

Veículos elétricos: Um estudo descritivo de seus impactos ambientais

Electric vehicles: A descriptive study of their environmental impacts

Vehículos eléctricos: un estudio descriptivo de sus impactos ambientales

Recebido: 28/06/2022 | Revisado: 24/07/2022 | Aceito: 04/08/2022 | Publicado: 13/08/2022

Igor Rodrigues Arengues

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2807-9430>
Universidade de São Paulo, Brasil
E-mail: igor.arangues@usp.br

Adriano Francisco Siqueira

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6920-7507>
Universidade de São Paulo, Brasil
E-mail: adrianoeel@usp.br

Leandro Gonçalves de Aguiar

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2055-9317>
Universidade de São Paulo, Brasil
E-mail: leandroaguiar@usp.br

Patrícia Carolina Molgero Da Rós

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6176-1848>
Universidade de São Paulo, Brasil
E-mail: patriciadaros@usp.br

Diovana Aparecida dos Santos Napoleão

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1056-6684>
Universidade de São Paulo, Brasil
E-mail: diovana@usp.br

Hélcio José Izário Filho

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3815-8327>
Universidade de São Paulo, Brasil
E-mail: helcio@dequi.eel.usp.br

Marco Aurélio Kondracki de Alcântara

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6884-0696>
Universidade de São Paulo, Brasil
E-mail: marko@usp.br

Resumo

Inventado no Século XIX, os carros elétricos não foram competitivos o suficiente para disputarem mercado com os carros a combustão durante o Século XX. Com o crescimento do pensamento sustentável e do debate sobre poluição, meio ambiente e mudança climática, a queima de combustíveis fósseis e a poluição gerada pelo processo se tornaram pontos críticos no debate ecológico. Devido à urgência da mudança climática, maiores investimentos foram realizados em tecnologias que minimizem o problema e empresas com propostas mais ecológicas surgiram no mercado. Este trabalho teve como objetivo concatenar e comparar as principais conclusões disponíveis na literatura contemporânea a respeito do uso de carros elétricos a bateria, a fim de descrever seus impactos ambientais, principalmente quando comparados aos carros convencionais. Concluiu-se que a mudança para carros elétricos é ambientalmente positiva quando conciliada à mudança de matriz energética para fontes renováveis, chegando a uma redução de 34% nas emissões de gases de efeito estufa, em determinados estudos. Porém, ressalta-se que houve grande variabilidade de resultados quanto às reduções de emissões desses gases, com estudos similares alcançando resultados que diferiam 4,5 vezes entre si, devido às premissas utilizadas. Encontraram-se também alternativas para potencializar esta migração de tecnologia de transporte, como políticas de taxaço de carbono. Pontuaram-se aspectos negativos dos carros elétricos, como acidificação oceânica e do solo e alta toxicidade humana comparada aos carros a combustão.

Palavras-chave: Veículos elétricos; Gases de efeito estufa; Emissões de CO₂; Energia renovável; Combustível fóssil; Impacto ambiental.

Abstract

Invented in the 19th century, electric cars were not competitive enough to compete with combustion cars during the 20th century. With the growth of sustainable thinking and the debate about pollution, the environment and climate change, the burning of fossil fuels and the pollution generated by the process have become hotspots in the ecological debate. Due to the urgency of climate change, greater investments were made in technologies that minimize the problem and companies with more ecological proposals appeared on the market. This work aimed to concatenate and compare the main conclusions available in the contemporary literature regarding the use of battery electric cars, in order to

describe their environmental impacts, especially when compared to conventional cars. It was concluded that the switch to electric cars is environmentally positive when combined with the change in energy matrix to renewable sources, reaching a 34% reduction in greenhouse gas emissions in certain studies. However, it is noteworthy that there was great variability of results regarding the reductions in emissions of these gases, with similar studies reaching results that differed 4.5 times from each other, due to the assumptions used. Alternatives were also found to enhance this migration of transport technology, such as carbon taxation policies, and negative aspects of electric cars, such as ocean and soil acidification and high human toxicity compared to combustion cars.

Keywords: Electric vehicles; Greenhouse gases; CO₂ emissions; Renewable energy; Fossil fuel; Environmental impact.

Resumen

Inventados en el siglo XIX, los autos eléctricos no eran lo suficientemente competitivos para competir con los autos de combustión durante el siglo XX. Con el crecimiento del pensamiento sostenible y el debate sobre la contaminación, el medio ambiente y el cambio climático, la quema de combustibles fósiles y la contaminación generada por el proceso se han convertido en puntos calientes del debate ecológico. Debido a la urgencia del cambio climático, se realizaron mayores inversiones en tecnologías que minimizan el problema y aparecieron en el mercado empresas con propuestas más ecológicas. Este trabajo tuvo como objetivo concatenar y comparar las principales conclusiones disponibles en la literatura contemporánea sobre el uso de automóviles eléctricos a batería, con el fin de describir sus impactos ambientales, especialmente cuando se comparan con los automóviles convencionales. Se concluyó que el cambio a autos eléctricos es ambientalmente positivo cuando se combina con el cambio de matriz energética a fuentes renovables, alcanzando una reducción del 34% en las emisiones de gases de efecto invernadero en ciertos estudios. Sin embargo, cabe destacar que hubo una gran variabilidad de resultados en cuanto a la reducción de emisiones de estos gases, llegando estudios similares a resultados que diferían 4,5 veces entre sí, debido a los supuestos utilizados. También se encontraron alternativas para mejorar esta migración de la tecnología de transporte, como las políticas de impuestos al carbono y los aspectos negativos de los automóviles eléctricos, como la acidificación del océano y el suelo y la alta toxicidad humana en comparación con los automóviles de combustión.

Palabras clave: Vehículos eléctricos; Gases de invernadero; Emisiones de CO₂; Energía renovable; Combustible fósil; Impacto ambiental.

1 Introdução

A mudança climática é explícita e há anos já pode ser confirmada como resultado das atividades humanas. O acúmulo de gases de efeito estufa em nossa atmosfera durante o século XX é consequência do uso crescente de energia e expansão da economia global, segundo a Organização Meteorológica Mundial (United Nation Framework Convention on Climate Change, 2011).

A continuidade das emissões de gases de efeito estufa em taxas constantes, ou até maiores durante o século XXI, resultariam em mudanças no sistema climático global ainda maiores do que as vistas no século passado. Cerca de 70% das emissões de CO₂ do planeta são oriundas de plantas de geração de energia que utilizam carvão e petróleo e do setor de transportes (United Nation Framework Convention on Climate Change, 2021; Zheng & Peng, 2021; Masson-Delmotte, 2021).

Neste cenário, a busca por energias renováveis e tecnologias que minimizem os fatores que levem ao aquecimento global vêm ganhando cada vez mais importância e investimento na tentativa de solucionar os desafios climáticos de nosso tempo. Especificamente no setor automotivo, uma alternativa de destaque vem sendo os carros elétricos a bateria. Essa alternativa vem sendo explorada por diversas empresas. Uma empresa que merece destaque nesse sentido é a Tesla Inc., empresa americana pioneira voltada para o desenvolvimento de carros elétricos de alto desempenho e tecnologias renováveis de energia, com investimentos em energia solar. Essa empresa já é a maior vendedora de carros elétricos da história e vem crescendo consideravelmente desde 2019 (Tesla, 2021a).

Entretanto, embora tal tecnologia tenha ganhado notoriedade nos últimos anos devido a seu potencial ambiental, a tecnologia dos carros elétricos tem seus primórdios em 1830, não havendo muitas mudanças em seu princípio de funcionamento, desde então. Sua invenção antecede a dos carros a combustão interna. No período logo após a virada para o século XX, o uso de carros elétricos aparecia como uma tendência no setor automotivo, dominando o uso urbano de veículos, em países como os Estados Unidos. Todavia, quando comparados aos carros a combustão, carros elétricos apresentam algumas desvantagens, que

desafiam os cientistas até hoje. A baixa distância percorrida com uma carga de sua bateria e a baixa velocidade alcançada pelos veículos elétricos não conseguiram concorrer em um mundo onde as distâncias se alongavam e carros a combustão entregavam o que a sociedade priorizava no momento. Assim, os carros a combustão acabaram por dominar o mercado e os carros elétricos passaram a ocupar um espaço mínimo, quase desaparecendo no final do século (Høyer, 2008).

Hoje, o cenário é diferente. Com o desenvolvimento de baterias mais eficientes e duradouras usando eletrodos de lítio íon e com a emergência da descarbonização para alcançar as metas de mudanças climáticas propostas pelo Comitê de Mudanças Climáticas. A pergunta, para muitos, já não é mais “se” os carros elétricos substituirão os atuais carros a combustão elétrica. A pergunta atual é “quando” isso acontecerá. Países como Noruega, Holanda e China traçam metas agressivas para extinguir carros a gasolina e diesel. Tais países têm objetivos de ampliar a eletrificação de suas frotas a partir de 2025. Em um futuro próximo, pretendem que 100% de seus veículos sejam elétricos (Crabtree, 2019).

Neste contexto, julga-se necessário uma maior exploração sobre o tema para entender a fundo o potencial de ganhos ambientais que os carros elétricos a bateria podem trazer a sociedade, assim como compilar os debates discutidos nos trabalhos acadêmicos que contribuem para o entendimento desta tecnologia do ponto de vista da sustentabilidade. Este trabalho visou entender a partir de quais premissas o uso dos carros elétricos pode ser benéfico ao ambiente, principalmente relacionados à emissão de gases de efeito estufa e à sua relação com a mudança de matriz energética para fontes renováveis, e esclarecer se existem pontos negativos de atenção em relação a seu uso que acabam por serem esquecidos, em meio as pautas de sustentabilidade. Notou-se, por fim, a Avaliação de Ciclo de Vida como o principal método científico utilizado na literatura para analisar o impacto ambiental dos veículos elétricos – abordando desde sua produção até o fim de sua vida útil – chegando a valores de 17% a 34% de redução nas emissões de gases de efeito estufa quando comparado aos carros convencionais (Zhou et al., 2013; Zheng & Peng, 2021).

O objetivo geral do presente trabalho foi concatenar e comparar as principais conclusões disponíveis na literatura a respeito do uso de carros elétricos a bateria, a fim de descrever seus impactos ambientais, principalmente quando comparados aos carros convencionais. Este foco visou elucidar o questionamento dos benefícios ambientais dos carros elétricos e se há vantagens em relação aos carros a combustão. Mais especificamente, os objetivos deste trabalho foram os seguintes: (i) caracterizar os principais elementos relacionados ao tema, como quais são as classes de carros e baterias e como se diferem em suas estruturas; (ii) entender junto do histórico desta tecnologia, como ela se relaciona com o pensamento sustentável e ambiental e como se encontra seu estado da arte; (iii) descrever os problemas fundamentais da utilização de carros a combustão para o meio ambiental e para o quadro de mudanças climáticas na Terra; (iv) diagnosticar os pontos críticos de discussão a respeito do impacto ambiental de carros elétricos encontrados na literatura contemporânea e (v) discutir as principais conclusões dos trabalhos nestes pontos críticos encontrados e apresentar suas convergências e divergências, buscando entender se os carros elétricos solucionam os problemas ambientais dos veículos convencionais;

2 Metodologia

Este trabalho é uma pesquisa de natureza aplicada e de cunho qualitativo, pois busca a compreensão profunda do contexto analisado. Possui caráter descritivo, já que visa descrever as características de um fenômeno e, por fim, utiliza o método de Pesquisa Bibliográfica, conforme definido por Gil (2009). Foram consultadas as bases de dados *Web of Science*, *Scopus* e *Google Scholar*.

Portanto, a metodologia adotada é composta de uma pesquisa bibliográfica utilizando as bases de dados citadas anteriormente, priorizando trabalhos que contemplem as palavras-chave “*electric vehicle*”, “*environmental impact*”, “*CO₂ emission*” dentre outros termos que afunilam as respostas para artigos que debatam temas relacionados ao objetivo geral.

Adicionalmente, foram priorizados artigos selecionados pelas bases de dados como “Artigo mais citado no campo” e “Artigos interessantes no campo”, conforme os filtros possíveis na plataforma, além de considerar a quantidade de citações que cada artigo possui, visando usar como referência o que há de mais relevante e recente no atual cenário acadêmico do momento

relacionado a carros elétricos e seus impactos no meio ambiente ao longo de todo seu ciclo de vida. Quase a totalidade das referências buscadas foram em língua inglesa, devido a sua dominância no meio acadêmico e por representar o que há de mais recente no meio. Não houve restrições de países nos quais os estudos foram feitos, com o intuito de buscar os principais debates e conclusões sobre o tema, independente do contexto de seus países.

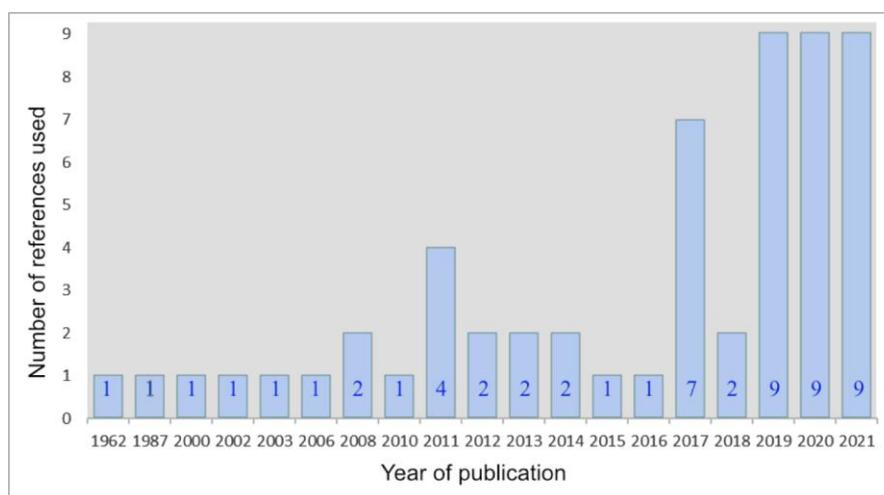
Optou-se por artigos e livros publicados recentemente, com um intervalo entre 2015 e 2021. Entretanto, textos mais antigos também foram incluídos quando relevantes, principalmente nos momentos nos quais a necessidade era encontrar referências que definissem conceitos estabelecidos de maneira atemporal, como modo de funcionamento de uma bateria e de carros a combustão, ou para abordagem histórica do assunto, sendo preciso documentações feitas no tempo referenciado.

