esse uso já há toda a infraestrutura requerida instalada. No caso do veículo elétrico, há empecilhos a serem superados para que este seja amplamente difundido, como o alto custo de aquisição que restringe a comercialização em grande escala. Além disso, não há estações de recarga em volume suficiente para um incremento significativo da frota eletrificada, sendo então requerido altos investimentos para a disponibilização da estrutura necessária.

Por fim, na Índia a emissão média dos veículos elétricos foi superior à dos veículos convencionais. No geral, as emissões dos veículos avaliados foram

superiores à $125 \text{ gCO}_2/\text{kWh}$, sendo o maior dentre os países em estudo. Este fator se deve principalmente composição do sistema elétrico local, formado majoritariamente por fontes não-renováveis. O cenário encontrado no país se apresenta de forma similar ao da China, no entanto, ainda se trata de um país em desenvolvimento. Desta forma, pode-se constatar que qualquer que seja a opção de transporte ela possuirá um alto impacto ambiental.

6

Conclusão

Os desafios do desenvolvimento de novas modalidades para os meios de transporte e a evolução da transição energética é uma realidade enfrentada diariamente por todas as nações. Os anseios ambientais, cada vez mais evidentes, traduzem a necessidade imediata de uma definição estratégica sob o aspecto da mobilidade urbana e das matrizes elétricas.

Em suma, este trabalho carrega em sua abordagem as ponderações referentes à eficiência ambiental dos veículos elétricos em virtude da formação das matrizes elétricas de cada um dos países em estudo. Deste modo, foi possível estabelecer elos significativos para a definição da adoção de veículos movidos a fontes alternativas.

Portanto, ao decorrer do presente trabalho, foi evidenciado o impacto ambiental decorrente do sistema de transportes e do sistema de geração elétrica. Ambos são influenciados pela formação da matriz energética e sua devida finalidade. Assim sendo, foi demonstrado que em países altamente dependentes de fontes energéticas não renováveis há elevadas quantidades de emissões atmosféricas referentes aos mecanismos de transporte e geração elétrica.

Apesar disto, foi possível avaliar condições e particularidades enfrentadas por cada país para a determinação da eficiência ambiental veicular. Portanto, foi constatada grande vantagem sob o aspecto das emissões atmosféricas do uso de veículos elétricos no Brasil, Estados Unidos da América e Alemanha. Em todas essas localidades, os automóveis elétricos apresentaram níveis de poluição inferior aos veículos convencionais. Em especial, no Brasil, o resultado foi em torno de quatro vezes mais eficiente.

No Brasil, há ainda a alternativa do uso do etanol proveniente da cana-de-açúcar para abastecimento da frota automotiva, tendo em vista que grande parte da gama de veículos comercializados nacionalmente são adeptos da tecnologia *flex*. Diante do resultado ambiental do veículo elétrico e a etanol serem similares em termos de emissões atmosféricas, pode-se desta forma, considerar ambos como soluções viáveis no mercado local.

Todavia, tornar o veículo elétrico escalável demandará infraestrutura de abastecimento robusta e adequada, além de incentivos fiscais para aquisição. Esses fatores certamente levarão um longo prazo para ser devidamente estabelecido. Além disso, há de se destacar que a infraestrutura disponível para o abastecimento dos veículos movidos a etanol já está implementada de forma madura em todo o território nacional.

Dada a facilidade de aproveitamento de uma estrutura já existente e altamente difundida, a utilização do etanol oriundo da cana-de-açúcar pode ser considerada uma forte opção aos veículos movidos à gasolina ou elétricos. Desta forma, o impacto ambiental é significativamente reduzido. No entanto, assim como as emissões atmosféricas são variadas conforme a composição das fontes energéticas, é necessário ressaltar que o mesmo ocorre no processo de transformação das matérias-primas em etanol. Deste modo, desde o tratamento do solo ao cultivo e transformação, vários parâmetros devem ser levados em consideração. Isto significa que cada tipo de etanol irá possuir uma performance ambiental distinta.

