



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO  
CENTRO DE FILOSOFIA E CIÊNCIAS HUMANAS  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM DESENVOLVIMENTO E MEIO  
AMBIENTE



JOÃO PINTO CABRAL NETO

**ELETRIFICAÇÃO VEICULAR NO BRASIL:** desafios e perspectivas

RECIFE

2021

JOÃO PINTO CABRAL NETO

**ELETRIFICAÇÃO VEICULAR NO BRASIL: desafios e perspectivas**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Desenvolvimento e Meio Ambiente da Universidade Federal de Pernambuco, como parte dos requisitos para obtenção do título de Doutor em Desenvolvimento e Meio Ambiente.

**Área de Concentração:** Desenvolvimento e Meio Ambiente

**Linha de Pesquisa:** Tecnologias para o Desenvolvimento Sustentável

**Orientadora:** Prof<sup>ª</sup>. Dr<sup>ª</sup>. Rejane Magalhães de Mendonça Pimentel

**Coorientadora:** Prof<sup>ª</sup>. Dr<sup>ª</sup>. Simone Machado Santos

RECIFE

2021

Catálogo na fonte  
Bibliotecária Maria do Carmo de Paiva, CRB4-1291

C117e Cabral Neto, João Pinto.

Eletrificação veicular no Brasil : desafios e perspectivas / João Pinto Cabral Neto.  
– 2021.

73 f. : il. ; 30 cm.

Orientadora: Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Rejane Magalhães de Mendonça Pimentel.

Coorientadora: Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Simone Machado Santos.

Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Pernambuco, CFCH.

Programa de Pós-Graduação em Desenvolvimento e Meio Ambiente, Recife, 2021.

Inclui referências.

1. Gestão ambiental. 2. Veículos elétricos. 3. Impacto ambiental. 4. Sustentabilidade. 5. Transportes. I. Pimentel, Rejane Magalhães de Mendonça (Orientadora). II. Santos, Simone Machado (Coorientadora). III. Título.

363.7 CDD (22. ed.)

UFPE (BCFCH2021-045)

JOÃO PINTO CABRAL NETO

**ELETRIFICAÇÃO VEICULAR NO BRASIL: desafios e perspectivas**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Desenvolvimento e Meio Ambiente da Universidade Federal de Pernambuco, como parte dos requisitos para obtenção do título de Doutor em Desenvolvimento e Meio Ambiente.

Aprovada em: 26/01/2021.

BANCA EXAMINADORA

---

Prof<sup>ª</sup>. Dr<sup>ª</sup>. Rejane Magalhães de Mendonça Pimentel (Orientadora)  
Universidade Federal Rural de Pernambuco

---

Dr<sup>ª</sup>. Valéria Sandra de Oliveira Costa (Examinadora Interna)  
Universidade Federal de Pernambuco (PRODEMA)

---

Prof. Dr. Romildo Morant de Holanda (Examinador externo)  
Universidade Federal Rural de Pernambuco

---

Prof. Dr. Gregório Guirado Faccioli (Examinador externo)  
Universidade Federal de Sergipe

---

Prof. Dr. Gilson Lima da Silva (Examinador externo)  
Universidade Federal de Pernambuco

*A Deus, por seus ensinamentos de perseverança, resiliência e fé, que me deu forças  
em todos os momentos que precisei.*

*Aos meus filhos, por me ensinarem um novo significado para a palavra amor.  
À tia Socorro, que sempre foi uma mulher batalhadora a quem aprendi a admirar.*

## AGRADECIMENTOS

Agradeço, antes de tudo, a Deus por me dar forças, sabedoria e paciência para enfrentar os momentos mais difíceis e por ter colocado pessoas em meu caminho que estão sempre dispostas a me ajudar.

Aos meus pais, Assis e Marlucia, por estarem sempre ao meu lado, ensinando-me, dia após dia, o verdadeiro valor da família; pelo amor, educação, esforços e dedicação para comigo. E, a minha irmã Daiane, por sempre lembrar-me da importância de termos um ao outro.

À minha amada tia Socorro, que apesar da saúde/lucidez debilitada, sei que sempre torceu por este meu momento. Por sempre ter sido como uma segunda mãe para mim!

À minha querida avó Severina, pelas conversas/conselhos, pelos infindáveis momentos de descontração, incentivo e por ser um exemplo em minha vida.

À memória do meu tio Batista e meu padrinho Bevenuto. Apesar do sentimento de perda, levarei sempre comigo as boas memórias dos momentos que compartilhamos juntos.

À Viviany, e aos meus filhos, Heitor e Guilherme, por me fazerem buscar ser sempre uma pessoa melhor a cada dia, pelo amor e dedicação a família que construímos diariamente.

Aos meus demais tios, tias, a todos os familiares e amigos que torceram por mim e me deram apoio.

Aos colegas e amigos que fiz no PRODEMA, em especial as turmas 17.1 do Doutorado e Mestrado, pelo auxílio e companheirismo ao longo dessa jornada.

Às minhas queridas professoras Rejane Pimentel, Simone Santos e Máisa Mendonça, por sempre terem acreditado em mim, por toda motivação, orientação, e porque não dizer os puxões de orelha e a amizade que construímos, e por terem contribuído de forma significativa com a tessitura deste trabalho.

À Moura, por ter me dado oportunidade de mostrar minha capacidade de fazer um doutorado sem abandonar as responsabilidades da empresa. Bem como, a família da Central de Projetos que sempre me apoiou nos momentos que mais precisei, por toda amizade e companheirismo.

A todos que fazem o PRODEMA, professores e corpo técnico, por toda presteza e conhecimentos compartilhados.

A todos vocês, abraço com profundo sentimento de gratidão. Dedico-lhes meus méritos.

Não é o que acontece com você, mas é como  
você reage que importa.

(EPICTETO)

## RESUMO

O estudo versa sobre os principais desafios e perspectivas relacionadas a inserção de um novo modelo de transporte: os veículos elétricos (EVs). Devido a não emissão de gases de efeito estufa (GEE) durante sua operação, os EVs são considerados pelas principais mídias como o modelo de transporte ambientalmente mais sustentável. No entanto, pouco se é discutido com relação aos impactos atrelados a estes tipos de veículos. Nesse contexto estão as emissões indiretas que dependem do tipo de fonte de geração da energia que abastece os carros, o déficit de infraestrutura necessária para suportar a demanda crescente por energia elétrica, além da produção de resíduos eletroeletrônicos, como as baterias de lítio, cuja produção está vinculada à fabricação de carros e a sua própria vida útil. Dessa maneira, esse estudo tem como principais objetivos: a realização de uma revisão sistemática que dê luz ao estado da arte dos impactos ambientais ligados aos EVs; uma avaliação da infraestrutura energética necessária para suportar uma frota de EVs projetada até 2030, a partir do cálculo do consumo de um modelo utilitário de EV, com base no perfil de uso brasileiro; e o desenvolvimento de um modelo matemático para a projeção de sucatas de baterias de lítio, considerando fatores tais como mercado de venda de EVs (carro passeio) e vida útil das baterias. Os resultados obtidos apontam que os carros elétricos podem ser responsáveis pelo aumento da eco-toxicidade não apenas no que diz respeito à qualidade do ar, mas também da água e do solo; mostraram a existência de uma importante defasagem de infraestrutura; e trazem que os EVs podem não ser a melhor solução de mobilidade para o Brasil neste momento, destacando a existência de outras tecnologias como os biocombustíveis, como alternativas à eletrificação. Os achados deste estudo poderão tornar possível o planejamento adequado, por parte de empresas e governo, quanto às políticas de fomento a modelos de transporte, além de contribuir com o gerenciamento dos resíduos de acumuladores, considerando a logística reversa como objetivo a ser alcançado.

**Palavras-chave:** Veículos elétricos. Impactos ambientais. Sustentabilidade. Transporte.

## **ABSTRACT**

The study deals with the main challenges and perspectives related to the insertion of a new transport model: electric vehicles (EV). Due to the non-emission of greenhouse gases (GHG) during its operation, EV are considered by the main media as the most environmentally sustainable transport model. However, little is discussed about the impacts associated with these vehicles. In this context are indirect emissions that depend on the type of energy generation source that supplies the cars, the deficit of infrastructure necessary to support the growing demand for electricity, in addition to the electronic waste production, such as lithium batteries, whose production is linked to the cars manufacture and their own useful life. Thus, this study has as main objectives: to carry out a systematic review that sheds light on the state of the art of environmental impacts linked to EV; an assessment of the energy infrastructure needed to support an EV fleet projected until 2030, based on the calculation of an EV utility model consumption, for the Brazilian use profile; and the development of a mathematical model for the future lithium battery scraps projection, considering factors such as the EV market (passenger car) and battery life. The results obtained show that electric cars can be responsible for the eco-toxicity increase not only with regard to the air quality, but also of the water and the soil; showed the existence of an important infrastructure gap; and they show that EV may not be the best mobility solution for Brazil at this time, highlighting the existence of other technologies, such as biofuels, as alternatives to electrification. The study findings may make it possible to plan properly, on the part of companies and the government, regarding policies to promote transport models, in addition to contributing to the batteries waste management, considering reverse logistics as an objective to be achieved.

**Keywords:** Electric vehicles. Environmental impacts. Sustainability. Transport.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

### Introdução

Figura 1 -	Carro elétrico "La Jamais Contente", em 1899.....	16
------------	---	----

### Referencial Teórico

Figura 2 -	Número de artigos com os termos “ <i>electric vehicle</i> ” e “ <i>environmental impact</i> ”, constantes no banco de dados WoS, referente ao período de 2008 a 2018.....	22
------------	---	----

Figura 3 -	Países nos quais constaram artigos com os termos “ <i>electric vehicle</i> ” e “ <i>environmental impact</i> ”, no banco de dados WoS, referente ao período de 2008 a 2018.....	22
------------	---	----

Figura 4 -	As 10 instituições com mais publicações, contendo os termos “ <i>electric vehicle</i> ” e “ <i>environmental impact</i> ”, no WoS, referente ao período de 2008 a 2018.....	23
------------	---	----

Quadro 1 -	Artigos mais relevantes contendo, simultaneamente, os termos “ <i>electrical vehicle</i> ” e “ <i>environmental impact</i> ”, referente ao período de 2008 a 2018.....	23
------------	--	----

Figura 5 -	Áreas de pesquisa das publicações, contendo os termos “ <i>electric vehicle</i> ” e “ <i>environmental impact</i> ”, no banco de dados WoS, referente ao período de 2008 a 2018.....	25
------------	--	----

### Método

Figura 6 -	Fluxograma metodológico.....	31
------------	------------------------------	----

### Artigo 1

Tabela 1 -	Dados do licenciamento total de automóveis, por combustível, no Brasil.....	33
------------	---	----

Figura 1 -	Metas mundiais (Estados Unidos, China, Japão, União Europeia e Brasil) de emissões veiculares, em gramas de CO <sub>2</sub> por km rodado, nos anos de 2013, 2021 e 2025.....	34
------------	---	----

Figura 2 -	Fluxograma mostrando as etapas seguidas na revisão científica abordando a infraestrutura energética brasileira, considerando as perspectivas e desafios para o suporte aos veículos elétricos.....	36
------------	--	----

Tabela 2 -	Média de circulação (km) de um veículo, por Estado, no Brasil, em 2019.....	38
------------	---	----

Figura 3 -	Fluxograma do modelo de projeção de consumo da frota de veículos elétricos de 2019 até 2030, no Brasil.....	41
Tabela 3 -	Consumo projetado da frota de veículos elétricos, de 2019 até 2030, no Brasil.....	41
Figura 4 -	Capacidade de geração atual <i>versus</i> crescimento da demanda devido aos veículos elétricos.....	42
Tabela 4 -	Ganhos ambiental e financeiro devido aos veículos elétricos, de 2019 até 2030, no Brasil.....	43
Tabela 5 -	Ganhos ambiental e financeiro devido aos veículos flex, de 2019 até 2030, no Brasil.....	44

## **Artigo 2**

Tabela 1 -	Média de circulação anual (km) de um veículo, por Estado, no Brasil, divulgada pela KBB.....	52
Figura 1 -	Gráfico da série de venda de veículos elétricos, no Brasil (2012-2019).....	53
Tabela 2 -	Venda de veículos elétricos, no Brasil (2012-2019).....	54
Tabela 3 -	Análise de séries temporais para os dados de vendas de EVs.....	54
Tabela 4 -	Previsão de venda de carros elétricos (2020-2030).....	54
Figura 2 -	Gráfico do modelo Winters para vendas anuais de EVs – método multiplicativo.....	56
Figura 3 -	Gráfico do modelo ARIMA para vendas anuais de EVs.....	56
Figura 4 -	Gráfico do modelo de Médias Móveis para vendas anuais de EVs...	57
Tabela 5 -	Previsão da geração de sucatas de LIB (2020-2040).....	59
Figura 5 -	Gráfico do crescimento de vendas de EVs em comparação com a quantidade de sucatas de LIB geradas.....	60

## LISTA DE SIGLAS

AIE	Agência Internacional de Energia
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
ANFAVEA	Associação Nacional dos Fabricantes de Veículos Automotores
ARIMA	Modelo Autorregressivo Integrado de Médias Móveis
CNA	Confederação da Agricultura e Pecuária do Brasil
CPRM	Serviço Geológico do Brasil
CSLL	Contribuição Social Sobre o Lucro Líquido
CV	Veículo a Combustão
DETRAN	Departamento Nacional de Trânsito
DNPM	Departamento Nacional de Produção Mineral
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
EV	Veículo Elétrico
GEE	Gases de Efeito Estufa
GM	General Motors
GRS	Gerenciamento de Resíduos Sólidos
HEV	Veículo Híbrido
IEC	Comissão Eletrotécnica Internacional
IPI	Imposto Sobre Produtos Industrializados
IR	Imposto de Renda
ITEMM	Instituto Edson Mororó Moura
KBB	Kelley Blue Book
LIB	Baterias de Íon-Lítio
MAD	Desvio Médio Absoluto
MAPE	Erro Percentual Médio Absoluto

MME	Ministério de Minas e Energia
MSD	Desvio padrão máximo
PHEV	Veículo Plug-in
PNRS	Política Nacional de Resíduos Sólidos
SEEG	Sistemas de Estimativas de Emissões de Gases de Efeito Estufa
UNFCCC	Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima
USGS	Serviço Geológico dos Estados Unidos
WoS	Web of Science

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	<b>15</b>
<b>2</b>	<b>REFERENCIAL TEÓRICO</b> .....	<b>18</b>
2.1	VEÍCULOS A COMBUSTÃO .....	18
2.2	VEÍCULOS ELÉTRICOS .....	19
2.3	OS VEÍCULOS ELÉTRICOS E OS IMPACTOS AMBIENTAIS .....	21
<b>3</b>	<b>MÉTODO</b> .....	<b>31</b>
<b>4</b>	<b>RESULTADOS</b> .....	<b>32</b>
4.1	ARTIGO 1 – INFRAESTRUTURA ENERGÉTICA BRASILEIRA: PERSPECTIVAS E DESAFIOS PARA O SUPORTE AOS VEÍCULOS ELÉTRICOS .....	18
4.2	ARTIGO 2 – ESTIMATIVA DE GERAÇÃO DE SUCATAS DE BATERIAS DE ÍON-LÍTIO COMO FERRAMENTA DE GERENCIAMENTO DE RESÍDUOS .....	46
<b>5</b>	<b>CONCLUSÃO</b> .....	<b>63</b>
	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	<b>64</b>

## 1 INTRODUÇÃO

O avanço da tecnologia vem trazendo enormes benefícios para a sociedade. Todavia, não se pode negar que esse avanço vem gerando um alto custo ambiental e, com isso, trazendo grandes preocupações de âmbito global e motivado estudos e pesquisas, no sentido de buscar soluções para os problemas gerados e de evitar que outros problemas ocorram.

Dentre os problemas oriundos dos avanços tecnológicos está o aumento da poluição do ar, em função da emissão de gases de efeito estufa (GEE) e da potencialidade que eles têm de causar danos ambientais e o empobrecimento dos recursos naturais.

Com o intuito de se controlar a emissão dos GEE, diversas iniciativas foram e estão sendo tomadas em escala global. Neste sentido, objetivando criar regras para limitar o aquecimento global, por meio de diversas políticas, que incluem metas de emissões de GEE, a Conferência das Nações Unidas para o Meio Ambiente e o Desenvolvimento (Rio-92) adotou a Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima (UNFCCC), que foi assinada por 192 países. Não obstante, foi assinado por 37 países o Protocolo de Kyoto (1998), cujo objetivo era reduzir as emissões dos signatários em 5,2% em relação a 1990. Em 2009, foi assinado o Acordo de Copenhague, com o objetivo de limitar o aquecimento global a um aumento de temperatura máximo de 2°C, através de metas de redução de emissões.

Diante de tantos acordos e políticas internacionais voltadas ao controle das emissões de GEE, o setor de transportes – por ser um dos setores que mais emitem poluentes para a atmosfera – acabou por se tornar o centro das atenções. Potencialmente, o setor de transportes é considerado como um dos que mais apresenta possibilidades de redução de emissões. Assim, uma das alternativas que tem ganhado maior destaque no cenário mundial como possível solução para mitigação de parte das emissões seria a substituição dos veículos por outros menos ou não poluentes.