Por fim, houve a realização de uma comparação entre os trabalhos selecionados, dividindo qual abordagem e método de análise. Foram selecionados principalmente aqueles com maior foco na Avaliação de Ciclo de vida, já que este é o método mais utilizado para estudo do impacto ambiental dos veículos elétricos. Foram debatidos os resultados e conclusões de cada abordagem, visando encontrar quais são as principais respostas que a Ciência tem no momento sobre o assunto e quais as divergências que os trabalhos possuem entre si.

Dado o método e a sequência de etapas utilizadas, finaliza-se expondo com maior profundidade as características das referências utilizadas neste trabalho, principalmente nos critérios de ano de publicação, país associado à instituição de pesquisa dos autores e revista de publicação dos artigos referenciados.

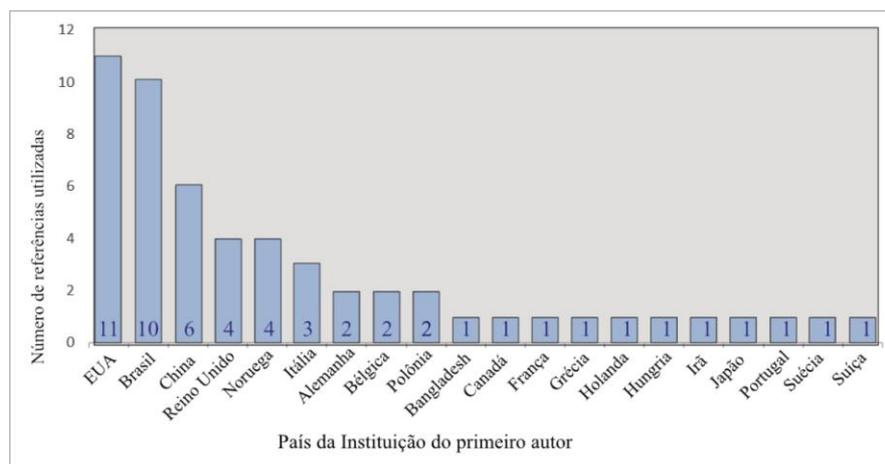
Conforme é mostrado na Figura 1, observa-se que no período considerado (2015 até 2021), foram encontradas ao todo 57 referências. Quando realizado o levantamento do país associado (considerando o primeiro autor de cada trabalho), nota-se a prevalência dos Estados Unidos, Brasil e China (Figura 2). É também necessário ressaltar que algumas das referências utilizadas têm como autoria órgãos internacionais como a United Nations Framework Convention on Climate Change e, portanto não foi direcionado nenhum país para tais referências.

Figura 1. Quantidade de referências utilizadas por ano de publicação.



Fonte: Autores.

Figura 2. Quantidade de referências utilizadas por país da instituição de pesquisa do primeiro autor.



Fonte: Autores.

Na Tabela 1 encontra-se o fator de impacto mais recente das revistas que publicaram os artigos utilizados neste trabalho, totalizando um total de 33 publicações e 20 revistas diferentes. Nota-se um uso mais extenso de revistas como “*Energies*”, assim como o uso de revistas com alto fator de impacto, como “*Science*” e “*Renewable and Sustainable Energy Reviews*”.

Tabela 1. Relação entre as revistas utilizadas na monografia, a quantidade de artigos citados e seus fatores de impactos.

Nome da revista de publicação	Quantidade de referências vindas desta revista	Fator de Impacto
Science	1	41,845
Electrochemical Energy Reviews	1	28,905
Renewable and Sustainable Energy Reviews	1	14,982
Applied Energy	2	9,746
Environmental Science and Technology	1	9,028
Environmental Research Letters	1	7,801
Energy Reports	1	7,370
Energy	1	7,147
Journal of Industrial Ecology	2	6,946
Energy Policy	3	6,142
Transportation Research Part D: Transport and Environment	2	5,495
Sustainable Production and Consumption	1	5,032
Journal of Sustainable Transportation	1	4,170
International Journal of Life Cycle Assessment	3	4,141

Energies	6	3,004
Utilities Policy	1	2,812
Journal of Solid State Electrochemistry	1	2,430
Transportation Research Procedia	2	1,850
Procedia Structural Integrity	1	0,840
Urbe	1	0,600
Total	33	

Fonte: Autores.

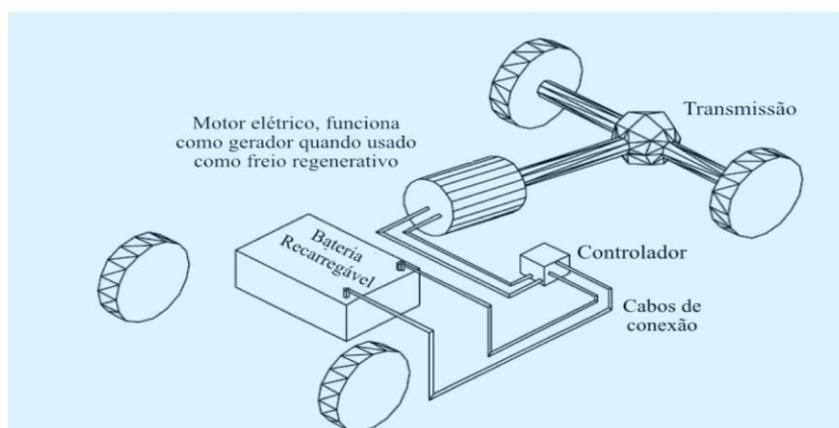
3 Desenvolvimento

No início deste tópico, são descritas as classes de carros estudadas e os tipos de baterias utilizadas. Um breve histórico é apresentado, destacando principalmente a preocupação ambiental com a emissão de gases por motores a combustão. Para aprofundar essa questão de emissão de gases, uma metodologia que vêm sendo explorada em estudos recentes é a Avaliação de Ciclo de Vida. Além dessa análise, outros aspectos ambientais relacionados aos veículos elétricos também merecem atenção. Ao final, é abordado, ainda que de modo sucinto, a implementação da eletrificação nos transportes.

3.1 Classes de carros estudadas

O carro elétrico movido a bateria também é conhecido como carro elétrico puro, pois tem como fonte de energia unicamente a bateria, diferentemente dos carros híbridos que também são elétricos, mas utilizam de duas ou mais fontes energéticas. Em específico, o carro elétrico a bateria consiste em uma célula eletroquímica para armazenar energia (normalmente recarregável quando plugada a uma rede elétrica), um motor elétrico e um controlador, como representado na Figura 3. A função do controlador é cadenciar a quantidade de energia vinda da bateria que chega ao motor, controlando, assim, a velocidade do veículo. Importante notar que alguns veículos possuem o adicional da frenagem regenerativa, mecanismo que faz com que a bateria seja recarregada pela energia cinética da frenagem. Este mecanismo também é utilizado para bicicletas e triciclos motorizados, além dos veículos de passageiros (Larminie & Lowry, 2012).

Figura 3. Esquematização de carro elétrico a bateria.

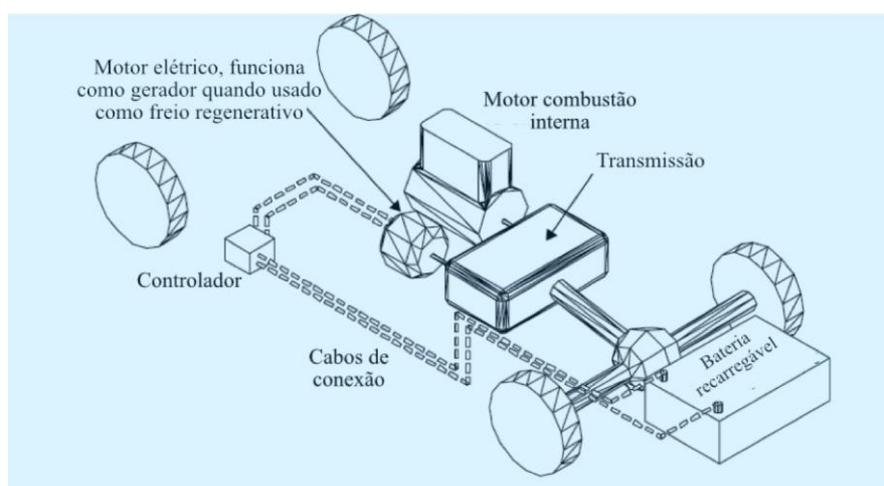


Fonte: Adaptado de Larminie & Lowry (2012).

A bateria é o que determina o quanto um carro elétrico consegue percorrer, podendo chegar a 500 km de distância, em uma carga para as baterias topo de linha. As vantagens de um veículo elétrico a bateria são a não produção de gases de efeito estufa durante sua fase de operação e a não emissão de barulhos. Considerando-se tais aspectos, carros elétricos movidos a bateria poderiam ser uma solução para uso em áreas urbanas (Un-Noor et al., 2017).

Um veículo elétrico híbrido combina mais de uma forma de energia, comumente sendo a combinação entre um motor de combustão interna com uma bateria, além de um motor elétrico e um gerador. O arranjo entre estas peças permite diversas possibilidades. Entretanto, o arranjo em paralelo se mostra mais abrangente e vantajoso (Larminie & Lowry, 2012). O esquema pode ser visto na Figura 4:

Figura 4. Esquemática de carro elétrico híbrido.



Fonte: Adaptado de Larminie & Lowry (2012).

A vantagem ao combinar estas duas fontes energéticas é alcançar um desempenho maior do que o dos carros elétricos a bateria, além de proporcionar uma melhor economia do combustível utilizado no motor a combustão (Sun et al., 2019).

A melhor otimização de um carro híbrido é adquirida quando ambas fontes são utilizadas simultaneamente, com o motor a combustão dando energia necessária ao veículo e a bateria sendo um suporte quando necessário. Assim, a bateria não precisa ser utilizada todo o tempo e também pode se recarregar via frenagem regenerativa (Larminie & Lowry, 2012).

Os veículos híbridos elétricos *plug-in* - PHEV, também utilizam as mesmas duas fontes de energia. Entretanto, diferenciam-se por utilizarem a propulsão elétrica como força motriz e o motor a combustão como suporte ou como meio de recarregar a bateria elétrica. Deste modo, é um modelo de carro com uma pegada de carbono menor do que os híbridos convencionais e com menor custo relacionado a combustíveis (Un-Noor et al., 2017).

Os carros movidos a combustão, chamados de “veículos convencionais”, possuem um mecanismo de queimar combustível para gerar a energia que move o seu motor. O processo consiste basicamente em injetar para dentro dos cilindros do carro uma mistura de combustível com ar que, ao receber uma faísca elétrica, inicia a reação que leva à expansão do pistão, fazendo com que ele se mova para produzir movimento. Como consequência, este movimento leva à movimentação do eixo de transmissão que levará ao giro das rodas e movimento do veículo. Uma das características deste mecanismo é a emissão dos gases gerados pela combustão para a atmosfera. A emissão desses gases depende de diversos fatores relacionados à condição do carro e como ele é utilizado (Milev et al., 2021).

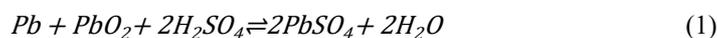
3.2 Baterias

A bateria é a peça crucial dos carros elétricos, sendo a única fonte de energia disponível (com exceção dos híbridos), além de também ser a peça de maior custo, peso e volume no veículo. Esta consiste em duas ou mais células que conseguem converter energia química em energia elétrica, derivada dos eletrodos positivos e negativos que, ao serem ligados por um meio eletrolítico, reagem e geram energia. Outra característica fundamental destas baterias, chave para ser viável no uso dos veículos elétricos, é sua capacidade cíclica, ou seja, passível de ser recarregada ao receber corrente elétrica, restaurando a diferença química entre as placas. Essa capacidade cíclica permite que ela forneça sua potência novamente (Larminie & Lowry, 2012; Varta Automotive, 2021).

Segundo Sun et al. (2019), uma característica que difere as baterias para carros elétricos das usadas para a ignição dos carros a combustão é o fato da necessidade daquelas de prover energia continuamente, exigindo uma capacidade energética bem maior.

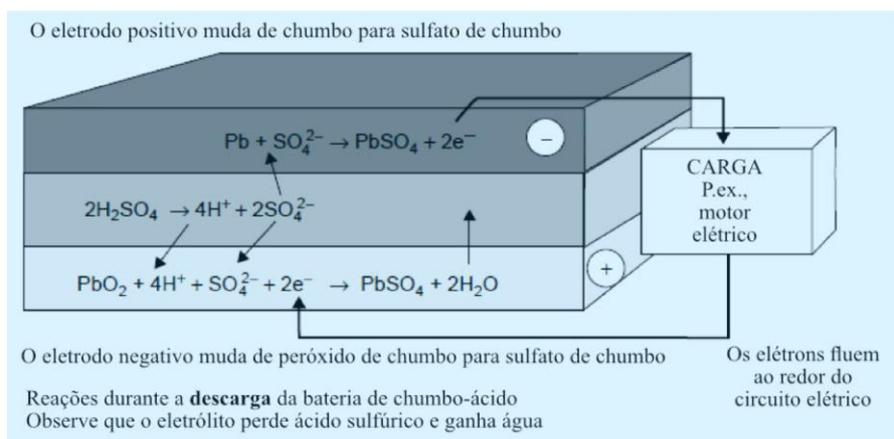
Dentre os fatores que influenciam na decisão de qual bateria será utilizada, pode-se elencar sua densidade energética, voltagem típica, eficiência, preço e temperatura de operação, entre outros. Atualmente, o dano ambiental que estas baterias podem causar, assim como seus outros impactos e seu processo de reciclo, também se tornaram relevantes no momento de fazer esta escolha. Por fim, mesmo com as inúmeras combinações possíveis para se montar uma célula eletroquímica, apenas algumas destas combinações têm-se mostrado viáveis para o uso em questão. Entre as opções viáveis, podem ser encontradas baterias de chumbo ácido, baterias de níquel cádmio e baterias de lítio (Larminie & Lowry, 2012).

A bateria de chumbo ácido traz em sua composição placas negativas contendo chumbo como material ativo e placas positivas contendo dióxido de chumbo, como pode ser visualizado na Figura 5. Ambas são imersas em um eletrólito de ácido sulfúrico diluído, dando início à reação descrita na Equação 1.



Em seu processo de descarregamento, ambos eletrodos formam sulfato de chumbo, enquanto o eletrólito vai diminuindo sua concentração de ácido sulfúrico, tornando-se mais diluído (Larminie & Lowry, 2012).