Na China e na Índia o resultado encontrado dos veículos elétrico foi similar ou mais adverso frente ao nível de poluição dos automóveis tradicionais. Esse dado reflete a realidade da formação do sistema de geração elétrica desses países, os quais estão altamente direcionados ao uso de carvão mineral, um dos elementos com maior potencial de emissão. Sendo assim, espera-se melhor desempenho ambiental através da adoção de veículos híbridos, até que ocorra uma transição energética adequada de modo que o sistema elétrico seja um menor emissor de poluentes atmosféricos.

Quanto ao Japão, foi identificado que o veículo elétrico é mais eficiente quando comparado aos automóveis tradicionais, no entanto, este perde

ambientalmente para os veículos híbridos, os quais se apresentam como a melhor alternativa para o país neste momento. Até que ocorra a migração de maiores demandas elétricas para fontes menos emissoras, a expectativa é de estabilidade.

Diante da análise elaborada, sugere-se como oportunidade para estudo futuro a comparação ambiental dos resíduos gerados pelo fim do ciclo de vida dos automóveis tradicionais e elétricos. Recomenda-se, portanto, a elaboração de estudo futuro para a diversificação da matriz elétrica brasileira em virtude da alta dependência encontrada atualmente.

Conclui-se que o veículo elétrico é uma alternativa ambientalmente viável sob a premissa de redução da emissão de poluentes atmosféricos desde que as fontes geradoras de energia estejam alinhadas com o uso principalmente de fontes renováveis. Fora deste cenário, é destacado o uso de veículos híbridos até que ocorra a transição energética para um padrão com emissões reduzidas.

7

Referências Bibliográficas

ABSOLAR, Associação Brasileira de Energia Solar Fotovoltaica. **Geração solar no Brasil atinge 14 GW, potência equivalente à Usina de Itaipu.** Disponível em: < <https://www.absolar.org.br/noticia/geracao-solar-no-brasil-atinge-14-gw-potencia-equivalente-a-usina-de-itaipu/> >. São Paulo, 2022.

AFDC – ALTERNATIVE FUELS DATA CENTER (USA). **How Do All-Electric Cars Works?**. U.S. Department of Energy. Disponível em: <<https://afdc.energy.gov/vehicles/how-do-all-electric-cars-work#:~:text=Hybrid%20electric%20vehicles%20are%20powered,by%20the%20internal%20combustion%20engine.>>. Acesso em: julho de 2023.

AFDC – ALTERNATIVE FUELS DATA CENTER (USA). **How Do Hybrid Electric Cars Works?**. U.S. Department of Energy. Disponível em: <<https://afdc.energy.gov/vehicles/how-do-hybrid-electric-cars-work#:~:text=Hybrid%20electric%20vehicles%20are%20powered,by%20the%20internal%20combustion%20engine.>>. Acesso em: julho de 2023.

AFDC – ALTERNATIVE FUELS DATA CENTER (USA). **How Do Plug-In Hybrid Electric Cars Works?**. U.S. Department of Energy. Disponível em: <<https://afdc.energy.gov/vehicles/how-do-plug-in-hybrid-electric-cars-work#:~:text=Hybrid%20electric%20vehicles%20are%20powered,by%20the%20internal%20combustion%20engine.>>. Acesso em: junho de 2023.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENERGIA NUCLEAR (ABEN). **Análise comparativa das alternativas energéticas.** Rio de Janeiro, 2008.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE VEÍCULOS ELÉTRICOS (ABVE). **Eletrificados crescem 51% no 1º quadrimestre.** Disponível em: < <http://www.abve.org.br/eletrificados-crescem-51-no-1o-quadrimestre/> >. Acesso em junho de 2023.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE VEÍCULOS ELÉTRICOS (ABVE). **Vendas/emplacamentos de veículos elétricos (VEs) no Brasil – 2012 a junho de 2020.** Rio de Janeiro, 2020.

AGÊNCIA DE NOTÍCIAS DA INDÚSTRIA. **Deu COP: destaques de 10 Conferências do Clima ao longo dos anos.** 2022. Disponível em: < Deu COP: destaques de 10 Conferências do Clima ao longo dos anos - Agência de Notícias da Indústria (portaldaindustria.com.br) > Acesso em: novembro de 2022.

ANDERSON, J.; ANDERSON, C. **Electric and Hybrid cars: A History.** North Carolina, 2010.