Atualmente, existem uma série de tecnologias possíveis de veículos de baixa ou nenhuma emissão de gases de efeito estufa. Entre eles estão os carros elétricos, tidos por muitos como a melhor opção para essa problemática ambiental. No entanto, existem uma série de questões relacionados a eficiência energética, viabilidade econômica e impactos ambientais dos veículos elétricos que necessitam ser analisadas, para que haja uma maior assertividade antes que se possa afirmar que os veículos elétricos são a melhor opção para o meio ambiente e sociedade.

Apesar de ser visto como novidade, o carro elétrico surgiu na mesma época dos primeiros veículos com motor à combustão interna e chegou a representar 30% do mercado norte-americano, perdendo apenas para os veículos à vapor, que representavam mais de 40% do mercado (MARCEL, 2016).

Ainda em meados de 1899, foi um carro elétrico que recebeu o título de primeiro veículo do mundo a ultrapassar a marca dos 100 km/h (Figura 1).

**Figura 1** - Carro elétrico "La Jamais Contente", em 1899.



Fonte: Reprodução - Autrique (2017)

Porém, com o passar do tempo, a produção de energia elétrica não acompanhou o ritmo de desenvolvimento dos veículos a combustão, sequer havendo linhas de transmissão que pudessem levar a energia dos pontos de geração aos grandes centros que ficavam afastados. Enquanto a gasolina, podia ser transportada e armazenada de forma fácil. De maneira tal que, em meados de 1920, os veículos a combustão passaram a ser nitidamente, a tecnologia dominante (MARCEL, 2016).

Os EVs se dividem entre os veículos puramente elétricos e híbridos. Os puramente elétricos são propulsados somente por motores elétricos, e alimentados por energia elétrica. Enquanto a configuração dos híbridos combina motores elétricos e motores a combustão interna, o que permite que os mesmos funcionem tanto através da utilização de combustíveis como a gasolina, quanto através de energia elétrica (seja de forma direta através da alimentação via rede elétrica, ou indireta através de baterias, de acordo com o grau de hibridização do veículo).

O estudo objetivou identificar os potenciais impactos ambientais e de infraestrutura, decorrentes da eletrificação veicular no Brasil. Especificamente, identificar as necessidades de adaptação da infraestrutura energética existente, com base em uma análise crítica e de viabilidade técnico-econômica do novo modelo de transporte; construir um modelo matemático para a projeção de sucatas de baterias de veículos elétricos, considerando fatores tais como mercado de venda de automóveis e vida útil das baterias.

## 2 REFERENCIAL TEÓRICO

### 2.1 VEÍCULOS A COMBUSTÃO

A invenção dos motores a combustão interna é datada de meados do século XIX. Apesar das melhorias sofridas nas últimas décadas, esses motores geram gases poluentes como subproduto, devido à combustão incompleta dos hidrocarbonetos. A maioria dos motores destes automóveis funciona a quatro tempos: admissão, compressão, expansão (explosão) e descarga. O motor do carro combina o ar atmosférico com o combustível, gerando uma reação química exotérmica que provoca a expansão dos gases na câmara de combustão, pressionando o pistão, que desce gerando um movimento rotativo no motor, transformando assim calor em trabalho. Os gases resultantes da combustão, tais como o monóxido e dióxido de carbono (CO e CO<sub>2</sub>), dióxido de enxofre (SO<sub>2</sub>), óxidos de nitrogênio (NO<sub>x</sub>), hidrocarbonetos (HC) e materiais particulados (MP) são eliminados através da abertura da válvula de descarga. O movimento de rotação do motor induz a geração de uma corrente elétrica no alternador do veículo que é armazenada em baterias de chumbo-ácido (ECYCLE, 2016).

O setor de transportes é responsável por, em média, 25% das emissões de CO<sub>2</sub> do planeta; em 2007, 63% do total dessas emissões foi atribuído aos carros de passeio (PERUJO; THIEL; NEMRY, 2011). Segundo dados do Sistema de Estimativas de Emissões de Gases de Efeito Estufa (SEEG), o Brasil emitiu cerca de 2 bilhões de toneladas de CO<sub>2</sub>, apenas em 2017. Cerca de 21% dessas emissões foram atribuídas ao setor de transporte e energia (WRI BRASIL, 2018). Além das emissões, o gerenciamento adequado das sucatas de baterias de chumbo-ácido, resultantes da obsolescência dos acumuladores de energia desses veículos, é outro desafio ambiental. A exposição aos efeitos nocivos decorrentes do manuseio inadequado de sucata de baterias chumbo-ácido é muito comum em países em desenvolvimento, onde há um mercado ilegal de reciclagem de chumbo. Esse mercado e seus efeitos nocivos ao meio ambiente e saúde pública são descritos nos trabalhos de Paoliello e De Capitani (2007), Haefliger et al. (2009), He et al. (2009), Chen et al. (2009), Trivelato e Paoliello (2009), Gupt (2014), Noguchi et al. (2014), Gupt e Sahay (2015) e Daniell et al. (2015). Dentre todos os componentes da bateria de chumbo-ácido, o chumbo é considerado o mais perigoso, por se tratar de uma neurotoxina potente que pode afetar a saúde e desenvolvimento intelectual de crianças e adultos e pode causar muitos distúrbios neurológicos (VAN DER KUIJP et al., 2013).

A sucata de bateria de chumbo-ácido tem um alto valor de mercado, pode ser 100% reciclada e reutilizada como insumo para a fabricação de novas baterias (CSPOWER, 2009). Segundo Santos et al. (2019), pelo menos 1% das sucatas provenientes de veículos leves tem destinos desconhecidos ou impróprios, no Brasil.

## 2.2 VEÍCULOS ELÉTRICOS

O primeiro veículo movido a energia foi desenvolvido na França, através de uma adaptação feita em uma charrete, em 1881. Mas, o primeiro automóvel projetado para rodar como um carro elétrico foi desenvolvido nos Estados Unidos, em 1890 (MARCEL, 2016).

No entanto, a história dos carros elétricos sempre esteve inter-relacionada com a história das baterias. Em 1859, o belga Gaston Planté realizou a demonstração da primeira bateria chumbo-ácido. Apesar da baixa autonomia destes veículos, devido à pouca capacidade de armazenamento de energia de suas baterias, os EV faziam muito sucesso por serem considerados tecnologicamente superiores aos demais. Além disso, os fabricantes dos automóveis elétricos ou eram monopolistas, ou procuravam vender produtos caros a consumidores de alto poder aquisitivo, adotando uma estratégia de venda voltada ao status social proporcionado pelo veículo elétrico (HOYER, 2008). Com o passar do tempo, a produção de energia elétrica não acompanhou o ritmo de desenvolvimento dos veículos a combustão, e ainda estava incipiente em muitas regiões, sequer havendo linhas de transmissão que pudessem levar a energia dos pontos de geração aos grandes centros que ficavam afastados. Enquanto a gasolina podia ser transportada para todos os lugares do mundo, de forma fácil. Com isto, a questão da falta de autonomia do EV ficou ainda mais evidente. Enquanto os modelos elétricos tinham autônias próximas de 80 km até precisarem recarregar suas baterias, os veículos a combustão comportavam, cerca de 80 L de combustível, o que rendia, na época, uma autonomia média de 320 km (MARCEL, 2016).

Segundo Baran (2012), enquanto as indústrias de veículos a combustão (CV) seguiam com estratégias comerciais agressivas com foco nas vendas em massa, menores preços e maior autonomia de seus veículos, o mercado de EV manteve seus veículos como produtos de luxo, produzidos em pequenas escalas e com baixa autonomia até que, gradativamente, foram sendo substituídos pelos CV.

Os veículos elétricos podem ser classificados em dois grandes grupos: (i) os veículos puramente elétricos (EV), propulsados somente por motores elétricos, cuja energia é armazenada em baterias tipicamente de lítio e oriunda da rede de abastecimento de energia

elétrica; e (ii) os híbridos, que combinam motores elétricos com motores a combustão interna. Os veículos híbridos (HEV), são todos aqueles que além de um motor elétrico, possuem também um motor a combustão. Os motores a combustão podem ser destinados apenas a carregar as baterias ou a ser corresponsáveis pela tração dos veículos, dividindo a tarefa de propeli-los com os motores elétricos, sendo, ao mesmo tempo, responsáveis por carregar as baterias. O grau de influência do motor a combustão no sistema de propulsão destes veículos é o que vai determinar o grau de hibridização dos mesmos. A associação dos dois tipos de motores em um veículo híbrido torna o automóvel mais eficiente, agregando um menor consumo de combustível, uma vez que o motor a combustão está sendo auxiliado pelo motor elétrico. De acordo com o ITEM (2016), o menor grau de hibridização é encontrado nos veículos denominados micro e *mild*, nos quais não há alimentação através da rede elétrica. Os chamados micro híbridos, também conhecidos como start-stop, desligam o motor do carro sempre que o mesmo está parado, e dão novamente a partida sempre que requisitado pelo condutor (ao pisar no acelerador, por exemplo). Os veículos *mild*, além de contarem com a tecnologia start-stop, utilizam-se de um sistema de frenagem regenerativa onde a bateria é recarregada a partir da energia cinética do automóvel, permitindo que o motor elétrico atue em conjunto com o motor a combustão para fornecer potência ao veículo. A principal tecnologia de bateria utilizada nos híbridos micro e *mild* é a bateria de chumbo-ácido devido ao seu custo-benefício e por estar sempre operando junto ao motor a combustão.

Os veículos com o maior grau de hibridização são o *full* e o *plug-in* (PHEV). Para estes dois tipos de veículos, o motor elétrico, através da energia fornecida pela bateria, deve ser capaz de tracionar o carro sem auxílio do motor a combustão. Como neste caso a bateria passa a ser bem mais exigida, ela precisa ter uma maior densidade de energia, fazendo com que a tecnologia de bateria mais empregada passe a ser a de lítio-íon. A principal diferença entre estas duas tecnologias é que, no veículo *plug-in*, a bateria, além de utilizar o motor a combustão para sua recarga, pode também efetuar-se através de uma tomada, ou seja, é possível fornecer energia ao acumulador através de uma fonte externa ao veículo (ITEM, 2016).

A partir dos veículos *plug-in*, tem-se os veículos puramente elétricos que se caracterizam por possuir apenas o motor elétrico como sistema de propulsão. Apesar de a estrutura mecânica de um veículo 100% elétrico ser bastante simplificada, o veículo exige investimentos em infraestrutura, como os postos de reabastecimento e uma rede de recarga preparada. Por serem em sua maioria abastecidos através da rede elétrica, ainda necessitam

de um tempo de recarga longo – entre de 6 a 12 horas – apesar de a prática de recargas de oportunidade ser bastante comum (JATOBÁ, 2014).

Apesar de não emitirem GEE durante sua operação, os EV podem estar associados a alguma forma de poluição. Os EV são abastecidos através da rede elétrica tradicional. Para ser considerado um veículo não emissor de gases poluentes, é necessário que a energia utilizada na sua recarga seja, necessariamente, oriunda de uma fonte de energia limpa. Diferentemente disso, haverá produção de CO<sub>2</sub> no processo de geração de energia, e consequentemente, de maneira indireta, também na utilização dos EV.

Na China, a matriz energética concentra 85% da geração de sua energia em combustíveis fósseis, dos quais 90% tem o carvão mineral como fonte de poder calorífico. Tipicamente, neste país, as usinas geradoras de energia costumam ficar afastadas dos grandes centros consumidores. Neste sentido, o estudo de Ji et al. (2012) traz uma perspectiva de que os EV, por não emitirem gases poluentes de maneira direta durante sua operação, estariam contribuindo para uma falsa impressão de sustentabilidade, uma vez que, o que ocorre de fato é uma transferência da poluição dos centros ricos para as zonas rurais mais pobres. Tal estudo acaba desencorajando a adoção de EV, na medida que estes estariam aumentando as emissões de CO<sub>2</sub> e de poluentes causadores de doenças, elevando o número de mortes devido à problemas respiratórios, na China. Os autores ainda reforçam que boa parte dessa problemática se deve a ineficiência na geração de energia do país. Possivelmente os resultados seriam diferentes em países com uma matriz energética renovável.

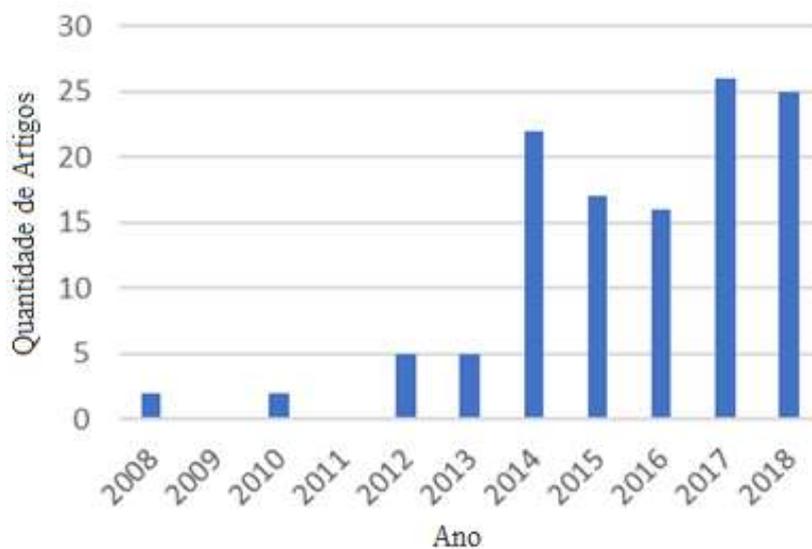
### 2.3 OS VEÍCULOS ELÉTRICOS E OS IMPACTOS AMBIENTAIS

Realizada uma busca simultânea com os termos “*electric vehicle*” e “*environmental impact*” no banco de dados da *Web of Science* (WoS), sem o filtro do tempo, foram encontrados apenas 133 artigos. O primeiro deles foi publicado em 1993. Passada uma década, 6 artigos foram publicados. Na década seguinte (2004-2013), 19 estudos foram publicados. A quantidade de artigos publicados por ano só superou a casa da dezena em 2014, quando 22 pesquisas foram publicadas. Segundo os registros do WoS, nos anos de 2011, 2009, 2004, 2000, 1999, 1997, 1996, 1995 e 1994 não houve nenhuma publicação.

A partir do ano de 2008, 122 artigos foram publicados, todos em inglês (Figura 2). Estados Unidos, Itália e China foram, nessa ordem, os países com a maior quantidade de publicações indexadas no banco de dados WoS. É importante destacar que, durante o período

de 2008 a 2018, apenas 10 países trataram do tema, utilizando estas duas palavras chaves (Figura 3).

**Figura 2** - Número de artigos com os termos “*electric vehicle*” e “*environmental impact*”, constantes no banco de dados WoS, referente ao período de 2008 a 2018.



Fonte: Elaborada pelo autor (2019)

**Figura 3** - Países nos quais constaram artigos com os termos “*electric vehicle*” e “*environmental impact*”, no banco de dados WoS, referente ao período de 2008 a 2018.



Fonte: Elaborada pelo autor (2019)

Vinte e quatro autores tiveram mais de 1 publicação, enquanto os três autores que mais publicaram (Dincer, Messagie e Van Mierlo) tiveram 5 artigos, cada. Das instituições de pesquisa com mais de 1 publicação, em um total de 33, destaca-se o Instituto de

Tecnologia da Universidade de Ontário, no Canadá. Em seguida, com 5 publicações, a *Vrije Universiteit Brussel*, de Bruxelas, na Bélgica. Duas instituições brasileiras figuram na lista: a Universidade Federal da Paraíba e a Universidade Tecnológica Federal do Paraná, ocupando a 160ª e 162ª posição, respectivamente.

**Figura 4** - As 10 instituições com mais publicações, contendo os termos “*electric vehicle*” e “*environmental impact*”, no WoS, referente ao período de 2008 a 2018.



Fonte: Elaborada pelo autor (2019)

O artigo considerado mais relevante foi o de Tartakovsky et al. (2015) da *Faculty of Mechanical Engineering*, em Israel, intitulado “*Modeling environmental impact of cybernetic transportation system*”, que abordou o conceito dos cibercarros (veículos elétricos associados a um sistema de rede inteligente), comparando o desempenho deste tipo de veículo com o de veículos convencionais, estimando assim o seu impacto ambiental. O Quadro 3 apresenta um resumo da evolução das principais temáticas abordadas nos artigos indexados no período de 2008 a 2018 envolvendo, simultaneamente, os termos “*electrical vehicle*” e “*environmental impact*”.

**Quadro 1** - Artigos mais relevantes contendo, simultaneamente, os termos “*electrical vehicle*” e “*environmental impact*”, referente ao período de 2008 a 2018.