Figura 5. Esquematização de bateria chumbo ácido.

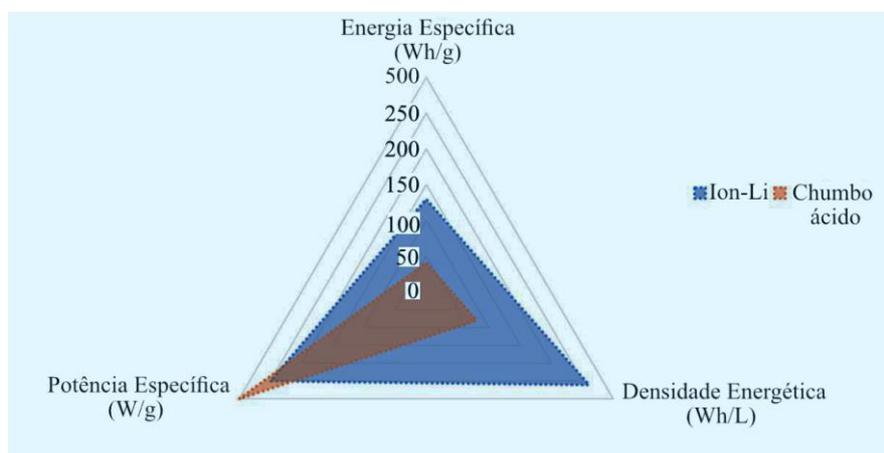


Fonte: Adaptado de Larminie & Lowry (2012).

Atualmente, 65% da demanda global deste tipo de bateria vem da indústria automotiva, utilizada principalmente nos carros a combustão como fonte de iniciação, ignição e iluminação (World Economic Forum, 2020). O principal problema das baterias de chumbo ácido são seus impactos ambientais, na manufatura, uso, descarte e reciclagem, além do chumbo ser altamente danoso ao ser humano. Na Europa e EUA, a coleta e reciclagem destas baterias já ultrapassou os 99%, minimizando estes impactos (Sun et al., 2019).

Quando comparada a baterias mais utilizadas no mercado atualmente, principalmente as baterias de lítio íon, percebe-se uma desvantagem devido a sua baixa energia específica (quantidade de energia disponível por unidade de massa), como é mostrado na Figura 6.

Figura 6. Comparação energética entre baterias.



Fonte: Adaptado de Sun et al. (2019).

As baterias recarregáveis à base de lítio surgiram na década de 80 e já são as principais utilizadas nos *laptops* e celulares disponíveis no mercado. Mesmo com seu maior custo em relação às anteriores, sua densidade energética é consideravelmente maior. Quimicamente, trata-se de um eletrodo positivo composto pelo óxido de um metal, enquanto para o eletrodo negativo um carbono litiado (Larminie & Lowry, 2012).

A reação geral desta célula eletroquímica pode ser vista na Equação 2, sendo M a representação de um metal.

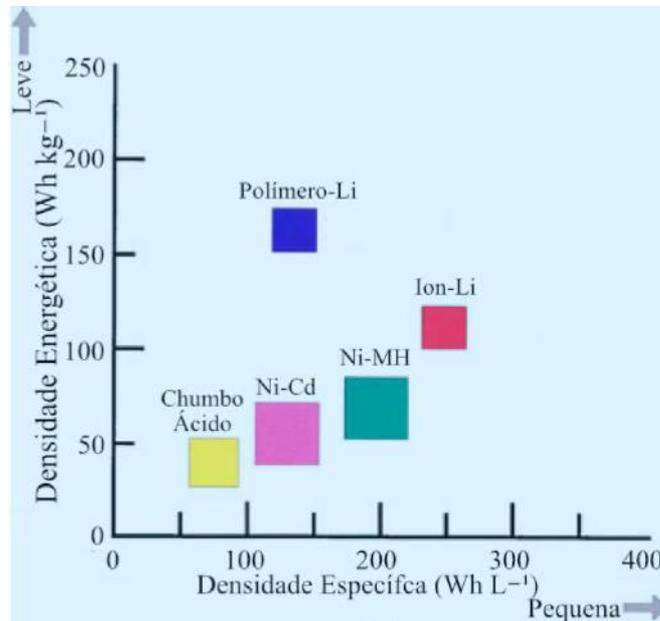


Especificamente as baterias de lítio íon são as mais adequadas para os carros elétricos no momento, devido a suas propriedades de densidade energética, longo ciclo de vida e eficiência; resultando também em baterias mais leves e menores, necessárias para as inovações tecnológicas, como mostrado na Figura 7 (Scrosati, 2011; Ding et al., 2019).

Para a próxima década, as baterias de lítio devem dominar o setor de veículos elétricos por conta do bom estabelecimento que este material obteve, com experiências em grandes produções e um entendimento das suas características de longa durabilidade. Também contribuem para a prevalência das baterias de lítio os investimentos feitos nesta tecnologia, tanto para manufatura, quanto para sua cadeia de suprimentos. Além disso, há que se considerar que outras tecnologias ainda não se encontram em grau de preparo suficiente para ter condições de entrar nas aplicações comerciais. Baterias de lítio atualmente

fazem parte de carros como BMW i3, Tesla, Nissan Leaf, BYD, entre outros (International Energy Agency, 2020; Sun et al., 2019).

Figura 7. Diagrama de densidade energética em relação à densidade específica.

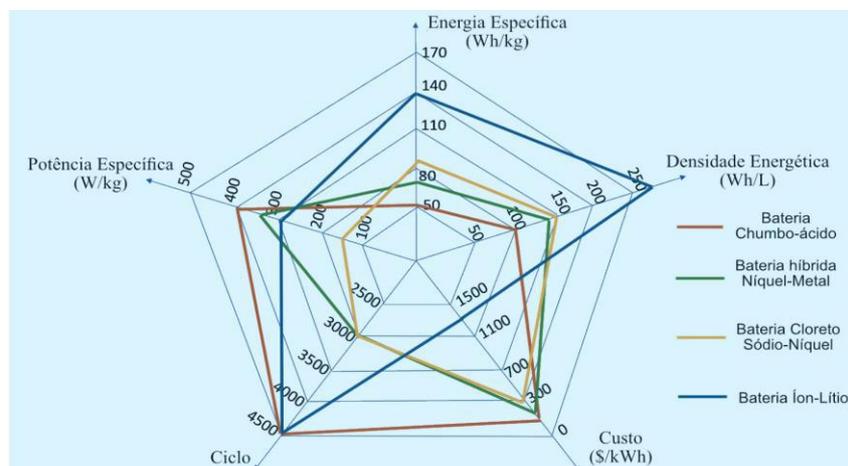


Fonte: Adaptado de Scrosati (2011).

As baterias dos carros elétricos atuais costumam ter seus cátodos compostos por óxidos de cobalto, níquel e manganês, juntamente do lítio. Enquanto para seus ânodos, a escolha principal é o grafite, mesmo que também exista a possibilidade do titanato de lítio. O primeiro tem a vantagem de ser abundante devido a sua produção sintética (Romare & Dahllöf, 2017).

Na Figura 8 é exposta à análise de 4 modelos de baterias citadas em relação a suas propriedades, evidenciando o domínio das baterias de lítio no mercado.

Figura 8. Radar de propriedades das baterias.



Fonte: Adaptado de Sun et al. (2019).

3.3 História dos carros elétricos

A história dos carros elétricos está intimamente ligada à história do desenvolvimento das baterias. Segundo Høyer (2008), as descobertas científicas que se relacionam com a história deste tipo de veículo se iniciam em 1800, com a criação da pilha elétrica por Alessandro Giuseppe Antonio Anastasio Volta, inspirado por Luigi Galvani. A pilha elétrica armazenava energia elétrica quimicamente (célula voltaica). O próximo grande passo na Ciência viria de Michael Faraday, em 1831, que mostrou a relação entre corrente elétrica e magnetismo, fundamental para o desenvolvimento das tecnologias elétricas e eletrônicas, como motores elétricos e geradores (Westbrook, 2001).

Os primeiros veículos elétricos surgem por volta de 1830. Em alguns países, como Inglaterra, Estados Unidos e Holanda esse surgimento ocorreu no mesmo período. Quase 30 anos depois, o belga Gaston Planté faz a primeira demonstração de uma bateria Chumbo-Ácida, ainda utilizada tanto em modelos de carro de motor de combustão interna, quanto em modelos elétricos. Os primeiros modelos utilizando estas baterias foram apresentados em 1881, enquanto o modelo inicial de um carro de combustão interna só foi demonstrado em 1885. Vendo o potencial desta descoberta, Thomas Edison investiu para criar um modelo de maior eficiência energética, resultando na bateria Níquel-Ferro que armazenava 40% a mais de energia por unidade de peso (Høyer, 2008).

Neste período de virada para o século XX, ter um carro elétrico não era prático, pois não havia uma tecnologia de plugar o carro na tomada residencial e depois sair a passeio. Para carregar o carro seria necessário ir até um posto em um processo nada simples (Segrave, 2019). Por 1912, surgem duas inovações. A frenagem regenerativa (que transforma energia cinética em energia elétrica, o que recarrega a bateria) e os modelos híbridos (que combinam um sistema elétrico com um motor a gasolina (Høyer (2008),

Porém, os carros elétricos ainda tinham problemas únicos e que não conseguiam ser resolvidos. De acordo com Kubanski (2020), as principais desvantagens são o longo tempo de carregamento da bateria, distância limitada em uma única carga e o alto custo da bateria e do carro. Assim, o crescimento do mercado automotivo priorizou quase que unicamente os carros com motores a combustão e os veículos elétricos praticamente desapareceram.

Nos anos 60, com o lançamento do livro *Silent Spring* (Carson, 1962), há o crescimento do debate relacionado à poluição e ao meio ambiente. Naquela época, embora o carro a combustão fosse visto como um dos responsáveis pela poluição, os problemas ambientais ainda eram considerados como problemas locais. Na década de 70, a Crise do Petróleo e o debate sobre energia nuclear colocam em foco a necessidade de se desenvolver alternativas de fontes renováveis de energia. Os problemas ambientais assumem uma escala global. Os carros elétricos voltam a ser considerados uma opção para amenizar tais problemas, por serem livres de emissões e possibilitarem a utilização de energia elétrica vinda de fontes renováveis em sua operação. Neste sentido, o documento *Our Common Future* de 1987 e o evento Rio-92 são marcos cruciais para iniciativas visando à redução na emissão de gases poluentes e a necessidade de transição para fontes renováveis de energia (Høyer, 2008).

O documento da World Commission on Environment and Development (1987) aborda essa preocupação com a utilização sustentável de energia. De acordo com esse documento, o período que se segue deveria ser considerado como uma transição entre a utilização insustentável e a sustentável de energia. Porém, alerta que os desafios envolvendo a utilização segura e sustentável ainda não foram abordados pela comunidade internacional com suficiente senso de urgência e considerando uma perspectiva global.

Com os problemas a respeito da poluição no ar nas grandes cidades ficando mais evidentes, uma iniciativa da Califórnia foi de extrema relevância para a trajetória dos carros elétricos na sociedade: a *California Air Resources Board* - CARB. Essa iniciativa foi um mandato de vendas que exigia das companhias automotivas daquele Estado com vendas superiores a 35000 veículos por ano a terem 2% de suas vendas sendo representadas por veículos de zero emissão (Westbrook, 2001). Essa meta deveria ser alcançada em 1998, ou seja, 8 anos a partir da implementação da lei. Esta ação forçou um sério investimento das

grandes empresas nos carros elétricos. Essa regulação inaugura uma etapa do discurso ambiental, agora mais abrangente e chamado de “Desenvolvimento Sustentável” (Høyer, 2008).

3.4 Emissão de gases por combustíveis fósseis

Os combustíveis fósseis se constituem em um dos principais responsáveis pela emissão de gases de efeito estufa na atmosfera. A sua queima tem inúmeros efeitos indesejáveis para o ambiente, como poluição do ar, aumento da acidez das chuvas, doenças e o impacto no clima terrestre (Woo et al., 2017; Lvovsky et al., 2000). O setor de transportes representa cerca de ¼ das emissões de gases de efeito estufa, além de ser um dos principais setores em que este número permanece aumentando. O transporte rodoviário é o maior emissor devido à queima de combustível pelos carros a combustão interna.

A mudança climática se transformou em um problema global no final do século passado, levando a medidas governamentais para extinguir o uso de motores a diesel e gasolina até 2050, principalmente em países europeus e na China. Embora em termos climáticos o foco da extinção desses motores seja a redução de CO₂ (que corresponde a 58% dos gases de efeito estufa), é importante lembrar que eles também podem emitir hidrocarbonetos, óxidos de nitrogênio e monóxido de carbono (Lotfalipour et al., 2010; Woo et al., 2017; Kubański, 2020).

Mesmo sabendo que fontes renováveis são fundamentais para a redução do uso dos combustíveis fósseis e para a redução das emissões de carbono, o caminho para a extinção dos motores a combustão utilizando combustíveis fósseis possui desafios. A percentagem de consumo de energia baseada em combustíveis fósseis em 29 países europeus ainda é elevada. A maioria dos países tem acima de 60% da sua matriz energética oriunda desses combustíveis. Isso inclui países líderes na mudança para energias renováveis, como, por exemplo, a Alemanha. As estimativas para 2050 apontam que menos de 20% das reservas de óleo e gases restarão, tornando a mudança ainda mais crucial (Martins et al., 2019).