BBC. **How did oil come to run our world?**. Disponível em: <<https://www.bbc.co.uk/teach/how-did-oil-come-to-run-our-world/zn6gnrd>> Acesso em: março de 2020.

BRASIL, Banco Nacional do Desenvolvimento Econômico e Social (BNDES). **Veículos elétricos: história e perspectivas no Brasil**. Brasil, 2010.

BRASIL, **Lei nº 10.946/2022**, de 25 de janeiro de 2022. Dispõe sobre a cessão de uso de espaços físicos e o aproveitamento dos recursos naturais em águas interiores de domínio da União, no mar territorial, na zona econômica exclusiva e na plataforma continental para a geração de energia elétrica a partir de empreendimento offshore. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 2022.

BRASIL, **Lei nº 14.300/2022**, de 6 de janeiro de 2022. Institui o marco legal da microgeração e minigeração distribuída, o Sistema de Compensação de Energia Elétrica (SCEE) e o Programa de Energia Renovável Social (PERS); altera as Leis nºs 10.848, de 15 de março de 2004, e 9.427, de 26 de dezembro de 1996; e dá outras providências. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 2022.

BRASIL, Ministério de Minas e Energia. **Brasil avança no setor de biocombustíveis**. Brasil, 2022.

BRASIL, Ministério de Minas e Energia. **Especificação do biodiesel**. Brasil, 2021.

BRASIL, Ministério de Minas e Energia – Empresa de Pesquisa Energética. **Balanco Energético Nacional ano base 2019**. Brasília, 2020.

BRASIL, Ministério de Minas e Energia – Empresa de Pesquisa Energética. **Balanco Energético Nacional ano base 2020**. Brasília, 2021.

BRASIL, Ministério de Minas e Energia – Empresa de Pesquisa Energética. **PNE-2050 – Plano Nacional de Energia**. Brasília, 2020.

BRASIL, Ministério de Minas e Energia – Empresa de Pesquisa Energética. **Potencial de Redução de Emissões de CO2 em Projetos de Produção e uso de Biocombustíveis**. Rio de Janeiro, 2005.

BRASIL, Ministério de Minas e Energia – Empresa de Pesquisa Energética. **RenovaBio: Combustíveis 2030 – Nota técnica: Regras de comercialização**. Brasil, 2017.

BRASIL, Ministério de Minas e Energia – Empresa de Pesquisa Energética. **Matriz Energética e Elétrica**. Brasil.

BRASIL, Ministério do Meio Ambiente. **Resolução CONAMA nº 18/86**, de 6 de maio de 1986. Instituir, em caráter nacional, o PROGRAMA DE

CONTROLE DA POLUIÇÃO DO AR POR VEÍCULOS AUTOMOTORES – PROCONVE. Brasília, 1986.

BRASIL, Ministério do Meio Ambiente. **Resolução CONAMA nº 5/89**, de 15 de junho de 1989. Instituir o Programa Nacional de Controle da Qualidade do Ar - PRONAR, como um dos instrumentos básicos da gestão ambiental para proteção da saúde e bem-estar das populações e melhoria da qualidade de vida com o objetivo de permitir o desenvolvimento econômico e social do País de forma ambientalmente segura, pela limitação dos níveis de emissão de poluentes por fontes de poluição atmosférica. Brasília, 1989.

BRASIL, Ministério do Meio Ambiente. **Resolução CONAMA nº 297/02**, de 26 de fevereiro de 2002. Estabelecer os limites para emissões de gases poluentes por ciclomotores, motocicletas e veículos similares novos. Brasília, 2002.

BRASIL, Ministério do Meio Ambiente. **Resolução CONAMA nº 382/06**, de 26 de dezembro de 2006. Estabelece os limites máximos de emissão de poluentes atmosféricos para fontes fixas. Brasília, 2006.

BRASIL, Ministério do Meio Ambiente. **Resolução CONAMA nº 418/09**, de 25 de novembro de 2009. Estabelece critérios para a elaboração de planos de controle de poluição veicular-pcpv, para a implantação de programas de inspeção e manutenção de veículos em uso - i/m pelos órgãos estaduais e municipais de meio ambiente, determinar novos limites de emissão e procedimentos para a avaliação do estado de manutenção de veículos em uso. Brasília, 2009.