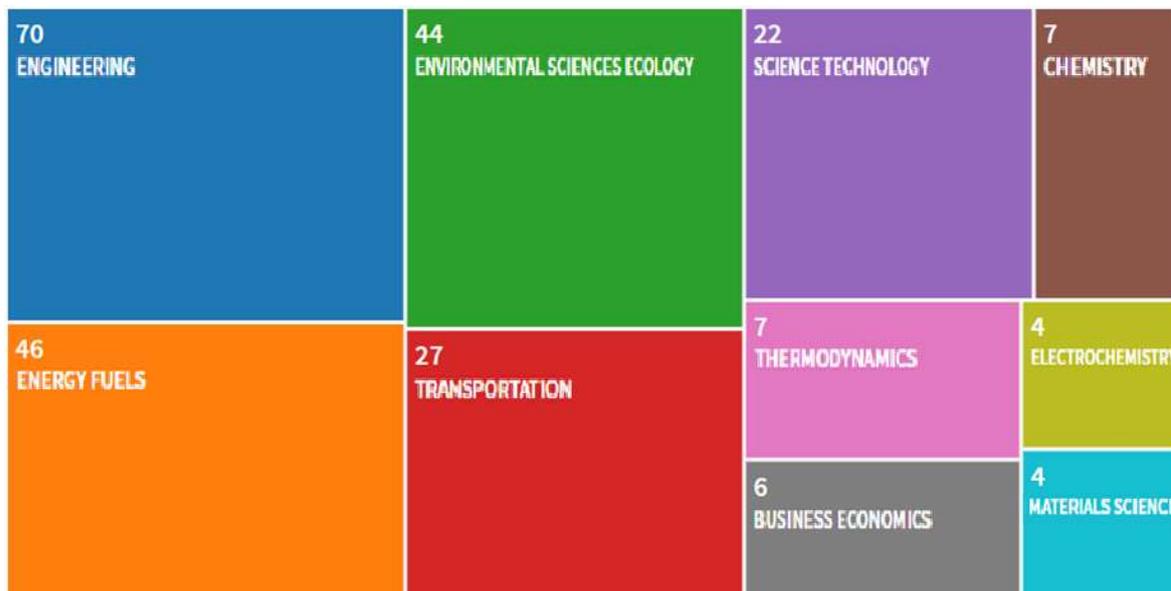
<b>Autoria/Ano</b>	<b>Título</b>	<b>Temáticas centrais</b>
Tartakovsky et al. (2015)	Modeling environmental impact of cybernetic transportation system	O Sistema de Transporte Cibernético (CTS) e seus impactos ambientais

Casals et al. (2017)	Electric vehicle battery reuse: Preparing for a second life	A segunda vida das baterias de veículos elétricos como forma de mitigação de impactos e oportunidade econômica
Vidhi et al. (2018)	A review of electric vehicle lifecycle emissions and policy recommendations to increase EV penetration in India	O ciclo de vida de um EV, seu impacto nas emissões e recomendações de políticas para o mercado indiano
Yuan et al. (2017)	Method for evaluating the real-world driving energy consumptions of electric vehicles	Uso de rede neural para determinação do desempenho de EV em condições reais de direção
Zhao et al. (2017)	The Projected Pathways and Environmental Impact of China's Electrified Passenger Vehicles	A utilização de rotas projetadas e de EV como ferramentas de redução de impactos ambientais
Li et al. (2016)	Electric vehicle charging in China's power system: Energy, economic and environmental trade-offs and policy implications	A transferência do uso de gasolina para a geração de energia a carvão para utilização nos EV
Zheng et al. (2018)	Manufacturing decisions and government subsidies for electric vehicles in China: A maximal social welfare perspective	O papel do governo na criação de subsídios para promoção dos EV e seus benefícios ambientais e sociais
Van Mierlo et al. (2017)	Comparative environmental assessment of alternative fueled vehicles using a life cycle assessment	Avaliação comparativa de veículos movidos a fontes alternativas, utilizando uma avaliação do ciclo de vida
Messagie et al. (2013)	Environmental and financial evaluation of passenger vehicle technologies in Belgium	Os impactos ambientais e os custos financeiros de diferentes tecnologias de veículos, considerando um motorista cotidiano belga
Moriarty et al. (2017)	Can Electric Vehicles Deliver Energy and Carbon Reductions?	O potencial de ecotoxicidade dos EV com relação a qualidade do ar, da água e depleção de metais

Fonte: Elaborada pelo autor (2019)

Dos 122 artigos levantados com os termos “*electrical vehicle*” e “*environmental impact*”, 70 relacionam-se à Engenharia, 46 à Combustíveis Energéticos, 44 às Ciências Ambientais e 77 a outras áreas, reforçando o caráter multidisciplinar desses estudos (Figura 5).

**Figura 5** - Áreas de pesquisa das publicações, contendo os termos “*electric vehicle*” e “*environmental impact*”, no banco de dados WoS, referente ao período de 2008 a 2018.



Fonte: Elaborada pelo autor (2019)

Os artigos analisados na revisão sistemática apresentaram interações a respeito da influência da eletrificação veicular nas emissões de GEE e quanto aos impactos dos EV na infraestrutura de geração de energia elétrica. Os autores mostram não somente os benefícios dos EV, mas também aos impactos ambientais.

Van Mierlo, Messagie e Rangaraju (2017) ressaltam que, os impactos ambientais dos veículos elétricos são fortemente influenciados pela fonte de eletricidade (gás, carvão, nuclear e renováveis, como eólica, biomassa e solar). A combinação de eletricidade e o nível de eletrificação estão entre os fatores-chave que influenciam o desempenho ambiental.

Além do modo de dirigir o veículo, o usuário exerce influência sobre o impacto ambiental do EV através da intensidade do uso de auxiliares. Por exemplo, o uso de aquecimento/resfriamento para atingir a temperatura desejada tem uma influência significativa no consumo de energia (EGEDE, 2015).

Em um estudo investigativo, Li et al. (2016), considerando os níveis de penetração dos EV esperados até 2030, na China, concluíram que a implantação de EV essencialmente transfere o uso de gasolina para a geração de energia a carvão (energia de base da China), levando a um maior consumo de carvão e, consecutivamente, ao aumento das emissões de CO<sub>2</sub>. Economicamente, os EV tendem a superar os veículos movidos a gasolina em termos de custos médios de abastecimento. Pois os EV tendem a ser alimentados com eletricidade produzida por usinas a carvão baratas e de baixa eficiência localizadas em regiões onde os

preços do carvão são baixos. Nesse sentido, os autores propuseram o aumento do uso de formas mais limpas de geração de eletricidade, associado a perfis de cobrança que coíbam a recarga destes veículos nos períodos de pico. Esses resultados podem ajudar os políticos chineses a criar uma melhor integração do sistema de transporte e de energia.

Segundo Van Mierlo, Messagie e Rangaraju (2017) as emissões de CO<sub>2</sub> de um veículo elétrico a bateria (BEV) médio europeu variam entre 2g e 175g de CO<sub>2</sub>/km, dependendo da fonte de eletricidade e hipóteses utilizadas. Relativizando essas emissões por kWh consumido, Moro e Lonza (2017) considerando a importação/exportação de energia que ocorre entre os países da União Europeia (UE), relatam que a intensidade de carbono da eletricidade usada na UE, em baixa tensão, em 2013, foi de 447g de CO<sub>2</sub> eq/kWh. Um dos artificios utilizados na Bélgica para diminuir a poluição urbana devido as emissões das usinas elétricas foi descarregar os gases através de altas chaminés, levando os gases para fora dos limites das cidades.

Por vezes, comparar EV com veículos convencionais é muito mais complexo do que geralmente reconhecido. Incertezas ocorrem tanto no uso da energia primária como nos cálculos de emissão de gases de efeito estufa. Além disso, pode não ser legítimo avaliar esses termos em uma base simples de veículo-km, devido a efeitos de transbordamento. Moriarty e Wang (2017) afirmam que os EV alimentados pelo atual mix de eletricidade europeu oferecem uma redução de 10% a 24% no potencial de aquecimento global, em relação aos veículos convencionais a diesel ou a gasolina. Por outro lado, os EV exibem potencial de aumento significativo na eco-toxicidade, atingindo principalmente a qualidade da água doce, gerando sua eutrofização, além de impactos relacionados a depleção de metais, em grande parte provenientes da cadeia de fornecimento de veículos. Os resultados são sensíveis às suposições relativas à fonte de eletricidade, ao consumo de energia de fase de uso, ao tempo de vida útil do veículo e a periodicidade de substituição das baterias.

De acordo com os autores, para definição da eficiência dos veículos, não basta comparar o veículo-km por cada litro/kW de combustível/energia usado, por exemplo. Para as comparações entre EV e veículos convencionais, tanto a gasolina quanto a eletricidade devem ser convertidas em termos de energia primária - por exemplo, petróleo bruto para veículos a combustão e carvão para eletricidade de usinas elétricas movidas a carvão. Mas, para isso, observou-se uma dificuldade quando se converte eletricidade em energia primária para diferentes combustíveis não fósseis. Em uma rede usando 100% de energia nuclear, a eficiência seria idêntica à de uma rede usando 100% de energia hidrelétrica se calculada por alguns dos métodos praticados no mercado, mas muito menor se o método da Agência

Internacional de Energia (AIE) fosse o utilizado. Claramente, este é um resultado insatisfatório que também torna os cálculos de eficiência de energia do CV versus EV, arbitrários.

O problema identificado no parágrafo anterior pode ser evitado se as comparações entre CV e EV forem feitas com base no CO<sub>2</sub> ou, mais geralmente, emissões de GEE, geralmente expressas como CO<sub>2</sub> equivalente. Mas, eis que surge então um novo problema: em quase todas as comparações publicadas, eletricidade de combustível não-fóssil (renováveis e nuclear), assume-se que estas fontes geram GEE zero, as chamadas fontes 'zero carbono'. No entanto, isso está longe de ser o caso. Embora seja verdade que essas fontes geram diretamente GEE insignificantes, o mesmo não pode se afirmar quanto as suas emissões indiretas (MORIARTY; WANG, 2017).

No que se refere ao efeito de transbordamento, Moriarty e Wang (2017) examinaram especificamente os EV existentes na Noruega. E, identificaram que as aquisições de EV no país se deveram, principalmente, aos vários impostos dispensados, assim como os pedágios e os custos de estacionamento subsidiados pelo governo. Porém, os autores descobriram que, a maioria das compras domésticas de veículos elétricos é uma adição à frota doméstica, não como veículos de substituição. Portanto, parece haver um transbordamento negativo quanto ao quantitativo de veículos por famílias.

No tocante ao armazenamento de energia, Ruiz et al. (2018) avaliaram aspectos relativos segurança baterias de íon de lítio (LIB). Eventos como incêndios com laptops, celulares, incidentes com aviões, à retirada de produtos do mercado (por exemplo, a Apple retirou os pacotes de íons de lítio da sua linha *PowerBook 5300*, e a EV Global Motors anunciaram o *recall* de 2000 baterias em suas bicicletas elétricas) geram uma preocupação crescente do público em geral em relação às tecnologias de íons de lítio. É natural que com o passar do tempo as células da bateria se degradem, no entanto, nas baterias de lítio esse envelhecimento as torna mais susceptíveis a eventos de explosão, por isso a necessidade de uma forte eletrônica embarcada que controle o estado de carga destas baterias, evitando que cheguem a esse estado de carga.

Segundo Ruiz et al. (2018), os eletrólitos usados nas LIB baseiam-se principalmente em solventes orgânicos, geralmente altamente inflamáveis. Os eletrólitos mais comumente usados são misturas de vários carbonatos (por exemplo, carbonato de propileno) e um sal dissolvido (por exemplo, hexafluorofosfato de lítio (LiPF<sub>6</sub>)). No caso de fuga térmica, o eletrólito se decompõe levando a formação de gases. Um perigo maior é a presença de compostos fluorados e prismáticos, levando à liberação de hidrogênio tóxico e corrosivo.

Como alguns gases gerados em eventos de alta densidade energética são tóxicos, podem potencialmente causar sérios danos aos indivíduos.

De acordo com Harrison e Thiel (2017), no caso do Brasil, a falta de apoio às políticas de infraestruturas pelo governo resultou em uma implantação lenta dos EV. A estratégia adotada pelo governo através do INOVAR AUTO (política de incentivo a eletrificação veicular no Brasil), visa apenas o fomento para que as montadoras automobilísticas fabriquem carros mais eficientes no que se refere à emissão de gases, sem prever, porém, investimentos em infraestrutura que suportem tais iniciativas. Tomando um exemplo, atualmente o Renault Zoé (carro elétrico mais popular da França), tem preço de compra no Brasil 4 vezes maior que o preço de compra na França devido ao alto imposto de importação. Com essa estratégia o governo visa incentivar a fabricação nacional, terceirizando a responsabilidade pela eletrificação veicular no país, sem se preocupar como deveria, com o impacto nas questões voltadas a geração de energia, e ao suporte com estações de recarga.

Segundo a Associação Nacional dos Fabricantes de Veículos Automotores no Brasil (ANFAVEA, 2015), até agosto de 2014, 558 veículos elétricos foram licenciados no Brasil. O número está crescendo de menos de 100, em 2012. Apesar de o crescimento não ser comparável com os países da Europa e da China, a questão da falta de infraestrutura começa a preocupar especialistas da área.

Atualmente, com o elevado preço de compra dos EV, embora o custo do combustível seja de apenas cerca de 10% do veículo de combustão similar, o custo operacional será equilibrado apenas se o carro for conduzido acima de 3.000 km por mês. Esse *target* por sua vez, dificilmente será atingido sem que haja toda uma infraestrutura espalhada pela cidade. Como o governo brasileiro não tem um plano para implementar apoio financeiro para pontos de carregamento públicos, o estabelecimento desses pontos dependerá do investimento dos setores privados. Dada a inexistência de uma regulamentação quanto aos encargos de mobilidade elétrica estabelecida pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), que servirão de remuneração para as empresas comercializadoras de energia, aquelas que estão investindo em estações de carregamento público, estão o fazendo apenas a título de estudo de campo, objetivando avaliar o impacto dos veículos elétricos na rede de distribuição local e também aprender como desenvolver e operar sua própria rede de recarga (LI, 2016).

Vale destacar ainda que, quando falasse de infraestrutura necessária para suportar a implantação dos EV, falasse também da confiabilidade do sistema de distribuição de energia. Uma vez que a carga elétrica aumenta, é necessário que todo o cabeamento e infraestrutura de suporte esteja dimensionada para atender a demanda. De maneira experimental Galiveeti,

Goswami e Dev Choudhury (2018) realizaram uma simulação, tomando por base uma área residencial hipotética de 15 km<sup>2</sup>, na qual as cargas são atendidas por uma única subestação dimensionada para tal. A simulação feita pelos pesquisadores, com base nessa representação, mostrou que a realização de recargas em períodos aleatórios de veículos elétricos, incluindo horários de ponta, influenciam diretamente a confiabilidade do fornecimento de energia, de maneira a tornar muito lenta a capacidade de restauração do sistema e o suprimento de energia, tornando o mesmo mais propenso a falhas elétricas, podendo ocasionar desligamentos.

Ademais, na estratégia de recarga descontrolada, ou seja, cada carro recarrega imediatamente após acessar um local de carregamento, os picos de demanda de eletricidade para carregar os carros elétricos ocorrem quando a demanda geral de eletricidade é alta. Durante esses períodos, a demanda adicional por eletricidade é tipicamente coberta por usinas a gás, utilizando combustíveis fósseis. Portanto, o conceito de introduzir veículos elétricos para reduzir as emissões totais de dióxido de carbono só pode ser bem sucedida se combinada com estratégias inteligentes de carregamento (ROSS; GUHATHAKURTA, 2017).

Rosato et al. (2017) destacam que adoção generalizada de EV resultaria em eletricidade doméstica com características de demanda radicalmente diferentes, representando uma ameaça à estabilidade da rede elétrica. Nesta perspectiva, a microgeração e geração distribuída são consideradas pela Comunidade Europeia como uma das medidas mais eficazes para economizar energia primária, reduzir as emissões e reduzir o impacto dos EV na rede elétrica. A título de Brasil, tanto as iniciativas de micro e cogeração, quanto as de geração distribuída, são ainda muito insipientes.

Em âmbito geral, Ashnani et al. (2015) realizaram uma avaliação completa do ciclo de vida do combustível em veículos a gasolina, diesel, gás natural comprimido, veículo elétrico EV e biodiesel. Comparar as diferentes tecnologias de carro indica que o impacto climático está consideravelmente sob o efeito da tecnologia do veículo, o tipo de combustível e a matéria-prima usada para gerar o combustível. Conforme recomendado pelos resultados, nenhuma das opções dominou as outras em todas as dimensões. Dado ao efeito combinado de 1- a alta participação de fósseis no mix de energia; 2- a baixa eficiência das tecnologias de conversão em eletricidade; e 3- o elevado peso do banco de baterias, o desempenho do EV não é tido como satisfatório, sem falar nas sucatas das baterias que por si só representam um impacto global significativo. A melhor posição foi preenchida pelos biocombustíveis dados seus créditos de CO<sub>2</sub>. Apesar disso, os biocombustíveis convencionais não são isentos

de desvantagens, pois são muito caros e, no estado atual, precisam de quantidades consideráveis de recursos fósseis.

Mallig et al. (2016) trazem ainda como opção de diversificação o uso de veículos híbridos capazes de associar benefícios de mais de um tipo de tecnologia. Os elétricos híbridos, por exemplo, combinam uma bateria elétrica com um motor de combustão ou um gerador. Essas soluções superam as limitações de alcance e, ao mesmo tempo, permitem a condução em energia elétrica para a maioria da quilometragem total. No entanto, é destacado também que tais iniciativas devem estar associadas a planos de expansão das energias renováveis.