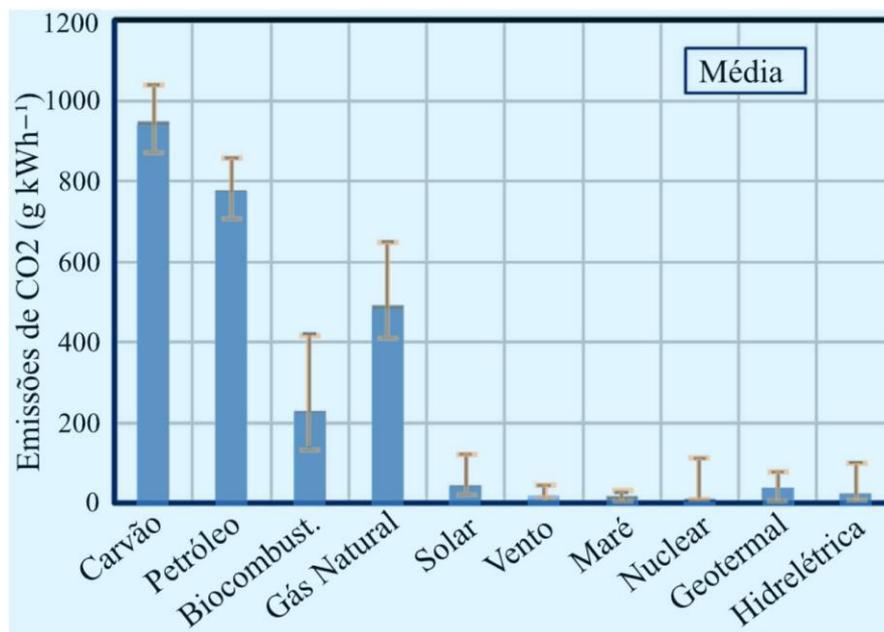
Os carros elétricos a bateria se mostram benéficos principalmente para cidades populosas, diminuindo tanto as emissões de gases de efeito estufa, quanto a poluição do ar e o barulho produzido pelos veículos convencionais. As reduções nas emissões nestes carros são menores quando comparados aos carros a combustão principalmente durante sua fase de operação, mesmo que durante sua fase de produção as emissões sejam maiores. Os valores de redução podem ser entre 17% e 34% (Zhou et al., 2013; Zheng & Peng, 2021).

Outros estudos, ao analisar e comparar todo o ciclo de vida dos dois tipos de carro, apontam que os carros a bateria diminuem consideravelmente as emissões nocivas de gases poluentes. Essa redução nociva seria ainda mais potencializada caso também houvesse um aumento no uso de energias renováveis, como energia solar e hidroelétrica (Ou et al., 2011; Zheng & Peng, 2021).

Entretanto, outras análises evidenciam a necessidade de não somente mudar a classe dos veículos a serem usados, mas também alterar a fonte em que a energia é produzida. Países que tinham em sua matriz energética alta porcentagem de fontes não renováveis continuaram a ter um aumento na emissão de CO₂ mesmo mudando para carros elétricos. Isto porque o uso dos carros elétricos aumenta a emissão indireta de gases em outras partes do seu processo de produção, mostrando-se necessário tanto a mudança na classe dos carros, como também uma mudança auxiliar para fontes renováveis de energia (Ali et al., 2021).

A diferença numérica na emissão de CO₂ por fontes fósseis comparadas com fontes renováveis na geração de energia podem ser analisadas na Figura 9.

Figura 9. Emissão de CO₂ por fonte de energia.



Fonte: Adaptado de Zheng & Peng (2021).

Mesmo com divergências entre a necessidade ou não da mudança dos carros junto de uma mudança de matriz energética, a combinação dos carros elétricos a bateria com alimentação vinda de energias adquiridas a partir de fontes renováveis se mostra como uma solução para a redução das emissões de CO₂ derivados da combustão dos carros convencionais. Além de outros impactos positivos trazidos pela mudança, como benefícios econômicos e políticos devido à exclusividade de recursos fósseis em poucos países do planeta e sua iminente escassez nas próximas décadas (Crabtree, 2019; Martins et al., 2019).

3.5 Avaliação de Ciclo de Vida

A metodologia de Avaliação de Ciclo de Vida avalia o sistema de produto considerando todo seu ciclo de vida e avaliando determinados critérios ambientais pré-determinados. Esta abordagem apoia a identificação de partes-chave do ciclo de vida que merecem atenção do ponto de vista ambiental e suporta a tomada de decisões de empresas e governos visando mudanças em seus processos.

Sua estrutura, de acordo com Finkbeiner et al. (2006) e Arvanitoyannis (2008), se baseia em:

1. Definir um objetivo do estudo;
2. Alimentar um inventário que seria a análise – quantitativa ou qualitativa – dos recursos utilizados e das emissões expelidas;
3. Realizar o entendimento do impacto, o qual define quais as métricas que serão estudadas (saúde humana, ecológica e uso de recursos – por exemplo), a criação da relação entre o inventário em cada uma das categorias e a quantificação das variáveis;
4. Interpretar os resultados e ter suas conclusões e sugestões de melhoria.

É necessário ponderar que essa abordagem macro não é o suficiente para se chegar em conclusões definitivas. As conclusões dependem também de quais premissas e objeto de estudo foram definidos no início. Esses aspectos são ainda mais

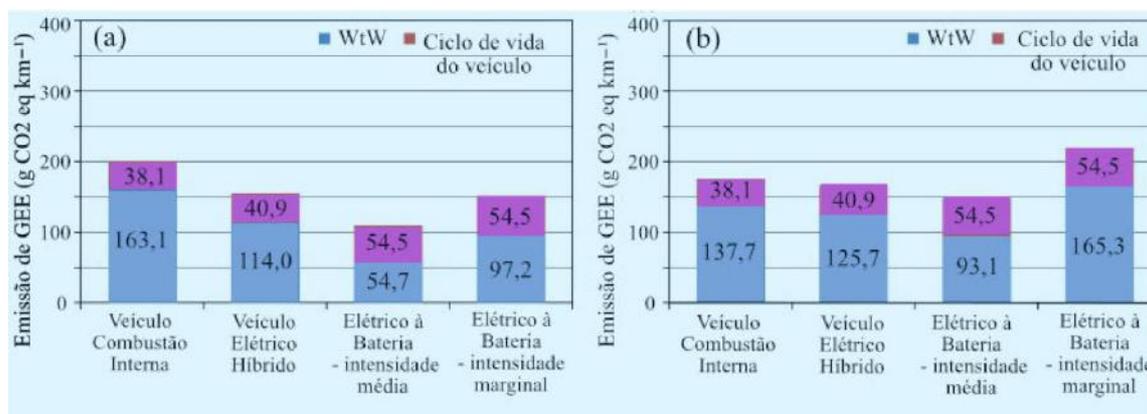
relevantes quando se compara o desempenho de carros elétricos com o de carros a combustão. Os carros utilizados na avaliação e suas especificações podem alterar bastante o resultado de um estudo para outro. Como ainda se trata de uma tecnologia que evolui constantemente e apresenta novidades em seus equipamentos, é difícil decidir quais características de carro elétrico serão utilizadas na comparação e, além disso, encontrar um carro a combustão que seja factível para a proposta, já que são tecnologias extremamente divergentes.

As principais publicações acerca do tema dividem o ciclo de vida dos carros em 3 etapas: do poço ao tanque (*Well-to-Tank* - WtT), do tanque à roda (*Tank-to-Wheel* - TtW) e do poço à roda (*Well-to-Wheel* - WtW) (Tsilev, 2019). WtT engloba desde a produção e transporte da energia a ser utilizada no carro até sua inserção no veículo, TtW trata da conversão desta energia abastecida em energia utilizada pelo veículo e WtW as duas etapas unidas em uma análise mais abrangente (Fuc et al., 2016).

Ma et al. (2012) utilizam estas 3 etapas da vida de um combustível ou bateria para realizar sua avaliação dos impactos ambientais entre os veículos. Esses autores utilizam uma forma diferente de outras abordagens vistas na sequência. Eles determinam como premissas para seu estudo, modelos de excelência, tanto dos carros a bateria, quanto dos carros a combustão, em busca de uma melhor comparação no TtW. Além disso, para realizar os cálculos energéticos utilizam dados da matriz energética inglesa e californiana e incluem as emissões oriundas da produção das baterias.

Conclui-se, como ilustrado na Figura 10, que a quantidade de CO₂ emitido por km é altamente influenciado pela velocidade e pelos acessórios que os carros podem possuir. Em casos de menor velocidade e menos acessórios (Figura 10a), os carros elétricos resultam em menores emissões durante toda sua vida do que os carros a combustão e carros híbridos – mesmo considerando a energia adicional que deveria ser gerada para sustentar a existência destes carros em sociedade. Entretanto, em carros de maior velocidade e munidos de acessórios, mesmo os carros elétricos não emitindo CO₂ durante sua vida útil, seu ciclo de WtW faz com que seja menos vantajoso do que o carro a combustão.

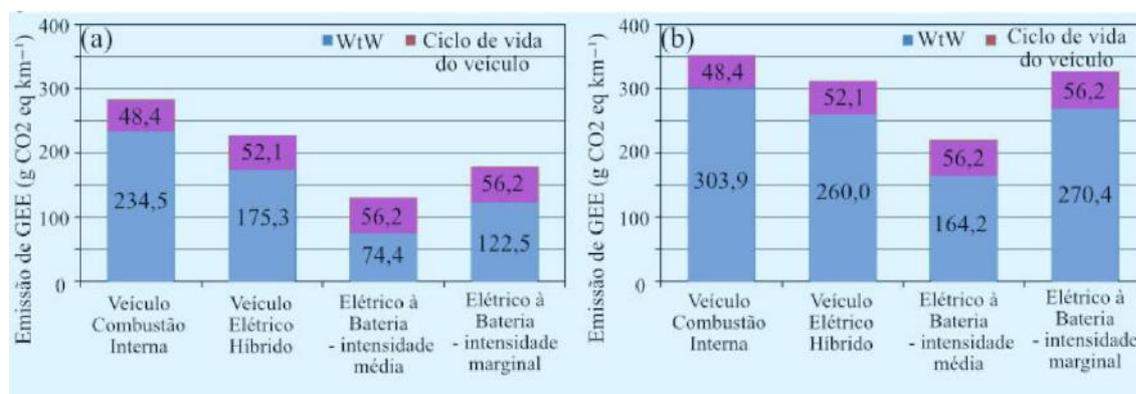
Figura 10. Emissão de g CO₂ eq/km para diversos tipos de carros pequenos em situações de velocidade e acessórios diferentes no Reino Unido em 2015, considerando tempo de vida de 15 anos e 12.000 km/ano. (a) – condições de condução de velocidade e carga mais baixas (urbana, apenas para motorista, sem acessório); (b) – condições de condução de maior velocidade e carga extra (urbana, motorista+carga, acessório).



Fonte: Adaptado de Ma et al. (2012).

Quando utilizado carros SUV para a comparação, os resultados são diferentes. Independente da velocidade utilizada pelo carro e de seus acessórios, as emissões de CO₂ durante o ciclo de vida dos carros a combustão são sempre maiores, mesmo com a necessidade de aumento de geração de energia nos territórios, como ilustrado na Figura 11.

Figura 11. Emissão de g CO₂ eq/km para diversos tipos de carro SUV em situações de velocidade e acessórios diferentes no Reino Unido em 2015, considerando tempo de vida de 15 anos e 19.300 km/ano. (a) – condições de condução de velocidade e carga mais baixas (urbana, apenas para motorista, sem acessório); (b) – condições de condução de maior velocidade e carga extra (urbana, motorista+carga, acessório).



Fonte: Adaptado de Ma et al. (2012).

Ma et al. (2012), portanto, obtêm conclusões que convergem com as principais pesquisas da área, segundo as quais determinadas variáveis são cruciais para escolha de qual tipo de carro é ambientalmente mais vantajoso. O desempenho é dependente da matriz energética que alimentará os carros. Assim, se houver a utilização de fontes de energia fósseis para suprir a energia marginal a ser gerada para os carros elétricos, as emissões nesta produção (WtT) podem levar a impactos ambientais maiores que carros a combustão. O estudo em questão utiliza dados de regiões do planeta consideradas referências em energia renovável e possuem uma matriz energética que não equivale ao encontrado em outros países. Assim, a descarbonização passa primeiro por uma reavaliação das fontes de energia utilizadas para que o impacto positivo dos carros elétricos ultrapasse sua alta demanda energética.

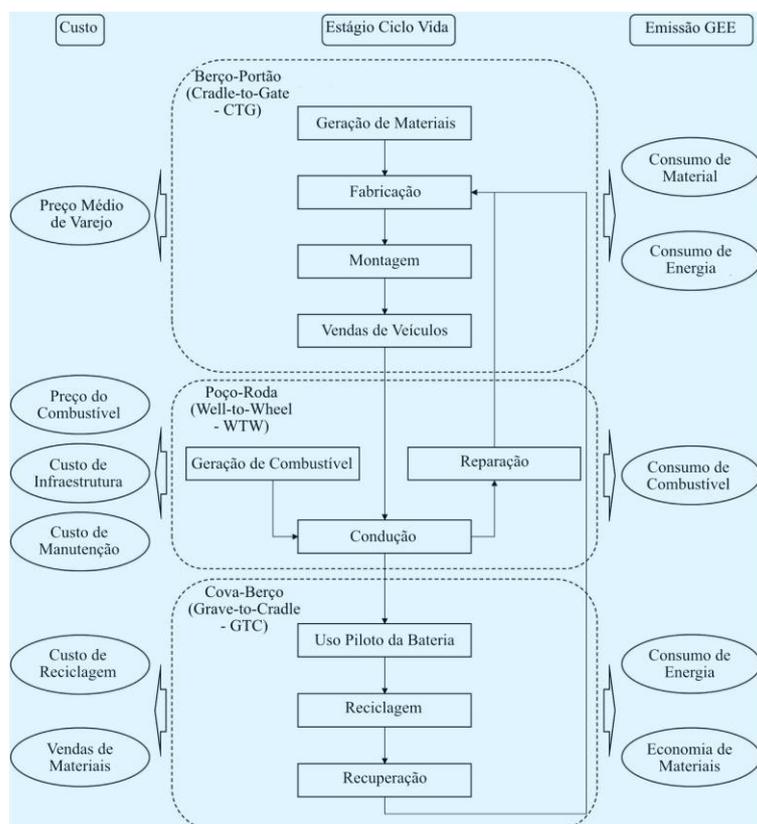
Estudos chineses – como Zhou et al. (2013) e Ou et al. (2011) - demonstram uma conclusão similar aos estudos anteriores, determinando que com a mudança de matriz energética, o impacto positivo dos carros elétricos são elevados, contribuindo para a redução das emissões de gases de efeito estufa. Zhou et al. (2013) obtém o resultado de 34% de redução na emissão de CO₂ comparado aos carros de combustão.