BRASIL, Ministério do Meio Ambiente. **Resolução CONAMA nº 491/18**, de 21 de novembro de 2018. Esta Resolução estabelece padrões de qualidade do ar. Brasília, 2018.

BRASIL, Senado Federal. **Protocolo de Kyoto**. Brasília. Disponível em: < <https://www12.senado.leg.br/noticias/entenda-o-assunto/protocolo-de-kyoto> > Acesso em: setembro de 2022.

CAGE, F.; GRANADOS, S. The Long Road to Electric Cars. **Reuters**, 2022. Disponível em: < <https://www.reuters.com/graphics/AUTOS-ELECTRIC/USA/mopanyqxwva/> > Acesso em outubro de 2022.

CARVALHO, C. **Emissões Relativas de Poluentes do Transporte Urbano**.

Boletim Regional, Urbano e Ambiental – IPEA – Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada, 2011.

CAR AND DRIVER. **Car and Drive**. Tesla Model S Long Range Plus Exceeds 300 Miles of Range, a First in Our Testing. Disponível em: < <https://www.caranddriver.com/news/a36302930/tesla-model-s-long-range-plus-highway-range-testing/> > Acesso em: outubro de 2022.

CASPER, R.; SUNDIN, E. **Electrification in the automotive industry: effects in remanufacturing.** Journal of Remanufacturing. 2021.

CBO – Congress Budget Office. **Emissions of Carbon Dioxide in the Transportation Sector.** Publication nº 58.566. 2022.

CEIC Data. **China Number of Registered Vehicles – 1983 – 2022.** Disponível em: < <https://ceicdata.com/en/indicator/china/number-of-registered-vehicles>> Acesso em: outubro de 2022.

CENTER OF SUSTAINABLE SYSTEMS. **U.S Renewables Energy Factsheet.** Michigan. University of Michigan, 2022.

CHEVROLET. **Chevrolet.** Bolt EV 2022. Disponível em: < <https://www.chevrolet.com.br/eletrico/bolt-ev>> Acesso em: outubro de 2022.

CONAB – Companhia Nacional de Abastecimento. **Observatório Agrícola Acompanhamento da Safra Brasileira de Cana-de-Açúcar.** Brasília, 2019.

CROWNHART, C. **Why EVs won't replace hybrid cars anytime soon.** MIT Technology Review. Disponível em: < <https://www.technologyreview.com/2022/12/22/1065830/why-evs-wont-replace-hybrid-cars-anytime-soon/>> Acesso em: junho de 2023.

CRUZ, M.; GUERREIRO, E.; RAIHER, A. **A Evolução da Produção de Etanol no Brasil, no Período de 1975 a 2009.** Documentos técnico-científicos, 43, 141-159p, 2012.

BRITANNICA. **Nicolas-Joseph Cugnot biography.** Disponível em: <<https://www.britannica.com/biography/Nicolas-Joseph-Cugnot>> Acesso em: janeiro de 2022.

DA VINCI, L. **Codex Atlanticus.** Itália, século XVI.

DEO, A.; GERMAN, J. **Fuel consumption from new passenger cars in India: Manufacturers' performance in fiscal year 2020-21.** The International Council on Clean Transportation, 2021.

DEUTSCHLAND, Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz. **Entwurf eines Gesetzes zur Änderung des Erneuerbare-Energien-Gesetzes und weiterer energierechtlicher Vorschriften.** Berlin.

DEUTSCHLAND, Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz. **Our energy transition for an energy supply that is secure, clean, and affordable.** Disponível em: < <https://www.bmwk.de/Redaktion/EN/Dossier/energy-transition.html>> Acesso em: setembro de 2022.

DEUTSCHLAND, Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz. **The Energiewende: Secure, sustainable and affordable energy for 21st century.** Berlin.

DEUTSCHLAND, Das Kraftfahrt-Bundesamt. **Der Fahrzeugbestand im Überblick am 1. Januar 2016 gegenüber dem 1. Januar 2015.** Berlin, 2016.