### 3 MÉTODO

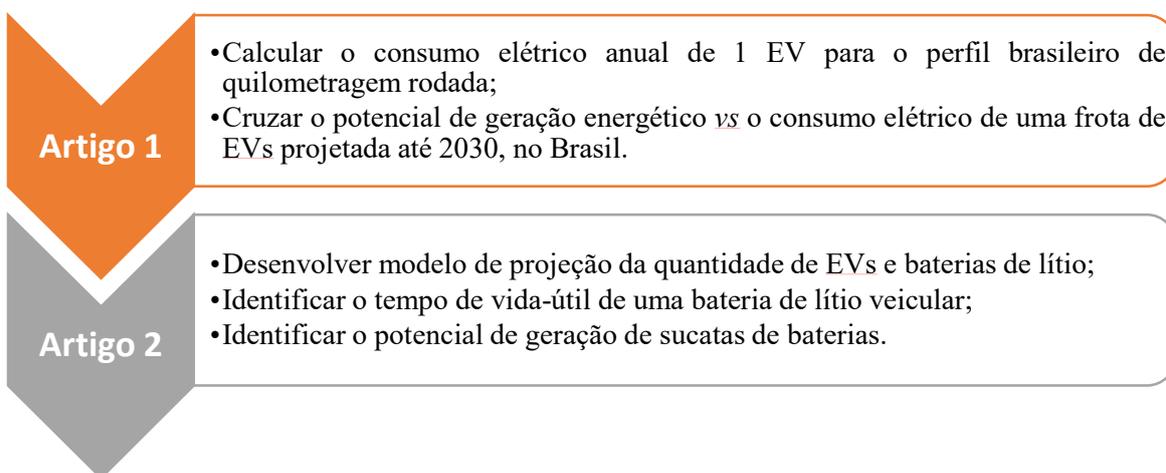
Nesta pesquisa aplicada de objetivo explicativo, os métodos utilizados para o tratamento dos materiais têm como principais embasamentos científicos as ideias apresentadas nos estudos referendados no referencial teórico.

Este estudo classifica-se como exploratório e descritivo, quanto aos fins. A abordagem adotada é quanti-qualitativa, considerando a complementariedade das informações advindas das ciências ambientais, exatas e sociais, demandando uma visão multi e interdisciplinar (LAKATOS; MARCONI, 2003).

Procurando ampliar essas visões, fazendo uso adequado das teorias e buscando responder aos objetivos da pesquisa, no processo de tratamento dos dados, os métodos apresentados nesta seção dialogaram também com outros estudos, trazendo as especificidades deste.

Para um melhor entendimento do método utilizado, observa-se o fluxograma abaixo (Figura 6).

**Figura 6** - Fluxograma metodológico



Fonte: Elaborada pelo autor (2019)

Desta forma, os resultados serão apresentados no formato de artigos científicos. E, oportunamente, em cada artigo haverá uma seção para estratificação de sua própria metodologia.

## 4 RESULTADOS

### 4.1 ARTIGO 1 – INFRAESTRUTURA ENERGÉTICA BRASILEIRA: PERSPECTIVAS E DESAFIOS PARA O SUPORTE AOS VEÍCULOS ELÉTRICOS

Artigo publicado na Revista Ibero-Americana de Ciências Ambientais, v. 12, n. 1, p. 385-396.

#### RESUMO

O setor de transportes é considerado, mundialmente, como um dos que mais emitem gases de efeito estufa (GEE). Os veículos elétricos (EVs), por não emitirem GEE durante a operação, vêm sendo fortemente incentivados por governos, no Brasil e no exterior. Existe pouca discussão quanto à infraestrutura necessária para suportar a entrada deste segmento de veículos no mercado. A partir do cálculo do consumo de um modelo utilitário de EV, com base no perfil de uso brasileiro, este estudo mostra uma avaliação da infraestrutura energética necessária para suportar uma frota de EVs projetada até 2030, frente ao potencial de geração de energia elétrica no Brasil, a partir de uma análise crítica e de viabilidade técnico-econômica dos dados obtidos. Os resultados mostraram a existência de uma importante defasagem de infraestrutura, destacando que os EVs podem não ser a melhor solução de mobilidade para o Brasil neste momento, sobretudo quando comparados com outras tecnologias, como os veículos movidos a biocombustíveis.

**Palavras-chave:** Veículos Elétricos, Infraestrutura Elétrica, Incentivos Governamentais, Biocombustíveis.

#### Introdução

O setor de transportes é responsável por cerca de 14% das emissões de gases de efeito estufa (GEE) no planeta (IPCC, 2014). Em 2007, 63% do total dessas emissões foi atribuído aos carros de passeio (PERUJO; THIEL; NEMRY, 2011). Segundo dados do Sistema de Estimativas de Emissões de Gases de Efeito Estufa (SEEG), o Brasil emitiu cerca de 2 bilhões de toneladas de CO<sub>2</sub>, apenas em 2017. Cerca de 21% dessas emissões foram atribuídas ao setor de transporte e energia (WRI BRASIL, 2018).

Diante desta problemática global, os veículos elétricos (EVs) vêm se apresentando como uma alternativa no que se refere a mitigação dos GEE. Neste cenário, a China foi responsável por metade de todas as vendas de EVs no mundo. A Noruega representou o maior mercado consumidor de EVs, onde 39% dos novos carros vendidos são elétricos (BNEF, 2018). Nesta perspectiva de expansão, especialistas indicam que 33% da frota global e 55% dos veículos zero quilômetro comercializados, até 2040, serão elétricos (BNEF, 2018). A estratégia das políticas públicas de fomento considera que, através das boas práticas

de regulação, os governos induzam a eficiência no mercado automotivo, onde montadoras produzam e consumidores adquiram cada vez mais EVs (FGV, 2018).

Segundo dados da Associação Nacional dos Fabricantes de Veículos Automotores (ANFAVEA), quanto à quantidade de carros licenciados, por tipo de combustível, no Brasil, é possível observar a evolução do mercado de automóveis do País (Tabela 1). O segmento de EVs, mesmo dentro do cenário de crise econômica, foi o único a apresentar taxa de crescimento positiva: crescimento de 178%, quando comparado ao crescimento obtido entre os anos de 2019 e 2018; e de 299%, somente para o ano de 2019 (ANFAVEA, 2019). Tais índices são reflexos das políticas públicas que visaram incentivar a eletrificação veicular.

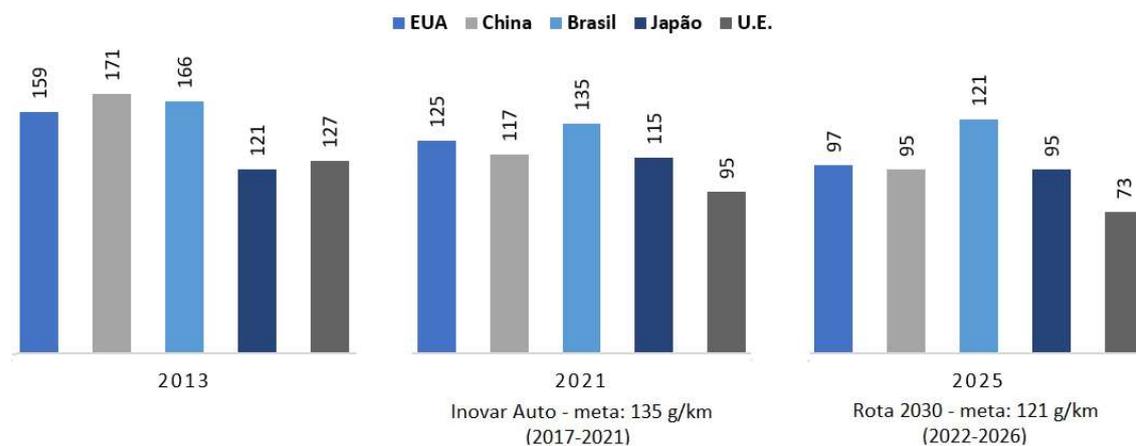
**Tabela 1** - Dados do licenciamento total de automóveis, por combustível, no Brasil.

Combustível	Licenciamentos			Crescimento		Taxa de Crescimento
	2017	2018	2019	2019/2018	2018/2017	
Gasolina	68.902	81.935	73.853	90%	119%	-29%
Elétrico	3.296	3.970	11.858	299%	120%	178%
Flex Fuel	1.927.221	2.168.173	2.328.650	107%	113%	-5%
Diesel	176.565	221.260	251.222	114%	125%	-12%

Fonte: Adaptado de ANFAVEA (2019)

A maioria dos modelos de EVs existentes no Brasil são importados e possuem isenção do imposto de importação. No entanto, visando mudar este cenário e fomentar a produção destes veículos nacionalmente, e tomando por parâmetro metas de redução de emissão de CO<sub>2</sub>/km rodado, como praticado em outros países, podem-se destacar duas políticas governamentais como marcos da eletrificação veicular no Brasil, o Programa de Incentivo à Inovação Tecnológica e Adensamento da Cadeia Produtiva de Veículos Automotores (Inovar-Auto) e o Programa de Mobilidade - Rota 2030 (Figura 1).

**Figura 1** - Metas mundiais (Estados Unidos, China, Japão, União Europeia e Brasil) de emissões veiculares, em gramas de CO<sub>2</sub> por km rodado, nos anos de 2013, 2021 e 2025.



Fonte: Adaptado de MOURA (2019)

O Inovar Auto, criado pela Lei nº 12.715 (BRASIL, 2012), configurou-se como uma iniciativa do Governo brasileiro para fomentar ganhos sistêmicos de eficiência e aumento de produtividade da cadeia automotiva. Os incentivos tributários do programa foram direcionados a novos investimentos, à elevação do padrão tecnológico dos veículos e de suas peças e componentes, e à segurança e eficiência energética veicular. Apesar do Inovar Auto não se referir, necessariamente, à eletrificação veicular, ele foi o primeiro grande programa a tratar da eficiência energética dos veículos, criando um ambiente favorável para que o Governo brasileiro pudesse promulgar metas ainda mais arrojadas, no futuro.

O Rota 2030, criado pela Lei nº 13.755 (BRASIL, 2018), surge como programa governamental em substituição ao Inovar Auto, visando tornar mais rígidas as metas de emissão de GEE. Com este subsídio, a alíquota de imposto sobre produtos industrializados (IPI) sobre os EVs que inicialmente era de 25%, passará a ser de 7% até 18%, variando de acordo com a eficiência energética do motor. Quanto maior a eficiência energética, menor a alíquota incidente sobre o EV. Os fabricantes de veículos convencionais (motor a combustão) que baterem a meta de eficiência sem, no entanto, migrarem para a eletrificação veicular, ganharão desconto de apenas um ponto percentual sobre o IPI que é de 25% (BRASIL, 2018). Ainda, de acordo com o programa Rota 2030, além da renúncia tributária anual, estimada em R\$ 1,5 bilhão pelo Governo, as empresas do segmento automotivo que aderirem e fizerem investimentos em inovação poderão gerar créditos de até 30% do valor dos veículos para abater sobre o imposto de renda (IR) ou sobre a contribuição social sobre o lucro líquido (CSLL). Quando os investimentos forem realizados em áreas consideradas estratégicas pelo Governo, como no desenvolvimento de baterias para EVs, o abatimento

poderá chegar à 40%. Da mesma forma, caso haja descumprimento das metas acordadas, tanto as montadoras, quanto as importadoras, terão que arcar com uma multa de até 20% sobre as vendas realizadas (BRASIL, 2018).

Destaca-se que, dentre as políticas nacionais (consideradas como as principais iniciativas), existem ainda uma séria de outras políticas, regionais e locais, promovidas por governos estaduais e municipais, que também visam promover o mercado de EVs. Na cidade de São Paulo (SP), por exemplo, os carros elétricos passaram a não fazer parte do rodízio municipal de veículos. Na cidade de Campinas (SP), planeja-se criar uma “Área Branca”, livre da circulação de veículos à combustão interna, na região central da cidade (FGV, 2018).

No entanto, independentemente, de se tratarem de iniciativas nacionais ou não, quando são tomadas experiências internacionais como base para o desenvolvimento de políticas próprias, deve-se observar não apenas o incentivo à produção e comercialização do produto alvo, mas sim toda a infraestrutura necessária para suportar tal mercado (HARRISON; THIEL, 2017). De acordo com Jatobá (2014), apesar de a estrutura mecânica de um veículo 100% elétrico ser bastante simplificada, o veículo exige investimentos em infraestrutura, como sistema de geração, postos de reabastecimento e uma rede de recarga preparada. Por serem, em sua maioria, abastecidos através da rede elétrica, os EVs ainda necessitam de um tempo de recarga longo, entre 6 e 12 horas, o que requer um sistema de distribuição de energia com cabeamento bem mais robusto que o convencional. Segundo Vidhi e Shrivastava (2018), a falta de apoio às políticas de infraestruturas pelo governo acaba refletindo em uma implantação lenta dos EVs.

Rosato et al. (2017) destacam que a adoção generalizada de EVs resultaria em uma eletricidade doméstica com características de demanda radicalmente diferentes, representando uma ameaça à estabilidade da rede elétrica. Nesta perspectiva, a microgeração e geração distribuída são consideradas, pela comunidade europeia, como algumas das medidas mais eficazes para economizar energia primária, reduzir as emissões e reduzir o impacto dos EVs na rede elétrica. Somado a isto, Moriarty e Wang (2017) e Van Mierlo et al. (2017) ressaltam ainda que os EVs podem ser potencialmente poluidores quando alimentados por energia elétrica proveniente de fontes não renováveis, como gás natural, carvão, petróleo e derivados. No caso do Brasil, tanto as iniciativas de micro e cogeração, quanto as de geração distribuída, são ainda muito incipientes.

Considerando este cenário, surgiram as seguintes questões de investigação: (i) qual seria a média de consumo de energia de um EV para o perfil de rodagem do brasileiro? (ii) qual seria o impacto no consumo de energia elétrica de uma frota projetada de EVs? O Brasil

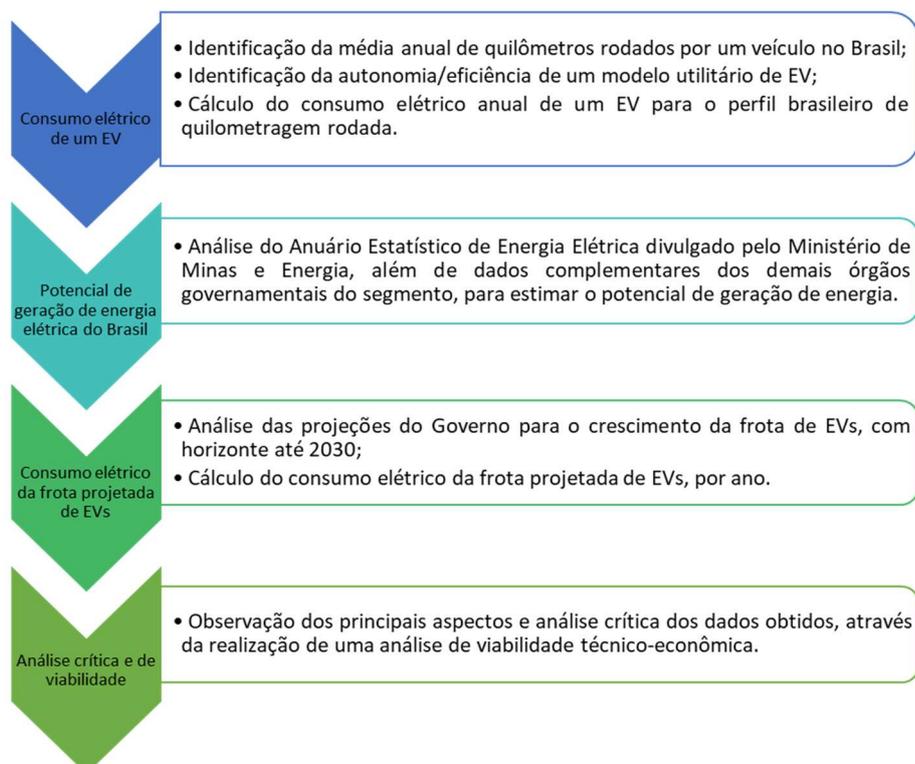
possui potencial de geração suficiente para suportar tal demanda? Nesse contexto, este estudo tem como principal objetivo responder a estes questionamentos através da análise de dados técnicos e estatísticos divulgados pelo governo e entes do segmento automotivo.

## Metodologia

Considerando os dados de consumo elétrico de um modelo de EV e da quilometragem média percorrida pelo brasileiro, foi estimado o consumo elétrico de uma determinada frota de EVs. Em seguida, foi realizada uma comparação entre o potencial de geração do Brasil frente a este novo potencial de consumo, além de uma análise de viabilidade do modelo de negócio da eletrificação veicular.

O fluxograma na Figura 2 apresenta as etapas seguidas na aplicação da metodologia utilizada no estudo.

**Figura 2** - Fluxograma mostrando as etapas seguidas na revisão científica abordando a infraestrutura energética brasileira, considerando as perspectivas e desafios para o suporte aos veículos elétricos.