Zheng & Peng (2021), aplicam a metodologia de Avaliação do Ciclo de Vida para avaliar a eficiência do TtW utilizando os dados energéticos da China, país com a maior produção e comercialização de carros elétricos e com maior produção e demanda energética do planeta. No caso de carros a combustão, a eficiência energética é a proporção da energia útil usada pelo veículo pela produção de energia do tanque de combustível. Para veículos elétricos, é a proporção entre a quantidade final de energia (eletricidade) usada pela quantidade de eletricidade produzida pela bateria do veículo. Seus resultados mostram que na segunda etapa de um ciclo de vida (TtW), os carros elétricos possuem vantagem por terem uma maior eficiência energética, levando a menores consumos energéticos. Esses autores, ao compararem a emissão de CO₂ dos dois tipos de carros pelo seu tempo de vida, reforçam as conclusões abordadas anteriormente. Ao realizarem a comparação para cinco cenários diferentes: matriz energética chinesa, norueguesa, inglesa, indiana e média global, concluem que com exceção do país nórdico, os outros 4 cenários ainda não possuem uma produção de energia sustentável a ponto de fazer com que o carro elétrico emita menos gases de efeito estufa do que os a combustão. No trabalho daqueles autores, é proposto o fator “SRPR”. Esse fator foi utilizado para calcular o quanto o modelo do veículo é interessante para o consumidor, considerando dois componentes: Força e Intervalo em que consegue

percorrer (autonomia). O carro padrão teria SRPR de 1. Assim, quanto maior o fator (mais próximo de 1), mais atrativo o veículo é para o consumidor. Os autores concluem que não se pode negar que em alguns países/regiões os carros elétricos devam ser desenvolvidos por serem benéficos para a redução de CO₂. Porém, a maioria dos países cujas produções de eletricidade não são tão limpas deve adiar a promoção dos carros elétricos, até que suas gerações de energia melhorem em relação às emissões de CO₂. Segundo os autores, na maioria dos países ainda há muitos esforços que precisam ser feitos para permitir que os carros elétricos tenham emissões de CO₂ durante o seu ciclo de vida mais baixos do que os carros a combustão.

Qiao et al. (2020) e Qiao et al. (2019) acrescentam ainda que além do reflexo positivo que a mudança energética traz para o impacto ambiental dos carros elétricos, a reciclagem ao final da vida útil destes carros é peça importante para redução de seus impactos negativos. Os estudos em questão utilizam uma abordagem diferente dos estudos supracitados, pois dividem a abordagem de ciclo de vida em: *Cradle-to-Gate (CtG)*; *Well-to-Whell (WtW)* e *Grave-to-Cradle (GtC)*, conforme definido na Figura 12. Nessa figura são mostrados também os fatores destas etapas que impactam no custo e no meio ambiente.

Figura 12. Diagrama explicativo da avaliação de ciclo de vida com as fases CtG, WtW e GtC.



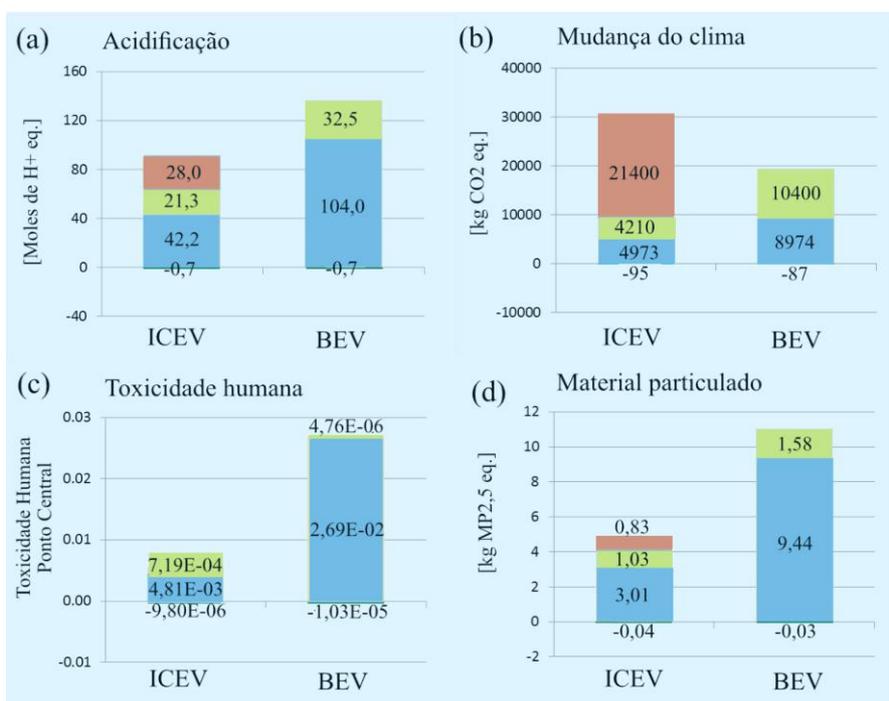
Fonte: Adaptado de Qiao et al. (2020).

Segundo esses estudos, a fase *CtG* – que engloba a manufatura tanto do carro, quanto da bateria – possui potencial de redução em impacto ambiental com a implementação de práticas de reciclagem, podendo reduzir em até 17% das emissões de um carro elétrico.

Por fim, Pero et al. (2018) e Hawkins et al. (2013) utilizam a metodologia para avaliar o ciclo de vida dos carros elétricos comparados aos carros convencionais sob a ótica de diversas métricas a mais do que os outros estudos, abordando impactos além

das emissões de gases de efeito estufa. No tópico de mudança climática, é notável a vantagem na utilização do carro elétrico quando se utiliza a premissa de fontes mais limpas de energia, pois mesmo liberando mais CO₂ em sua etapa de produção, sua operação zero emissão faz com que a economia seja de mais de 100000 kg do composto para um ciclo de vida de 150000 km rodados. Na Figura 13 são apresentados os dados obtidos por aqueles autores (Pero et al., 2018).

Figura 13. Comparativo entre carros elétricos e convencionais em métricas de acidificação, mudança climática, toxicidade humana e suspensão de partículas segundo o ciclo de vida de cada modelo. BEV: veículos elétricos; ICEV: veículos movidos por combustão interna.



Fonte: Adaptado de Pero et al. (2018).

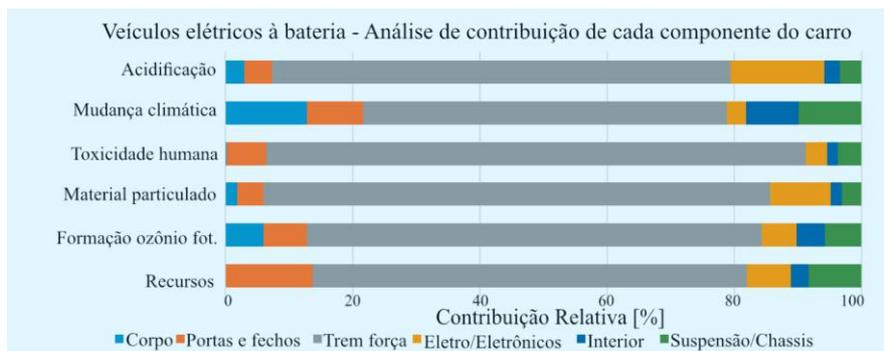
Ji et al. (2012) trazem outra análise relevante ao tema calculando vantagens secundárias na transição de carros a combustão para carros elétricos. Os autores concluem que o fato dos carros elétricos emitirem gases de efeito estufa durante sua produção, mas possuírem uma utilização limpa, ao contrário dos carros convencionais que emitem estes gases durante sua utilização, faz com que os humanos inalem menos partículas de poluição durante suas rotinas, migrando estes componentes para regiões industriais.

Porém, existem aspectos nos quais é necessário considerar os efeitos negativos dos carros elétricos (indicados por “BEV” na Figura 13) em comparação aos carros a combustão interna (indicados por “ICEV” nessa figura). Em relação à acidificação protagonizada por cada modelo, a produção da bateria e motor dos carros elétricos é fator determinante para que este carro supere os convencionais; principalmente pelo uso de alumínio, cobre e níquel.

Em questão de toxicidade aos humanos e suspensão de materiais particulados, o desempenho dos carros elétricos sinaliza um alerta em relação a este tipo de veículo. A mineração de materiais brutos para a utilização nas baterias e motores é responsável por quase todo o impacto em ambas as métricas. Esses aspectos indicam a profundidade do problema relacionado às baterias de lítio ion, tão fundamentais para a produção do veículo.

Evidenciando a problemática, na Figura 14 é apresentado o quanto cada parte do carro elétrico é responsável pelos resultados obtidos nos gráficos anteriores, reforçando a conclusão de que a bateria e motores elétricos e seus acessórios complementares são os responsáveis pelos impactos apresentados pelo veículo.

Figura 14. Relação da contribuição das partes de um carro elétrico para as métricas estudadas na Figura 13.



Fonte: Adaptado de Pero et al. (2018).

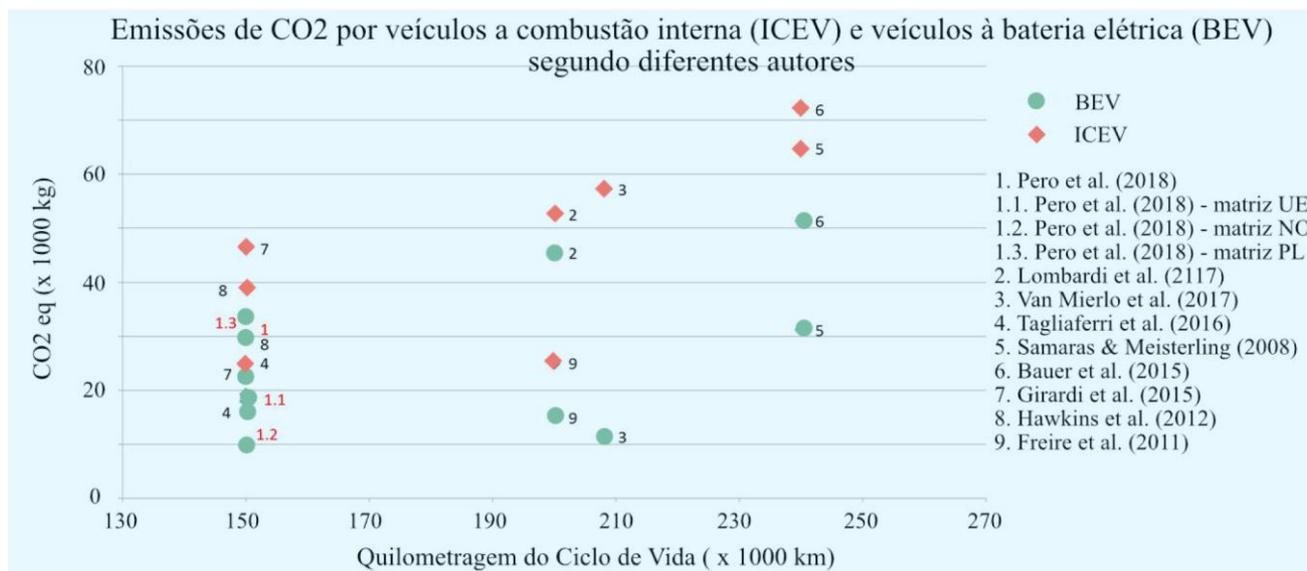
Pero et al. (2018) concluem que, para evitar problemas com a mudança de veículos convencionais para elétricos, alguns aspectos se destacam. Entre eles, esses autores citam o desenvolvimento de processos inovadores para a produção de baterias, capazes de oferecer alta eficiência, materiais inovadores eco-eficientes e reciclagem de componentes. Para melhorar a eco eficiência do uso dos carros elétricos, é necessário aumentar a quilometragem por ciclo de vida, o que envolveria uma redução adicional no impacto por quilômetro percorrido.

Hawkins et al. (2013), ao analisar fatores similares aos utilizados por Pero et al.(2018), convergem nos resultados, entendendo que a fase de produção do carro elétrico, devido à bateria e propulsão, é o momento mais crítico em termos ambientais. Segundo o estudo, os fatores de potencial tóxico aos humanos, potencial tóxico a água e potencial de esgotamento mineral são os maiores impactos desta etapa do ciclo de vida. Além disso, utilizando como premissa a matriz energética europeia, o estudo alcança resultados otimistas, ao chegar em uma redução entre 20% e 24% de potencial de aquecimento global na troca de carros a combustão por carros elétricos. Esses autores lembram que essa redução é diretamente proporcional a vida útil do carro, ou seja, quanto mais quilômetros o carro elétrico conseguir rodar antes de chegar ao seu fim de vida, maiores as reduções no potencial de aquecimento. Nos outros fatores estudados, a diferença mais relevante se dá no potencial de formação de oxidação fotoquímica, chegando a uma redução de 33% com o uso de carros elétricos, principalmente devido aos combustíveis dos carros a combustão gerarem óxidos de nitrogênio. Entretanto, assim como concluíram Pero et al. (2018), o fator de potencial tóxico humano é o ponto crítico dos carros elétricos, pois este tipo de veículo aumenta em mais de 180% o potencial danoso deste fator, chegando em até 290% em comparação aos carros convencionais a combustão.

Mesmo com a convergência dos principais estudos recentes sobre o tema, Pero et al. (2018) abordam uma questão fundamental para a discussão do tema: a variabilidade dos resultados devido às premissas assumidas. Esses autores mostram como a mudança dos dados utilizados em tópicos como distância percorrida na vida útil de um veículo, peso do veículo, densidade da bateria e matriz energética do país fazem com que os resultados obtidos na comparação flutuem dentro de um espectro muito abrangente. Assim sendo, o método de avaliação de ciclo de vida, por necessitar de diversas premissas, pode acarretar resultados quantitativos com alta variação. Para demonstrar esse aspecto, aqueles autores fizeram uma enxuta revisão bibliográfica que comprova como 12 cenários de dados diferentes alcançam resultados tão diferentes. Por exemplo, na Figura

15, ao analisarmos dados obtidos por Lombardi et al. (2017) e Mierlo et al. (2017), é possível verificar que as emissões de CO₂ podem diferir 4,5 vezes entre estudos com uma faixa de quilometragem tão similar.

Figura 15. Quilometragem da vida de um veículo pela massa emitida de CO₂ para carros elétricos e a combustão em diversos estudos de análise de ciclo de vida.