DEUTSCHLAND, Das Kraftfahrt-Bundesamt. **Der Fahrzeugbestand im Überblick am 1. Januar 2017 gegenüber dem 1. Januar 2016.** Berlin, 2017.

DEUTSCHLAND, Das Kraftfahrt-Bundesamt. **Der Fahrzeugbestand im Überblick am 1. Januar 2018 gegenüber dem 1. Januar 2017.** Berlin, 2018.

DEUTSCHLAND, Das Kraftfahrt-Bundesamt. **Der Fahrzeugbestand im Überblick am 1. Januar 2019 gegenüber dem 1. Januar 2018.** Berlin, 2019.

DEUTSCHLAND, Das Kraftfahrt-Bundesamt. **Der Fahrzeugbestand im Überblick am 1. Januar 2020 gegenüber dem 1. Januar 2019.** Berlin, 2020.

EEA – European Environment Agency. **Transport: increasing oil consumption and greenhouse gas emissions hamper EU progress toward environment and climate objectives.** 2020.

FERNÁNDEZ, R.A. **A more realistic approach to electric vehicle contribution to greenhouse gas emissions in the city.** Journal of Cleaner Production. Madrid, 2018.

FRAUNHOFER IWKS – FRAUNHOFER RESEARCH INSTITUTION FOR MATERIALS RECYCLING AND RESOURCE STRATEGIES IWKS. **Closing the value chain in electromobility recycling for the energy of tomorrow.** Hanau.

GIL, L. **Materiais necessários para a transição energética via mobilidade elétrica rodoviária.** Lisboa. Ciência & Tecnologia dos Materiais Vol.31 Nº1. Direção Geral de Energia e Geologia, Divisão de Estudos, Investigação e Renováveis, 2019.

GREINER, T. **Carbon Monoxide Poisoning: Checking for Complete Combustion (AEN-175).** Department of Agricultural and Biosystems Engineering, Iowa State University, 1997.

HODGES, J. **Animals and values in society.** Livestock Research for Rural Development. Volume 11, Article #23. 1999.

HUBBERT, M. **Nuclear Energy and the Fossil Fuels.** Houston, 1956.

IBERDROLA. **Você sabe como os parques eólicos onshore funcionam?**. Disponível em: <
<https://www.iberdrola.com/sustentabilidade/como-funcionam-parques-eolicos-onshore>> Acesso em: junho de 2020.

INDIA, Ministry of New and Renewable Energy. **Annual Report 2020-21**. Índia, 2022.

INDIA, Ministry of Road Transport & Highways Transport Research Wing. **Road Transport Year Book 2017-2018 & 2018-2019**. New Delhi, 2021.

INSIDEEVS. **UOL**. Avaliação Volvo XC40 P6: Versão de entrada é o carro elétrico que faz sentido. Disponível em: <
<https://insideevs.uol.com.br/reviews/626248/avaliacao-volvo-xc40-p6-eletrico/#:~:text=Al%C3%A9m%20disso%2C%20a%20bateria%20tamb%C3%A9m,uma%20carga%20pelo%20padr%C3%A3o%20WLTP.>> Acesso em: novembro de 2022.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **An Energy Sector Roadmap to Carbon Neutrality in China**. France, 2021.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **Global EV Outlook 2020** Entering the decade of electric drive. France, 2020.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **Global EV Outlook 2021** Accelerating ambitious despite the pandemic. France, 2021.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **Global EV Outlook 2022** Securing supplies for an electric future. France, 2022.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA). **IEA**. Disponível em: <
[https://www.iea.org/data-and-statistics?country=WORLD&fuel=Energy%20supply&indicator=Total%20primary%20energy%20supply%20\(TPES\)%20by%20source](https://www.iea.org/data-and-statistics?country=WORLD&fuel=Energy%20supply&indicator=Total%20primary%20energy%20supply%20(TPES)%20by%20source)> Acesso em: maio de 2020.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA). **IEA**. Disponível em: <
<https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/global-electric-car-stock-2010-2019>> Acesso em: maio de 2021.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA). **IEA**. Disponível em: <
<https://www.iea.org/countries/china>> Acesso em: maio de 2020.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA). **IEA**. Disponível em: <
<https://www.iea.org/countries/germany>> Acesso em: maio de 2020.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA). **IEA**. Disponível em: <
<https://www.iea.org/countries/india>> Acesso em: maio de 2020.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA). **IEA**. Disponível em: <<https://www.iea.org/countries/japan>> Acesso em: maio de 2020.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA). **IEA**. Disponível em: <<https://www.iea.org/countries/united-states>> Acesso em: maio de 2020.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **Net Zero by 2050 – A Roadmap for the Global Energy Sector**. France, 2021.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Estatísticas Frota de Veículos**. Disponível em: <<https://cidades.ibge.gov.br/brasil/pesquisa/22/28120>> Acesso em: julho de 2022.

INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA, QUALIDADE E TECNOLOGIA (INMETRO). **Tabela de Consumo / Eficiência Energética Veículos Automotores Leves Tabela Ano 2022**. Programa Brasileiro de Etiquetagem, 2022.

IPCC – Intergovernmental Panel on Climate Change. **Climate Change 2007: Working Group I: The Physical Science Basis**. Disponível em: <https://archive.ipcc.ch/publications_and_data/ar4/wg1/en/faq-2-1.html> Acesso em: junho de 2023.

IPCC – Intergovernmental Panel on Climate Change. **Climate Change in Data – Climate Change 2021: The Physical Science Basis**. Disponível em: <<https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/resources/climate-change-in-data/>> Acesso em: junho de 2023.

IPCC – Intergovernmental Panel on Climate Change. **IPCC Updates Methodology for Greenhouse Gas Inventory**. 2019.

JAISWAL, D. et al. **Brazil sugarcane ethanol as an expandable green alternative to crude oil use**. Nature Climate Change, 2017.

JAPAN AUTOMOBILE MANUFACTURES ASSOCIATION (JAMA). **Motor Vehicles Statistics**. Tóquio, 2021. Disponível em: <<https://www.jama.or.jp/english/publications/MVS2020.pdf>> Acesso em: maio de 2022.

JAPAN AUTOMOBILE MANUFACTURES ASSOCIATION (JAMA). **The Motor Industry of Japan 2020**. Tóquio, 2021. Disponível em: <https://www.jama.or.jp/english/publications/The_Motor_Industry_of_Japan_2020.pdf> Acesso em: maio de 2022.

LAI, X. et al. **Critical review of life cycle assessment of lithium-ion batteries for electric vehicles: A lifespan perspective**. eTransportation 12 – 100160. 2022.

MANSARD, J. It's 250 years old and it still exists: The first automobile the world ever saw. **El País**. Disponível em:

<<https://english.elpais.com/science-tech/2022-02-15/its-250-years-old-and-it-still-exists-the-first-automobile-the-world-ever-saw.html>>. Acesso em: abril de 2022.

MCKINSEY. **Why the automotive future is electric**: Mainstream EVs will transform the automotive industry and help decarbonize the planet. McKinsey Center for Future Mobility. 2021.

MERCEDES-BENZ. **Corporate history**. Disponível em: <<https://www.mercedes-benz.com/en/innovation/milestones/corporate-history/>> Acesso em: fevereiro de 2020.

MERCEDES-BENZ GROUP. **Company history first automobile**. Disponível em: <<https://group.mercedes-benz.com/company/tradition/company-history/1885-1886.html>> Acesso em: março de 2021.

NATIONAL MAGLAB. **Planté Battery – 1859**. Florida. Disponível em: <<https://nationalmaglab.org/magnet-academy/history-of-electricity-magnetism/museum/plante-battery-1859/>> Acesso em: fevereiro de 2020.

NISSAN. **Nissan**. Nissan Leaf 2023. Disponível em: <https://www.nissan.com.br/veiculos/modelos/leaf.html#C400_cmp_story_6a03-modal> Acesso em: outubro de 2022.

ORGANISATION INTERNATIONALE DES CONSTRUCTEURS D'AUTOMOBILES (OICA). **Production Statistics**. Disponível em: <<https://www.oica.net/production-statistics/>> Acesso em: setembro 2022.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS (ONU). **Acordo de Paris sobre o Clima**. Paris, 2015.