Fonte: Elaborada pelo autor (2020)

### *Estimativa do consumo elétrico de um EV no Brasil*

Considerando os dados da média de circulação (km) de um veículo, por Estado, no Brasil, foi calculado o perfil de rodagem do brasileiro através da média entre os resultados obtidos nos Estados.

Objetivando a simplificação dos cálculos e redução do erro (devido ao grau de incerteza quanto ao volume de veículos de grande porte que migrarão para a eletrificação), neste estudo, considerou-se toda a frota futura de veículos elétricos como sendo composta unicamente por veículos de passeio. Assim, para identificação do consumo médio de um EV, foram observados os dados de eficiência presentes na ficha técnica de um veículo de passeio de uma das principais montadoras de EVs do mundo.

Visando a identificação do consumo elétrico anual de um EV, nas condições de uso brasileiras, foram cruzados os dados de eficiência do veículo com a quilometragem média percorrida por um carro utilitário no Brasil.

### *Potencial de geração de energia elétrica do Brasil*

Analisando o Anuário Estatístico de Energia Elétrica, divulgado pela Empresa de Pesquisa Energética (EPE) e de dados da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), órgãos pertencentes ao Ministério de Minas e Energia (MME), foram relacionadas as várias fontes de geração de energia do Brasil, classificando-as entre fontes renováveis e não renováveis. Adicionalmente, foi identificado o potencial instalado e efetivo de geração de energia elétrica, com destaque para a parcela de energia importada para complementar a demanda interna de consumo.

### *Consumo elétrico da frota projetada de EVs*

Baseado na perspectiva de crescimento do mercado de veículos elétricos no Brasil até 2030, promovida pelas políticas de incentivos governamentais, e no cálculo realizado para estimar o consumo de um modelo utilitário de EV, foi novamente calculada a estimativa de consumo, entretanto, para uma frota e não apenas para um único veículo.

Os resultados foram apresentados, anualmente, de 2019 a 2030, de forma acumulada e o acréscimo de consumo relativo aos EVs foi comparado com a capacidade de geração efetiva atual do Brasil.

### *Análise crítica e de viabilidade*

Considerando o nível de emissão da frota veicular brasileira, anterior às políticas de eficiência energética do Inovar Auto e Rota 2030, e considerando o perfil de quilometragem média percorrida por um carro no Brasil, foi calculado o nível de emissões de CO<sub>2</sub> evitado pela frota de veículos elétricos projetada até 2030. Com base na quantidade de toneladas de carbono não emitidas e no valor de cotação do crédito de carbono, foi calculada a remuneração do projeto de eletrificação veicular brasileiro. Para fins comparativos e de análise de viabilidade, a mesma remuneração foi calculada para uma frota de veículos flex (baseada na quantidade de veículos flex licenciados em 2019), considerando a possibilidade destes veículos serem abastecidos com álcool, visto que o álcool também pode ser considerado uma fonte de emissão zero, pois considera-se o efeito de compensação, através do replantio da cana-de-açúcar (RIBEIRO et al., 2010).

Mediante os resultados obtidos, foi realizada uma análise crítica sobre a infraestrutura necessária para suportar o crescimento do mercado de EVs no Brasil, bem como, sobre a viabilidade técnico-econômica dos veículos elétricos frente a outras tecnologias, como solução para mitigação da emissão de GEE.

### **Resultados e Discussão**

De modo geral, os dados obtidos na literatura consultada permitiram traçar um perfil atualizado do consumo elétrico veicular e do tamanho projetado para a frota de veículos, a partir do qual foi possível elaborar um diagnóstico, considerando o avanço da inserção de veículos elétricos no cenário brasileiro.

#### *Consumo elétrico de um EV*

Segundo pesquisa realizada pela *Kelley Blue Book*, a partir da análise de dados e big data de mais de um milhão de veículos em todo o Brasil, foi apontada a média de circulação anual dos motoristas, por Estado (KBB BRASIL, 2019), conforme Tabela 2.

**Tabela 2** - Média de circulação (km) de um veículo, por Estado, no Brasil, em 2019.

<b>Estado</b>	<b>Média de circulação (km)</b>	<b>Estado</b>	<b>Média de circulação (km)</b>	<b>Estado</b>	<b>Média de circulação (km)</b>
TO	17.600	PR	13.100	AP	12.500
DF	14.600	SE	13.100	BA	12.500
MT	14.600	MA	13.000	RO	12.500
RR	14.300	SP	13.000	RS	12.200
GO	13.700	AL	12.900	PA	12.100

MS	13.700	MG	12.900	CE	11.900
RN	13.400	AM	12.800	ES	11.700
AC	13.300	SC	12.800	RJ	11.600
PB	13.100	PI	12.600	PE	11.100

Fonte: Adaptado de KBB BRASIL (2019)

A média de circulação por um veículo no Brasil foi obtida pela média dos valores de cada Estado, resultando em um valor médio de 13 mil km/ano.

Para a identificação do consumo elétrico de um EV, foi escolhido o modelo Bolt EV, da Chevrolet, por ser um modelo de veículo utilitário e o primeiro carro elétrico da marca no país. Além disso, comparativamente, trata-se do EV de maior autonomia em sua faixa de preço, transpondo inclusive elétricos de categoria superior, sendo um dos modelos de melhor aceitação popular no mundo (VIEIRA, 2019).

Segundo a ficha técnica do veículo, divulgada pelo fabricante (CHEVROLET, 2020), o Chevrolet Bolt EV possui um *pack* de baterias com capacidade de 66 kWh e uma autonomia de, aproximadamente, 416 km.

Portanto, foram nomeados o  $CE_{AM}$  como sendo o consumo elétrico para autonomia máxima do veículo, em kWh ( $CE_{AM} = 66$ );  $AM$  a autonomia máxima do veículo, em km ( $AM = 416$ );  $KA_{BRA}$  a quilometragem anual média percorrida por um brasileiro, em km ( $KA_{BRA} = 13.000$ ); e  $CE_{BRA}$  o consumo elétrico anual de um veículo, segundo perfil brasileiro, em kWh ( $CE_{BRA} = ?$ ).

Com base nestes dados, foi possível estimar, por meio de regra de três simples, o consumo elétrico de um EV para a realidade de tráfego brasileira (Equação 1).

$$CE_{BRA} \times AM = CE_{AM} \times KA_{BRA} \text{ (Equação 1)}$$

$$CE_{BRA} \times 416 = 66 \times 13.000$$

$$CE_{BRA} = 2.062,5 \text{ kWh} \rightarrow CE_{BRA} = 2,1 \text{ MWh}$$

A partir das premissas assumidas anteriormente, foi possível estimar que o consumo elétrico médio anual correspondente a um modelo utilitário de EV é de 2,1 MWh.

### *Potencial de geração de energia elétrica do Brasil*

A matriz elétrica é o conjunto de fontes de geração de um país, responsáveis por suprir a necessidade (demanda) de eletricidade. O somatório da capacidade de geração destas várias fontes corresponde ao potencial de geração de energia elétrica.

No Brasil, a matriz atual é majoritariamente renovável, isso porque grande parte da energia elétrica gerada vem de usinas hidrelétricas (65,2%). As demais fontes são gás natural (10,5%), biomassa (8,2%), solar e eólica (6,9%), carvão (4,1%), nuclear (2,5%) e petróleo e derivados (2,6%) (EPE, 2018).

Segundo levantamento da Agência Nacional de Energia Elétrica, apesar de possuir mais de 178 GW de capacidade instalada (o que corresponderia a uma geração de 1.537 TWh de energia), o Brasil não é autossuficiente em produção de energia, importando ainda 4,6% de sua demanda de outros países como o Paraguai, Argentina, Venezuela e Uruguai (ANEEL, 2019). Destaca-se ainda que, nem toda a capacidade instalada é convertida em energia, dada a intermitência de algumas das fontes renováveis que estão sujeitas a variações climáticas, e ao grau de eficiência de cada tecnologia. De acordo com o anuário estatístico de energia elétrica de 2019, divulgado pela EPE, de toda a potência instalada, efetivamente, apenas 601 TWh foram convertidos em energia elétrica (EPE, 2019).

Ao comparar a matriz elétrica do Brasil com a da China, país em que os veículos elétricos foram largamente adotados, temos o Brasil com uma matriz majoritariamente renovável (83%) (EPE, 2018), enquanto que a China com uma matriz majoritariamente fóssil (86%) (GÓMEZ et al., 2012). A partir da avaliação de Li (2016), observou-se que a implantação de EVs na China, essencialmente, transfere o uso de gasolina para a geração de energia a carvão (energia de base da China), levando a um maior consumo de carvão e, conseqüentemente, a um aumento das emissões de CO<sub>2</sub>. Nesse sentido, Li (2016) conclui que a estratégia chinesa não é a de reduzir as emissões de GEE, mas sim de transferir a poluição dos grandes centros urbanos para locais mais afastados, onde estão situadas as usinas de geração de energia.

Desta forma, fica evidenciado que, apesar de o Brasil ter uma matriz em sua maior parte limpa, é necessário que qualquer incremento de consumo devido aos EVs seja amparado por uma ampliação da capacidade de geração de energia renovável, caso contrário poderá haver apenas a transferência geográfica da poluição, como no caso da China.

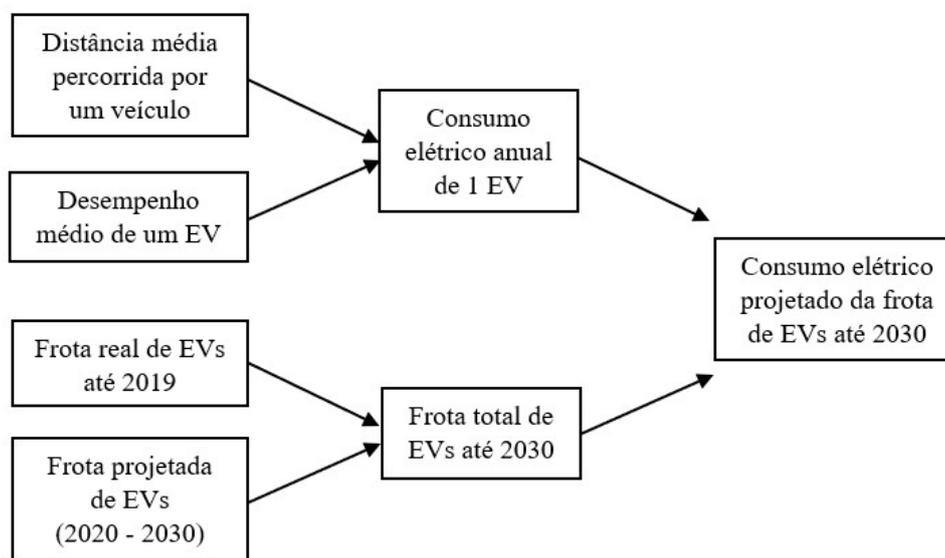
#### *Consumo elétrico da frota projetada de EVs*

Segundo dados da ANFAVEA (2019), nos últimos cinco anos (2015-2019), contabilizando os veículos importados, foram licenciados 21.061 EVs no Brasil, dos quais, 11.858 apenas em 2019. Muito deste aumento se deve às políticas de incentivos governamentais.

Baseado na maior agressividade do fomento a este segmento de transporte, como relatado anteriormente, estima-se que, até 2030, o Brasil conte com 5% de sua frota de carros composta por EVs. Essa frota corresponderá a, aproximadamente, 2 milhões de EVs, havendo uma meta anual de 180 mil novos veículos licenciados/ano (BCG, 2019).

Diante dessa estatística, e tomando por base o modelo de projeção de consumo elétrico apresentado na Figura 3, com o consumo anual de 2,1 MWh como sendo o consumo elétrico correspondente a um modelo utilitário de EV, foi possível calcular o incremento de demanda energética relativa à frota projetada de veículos elétricos, até 2030 (Tabela 3).

**Figura 3** - Fluxograma do modelo de projeção de consumo da frota de veículos elétricos de 2019 até 2030, no Brasil.



Fonte: Elaborada pelo autor (2020)

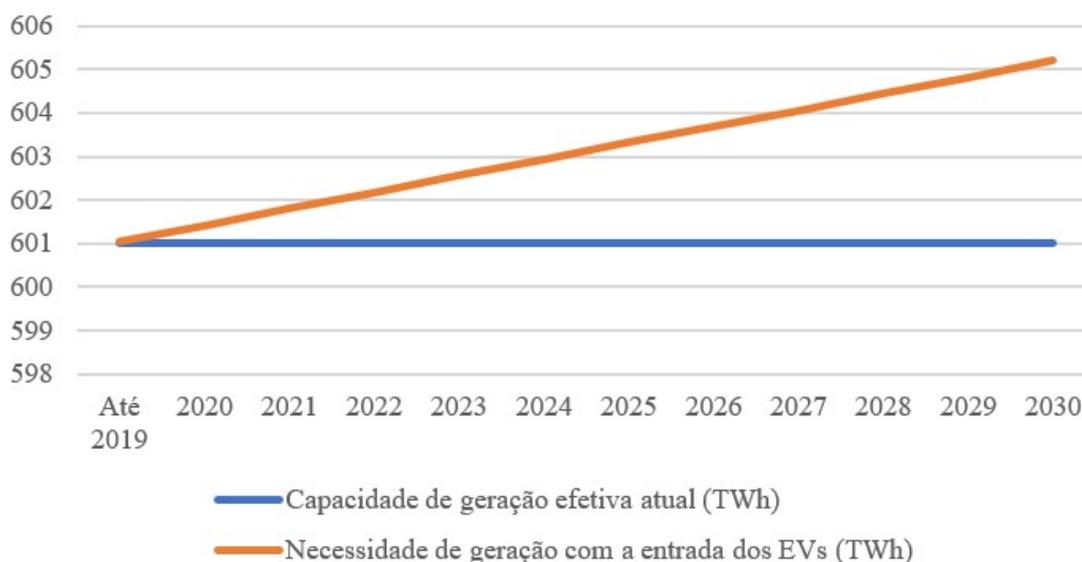
**Tabela 3** - Consumo projetado da frota de veículos elétricos, de 2019 até 2030, no Brasil.

Ano	Frota acumulada (unidades)	Consumo incremental (Mwh)
Até 2019	21.061	44.228
2020	201.061	422.228
2021	381.061	800.228
2022	561.061	1.178.228
2023	741.061	1.556.228
2024	921.061	1.934.228
2025	1.101.061	2.312.228
2026	1.281.061	2.690.228
2027	1.461.061	3.068.228
2028	1.641.061	3.446.228
2029	1.821.061	3.824.228
2030	2.001.061	4.202.228

Fonte: Elaborada pelo autor (2020)

Assim sendo, foi possível estimar em 4,2 TWh o acréscimo do consumo de energia necessário para suportar a introdução dos EVs, no mercado brasileiro de transportes. Tomando por base o registro mais recente da capacidade efetiva de geração do Brasil, divulgado pela EPE, é possível analisar o comportamento deste acréscimo de energia ao longo do tempo (Figura 4).

**Figura 4** - Capacidade de geração atual *versus* crescimento da demanda devido aos veículos elétricos.



Fonte: Elaborada pelo autor (2020)

### *Análise crítica e de viabilidade*

Considerando que o consumo adicional de energia referente a entrada dos veículos elétricos será de 4,2 TWh, para atendimento dessa demanda, a título de comparação com as estruturas geradoras de energia existentes no país, seria necessário a construção de: (i) uma geradora do porte da Usina Nuclear Angra I, que, segundo a ELETROBRAS (2020), em 2019 alcançou sua melhor marca de geração com 5,5 TWh; (ii) ou a construção de três centrais hidrelétricas do porte de Sobradinho, que em 2018 chegou a produzir 1,5 TWh (CHESF, 2019). Segundo Villela (2018), para construção de uma Usina com o porte de Angra I, seria necessário um investimento na ordem de 6 bilhões de reais. Ademais, é importante destacar que, para suportar a entrada dos EVs no mercado brasileiro, o investimento necessário em infraestrutura não se restringe apenas a construção de novas geradoras de energia, também existe a necessidade de investimento massivo em redes de distribuição de energia e eletropostos para recarga destes veículos.

Sabendo-se que o crédito de carbono é tido como uma “commodity ambiental” cujo valor oscila influenciado por fatores de mercado, para evidenciar a real vantagem competitiva da solução da eletrificação veicular, foi assumido o valor do crédito de carbono de 18,99 euros/ton, conforme dados de fechamento da bolsa de valores (INVESTING, 2020). Levando-se em consideração ainda a cotação do euro no dia (01/05/2020 - 6,01 reais), a frota de veículos elétricos projetada até 2030, as emissões de 166 gCO<sub>2</sub>/km no Brasil (antes das políticas de eficiência energética), e a média de 13.000 km percorridos anualmente por um veículo no Brasil, foi obtido o ganho demonstrado na Tabela 4.