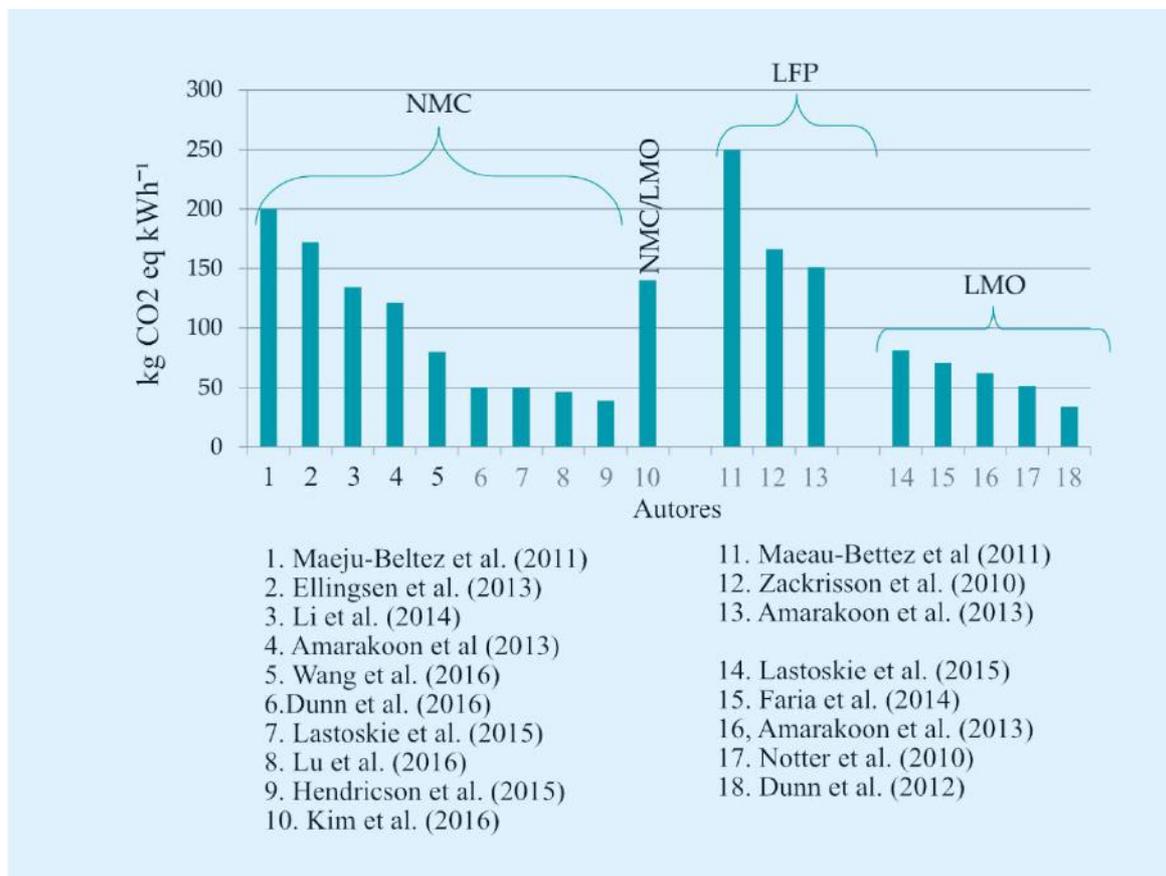
Fonte: Adaptado de Pero et al. (2018).

3.6 Análise das baterias de carros elétricos do ponto de vista ambiental

Ao observar a variabilidade de resultados obtidos em estudos a respeito do impacto ambiental de carros elétricos quando comparado aos carros convencionais, majoritariamente ao utilizar a Análise de Ciclo de Vida, faz-se necessário um estudo mais específico do que é o componente mais fundamental do modelo de carro em estudo: a bateria. O “custo” ambiental da produção desta peça para carros leves varia entre 150 a 200 kg CO₂-eq/kWh, com um gasto energético de 586 MJ/kWh, sendo a produção do cátodo o maior gerador de gases de efeito estufa. Ou seja, durante o ciclo de vida de produção da bateria, é a manufatura do componente que mais impacta ambientalmente (Ellingsen et al., 2014; Romare & Dahllöf, 2017).

Entretanto, o estudo específico das baterias carrega problemáticas similares aos encontrados na bibliografia contemporânea das análises de ciclo de vida dos carros elétricos, pois o interesse recente pelo tema, a diversidade de premissas a serem tomadas e a variedade de escolha de conjunto de dados a serem utilizados, fazem com que os resultados obtidos pelos estudos também apresentam alto grau de diferença entre si. Esses aspectos podem ser vistos na Figura 16, que apresenta estas diferenças no cálculo de CO₂ emitido na produção de uma bateria pelos estudos da última década.

Figura 16. Quantidade de CO₂ emitido para produção de uma bateria de carro elétrico em publicações a partir de 2010. As siglas indicam o material que compõe o cátodo das células eletrolíticas da bateria. NMC: óxido de lítio manganês cobalto (LiNiCoMnO₂); LMO: óxido de lítio manganês (LiMn₂O₄) e LFP: fosfato de lítio ferro (LiFePO₄).



Fonte: Adaptado de Romare & Dahllöf (2017).

Hoekstra e Steinbuch (2020), por exemplo, criticam a adoção de 175 kg CO₂-eq/kWh como ideal para cálculo das emissões das baterias, citadas no estudo de Romare e Dahllöf (2017). Hoekstra e Steinbuch afirmam que 75 kg CO₂-eq/kWh seria mais factível, devido a maior eficiência na produção desenvolvida nos últimos anos e aumento na utilização de recursos renováveis. Entretanto, é perceptível que tal afirmação não é munida de referências relevantes para o apontamento, assim como não é o valor mais adotado nos artigos posteriores ao trabalho em questão.

Ao analisar os dados de Ellingsen et al. (2014) e de Romare & Dahllöf (2017) também evidenciam como a matriz energética do país pode impactar no custo ambiental de produção destas baterias, já que a maioria da energia utilizada vem da eletricidade gerada. Considerando a matriz energética brasileira (que apresenta grande potencial hidroelétrico), o estudo chega à conclusão de que é possível reduzir 60% a mais a quantidade de CO₂ emitida na produção quando comparado aos 107 kg CO₂-eq/kWh do estudo de Ellingsen *et al.* No lado oposto, um país como a Índia pode emitir 5 vezes mais dióxido de carbono considerando somente este fator.

O fator da matriz energética na produção da bateria volta a contribuir significativamente na vida do carro elétrico, deixando-o de 3 a 4 vezes com menor intensidade de CO₂ emitido por quilômetro rodado, já que esta peça do carro elétrico é responsável por até 40% de todo o dióxido de carbono emitido em sua vida (International Energy Agency, 2020).

Para entender o potencial ambiental dos carros movidos a bateria é importante conhecer o estado da arte da reciclagem destes componentes e seu potencial em reduzir os danos ao meio ambiente trazidos por nossas tecnologias de transporte.

Atualmente, a escolha por reciclar ou não determinados materiais costuma utilizar apenas o ponto de vista econômico do material de interesse, sem considerar a quantidade de gases de efeito estufa emitidos em sua produção ou a quantidade energética que se utiliza para produzi-lo pela primeira vez. No caso das baterias de lítio íon, sua reciclagem é muito baixa, principalmente por ser um componente recente e ter poucas unidades chegando em seu fim de vida e pelo pouco conhecimento em como realizar o processo.

A pouca reciclagem existente é via incineração por pirometalurgia, um método que resgata apenas o cobalto, níquel e cobre do componente, sem que estes materiais estejam fáceis para um segundo uso. A opção de maior benefício encontrada na literatura trata-se da proposta de conciliação com a hidrometalurgia, que ainda existe apenas em escalas de protótipo, e com tratamentos térmicos, proporcionando uma maior recuperação dos materiais a disposição. De acordo com Romare & Dahllöf (2017), será necessária uma alta taxa de reciclagem e uma alta qualidade na produção. Atualmente, a maioria da carga ambiental encontra-se no ciclo de vida do veículo, dado que o material não é reciclado ou reciclado abaixo do nível necessário para a bateria. O fato de atualmente o fluxo de produção de baterias de veículos ser baixo limita as oportunidades de reciclagem economicamente viável para a maioria dos materiais utilizados nas células. O lítio atualmente não é recuperado em uma forma que seja reutilizável em baterias. O destino mais comum desse elemento é ir para uma jorra de forno, como substituto de cargas em cimento. Segundo esses autores, essa não é uma opção a longo prazo para a sustentabilidade dessas baterias.

Outra opção que vem sendo pesquisada para diluir os impactos ambientais da vida de uma bateria seria dar-lhe uma segunda vida, encontrando outras funcionalidades que uma bateria já inutilizável para um carro possa ter em outros contextos. Entretanto, atualmente, não há a garantia da segurança em se utilizar estas baterias descartadas nem leis que padronizem o momento e modo deste descarte correto. Existem, sim, possibilidades de reutilizar essas baterias em situações que utilizam pequenas necessidades de armazenagem de energia, sistema de *backups*, entre outros. Porém, atualmente, esses usos alternativos ainda são incipientes.

Portanto, ao compilar os impactos negativos da produção de uma bateria com os resultados positivos possíveis de serem obtidos com uma reciclagem de maior taxa, pode-se ter um panorama completo dos impactos do ciclo de vida de uma bateria, conforme indicado na Tabela 2.

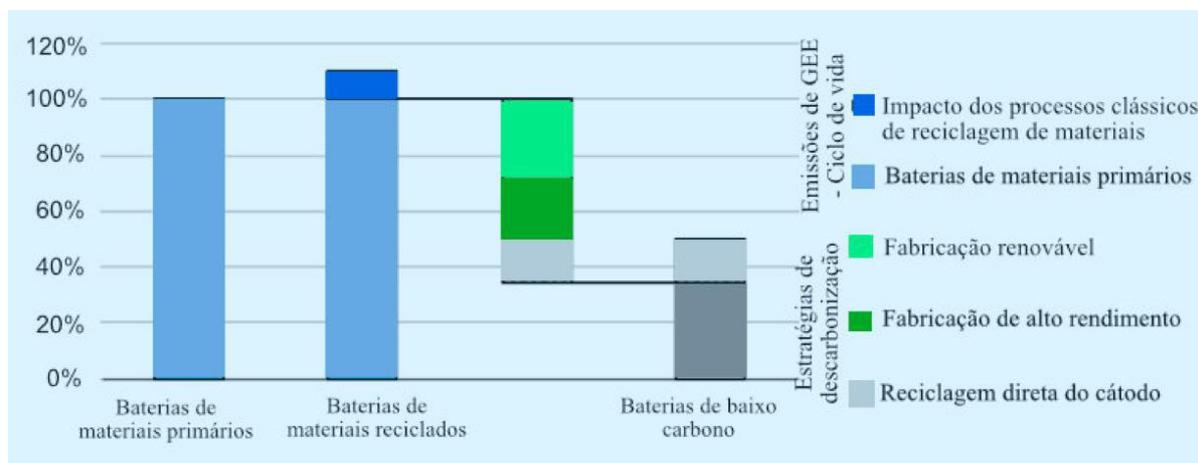
Tabela 2. Massa de CO₂ produzida por componente de uma bateria durante seu ciclo de vida.

Componente	kg CO ₂ eq/kWh bateria			
	Mineração e refinamento da matéria-prima	Produção de materiais para baterias (incluindo mineração e refino)	Fabricação (componente e célula + montagem da bateria)	Reciclagem
Ânodo	2 - 11	7 - 25		
Cátodo	7 - 18	13 - 20 (90)		
Eletrólito	4,00	4 - 13		
Separador	< 0,5	Aprox. 1		
Revestimento da célula	< 0,1	Aprox. 1		
Revestimento da bateria	4 - 13	10 - 25		
Resfriamento	0 - 3	2 - 6		
Sistema de manejo da bateria (estim.)	< 1	4 - 30		
Total	18 - 50	48 - 121 (216)	20 - 110	Piro: 15 Hidro: -12
Valor mais provável (com base na avaliação de transparência e método científico do relatório)		60 - 70	70 - 110	15

Fonte: Adaptado de Romare & Dahllöf (2017).

Em resumo, a reciclagem se mostra peça chave para a criação de uma cadeia de valor mais robusta que garanta maior sustentabilidade ambiental para os carros elétricos movidos a bateria. Atualmente, a reciclagem não traz vantagens em termos ambientais, mas ajuda na preservação dos recursos utilizados e faz dos veículos elétricos mais sustentáveis a longo prazo. Na Figura 17 é apresentado como estratégias de descarbonização podem favorecer a produção de baterias rumo a uma cadeia de valor mais sustentável.

Figura 17. Estratégias de descarbonização levando a redução porcentual de gases de efeito estufa na produção de baterias.



Fonte: Adaptado de Romare & Dahllöf (2017).

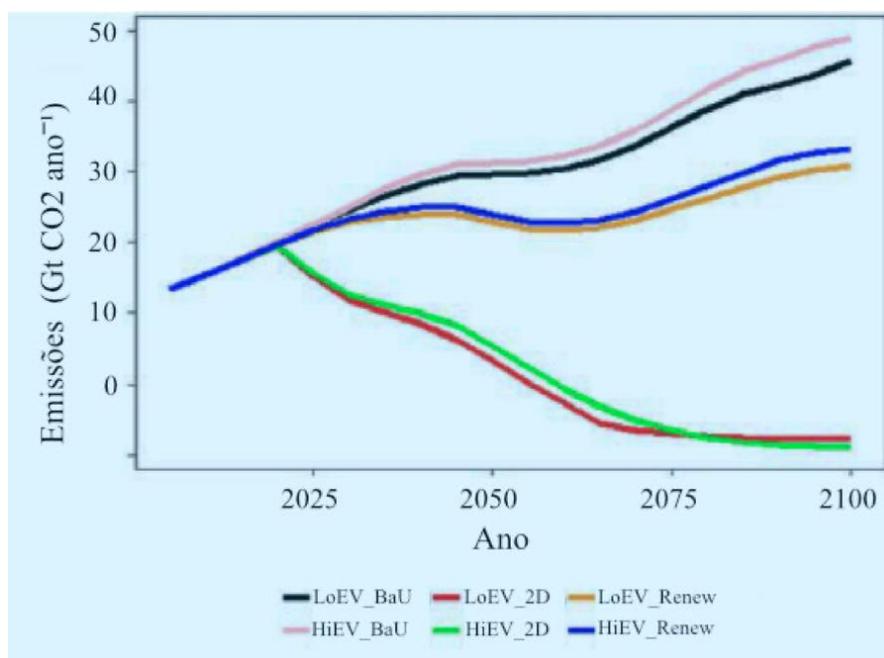
3.7 Implementação da eletrificação nos transportes

Os estudos citados ao longo deste trabalho indicam que a implementação dos carros elétricos como alternativa viável para o transporte urbano deve vir munida de políticas e estratégias que favoreçam a conversão da matriz energética para fontes mais limpas do ponto de vista ambiental, possibilitando a redução nas emissões dos gases de efeito estufa, principalmente de dióxido de carbono.