ORGANIZATION OF THE PETROLEUM EXPORTING COUNTRIES (OPEC). **OPEC Annual Statistical Bulletin**. Viena, 2020.

PAILLERE, H.; DONOVAN, J. **Nuclear Power 10 Years After Fukushima: The Long Road Back**. IAEA – International Atomic Energy Agency. 2021.

REQUIA, W.J. et al. **Carbon dioxide emissions of plug-in hybrid electric vehicles**: A life-cycle analysis in eight Canadian cities. Renewable and Sustainable Energy Reviews 78 (2017) 1390-1396. 2017.

SÃO PAULO, CETESB – Companhia Ambiental do Estado de São Paulo. **COP15/MOP5 – Copenhagen, Dinamarca (dezembro de 2009)**. Disponível em: <<https://cetesb.sp.gov.br/proclima/conferencia-das-partes-cop/cop-15-mop-5-copenhagen-dinamarca-dezembro-de-2009/>> Acesso em: setembro de 2022.

SEINFELD, J; PANDIS, S. **Atmospheric Chemistry and Physics** – From Air Pollution to Climate Change. John Wiley & Sons, Inc. New Jersey, 2006.

SCHLÖMER, S. **Technology-specific Cost and Performance Parameters**, Annex III of Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). 2014.

SOCIETY OF PETROLEUM ENGINEERS – SPE. **History of Petroleum Technology**. Disponível em: <[SOARES, L. et al. **Mitigação das Emissões de Gases de Efeito Estufa pelo Uso de Etanol de Cana-de-açúcar Produzido no Brasil**. Circular Técnica nº 27, Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária \(EMBRAPA\). Seropédica, Rio de Janeiro, 2009.](https://www.spe.org/en/industry/history/timeline/#:~:text=First%20Oil%20Well-,July%2014%2C%201848,which%20originated%20in%20ancient%20China.&text=Workers%20digging%20an%20oil%20well,%20DEibat%2C%20Baku%2C%20Azerbaijan.> Acesso em: março de 2020.</p>
</div>
<div data-bbox=)

SUNWISE. **Conheça as maiores hidroelétricas do mundo e do Brasil**. Disponível em: < <https://sunwise.com.br/conheca-as-maiores-usinas-hidreletricas-do-mundo-e-do-brasil/>> Acesso em: janeiro de 2022.

SWEENEY, P. **Electric perfection is enemy of hybrid-car good**. Reuters. Disponível em: <<https://www.reuters.com/breakingviews/electric-perfection-is-enemy-hybrid-car-good-2022-08-16/>> Acesso em: junho de 2023.

TANABE, Y. **Japan's Energy Transition toward Carbon Neutrality by 2050**. EU-Japan Center for Industrial Cooperation. Japan, 2021.

THE WORLD BANK. WORLD BANK. Disponível em: < <https://data.worldbank.org/country/IN>> Acesso em: maio de 2020.

TOYOTA DEUTSCHLAND. **Toyota**. Corolla Touring Sports. Disponível em: < <https://www.toyota.de/neuwagen/corolla-touring-sports>> Acesso em: novembro de 2022.

TOYOTA DEUTSCHLAND. **Toyota**. Yaris. Disponível em: < <https://www.toyota.de/neuwagen/yaris>> Acesso em: novembro de 2022.

TOYOTA JAPAN. **Toyota**. Corolla Ecology 2022. Disponível em: < https://toyota.jp/pages/contents/corolla/002_p_001/5.0/pdf/spec/corolla_ecology_202210.pdf> Acesso em: novembro de 2022.

UNIÃO DA INDÚSTRIA DA CANA-DE-AÇÚCAR (ÚNICA). **Unica**. Uso do etanol evitou a emissão de 535 milhões de toneladas de CO₂. 2019. Disponível em: < <https://unica.com.br/noticias/uso-do-etanol-evitou-a-emissao-de-535-milhoes-de-toneladas-de-co2eq-em-16-anos/>>. Acesso em dezembro de 2022.