**Tabela 4** - Ganhos ambiental e financeiro devido aos veículos elétricos, de 2019 até 2030, no Brasil.

<b>Ano</b>	<b>Frota acumulada (unidades)</b>	<b>Créditos de carbono (ton CO<sub>2</sub>)</b>	<b>Ganho financeiro (R\$ - bilhão)</b>
Até 2019	21.061	45.449,64	5.187,16
2020	201.061	433.889,64	49.519,78
2021	381.061	822.329,64	93.852,40
2022	561.061	1.210.769,64	138.185,02
2023	741.061	1.599.209,64	182.517,64
2024	921.061	1.987.649,64	226.850,25
2025	1.101.061	2.376.089,64	271.182,87
2026	1.281.061	2.764.529,64	315.515,49
2027	1.461.061	3.152.969,64	359.848,11
2028	1.641.061	3.541.409,64	404.180,73
2029	1.821.061	3.929.849,64	448.513,35
2030	2.001.061	4.318.289,64	492.845,96
<b>Total</b>		<b>26.182.435,66</b>	<b>2.988.198,76</b>

Fonte: Elaborada pelo autor (2020)

Desta forma, é demonstrada uma expectativa de redução de mais de 26,1 milhões de toneladas de CO<sub>2</sub>, devido a entrada dos veículos elétricos, até 2030, o que corresponderia a um ganho financeiro de mais de 2,9 quadrilhões de reais, em créditos de carbono.

Como comparação, calcularam-se os ganhos ambiental e financeiro da frota de veículos flex licenciados em 2019 (2.328.650 carros), segundo dados da ANFAVEA (2019). Para tal, foi considerado o abastecimento destes veículos unicamente com álcool, uma vez que o álcool também pode ser considerado uma fonte de emissão zero, dada a possibilidade de compensação através do replantio da cana-de-açúcar. Para projetar a frota acumulada até 2030, considerou-se a mesma quantidade de veículos licenciados em 2019 entrando a cada novo ano. Por conservadorismo, não foi adotada nenhuma taxa de crescimento anual. Assim, tomando por base estas e as demais considerações assumidas para o cálculo dos ganhos dos EVs, o resultado obtido para a frota de veículos flex é apresentada na Tabela 5.

**Tabela 5** - Ganhos ambiental e financeiro devido aos veículos flex, de 2019 até 2030, no Brasil.

<b>Ano</b>	<b>Frota acumulada (unidades)</b>	<b>Créditos de carbono (ton CO<sub>2</sub>)</b>	<b>Ganho financeiro (R\$ - bilhão)</b>
Até 2019	2.328.650	5.025.226,70	573.528,62
2020	4.657.300	10.050.453,40	1.147.057,24
2021	9.314.600	20.100.906,80	2.294.114,48
2022	18.629.200	40.201.813,60	4.588.228,97
2023	37.258.400	80.403.627,20	9.176.457,93
2024	74.516.800	160.807.254,40	18.352.915,86
2025	149.033.600	321.614.508,80	36.705.831,73
2026	298.067.200	643.229.017,60	73.411.663,46
2027	596.134.400	1.286.458.035,20	146.823.326,91
2028	1.192.268.800	2.572.916.070,40	293.646.653,82
2029	2.384.537.600	5.145.832.140,80	587.293.307,65
2030	4.769.075.200	10.291.664.281,60	1.174.586.615,29
<b>Total</b>		<b>20.578.303.336,50</b>	<b>2.348.599.701,96</b>

Fonte: Elaborada pelo autor (2020)

Mediante análise dos resultados, é possível afirmar que, apesar de os EVs demonstrarem ganhos tanto ambientais, quanto financeiros, a hipótese de abastecer os veículos flex com álcool apresenta resultados bem superiores, com uma redução de mais de 20,5 bilhões de toneladas de CO<sub>2</sub> emitidos e a mais de 2,3 quintilhões de reais, em créditos de carbono.

Sabendo-se que: (i) o agronegócio sempre foi um forte pilar da economia brasileira, correspondendo em 2019 a 21% do Produto Interno Bruto (PIB), segundo dados da Confederação da Agricultura e Pecuária do Brasil (CNA, 2020); (ii) os carros movidos a biocombustíveis são, na realidade, uma modalidade de veículos à combustão e que, portanto, para serem implementados em larga escala não necessitariam de grandes investimentos em infraestrutura, a não ser a de produção dos próprios biocombustíveis, é necessário se reavaliar, de forma pragmática, a futura entrada de EVs no mercado automobilístico brasileiro.

Tendo em vista os indicadores ambiental e financeiro aqui apresentados, observa-se que o modelo de mobilidade a partir de biocombustíveis figura como, possivelmente, mais viável que a eletrificação, no Brasil, nas atuais circunstâncias e considerando as simplificações adotadas neste estudo, uma vez que, como relatado por Soares et al. (2009), mesmo sendo derivados de materiais vegetais compostos por carbono oriundo exclusivamente do CO<sub>2</sub> atmosférico, as etapas de produção de qualquer biocombustível ainda requerem a utilização de fontes fósseis de carbono, e por decorrência disso, também são fontes indiretas de poluição.

## Conclusão

Apesar de, em operação, os EVs gerarem reduzidas quantidades de GEE, o mesmo não se pode afirmar quanto às suas emissões indiretas. Como já ressaltado anteriormente, se alimentados por fontes de energia fósseis, os EVs podem ser considerados como verdadeiras fontes poluidoras. No Brasil, essas fontes correspondem a 17% da matriz energética, segundo dados da EPE. Nesse sentido, se o objetivo da migração do modelo tradicional de transportes para elétrico é melhorar o desempenho ambiental, através da mitigação dos GEE, é necessário que a política de incentivo deste mercado automotivo esteja atrelada a uma política de expansão das fontes de geração de energia renovável.

Outro aspecto relevante a ser observado é a falta de conexão entre as políticas de promoção da tecnologia de eletrificação e as políticas de expansão da infraestrutura elétrica para atender os EVs, observando aspectos além da geração de energia, como a confiabilidade do sistema de distribuição de eletricidade. Uma vez que a carga elétrica aumenta, é necessário que todo o cabeamento e a infraestrutura de suporte estejam dimensionados para atender a demanda. A estratégia adotada pelo governo através do Inovar Auto e do Rota 2030 visa apenas o fomento para que as montadoras automotivas fabriquem carros mais eficientes, sem prever, porém, investimentos em infraestrutura que suportem tais iniciativas, o que pode acabar refletindo em uma implantação lenta dos EVs.

Destaca-se também que, dada a inexistência de regulamentação quanto aos encargos de mobilidade elétrica estabelecida pela ANEEL, que servirão de remuneração para as comercializadoras de energia, o valor cobrado pela recarga dos veículos em eletropostos, torna o negócio não atrativo. Portanto, as comercializadoras de energia que irão investir em estações de carregamento público, deverão avaliar o impacto dos EVs na rede de distribuição local e também aprender como desenvolver e operar sua própria rede de recarga.

Finalmente, destaca-se ainda como alternativa a introdução dos EVs, o fomento aos veículos movidos a biocombustíveis. Apesar da análise ter sido realizada introduzindo o álcool como combustível, ainda existe uma gama de outros biocombustíveis, até energeticamente mais eficientes, e que poderiam ser viabilizados mais rapidamente através de incentivos governamentais. Destaca-se, contudo que, da mesma forma que os EVs, os veículos movidos a biocombustíveis também não estão livres de emissões de GEE. Mesmo sendo derivados de materiais vegetais, as etapas de produção de qualquer biocombustível ainda requerem a utilização de fontes fósseis de carbono.

## 4.2 ARTIGO 2 – ESTIMATIVA DE GERAÇÃO DE SUCATAS DE BATERIAS DE ÍON-LÍTIO COMO FERRAMENTA DE GERENCIAMENTO DE RESÍDUOS

Artigo a ser submetido na Journal of Cleaner Production.

### RESUMO

Dentre a diversidade de resíduos eletroeletrônicos, as baterias de íon-lítio (LIBs), especificamente aquelas utilizadas na propulsão de veículos elétricos, são consideradas como poluentes de grande impacto. As LIBs quando não utilizadas e descartadas de maneira correta, podem causar uma série de danos à saúde e ao meio ambiente. Devido à instabilidade eletroquímica inerente a estas baterias, além da liberação de gases tóxicos, riscos de explosão, as LIBs estão sempre associadas a uma série de circuitos eletrônicos compostos por uma variedade de metais, incluindo metais pesados. Como resultado das políticas públicas de incentivo à eletrificação veicular, o segmento brasileiro de veículos elétricos tem apresentando elevado crescimento, mesmo dentro de um cenário de crise econômica. Nesse sentido, este artigo apresenta um modelo para estimativa da produção de veículos elétricos (EVs) e geração de sucatas de LIBs, baseado em séries temporais, combinando a vida útil da bateria, dados de vendas de automóveis e o perfil de quilometragem percorrida por um carro no Brasil. Os resultados mostram que quase 700 mil EVs deverão estar circulando no Brasil, até 2030 e que, até 2040, aproximadamente, 500 mil LIBs já terão se convertido em sucatas. Ao final, destaca-se o efeito retardatário da geração de sucatas de LIBs, condizente com a vida útil da bateria e que, futuramente, pode impactar, de forma bastante negativa, o gerenciamento de resíduos.

**Palavras-chave:** Vida útil, Sucatas de LIB, Veículos elétricos, Modelo de previsão, Séries temporais.

### Introdução

Alguns dos elementos mais importantes na avaliação dos EVs são as baterias. Diferentemente dos tipos mais comuns de veículos, onde a principal função do acumulador é a de dar a partida no motor, nos EVs, as baterias ganham um outro protagonismo, uma vez que além da ignição, assumem a função de fornecer energia para propulsão do veículo. Nesta ótica, apesar de existirem várias tecnologias de baterias, a LIB é considerada a mais utilizada para esta aplicação, devido à sua grande densidade de energia e a expectativa de vida-útil superior às tecnologias concorrentes (DU et al., 2019).

No entanto, apesar de apresentarem significativas vantagens de eficiência energética, a estas baterias também estão associados alguns problemas. Sun et al. (2016) relatam a existência de mais de cem tipos de gases tóxicos liberados pelas baterias de íons de lítio, considerados potencialmente fatais, podendo causar fortes irritações na pele, nos olhos e nas vias respiratórias, além de prejudicar o meio ambiente de modo geral. Ainda em seu estudo,

estes autores identificaram vários fatores que podem causar o aumento na concentração dos gases tóxicos emitidos. Uma bateria totalmente carregada libera mais gases tóxicos do que uma bateria com carga de 50%, por exemplo. Além disso, os compostos químicos contidos nas LIBs e sua capacidade de liberar carga também afetam as concentrações e os tipos de gases tóxicos liberados, sendo a utilização de LIBs em EVs, uma das formas de aplicação que mais exigem capacidade de carga da bateria.

A bateria é um acumulador responsável por armazenar energia elétrica proveniente da rede elétrica e/ou gerador, em forma de energia química, e posteriormente, convertê-la, novamente, em energia elétrica para alimentação do veículo. Segundo Castro e Ferreira (2010), quando se é dito que a bateria de íon-lítio é a mais promissora para aplicações em EVs, na realidade se é falado em um conjunto de soluções, já que tais baterias compreendem, na verdade, uma família de baterias, com suas vantagens e desvantagens.

As baterias são formadas por um cátodo (+) e um ânodo (-). O cátodo é o maior determinante da energia, da segurança, da vida útil e do custo de uma bateria. Assim, as principais diferenças das famílias de baterias residem nos cátodos. Os ânodos são feitos, usualmente, de grafite e funcionam como o eletrodo negativo responsável por conduzir a carga elétrica positiva da bateria. Os principais tipos de baterias de íon-lítio são os seguintes: LCO (óxido de lítio-cobalto), NCA (lítio-níquel-cobalto-alumínio, ou LiNiCoAl), NMC (lítio-níquel-manganês-cobalto, ou LiNiMnCo), LMO/LTO (lítio-manganês) e LFP (fosfato de ferro-lítio, ou LiFePO<sub>4</sub>) (DINGER et al., 2010).

A insuficiência da oferta de lítio para atender à demanda futura é um dos principais argumentos contrários aos EVs, defendida por Tahil (2007) e Tahil (2008). Segundo o Serviço Geológico dos Estados Unidos - USGS (2017), no mundo, há mais de 14 milhões de toneladas de lítio, estando as maiores reservas em países como Chile, Argentina, Bolívia e Austrália, que juntas somam cerca de 80% das reservas mundiais. De acordo com o Serviço Geológico do Brasil - CPRM (2018), o Brasil detém 8% das reservas já mapeadas, e sua produção foi de 43 mil toneladas em 2018, o que equivale a menos de 0,1% da produção mundial, dominada pela Austrália e pelo Chile, que juntos correspondem a 76% da produção mundial, e a Argentina, com 13% do total. A Europa lidera o ranking com 24% de todo consumo mundial de lítio, sendo todo ele importado. O Brasil consumiu apenas 9,5 mil toneladas, em 2016, segundo dados do Departamento Nacional de Produção Mineral - DNPM (2017).

Apesar de o lítio não ser utilizado somente na produção de baterias, cerca de 46% da produção mundial destina-se à fabricação de baterias para as mais diversas finalidades,

dentre elas, os veículos elétricos. No entanto, existe a expectativa de que, com a popularização dos EVs, o percentual do lítio produzido dedicado à fabricação de baterias, aumente ainda mais nos próximos anos (WATTSON, 2019).

Segundo dados da Associação Nacional dos Fabricantes de Veículos Automotores - ANFAVEA (2019), o segmento de veículos elétricos no Brasil, mesmo dentro do cenário de crise econômica, é o que vêm apresentando maiores índices de crescimento nos últimos anos, tendo sido de 120% e 299% as taxas de crescimento de veículos licenciados em 2018 e 2019, respectivamente. Tais indicadores são reflexos das políticas públicas que visaram incentivar a eletrificação veicular no país, tais como o Inovar-Auto (BRASIL, 2012) e o Rota 2030 (BRASIL, 2018).

Como um país em desenvolvimento, o enfrentamento dos problemas relacionados ao gerenciamento dos resíduos sólidos (GRS) no Brasil, ainda é recente. E, quando segmentamos a gestão das sucatas de LIBs, o desafio se torna ainda maior, principalmente no que se refere a carência de tecnologias para coleta seletiva e reciclagem – o que leva ao despejo em locais inadequados – e a falta de conhecimento para a implementação de uma legislação reguladora.

A legislação brasileira estabelece os limites máximos de chumbo, cádmio e mercúrio para pilhas e baterias comercializadas no território nacional e os critérios e padrões para o seu gerenciamento ambientalmente adequado. No entanto, ainda não há critérios e padrões para o gerenciamento adequado de pilhas e baterias de lítio, na legislação nacional. A Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) – Lei 12.305/2010 (BRASIL, 2010) – trata as baterias de forma genérica, sem fazer distinção de suas tecnologias e, exige que fabricantes, importadores, distribuidores e revendedores de baterias estruturem e implementem sistemas de logística reversa após o fim da vida útil do produto. De acordo com Neto et al. (2016), apesar do que prevê a legislação, a maior parte das empresas que fornece coleta de sucatas de baterias, está voltada para a tecnologia de chumbo-ácido, não existindo um mercado de logística reversa consolidado para as LIBs, principalmente devido ao fato de o Brasil ser importador desta tecnologia. As principais fabricantes são chinesas, o que torna a logística reversa ainda mais difícil.

A LIB é composta por dois eletrodos, um positivo e um negativo, imersos em uma solução eletrolítica. O eletrodo positivo é composto por uma variedade de óxidos metálicos litiados (ex:  $\text{LiCoO}_2$ ,  $\text{LiMn}_2\text{O}_4$ ,  $\text{LiNiO}_2$ ,  $\text{LiFePO}_4$ ,  $\text{Li}_2\text{FePO}_4\text{F}$ ,  $\text{LiNi}_{1/3}\text{Co}_{1/3}\text{Mn}_{1/3}\text{O}_2$ ) colado em uma folha de alumínio que representa o condutor elétrico do cátodo. O eletrodo negativo é formado por uma estrutura de grafite composta por várias camadas de carbono, entre as

quais se localizam os íons de lítio. A estrutura de grafite, por sua vez, é colada em uma folha de cobre que funciona como o condutor elétrico do ânodo. Tanto o material ativo positivo, quanto o negativo, são colados nos coletores de carga com uma resina polimérica PCDF (fluoreto de polivinilideno) (CONTESTABILE et al., 2001; VARELA et al., 2002). Segundo Nazri e Pistoia (2003) e Linden e Reddy (2008), a maior parte dos compostos de óxido metálico litiados apresentam instabilidade química com fácil decomposição devido a sua sensibilidade com relação à temperatura.

Devido à alta reatividade do lítio metálico com a água, as LIBs empregam eletrólitos dissolvidos em solventes não aquosos. O eletrólito é um componente que vêm sendo estudado de maneira contínua a fim de se obter uma solução capaz de dar maior estabilidade a LIB. No entanto, a solução eletrolítica mais utilizada é composta por sais de lítio dissolvidos em solventes orgânicos (geralmente carbonatos), que são absorvidos pelo separador (membrana polimérica) (VAN SCHALKWIJK; SCROSATI, 2002). Apesar de sua composição relativamente simples, diferentemente de outras tecnologias de baterias, devido a sua instabilidade eletroquímica, as LIBs requerem um elevado grau de eletrônica embarcada para garantir a segurança sob quase todas as circunstâncias. Usualmente, toda bateria de lítio está associada a placas de circuito impresso embarcadas dentro da bateria (BMS). Conforme estabelecido pela norma IEC 62133-2:2017 da Comissão Eletrotécnica Internacional - IEC, o BMS é responsável por garantir proteção contra correntes de carga e descarga excessivas, proteção contra descarga abaixo do valor mínimo de tensão da bateria, realizar o balanceamento de carga entre as baterias e proteção contra temperaturas excessivas. Estes circuitos eletrônicos, no entanto, têm sua composição feita por uma infinidade de materiais que variam de acordo com o fabricante, havendo vários metais, como até mesmo o chumbo, ligas metálicas, assim como compostos orgânicos e inorgânicos (HOFFMANN, 1992).