É importante entender as estratégias mais favoráveis de implementação do carro elétrico do ponto de vista ambiental. Visto que o setor de transportes é responsável por cerca de um quarto das emissões, sendo o transporte rodoviário a principal fonte, pensar e planejar a maneira de entrada desta tecnologia na sociedade se mostra crucial. Para isso, Zhang & Fujimori (2020) modelaram algumas situações de implementação desta tecnologia, considerando a realidade de 17 cenários diferentes ao redor do globo. Esses autores buscaram entender qual das estratégias era a mais favorável ambientalmente: a não implementação dos carros elétricos, sem esforços pelo clima; a não implementação dos carros elétricos, com taxaço pelas emissões de carbono; a não implementação dos carros elétricos, com alta preferência por energias renováveis; e a implementação de 100% de carros elétricos até 2050 com as 3 estratégias descritas anteriormente (sem esforços pelo clima, taxaço pelas emissões de carbono e preferência por energias renováveis). Os resultados obtidos evidenciaram que a troca pelos carros elétricos, independente da estratégia tomada, leva ao aumento de necessidade energética das regiões, enquanto promove a redução na dependência do petróleo para geração destas energias e redução na dependência de biocombustíveis (garantindo outras vantagens secundárias, como a diminuição do desmatamento, segurança alimentar e outras desvantagens que a produção agrária para geração de energia poderiam trazer).

Entretanto, seguindo as mesmas conclusões dos artigos de análise de ciclo de vida, observa-se que a simples introdução dos carros elétricos sem políticas de clima promove o aumento nas emissões indiretas, vindas da produção da energia. Nesse caso, é necessária a conciliação destes carros com a taxaço das emissões de carbono para uma redução significativa e priorização de energias renováveis para redução das emissões indiretas. Na Figura 18 é ilustrada a projeção de emissões de CO₂ até 2100.

Figura 18. Projeção de emissões de CO₂ até 2100 em cada cenário modelado. As curvas de “LoEV” indicam os cenários sem a implementação de carros elétricos, enquanto as “HiEV” as que implementaram 100% até 2050. Já os cenários “BaU” não tiveram estratégias vinculadas a mudança do Clima, enquanto “2D” taxaram as emissões de carbono e “Renew” priorizaram energias renováveis.



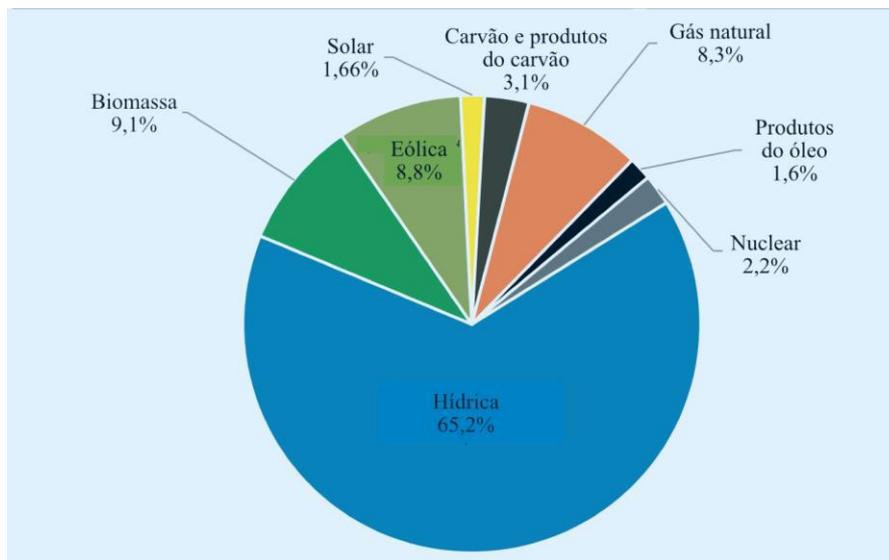
Fonte: Adaptado de Zhang & Fujimori (2020).

Segundo a Figura 18, fica claro o potencial de redução nas emissões que políticas de atribuição de preço ao carbono possuem, trazendo os melhores cenários quando conciliadas com a tecnologia tema deste estudo, pois levam ao fomento e desenvolvimento de energias mais limpas, como eólica e solar. Nota-se que a tecnologia dos carros elétricos por si só não salva o planeta dos gases de efeito estufa, tanto pelas emissões de sua produção, quanto pelas emissões da energia que será utilizada. Dependendo da estratégia adotada, pode ocorrer aumento nas emissões desses gases em comparação com a permanência das tecnologias atuais. É fundamental, então, a conciliação tão reforçada pelo meio acadêmico entre carros elétricos e energias renováveis. Por fim, considerando cada região particularmente, o estudo diagnostica que Europa, Canadá e Índia seriam peças-chave para o avanço na redução das emissões no planeta, primordialmente por juntos serem responsáveis por cerca de um quarto das emissões de transporte.

3.8 Cenário da implementação no Brasil

Considerando que a matriz energética do país baseia-se em energias limpas e renováveis, como mostrado na Figura 19., parece otimista o cenário brasileiro para a implementação dos carros elétricos, O país tem um consumo de 31,2% de sua energia vinculado ao setor de transporte, sendo 29,5% destinado ao transporte rodoviário (Empresa de Pesquisa Energética, 2021).

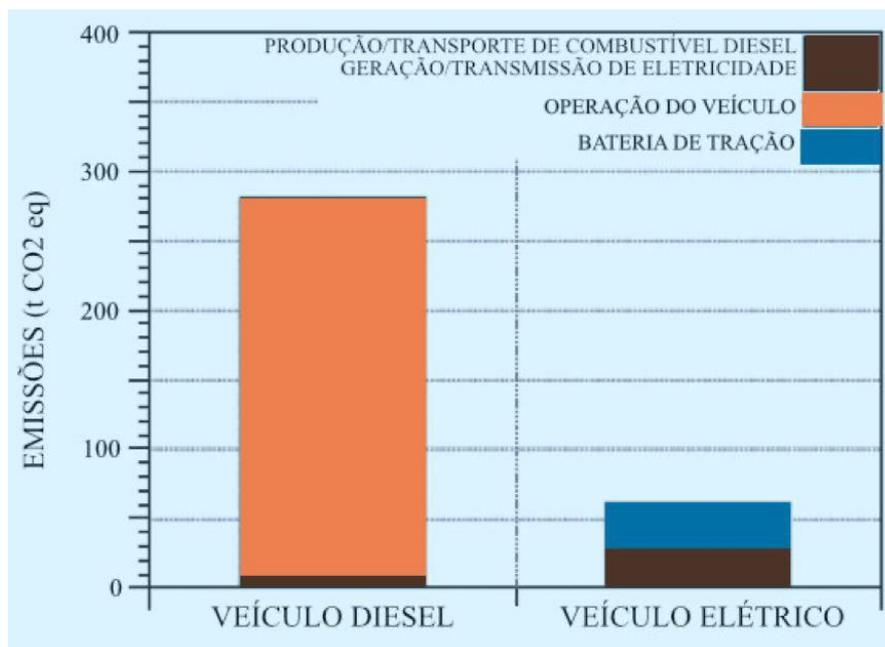
Figura 19. Matriz energética brasileira.



Fonte: Modificado de Empresa de Pesquisa Energética (2021).

Utilizando como base de dados uma matriz energética muito similar a esta, Falcão et al. (2017) chegam à conclusão de que o carro elétrico consegue emitir até 4,6 vezes menos equivalente de CO₂ do que o carro convencional. Assim como os estudos internacionais abordados, a produção da bateria ainda seria um fator de alto impacto ambiental na produção dos carros movidos a energia elétrica, levando a uma produção do veículo 3,5 vezes mais danosa do que o carro a diesel. Na Figura 20 é mostrada a análise comentada.

Figura 20. Emissão de equivalente de CO₂ de um carro a diesel e um carro elétrico na matriz energética brasileira.



Fonte: Adaptado de Falcão et al. (2017).

Devido à dimensão continental do Brasil, são raros os estudos que calculam o potencial ambiental dos carros elétricos considerando toda a extensão do país e sua enorme frota de veículos. Encontram-se em maior quantidade estudos focados em determinadas regiões, especialmente o Estado ou a cidade de São Paulo, principalmente pela sua população, capacidade econômica e quantidade de veículos (mais de 10% do total do país) (Costa et al., 2018).

Dias et al. (2014) calculam que a cada 10% da frota de carros na cidade de São Paulo que for substituída por carros elétricos, é possível atingir um ganho de 9,5% menos emissões em CO₂, com um aumento na demanda energética de apenas 2%.

Costa et al. (2017), também ao analisar a cidade de São Paulo, chegam ao potencial de redução de até 26% nas emissões de CO₂ com a troca de um quarto dos carros da cidade por carros elétricos. Os autores enfatizam as vantagens em termos ambientais desta tecnologia sobre a utilização do etanol – principalmente pelos danos como desmatamento, contaminação do solo, poluição do ar e da água e interferência nos preços dos alimentos. Assim como Zhang & Fujimori (2020) modelaram situações de comportamentos distintos na introdução dos carros elétricos no mundo, Costa et al. (2017) simulam situações para a cidade de São Paulo. O resultado de 26% na redução de emissões vem da premissa de substituição de um quarto da frota por carros elétricos e utilização de etanol para os carros que ainda forem a combustão. Do ponto de vista energético, esta troca acarretaria redução de 15% no consumo energético da cidade. Fechando o estudo, os autores realizam uma análise WtW de dois veículos – movido a etanol e elétrico – na cidade de São Paulo e concluem que a emissão de CO₂ por quilômetro rodado do carro elétrico pode ser 42 vezes menor, principalmente pela matriz energética da cidade ser quase que em sua totalidade renovável.

Tais pesquisas concluem que a tecnologia da eletrificação do transporte com os carros elétricos possui o potencial de mitigar a poluição do ar e a mudança climática em São Paulo, aproveitando a matriz energética local. Até 11 milhões de toneladas de CO₂ são possíveis de serem evitadas em um intervalo de 15 anos com a adoção de 20% da frota da cidade com carros elétricos, trazendo vantagens em energia, meio ambiente e perspectiva econômica (Costa, 2019; Costa et al., 2017; Costa et al., 2018).

Segundo Costa (2019), para garantir o máximo dos benefícios sócio-técnico-econômico-ambientais o Brasil deve desenvolver a mobilidade elétrica de forma estruturada. A produção do veículo e de seus componentes deve ser local, com o intuito de gerar empregos, evitar o aumento das importações, reduzir a dependência energética das fontes de petróleo, reduzir as emissões de GEE e mitigar as mudanças do clima. Esse autor ainda conclui que as políticas públicas devem incluir mecanismos para garantir que as redes de fabricantes e de concessionárias não impeçam a expansão do veículo elétrico.

No Brasil, a inserção de carros elétricos na frota de veículos ainda é tímida, principalmente pela barreira de preço. Um carro à bateria pode apresentar um preço de compra até 2,5 vezes maior do que um carro convencional. Tal fato é decorrente do preço de compra do veículo e também do custo de produção da bateria. Muitas vezes, o custo de manutenção menor dos carros elétricos em relação aos convencionais não é suficiente para compensar em termos econômicos a opção elétrica. No cenário atual, a viabilidade econômica só pode acontecer com incentivos governamentais que visem diminuir o atual estado de 13 anos de uso do carro elétrico para retornar o *payback*.

É um desafio estimar quando este tipo de veículo se tornará de fato acessível em terras brasileiras. O crescimento da eletrificação da frota vem acontecendo, mesmo com o receio dos consumidores em relação ao *range effect*, termo utilizado para descrever o medo dos usuários em não encontrar um posto de abastecimento elétrico durante um percurso longo e ficar sem bateria no meio de uma estrada (Costa et al., 2017).

De acordo com Falcão et al. (2017), o incentivo e o interesse governamental no fomento a produção de etanol seriam um entrave para a evolução da eletrificação. Os biocombustíveis, que representem 16% da matriz energética do país, geram uma quantidade relevante de empregos, tornando-os estratégicos para que o Brasil consiga cumprir as ações prometidas no Acordo de Paris. A dependência econômica em relação ao petróleo também acabaria dificultando a transição energética. Um fator que afeta não só o Brasil, como também outros países, é a implementação de locais seguros de carregamento dos veículos. Embora a pesquisa no assunto ainda seja embrionária, já é possível diagnosticar que a falta de segurança nas grandes cidades

brasileiras é um fator de preocupação dos possíveis consumidores - que desejam que os locais de carregamentos públicos sejam perto de *shoppings* e aeroportos, devido à segurança. A conclusão mais recente evidencia a necessidade de maiores estudos que entendam o ponto de equilíbrio entre demanda e fornecimento de postos elétricos para se planejar corretamente a criação destes locais (International Energy Agency, 2020).

4 Conclusão

A alternativa de substituir os carros a combustão por carros elétricos movidos a bateria surge com um grande potencial de solução para esta questão, mas devemos pormenorizar o assunto para entender realmente quais são os benefícios apresentados e o que pode ser apenas jogadas de marketing e lavagem verde protagonizada pelas empresas com este interesse.

Independentemente do método de pesquisa utilizado, encontram-se diversos problemas na escolha de dados para realização das análises e, principalmente, da comparação com outro tipo de tecnologia, o que nunca é fácil.

Também surge o problema da alta variabilidade de resultados, devido às premissas escolhidas para abordar o tema, o que é exposto no trabalho, com a apresentação de comparação entre estudos que chegam a respostas altamente divergentes.

Entretanto, observa-se um consenso no potencial de vantagens ambientais alcançadas pelos carros elétricos quando vinculados a uma política de desenvolvimento de fontes de energia renováveis como matriz energética da região de estudo. Mesmo gerando mais CO₂ do que os carros a combustão em seu período de produção, a vida útil baixa em emissões faz com que carros elétricos alimentados por energia limpa alcance uma redução de até 34% na emissão de gases de efeito estufa.

Juntamente, se faz relevante desenvolvimentos específicos que aumentariam consideravelmente os ganhos na utilização de carros elétricos, tais quais: aumento na quilometragem alcançada durante a vida de uma bateria, a produção de baterias mais eficientes e com a utilização de materiais mais ecológicos e o desenvolvimento e fomento da reciclagem desta peça, capaz de reduzir em até 17% as emissões de gases de efeito estufa.