UNITED STATES OF AMERICA – Department of Health & Human Services. **Air Pollutants**. CDC – Center for Disease Control and Prevention

Disponível em: <
[https://www.cdc.gov/air/pollutants.htm#:~:text=These%20six%20pollutants%20are%20carbon,matter\)%2C%20and%20sulfur%20oxides.](https://www.cdc.gov/air/pollutants.htm#:~:text=These%20six%20pollutants%20are%20carbon,matter)%2C%20and%20sulfur%20oxides.)> Acesso em: julho de 2023.

UNITED STATES OF AMERICA – Department of Transportation. **Hybrid-Electric, Plug-in Hybrid-Electric and Electric Vehicle Sales**. Disponível em: < Hybrid-Electric, Plug-in Hybrid-Electric and Electric Vehicle Sales | Bureau of Transportation Statistics (bts.gov)> Acesso em: julho de 2022.

UNITED STATES OF AMERICA – Department of Transportation. **Number of U.S. Aircrafts, Vehicle, Vessel and Other Conveyances**. Disponível em: < <https://www.bts.gov/content/number-us-aircraft-vehicles-vessels-and-other-conveyances>> Acesso em: julho de 2022.

UNITED STATES OF AMERICA – Environmental Protection Agency. **Clean Air Act Permitting for Greenhouse Gases**. Disponível em: < Clean Air Act Permitting for Greenhouse Gases | US EPA > Acesso em: setembro de 2022.

UNITED STATES OF AMERICA – Environmental Protection Agency. **Clean Air Act Requirements and History**. Disponível em: < Clean Air Act Requirements and History | US EPA> Acesso em: setembro de 2022.

UNITED STATES OF AMERICA – Environmental Protection Agency. **Greenhouse Gas Emissions from a Typical Passenger Vehicle**. Office of Transportation and Quality Air, 2018.

UNITED STATES OF AMERICA – Environmental Protection Agency. **Sources of Greenhouse Gas Emissions**. Climate Change Home. Chicago, 2014.

UNITED STATES OF AMERICA – Environmental Protection Agency. **2022 Toyota Corolla**. U.S. Department of Energy. Disponível em: < <https://www.fueleconomy.gov/feg/PowerSearch.do?action=noform&path=1&year1=2022&year2=2022&make=Toyota&baseModel=Corolla&srchttyp=y&mm&pageno=1&rowLimit=50>> Acesso em: novembro de 2022.

UNITED STATES OF AMERICA – U.S. Energy Information Administration. **Annual Energy Outlook 2022 (AEO2022)**. 27p. 2022.

UNTERLUGGAUER. T. et al. **Electric vehicle charging infrastructure planning for integrated transportation and power distribution networks**: A review. eTransportation 12 (2022). 2022.

VIDAL, M. **Produção e uso de Biocombustíveis no Brasil**. Banco do Nordeste, Caderno Editorial nº 79, 2019.

WIKIPEDIA. **Joseph Cugnot's 1770 Fardier à Vapeur, Musée des arts et métiers**. Paris, 2015. Disponível em:

<https://pt.m.wikipedia.org/wiki/Ficheiro:Joseph_Cugnot%27s_1770_Fardier_%C3%A0_Vapeur,_Mus%C3%A9_des_arts_et_m%C3%A9tiers,_Paris_2015.jpg> Acesso em: janeiro de 2022.

WOLFGANG. R. Elektroauto-Akkus: So funktioniert das Recycling. **ADAC: ALLGEMEINER DEUTSCHER AUTOMOBIL-CLUB**, 2022. Disponível em: <<https://www.adac.de/rund-ums-fahrzeug/elektromobilitaet/info/elektroauto-akku-recycling/>> Acesso em: 08 de setembro de 2022.

WORLD ENERGY COUNCIL. **World Energy Insights Brief 2019 – Global energy scenarios comparison review**. London, p.35, 2019.

ZHANG, Y.; HE, H. **China's efforts to decarbonize road transport: decent, but not sufficient**. The International Council on Clear Transportation, 2022. Disponível em: < <https://theicct.org/china-ev-efforts-mar22/>> Acesso em: novembro 2022.

YANG, Z.; BANDIVADEKAR, A. **Light-duty vehicle greenhouse gas and fuel economy standards**. Washington, DC. The International Council on Clear Transportation, 2017.