De acordo com Castro e Consoni (2020), ainda não há um processo consagrado para reciclagem das LIBs. Ainda segundo os autores, a reciclagem de uma bateria de lítio apresenta risco em função da possibilidade de fogo e explosão devido ao lítio e ao solvente não aquoso. Tentativas de abri-las podem expor às baterias à umidade do ar, provocando reações violentas. Na etapa crítica de abertura mecânica por trituração ou moagem, os processos empregam o elemento químico argônio na forma líquida, ou fornos com alta taxa de ventilação, existindo posteriormente uma grande dificuldade na etapa de segregação dos componentes/materiais. Atualmente, esta tecnologia de reciclagem é essencialmente

utilizada no Canadá e Estados Unidos. Na Europa, ainda não se tem um processamento efetivo das sucatas de LIB (CONTE, 2016).

Sendo o cobalto e o lítio os metais mais valiosos provenientes da reciclagem destas baterias, vários processos experimentais vêm sendo desenvolvidos objetivando ter um melhor rendimento na recuperação destes metais. Uma destas frentes emprega a dissolução das baterias em ácido clorídrico, nítrico ou sulfúrico diluídos, seguida de tratamento químico do líquido ácido e do processamento do resíduo final, levando a uma recuperação média de 85% de cobalto e lítio. Apesar disto, esta e outras iniciativas ainda não se tornaram populares devido ao seu processamento ainda bastante manual e elevados custos envolvidos (CONTE, 2016).

A estimativa da geração futura de resíduos é uma informação crucial para o estabelecimento de uma coleta eficiente e um sistema de reciclagem adequado (ZHANG et al., 2011). Com base em incentivos governamentais que visam fomentar a eletrificação veicular no Brasil, existem expectativas do governo e do mercado que até 2030 o Brasil conte com uma frota de mais de 2 milhões de EVs (FEM, 2016; BCG, 2019; EDP, 2019). Diante desta perspectiva, dado o crescimento do mercado de veículos elétricos, a estimativa da geração de sucatas de LIB torna-se base para tomadas de decisão mais assertivas, para a logística reversa, e para a correta reciclagem das sucatas, conforme os objetivos da PNRS (2010).

Portanto, esta pesquisa objetiva estimar a quantidade de sucatas de LIBs, combinando a vida útil da bateria, dados de vendas de automóveis e o perfil de quilometragem percorrida por um carro no Brasil, por meio de modelagem de séries temporais. A modelagem usando séries temporais tem sido bastante empregada em trabalhos semelhantes para a previsão de geração de resíduos, auxiliando em sua gestão, como mostram os trabalhos de Chang et al. (1993), Chang e Lin (1997), Chen e Chang (2000), Navarro-Esbri et al. (2002) e Santos et al. (2019).

Além disso, visa contribuir para o aprimoramento da gestão dos resíduos sólidos, uma vez que, segundo Badger (2015), há poucos estudos que tratam sobre a geração de sucatas de LIBs, sobretudo em países em desenvolvimento, como o Brasil.

## **Metodologia**

Para realizar a modelagem das séries temporais e demais análises estatísticas, foram utilizados os softwares Minitab® e o Microsoft Excel®.

### *Estimativa da frota de EVs e quantidade de LIBs*

Considerando que a projeção da frota de EVs (2 milhões de unidades), até 2030, foi traçada em um período pré-pandemia do COVID-19, e que a pandemia em questão ocasionou uma depressão econômica mundial, ainda mais forte em países em desenvolvimento como o Brasil, houve a necessidade de atualizar estas projeções, levando-se em consideração o comportamento histórico de venda destes veículos e não apenas os fomentos governamentais. Para tal, foram utilizados dados históricos de vendas de EVs disponibilizados pela ANFAVEA – entidade que compreende os fabricantes de veículos automotores (carros, caminhões e ônibus) e agrícolas máquinas (tratores de rodas, tratores, colheitadeiras e retroescavadeiras) no Brasil – que tem como atribuições: (i) estudar questões da indústria e do mercado automobilístico e (ii) compilar e disseminar dados de desempenho do setor.

Sabendo-se que cada EV tem seu sistema propulsor movido através de uma LIB, determinando a quantidade de veículos pode-se, portanto, indiretamente determinar a quantidade de baterias.

### *Modelagem de séries temporais para projeção da frota de EVs*

No caso em estudo, a série temporal é constituída pelos dados de EVs licenciados no Brasil, no período de 2012 a 2019. A modelagem de séries temporais refere-se ao processo de construção de um modelo de uma variável medida, repetidamente, ao longo de um período de tempo. Modelos de séries temporais são criados com o objetivo de explorar padrões de movimentos passados, a fim de prever o comportamento futuro (PINDYCK; RUBINFELD, 1998).

Por serem observações obtidas em ordem cronológica, é importante notar a existência de fatores externos que possam vir a influenciar o comportamento da série de dados. Uma vez que as observações vizinhas podem ser dependentes, faz-se necessário analisar e modelar essa dependência, observando se a série é, ou não, estacionária.

Segundo Neto et al. (2016), dados de venda de veículos compõem um tipo de série não estacionária que apresenta comportamentos tanto de tendência, quanto de sazonalidade. Além disso, a não estacionaridade da série foi comprovada através da realização do teste de Ljung-Box. Compreende-se por tendência o comportamento de longo prazo da série, que pode ser causado pelo crescimento demográfico, ou mudança gradual de hábitos de consumo, ou qualquer outro aspecto que afete a variável de interesse no longo prazo. Já a sazonalidade corresponde às flutuações nos valores da variável com duração inferior a um

ano, e que se repetem todos os anos, geralmente em função das estações do ano, feriados, festas populares, etc. (TRIOLA, 1999).

Assim, optou-se por utilizar o modelo de suavização exponencial, por ser um método de previsão que isola a sazonalidade da variação irregular (MCKENZIE, 1984). Técnicas específicas de suavização exponencial assumem que valores extremos da série representam padrão aleatório. Desta forma, através da suavização destes extremos, pode-se identificar o padrão de base (MORETTIN; TOLOI, 2006). A suavização exponencial é assim chamada por atribuir pesos exponenciais aos dados da série, aumentando o peso à medida que os dados se tornam mais recentes (YAFFEE; MCGEE, 2000).

Para a análise da quantidade de EVs, foram analisados três modelos de suavização exponencial, que forneceram os melhores ajustes para os dados: o modelo multiplicativo de Holt-Winters, o modelo autorregressivo integrado de médias móveis - ARIMA (suavização exponencial dupla), e o modelo de médias móveis simples. O modelo de Holt-Winters produz três valores suavizados:  $\alpha$  (nível),  $\beta$  (tendência) e  $\gamma$  (ajuste sazonal). O modelo ARIMA, por outro lado, tem dois parâmetros de suavização:  $\alpha$  (nível) e  $\beta$  (tendência), enquanto que o de médias móveis produz apenas o ajuste sazonal para a previsão.

#### *Estimativa de vida útil - LIBs*

Usualmente, as LIBs têm seu tempo de duração estimado a partir da quantidade de ciclos de carga e descarga suportados por ela (IMPINNISI, 2010). Sabe-se que a velocidade com que esta quantidade de ciclos é realizada varia de acordo com o perfil de quilometragem percorrida por uma determinada frota de veículos. Portanto, o cálculo da vida útil de uma LIB foi estimado com base na média de quilometragem percorrida pela população brasileira. A Tabela 1 mostra a média entre os valores de circulação (km) de cada Estado.

**Tabela 1** - Média de circulação anual (km) de um veículo, por Estado, no Brasil, divulgada pela KBB.

<b>Estado</b>	<b>Média de circulação (km)</b>	<b>Estado</b>	<b>Média de circulação (km)</b>	<b>Estado</b>	<b>Média de circulação (km)</b>
TO	17.600	PR	13.100	AP	12.500
DF	14.600	SE	13.100	BA	12.500
MT	14.600	MA	13.000	RO	12.500
RR	14.300	SP	13.000	RS	12.200
GO	13.700	AL	12.900	PA	12.100
MS	13.700	MG	12.900	CE	11.900
RN	13.400	AM	12.800	ES	11.700

AC	13.300	SC	12.800	RJ	11.600
PB	13.100	PI	12.600	PE	11.100
<b>Média Brasil</b>			13.059		

Fonte: Adaptado de KBB (2019)

O ciclo de uma bateria de íon-lítio quando convertido em quilometragem percorrida, segundo dados da ficha técnica de um dos modelos mais eficientes de EV, de acordo com a GM (2020), corresponde a aproximadamente 416 km/ciclo. O tempo de vida útil de uma LIB será calculado cruzando-se estes dados com a quantidade estimada de ciclos de uma bateria, obtida na literatura.

### *Sucata de LIBs*

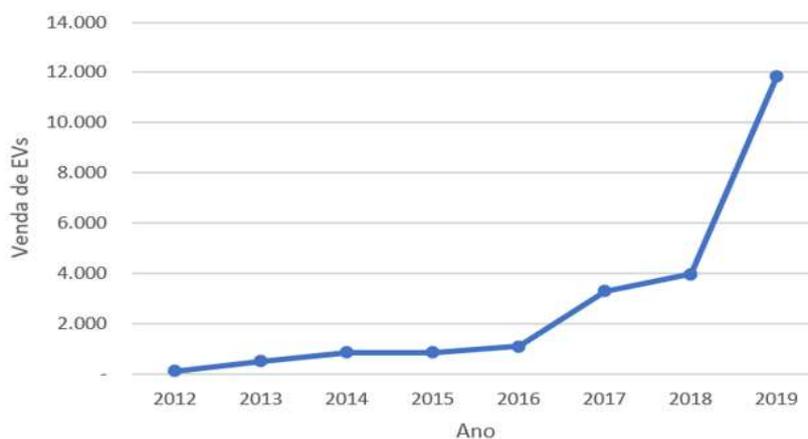
A partir da projeção da quantidade de veículos e respectiva quantidade de baterias produzidas, e considerando o tempo de vida útil calculado para uma LIB, será prospectada a respectiva quantidade de sucatas de baterias de íon-lítio que serão produzidas até 2040, no Brasil.

## **Resultados e discussão**

### *Frota de EVs*

Os dados de EVs licenciados, divulgados pela ANFAVEA, foram coletados ano a ano, durante um período de 8 anos (de 2012 até 2019). A Figura 1 mostra o gráfico da série temporal. Como trata-se de uma série não estacionária, de acordo com a parcimônia – a adoção da abordagem mais simples – métodos de suavização exponencial foram utilizados para analisar a série cronológica.

**Figura 1** - Gráfico da série de venda de veículos elétricos, no Brasil (2012-2019).



Fonte: Elaborada pelo autor (2020)

A série tem componentes de tendência e sazonalidade. Assim, três tipos de métodos foram utilizados: os modelos de predição de Winters, ARIMA e médias móveis. A Tabela 2 apresenta os dados anuais de vendas de carros. A Tabela 3 mostra a análise realizada, as constantes e as medidas de precisão. E, a Tabela 4 apresenta a previsão de vendas de EVs de 2020 a 2030, com cada método.

**Tabela 2** - Venda de veículos elétricos, no Brasil (2012-2019).

Ano	Venda de EVs
2012	117
2013	491
2014	855
2015	846
2016	1.091
2017	3.296
2018	3.970
2019	11.858

Fonte: Elaborada pelo autor (2020)

**Tabela 3** - Análise de séries temporais para os dados de vendas de EVs.

Método	Constantes	Medidas de precisão
Winters Multiplicativo	$\alpha$ (nível) = 0,2	MAPE = 97
	$\gamma$ (tendência) = 0,2	MAD = 3.357
	$\beta$ (ajuste sazonal) = 0,2	MSD = 36.494.940
ARIMA	$\alpha$ (nível) = 0,28663	MAPE = 88
	$\gamma$ (tendência) = 4,32845	MAD = 1.226
		MSD = 4.437.033
Médias Móveis (tamanho = 3)	-	MAPE = 56
		MAD = 2.876
		MSD = 18.622.774

Fonte: Elaborada pelo autor (2020)

**Tabela 4** - Previsão de venda de carros elétricos (2020-2030).

Método	Previsão
Winters Multiplicativo	2020 = 108
	$\alpha$ (nível) = 0,2
	$\gamma$ (tendência) = 0,2
	$\beta$ (ajuste sazonal) = 0,2
	2021 = 2.191
	2022 = 3.112
	2023 = 3.059
	2024 = 4.039
	2025 = 12.592
	2026 = 15.685
2027 = 48.455	
2028 = 221	
2029 = 4.223	

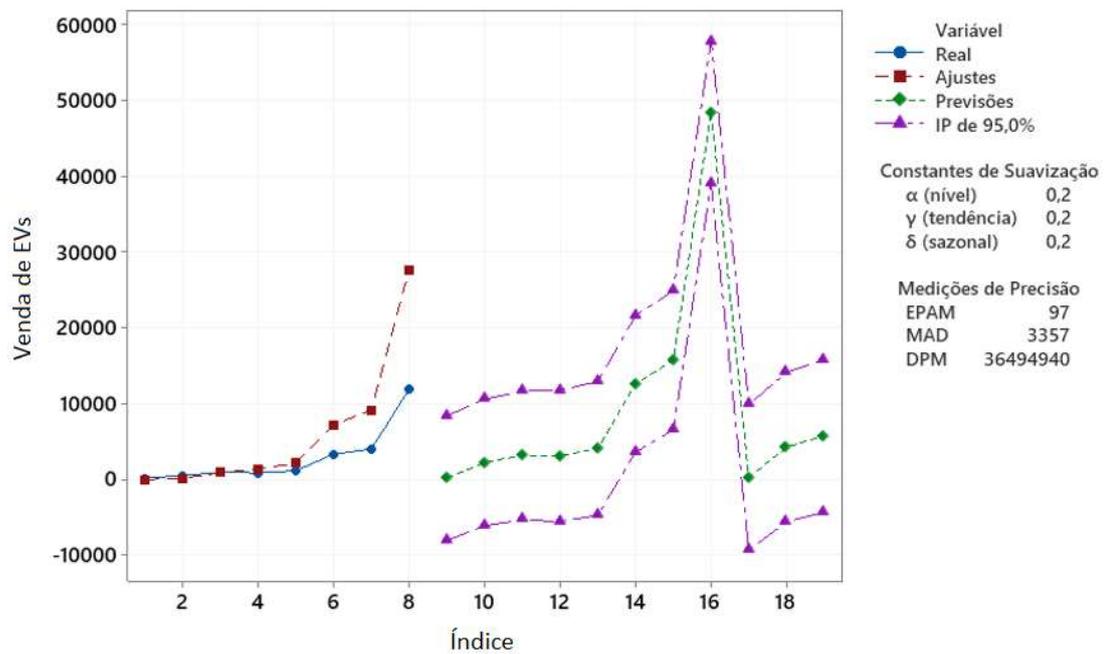
	2030 = 5.698
ARIMA	2020 = 16.572
$\alpha$ (nível) = 0,28663	2021 = 25.261
$\gamma$ (tendência) = 4,32845	2022 = 33.949
	2023 = 42.637
	2024 = 51.326
	2025 = 60.014
	2026 = 68.702
	2027 = 77.390
	2028 = 86.079
	2029 = 94.767
	2030 = 103.455
Médias Móveis (tamanho = 3)	2020 = 6.375
	2021 = 6.375
	2022 = 6.375
	2023 = 6.375
	2024 = 6.375
	2025 = 6.375
	2026 = 6.375
	2027 = 6.375
	2028 = 6.375
	2029 = 6.375
	2030 = 6.375

---

Fonte: Elaborada pelo autor (2020)

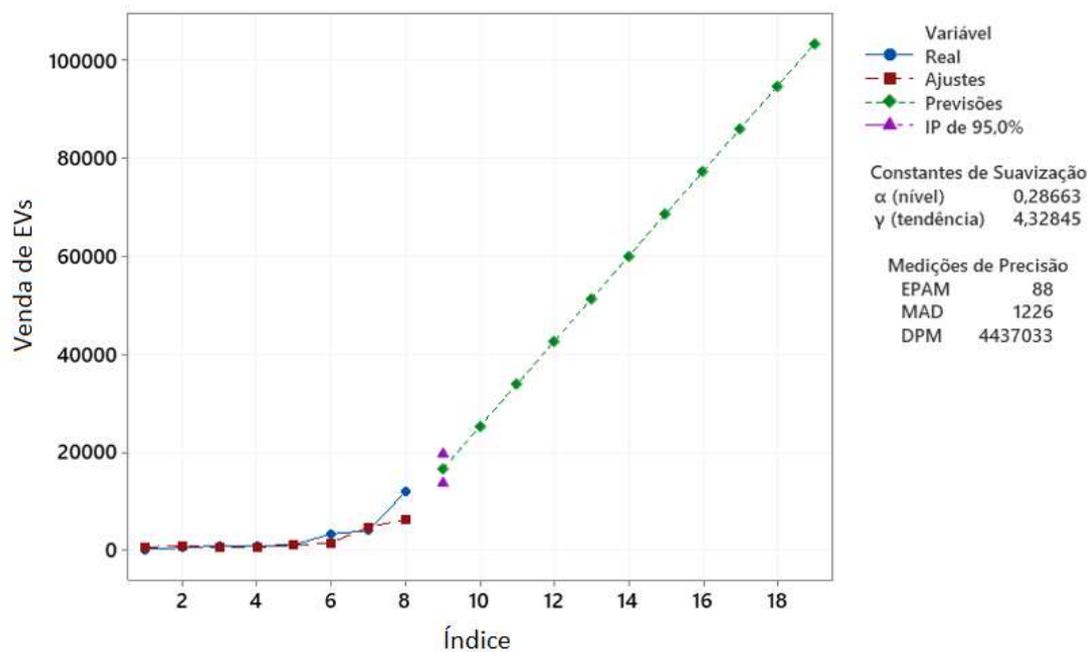
Os resultados mostram que a suavização exponencial dupla utilizando ARIMA é o método mais adequado para os dados de vendas de carros elétricos, devido ao menor conjunto de erros/desvios. Apesar de o MAPE (erro percentual absoluto) dos dados obtidos através de médias móveis ter sido relativamente menor que o MAPE obtido com o método ARIMA, o MAD (desvio médio absoluto) e o MSD (desvio padrão máximo) foram menores para a projeção utilizando ARIMA, em todos os cenários. As Figuras 2, 3 e 4 apresentam os dados ajustados para os três métodos utilizados.