Deve-se ressaltar aspectos negativos dos carros elétricos que são encontrados em diversos estudos, como seu desempenho preocupante na acidificação devido aos compostos presentes na bateria, a toxicidade humana apresentada na mineração destes compostos e o alto nível de suspensão de materiais particulados.

Toda a questão da substituição de carros a combustão por carros elétricos movidos a bateria vai muito além de um problema de engenharia – que este trabalho buscou elucidar as principais conclusões da contemporaneidade – intervencionando com problemáticas da geopolítica, da geografia da mobilidade urbana e das políticas públicas de fomento a desenvolvimento de fontes de energia e acesso a meios de transporte.

Existem diversos pontos que merecem estudos futuros. Por exemplo, aprofundar aspectos ligados ao lítio e aos danos gerados por sua extração, entendendo como realizá-la de maneira soberana, sustentável, planejada, com ajuste de demanda e aliada à reciclagem, à redução e ao reuso. Também merecem atenção pesquisas para entender o ponto de equilíbrio entre a demanda de energia elétrica para automóveis e o fornecimento via postos públicos de abastecimento, assim como as estratégias de construção destes locais, considerando contextos econômicos diversos dos países.

Há que se considerar que as discussões de transição energética e do setor de transportes são muito amplas. São necessários estudos que não se limitem a cenários nos quais os carros individuais sejam a única solução. É imperativo propor soluções que planejem um futuro com menor demanda energética, incluindo fontes renováveis, contemplando a mobilidade coletiva como centro da discussão. Há um arsenal de pontos de vista a serem explorados para subsidiar tomadas de decisão por parte da sociedade em um futuro próximo.

Referências

- Ali, S., Akter, S., & Fogarassy, C. (2021). The Role of the Key Components of Renewable Energy (Combustible Renewables and Waste) in the Context of CO₂ Emissions and Economic Growth of Selected Countries in Europe. *Energies*, 14(8), 2034. <https://doi.org/10.3390/en14082034>
- Arvanitoyannis, I. S. (2008). *Waste Management for the Food Industries*. Elsevier. <http://dx.doi.org/10.1016/b978-0-12-373654-3.x5001-9>
- Carson, R. (2002). *Silent spring* (40th anniversary ed., 1st Mariner Books ed.). Houghton Mifflin.
- Costa, J. E. G. (2019). *Mass introduction of electric passenger vehicles in Brazil: Impact assessment on energy use, climate mitigation and on charging infrastructure needs for several case studies* [Ph.D. Thesis, Universidade Nova Lisboa]. <http://hdl.handle.net/10362/83963>
- Costa, E., Seixas, J., Costa, G., & Turrentine, T. (2017). Interplay between ethanol and electric vehicles as low carbon mobility options for passengers in the municipality of São Paulo. *International Journal of Sustainable Transportation*, 11(7), 518–525. <https://doi.org/10.1080/15568318.2016.1276651>
- Costa, E., Seixas, J., Baptista, P., Costa, G., & Turrentine, T. (2018). CO₂ emissions and mitigation policies for urban road transportation: São Paulo versus Shanghai. *Urbe. Revista Brasileira de Gestão Urbana*, 10(suppl. 1), 143–158. <https://doi.org/10.1590/2175-3369.010.sup11.a015>
- Costa, E., Seixas, J., Costa, G., & Turrentine, T. (2017). Interplay between ethanol and electric vehicles as low carbon mobility options for passengers in the municipality of São Paulo. *International Journal of Sustainable Transportation*, 11(7), 518–525. <https://doi.org/10.1080/15568318.2016.1276651>
- Crabtree, G. (2019). The coming electric vehicle transformation. *Science*, 366(6464), 422–424. <https://doi.org/10.1126/science.aax0704>
- Dias, M. V. X., Haddad, J., Horta Nogueira, L., Costa Bortoni, E. da, Passos da Cruz, R. A., Akira Yamachita, R., & Goncalves, J. L. (2014). The impact on electricity demand and emissions due to the introduction of electric cars in the São Paulo Power System. *Energy Policy*, 65, 298–304. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2013.09.052>
- Ding, Y., Cano, Z. P., Yu, A., Lu, J., & Chen, Z. (2019). Automotive Li-Ion Batteries: Current Status and Future Perspectives. *Electrochemical Energy Reviews*, 2(1), 1–28. <https://doi.org/10.1007/s41918-018-0022-z>
- Ellingsen, L. A.-W., Majeau-Bettez, G., Singh, B., Srivastava, A. K., Valøen, L. O., & Strømman, A. H. (2014). Life Cycle Assessment of a Lithium-Ion Battery Vehicle Pack: LCA of a Li-Ion Battery Vehicle Pack. *Journal of Industrial Ecology*, 18(1), 113–124. <https://doi.org/10.1111/jiec.12072>
- Empresa de Pesquisa Energética - EPE. (2021). *Balanco Energético Nacional 2021. Relatório Síntese*. https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-601/topico-588/BEN_S%C3%ADntese_2021_PT.pdf
- Falcão, E. A. M., Teixeira, A. C. R., & Sodré, J. R. (2017). Analysis of CO₂ emissions and techno-economic feasibility of an electric commercial vehicle. *Applied Energy*, 193, 297–307. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.02.050>
- Finkbeiner, M., Inaba, A., Tan, R., Christiansen, K., & Klüppel, H.-J. (2006). The New International Standards for Life Cycle Assessment: ISO 14040 and ISO 14044. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 11(2), 80–85. <https://doi.org/10.1065/lca2006.02.002>
- Fuc, P., Kurczewski, P., Lewandowska, A., Nowak, E., Selech, J., & Ziolkowski, A. (2016). An environmental life cycle assessment of forklift operation: A well-to-wheel analysis. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 21(10), 1438–1451. <https://doi.org/10.1007/s11367-016-1104-y>
- Gil, A. C. (2009). *Como elaborar projetos de pesquisa*. Atlas.
- Hawkins, T. R., Singh, B., Majeau-Bettez, G., & Strømman, A. H. (2013). Comparative Environmental Life Cycle Assessment of Conventional and Electric Vehicles. *Journal of Industrial Ecology*, 17(1), 53–64. <https://doi.org/10.1111/j.1530-9290.2012.00532.x>
- Hoekstra, A., & Steinbuch, M. (2020). *Comparing the lifetime green house gas emissions of electric cars with the emissions of cars using gasoline or diesel* (p. 30). Eindhoven University of Technology. https://www.avere.org/wp-content/uploads/2020/09/englich_Studie-EAuto-versus-Verbrenner_CO2.pdf
- Høyer, K. G. (2008). The history of alternative fuels in transportation: The case of electric and hybrid cars. *Utilities Policy*, 16(2), 63–71. <https://doi.org/10.1016/j.jup.2007.11.001>
- International Energy Agency - IEA. (2020). *Global EV Outlook 2020: Entering the decade of electric drive?* [Technology report]. International Energy Agency. <https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2020>
- Ji, S., Cherry, C. R., J. Bechle, M., Wu, Y., & Marshall, J. D. (2012). Electric Vehicles in China: Emissions and Health Impacts. *Environmental Science & Technology*, 46(4), 2018–2024. <https://doi.org/10.1021/es202347q>
- Kubański, M. (2020). Prospects for the Use of Electric Vehicles in Public Transport on the Example of the City of Czechowice-Dziedzice. *Transportation Research Procedia*, 44, 110–114. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2020.02.016>
- Larminie, J., & Lowry, J. (2012). *Electric vehicle technology explained* (Second edition). Wiley, John Wiley & Sons, Ltd., Publication.
- Lombardi, L., Tribioli, L., Cozzolino, R., & Bella, G. (2017). Comparative environmental assessment of conventional, electric, hybrid, and fuel cell powertrains based on LCA. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 22(12), 1989–2006. <https://doi.org/10.1007/s11367-017-1294-y>
- Lotfalipour, M. R., Falahi, M. A., & Ashena, M. (2010). Economic growth, CO₂ emissions, and fossil fuels consumption in Iran. *Energy*, 35(12), 5115–5120. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2010.08.004>
- Lvovsky, K., Hughes, G., Maddison, D., Ostro, B., & Pearce, D. (2000). *Environmental costs of fossil fuels—A rapid assessment method with application to six cities* (Technical Paper No. 78; Environment Department Papers, p. 39). World Bank. <http://hdl.handle.net/10986/18303>

- Ma, H., Balthasar, F., Tait, N., Riera-Palou, X., & Harrison, A. (2012). A new comparison between the life cycle greenhouse gas emissions of battery electric vehicles and internal combustion vehicles. *Energy Policy*, *44*, 160–173. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2012.01.034>
- Martins, F., Felgueiras, C., Smitkova, M., & Caetano, N. (2019). Analysis of Fossil Fuel Energy Consumption and Environmental Impacts in European Countries. *Energies*, *12*(6), 964. <https://doi.org/10.3390/en12060964>
- Masson-Delmotte, V. P., Zhai, A., Pirani, S. L., Connors, C., Péan, S., Berger, N., Caud, Y., Chen, L., Goldfarb, M. I., Gomis, M., Huang, K., Leitzell, L., Lonnoy, J. B. L., Matthews, T. K., Maycock, T., Waterfield, O., Yelekçi, R. Y., & Zhou, B. (2021). *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University. https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/report/IPCC_AR6_WGL_Full_Report_smaller.pdf
- Prashad, V., & Bejarano, A. (2019, March). Elon Musk: Um neoconquistador do lítio sul-americano. *Revista Opera*. <https://revistaopera.com.br/2020/03/19/elon-musk-um-neoconquistador-do-litio-sul-americano/>
- Mierlo, J. van, Messagie, M., & Rangaraju, S. (2017). Comparative environmental assessment of alternative fueled vehicles using a life cycle assessment. *Transportation Research Procedia*, *25*, 3435–3445. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2017.05.244>
- Milev, G., Hastings, A., & Al-Habaibeh, A. (2021). The environmental and financial implications of expanding the use of electric cars—A Case study of Scotland. *Energy and Built Environment*, *2*(2), 204–213. <https://doi.org/10.1016/j.enbenv.2020.07.005>
- Ou, X., Xiaoyu, Y., & Zhang, X. (2011). Life-cycle energy consumption and greenhouse gas emissions for electricity generation and supply in China. *Applied Energy*, *88*(1), 289–297. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2010.05.010>
- Pero, F. D., Delogu, M., & Pierini, M. (2018). Life Cycle Assessment in the automotive sector: A comparative case study of Internal Combustion Engine (ICE) and electric car. *Procedia Structural Integrity*, *12*, 521–537. <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2018.11.066>
- Qiao, Q., Zhao, F., Liu, Z., He, X., & Hao, H. (2019). Life cycle greenhouse gas emissions of Electric Vehicles in China: Combining the vehicle cycle and fuel cycle. *Energy*, *177*, 222–233. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.04.080>
- Qiao, Q., Zhao, F., Liu, Z., Hao, H., He, X., Przesmitzki, S. V., & Amer, A. A. (2020). Life cycle cost and GHG emission benefits of electric vehicles in China. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, *86*, 102418. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2020.102418>
- Romare, M., & Dahllöf, L. (2017). *The Life Cycle Energy Consumption and Greenhouse Gas Emissions from Lithium-Ion Batteries: A study with focus on Current Technology and batteries for light-duty vehicles* (Technical Report C 243; p. 49). IVL Swedish Environmental Research Institute. ISBN 978-91-88319-60-9
- Rothaermel, F. T. (2021). *Strategic management* (Fifth edition). McGraw-Hill Education. ISBN 126026128X
- Scrosati, B. (2011). History of lithium batteries. *Journal of Solid State Electrochemistry*, *15*(7–8), 1623–1630. <https://doi.org/10.1007/s10008-011-1386-8>
- Sun, X., Li, Z., Wang, X., & Li, C. (2019). Technology Development of Electric Vehicles: A Review. *Energies*, *13*(1), 90. <https://doi.org/10.3390/en13010090>
- Tsilev, K. (2019). *Well-to-Wheel – How to better understand it*. Gmobility. <https://gmobility.eu/what-is-well-to-wheel>
- Un-Noor, F., Padmanaban, S., Mihet-Popa, L., Mollah, M., & Hossain, E. (2017). A Comprehensive Study of Key Electric Vehicle (EV) Components, Technologies, Challenges, Impacts, and Future Direction of Development. *Energies*, *10*(8), 1217. <https://doi.org/10.3390/en10081217>
- United Nations Framework Convention on Climate Change. (2011). *Climate change science—The status of climate change science today* (7p.). United Nations Climate Change. https://unfccc.int/files/press/backgrounders/application/pdf/press_factsheet_science.pdf
- United Nations Framework Convention on Climate Change. (2021). *United Nations Climate Change Annual Report 2020* (74p.) [Annual Report]. United Nations Framework. <https://unfccc.int/annualreport>
- Varta Automotive. (2021). *Como funciona uma bateria?* <https://www.varta-automotive.pt/pt-pt/apoio-da-varta-sobre-baterias/definicoes-das-baterias/como-funciona-uma-bateria>
- Westbrook, M. (2001). *The Electric Car: Development and future of battery, hybrid and fuel-cell cars (Energy Engineering)* (Institution of Electrical Engineers, Ed.). Institution of Electrical Engineers. ISBN 978-0-85296-013-4
- Woo, J., Choi, H., & Ahn, J. (2017). Well-to-wheel analysis of greenhouse gas emissions for electric vehicles based on electricity generation mix: A global perspective. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, *51*, 340–350. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2017.01.005>
- World Commission on Environment and Development (Ed.). (1987). *Our common future* (383p.). Oxford University Press. ISBN 978-0-19-282080-8.
- World Economic Forum, W. (2020). *Consequences of a Mobile Future: Creating an Environmentally Conscious Life Cycle for Lead-Acid Batteries* (29p.). Geneva.
- Zhang, R., & Fujimori, S. (2020). The role of transport electrification in global climate change mitigation scenarios. *Environmental Research Letters*, *15*(3), 034019. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ab6658>
- Zheng, G., & Peng, Z. (2021). Life Cycle Assessment (LCA) of BEV's environmental benefits for meeting the challenge of ICExit (Internal Combustion Engine Exit). *Energy Reports*, *7*, 1203–1216. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2021.02.039>
- Zhou, G., Ou, X., & Zhang, X. (2013). Development of electric vehicles use in China: A study from the perspective of life-cycle energy consumption and greenhouse gas emissions. *Energy Policy*, *59*, 875–884. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enpol.2013.04.057>