**Figura 2** - Gráfico do modelo Winters para vendas anuais de EVs – método multiplicativo.



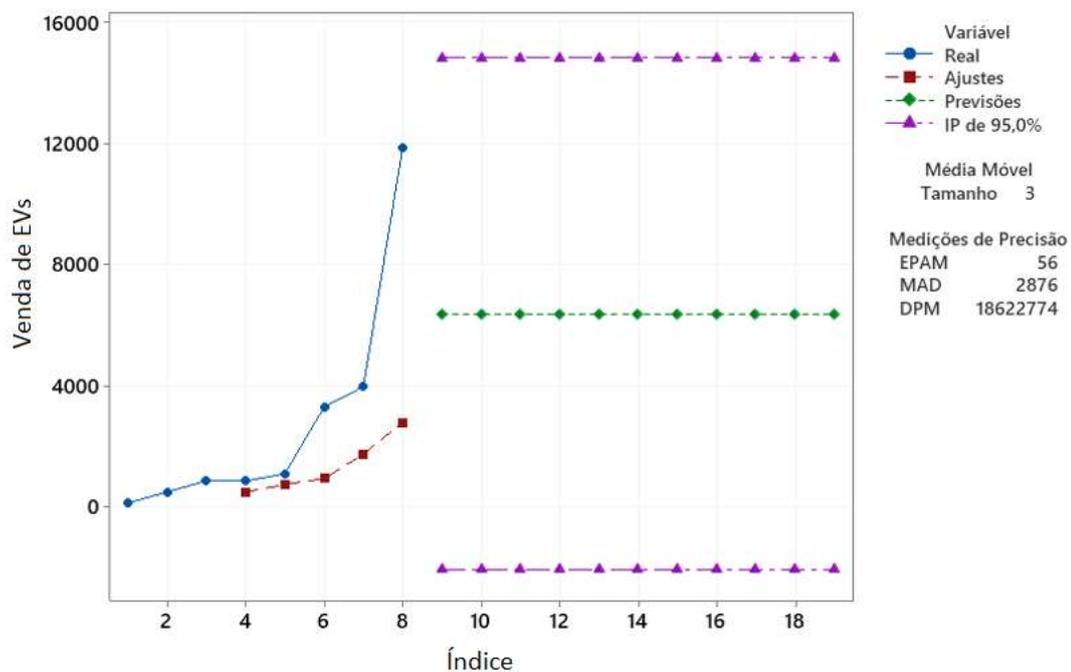
Fonte: Elaborada pelo autor (2020)

**Figura 3** - Gráfico do modelo ARIMA para vendas anuais de EVs.



Fonte: Elaborada pelo autor (2020)

**Figura 4** - Gráfico do modelo de Médias Móveis para vendas anuais de EVs.



Fonte: Elaborada pelo autor (2020)

### Vida útil - LIBs

A quantidade de ciclos de uma bateria varia de acordo com o nível de consumo elétrico a qual ela está submetida. Uma bateria de íon-lítio operando com 100% de sua corrente nominal de descarga atinge uma faixa de 300 a 500 ciclos (COBO, 2019). Nesse trabalho, será assumida a quantidade de ciclos de uma LIB como a média entre os valores limites da faixa estabelecida, ou seja, 400 ciclos. Sabendo-se que 1 ciclo de uma LIB corresponde a uma autonomia do EV de, aproximadamente, 416 km e que a média de circulação anual de um veículo no Brasil é de 13.059 km, foi possível estimar o tempo de vida útil de uma LIB para a realidade de tráfego brasileira (Equações 1 e 2).

$$C_{LIB} = 400 \quad AT = 416$$

$$K_{LIB} = ? \quad T_{VU} = ? \quad K_B = 13.059$$

$$K_{LIB} = C_{LIB} \times AT \quad (\text{Equação 1})$$

$$K_{LIB} = 400 \times 416$$

$$K_{LIB} = 166.400$$

$$T_{VU} = K_{LIB} / K_B \quad (\text{Equação 2})$$

$$T_{VU} = 166.400 / 13.059$$

$$T_{VU} = 12,7$$

onde  $C_{LIB}$  – quantidade de ciclos correspondente a vida útil de uma LIB;  $AT$  – autonomia correspondente a 1 ciclo de uma LIB, em km;  $K_B$  – quilometragem média anual percorrida no Brasil, em km/ano;  $K_{LIB}$  – quilometragem total correspondente a vida útil de uma LIB, em km;  $T_{VU}$  – tempo de vida útil de uma LIB, em anos.

Assim, para a situação de tráfego brasileira, estima-se que o tempo de vida útil médio de uma bateria de íon-lítio é de 12 anos.

### *Sucata de LIBs*

Por fim, combinando a vida útil das LIBs às projeções da quantidade de EVs que circularão no mercado até 2030, obtidas com o modelo ARIMA, estimou-se a quantidade de sucatas de baterias geradas. Considera-se que, para cada carro novo, é fabricada uma LIB que será substituída a cada 12 anos. Portanto, além da sucata gerada, deve ser fabricada uma nova bateria para reposição.

No Brasil, considerando a realidade dos veículos a combustão, um carro é considerado muito antigo (sucata) quando não é mais necessário ter licença do Departamento Nacional de Trânsito (DETRAN). E, este período varia entre 10 e 20 anos, de acordo com a legislação de cada Estado. Assim, devido à falta de dados empíricos relativos aos EVs no Brasil, e levando em consideração o tempo de vida útil de um CV, considera-se que dificilmente um veículo elétrico terá vida útil superior a 30 anos. Portanto, a Equação 3 sintetiza o modelo matemático utilizado para projeção de sucatas de baterias de EVs. A Tabela 5 apresenta os resultados referentes à previsão de sucatas de LIB, até 2040. E, a Figura 5 mostra a comparação entre as vendas anuais de carros e a quantidade de sucatas de LIB produzidas no mesmo período.

$$QTS_X = \sum(QTB_{X-12} + QTB_{X-24}) \quad (\text{Equação 3})$$

onde  $QTS_X$  – quantidade de sucatas de baterias geradas, no ano X;  $QTB_X$  – quantidade de baterias produzidas, no ano X.

**Tabela 5** - Previsão da geração de sucatas de LIB (2020-2040).

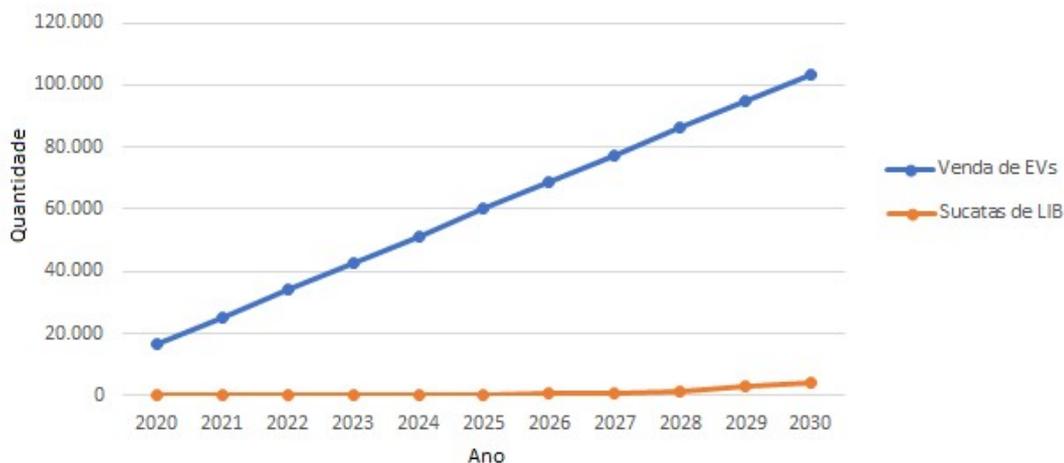
<b>Tempo</b>	<b>Novas LIBs/EVs</b>	<b>Novas LIBs repostas</b>	<b>Novas LIBs repostas</b>	<b>Total de novas LIBs</b>	<b>Sucatas</b>
<b>(Ano)</b>	<b>0 Ano</b>	<b>12 Anos</b>	<b>24 Anos</b>		
2012	117	-	-	117	-
2013	491	-	-	491	-
2014	855	-	-	855	-
2015	846	-	-	846	-
2016	1.091	-	-	1.091	-
2017	3.296	-	-	3.296	-
2018	3.970	-	-	3.970	-
2019	11.858	-	-	11.858	-
2020	<i>16.572</i>	-	-	16.572	-
2021	<i>25.261</i>	-	-	25.261	-
2022	<i>33.949</i>	-	-	33.949	-
2023	<i>42.637</i>	-	-	42.637	-
2024	<i>51.326</i>	117	-	51.443	<b>117</b>
2025	<i>60.014</i>	491	-	60.505	<b>491</b>
2026	<i>68.702</i>	855	-	69.557	<b>855</b>
2027	<i>77.390</i>	846	-	78.236	<b>846</b>
2028	<i>86.079</i>	1.091	-	87.170	<b>1.091</b>
2029	<i>94.767</i>	3.296	-	98.063	<b>3.296</b>
2030	<i>103.455</i>	3.970	-	107.425	<b>3.970</b>
2031	-	11.858	-	11.858	<b>11.858</b>
2032	-	16.572	-	16.572	<b>16.572</b>
2033	-	25.261	-	25.261	<b>25.261</b>
2034	-	33.949	-	33.949	<b>33.949</b>
2035	-	42.637	-	42.637	<b>42.637</b>
2036	-	51.326	117	51.443	<b>51.443</b>
2037	-	60.014	491	60.505	<b>60.505</b>
2038	-	68.702	855	69.557	<b>69.557</b>
2039	-	77.390	846	78.236	<b>78.236</b>
2040	-	86.079	1.091	87.170	<b>87.170</b>

Fonte: Elaborada pelo autor (2020)

Os números em *itálico* representam a quantidade de baterias/veículos projetados através do modelo matemático.

Os números em **negrito** indicam a quantidade de sucatas de LIB projetadas referente a estimativa de EVs.

**Figura 5** - Gráfico do crescimento de vendas de EVs em comparação com a quantidade de sucatas de LIB geradas.



Fonte: Elaborada pelo autor (2020)

Apesar da comercialização de EVs no Brasil ter se iniciado, efetivamente, em 2012, as primeiras sucatas de LIB só surgirão em meados de 2024. Esses resultados refletem, de certa forma, a falta de preocupação do mercado em desenvolver tecnologias de reciclagem para estas baterias, uma vez que ainda não se trata de um problema de curto prazo. Até 2030, serão produzidas 10.666 sucatas de LIB, número este que deverá chegar a 477.188 sucatas, na década seguinte. No entanto, o planejamento com a estimativa de geração de resíduos deve ser trabalhado, de maneira antecipada, e não apenas quando o problema já estiver estabelecido.

A partir da Figura 5, fica evidenciada a defasagem entre as projeções de venda de EVs e a de produção de sucatas de LIB. Devido aos 12 anos de vida útil das baterias, a geração de sucatas se comporta como um efeito rebote às vendas dos veículos. Comportamento diferente das baterias chumbo-ácido, que por terem uma vida útil de aproximadamente 3 anos, faz com que os carros troquem de baterias uma maior quantidade de vezes, em um menor intervalo de tempo, levando a um efeito cascata na geração de resíduos, como descrito no trabalho de Neto et al. (2016). No caso da produção de sucatas de LIB, existe o aspecto positivo que é a existência de tempo para um correto planejamento quanto a destinação final desses resíduos. No entanto, existe a preocupação de que por não ser um problema de curto prazo, a solução para o gerenciamento das sucatas de LIB seja adiada com consequências imprevisíveis.

Devido às dificuldades tecnológicas de reciclagem das LIBs, existe uma frente de pesquisa que prega sua reutilização em outros dispositivos eletroeletrônicos (segunda vida)

que demandem menos energia que o dispositivo para o qual foi dimensionada originalmente (ASSUNÇÃO, 2016). Mesmo para fins de reutilização, é importante realizar o gerenciamento das sucatas de maneira adequada, uma vez que serão necessárias adaptações mecânicas, de recarga, etc., que podem representar impactos ao meio ambiente.

Por fim, a falta de uma diretriz que trate, especificamente, das baterias de íon-lítio, leva não apenas a falta de planejamento, mas favorece também um gerenciamento deficiente e descarte inadequado das sucatas de LIB. Ainda, considerando o que já acontece no Brasil, há possibilidade de surgimento de recicladoras clandestinas, desprovidas de cuidados ambientais e de segurança do trabalho, como mostram as pesquisas de Faria e Oliveira (2019) e Caetano et al. (2019).

## **Conclusão**

Considerada uma etapa crucial do GRS, o planejamento, para ser realizado de maneira adequada, requer um diagnóstico confiável da quantidade e tipo de resíduos gerados. A quantificação de resíduos especiais, como as sucatas de baterias oriundas de veículos elétricos são pesquisas emergentes no Brasil. Através de um modelo matemático de séries temporais, combinado a informações de vendas de EVs, tempo de vida útil da LIB e perfil de quilometragem percorrida, esse estudo estima a quantidade de sucatas de baterias de íon-lítio. Através do ajuste estatístico dos coeficientes de precisão, os resultados indicam que séries temporais são aderentes aos processos de predição tanto de dados de vendas veiculares, quanto para projeções de sucatas de LIB. Dentre os modelos analisados, o ARIMA é o que demonstrou maior assertividade, por apresentar os menores erros. As previsões da quantidade anual de EVs vendidos (2020-2030), bem como, a previsão anual de sucatas de LIB (2020-2040), indicaram que o número de sucatas de baterias geradas é bastante defasado dos dados de vendas dos veículos, comprovando o efeito retardatário na geração destes resíduos (efeito rebote).

Outra importante contribuição desta pesquisa é a metodologia empregada para determinar o tempo de vida útil das baterias. Como as LIBs têm seu tempo de vida determinado pela quantidade de ciclos, e que o ciclo corresponde a um determinado tempo de autonomia do veículo, é esperado que a depender do perfil de quilometragem percorrida de cada país e/ou região, estas baterias durem mais ou menos tempo. Assim, este modelo pode ser utilizado para calcular o tempo de duração de uma LIB em qualquer outro país/região, utilizando dados próprios do perfil de quilometragem de cada localidade.

Por fim, com base nas predições de geração de sucatas de LIB, obtêm-se informações relevantes para a tomada de decisão no sistema de GRS. Os resultados possibilitam a implementação de programas de logística reversa para a indústria de baterias, para a indústria de reciclagem de sucatas e para o poder público, destacando a importância da criação de políticas de regulamentação para este novo mercado de baterias.

## 5 CONCLUSÃO

As principais conclusões do estudo em questão apontam que o benefício ambiental promovido pelos EVs não é uma verdade absoluta. Embora ainda sejam poucos os estudos que enfatizem os desafios e impactos ambientais a serem superados pela tecnologia, o estudo demonstrou que o assunto vem ganhando cada vez mais evidência no meio científico e que as vantagens atribuídas aos veículos elétricos dependem de uma série de fatores, como a participação de fontes fósseis no mix de geração de energia, a baixa eficiência das tecnologias de conversão em eletricidade, o alto peso dos bancos de baterias, entre outros fatores.

Além disso, pode-se concluir que, de fato, não existe nenhuma tecnologia considerada a melhor opção, pois, para cada região, pode haver uma solução mais adequada às variáveis locais. Assim, das diversas tecnologias observadas, entre elas, a eletrificação, os veículos híbridos, os movidos a biocombustíveis, e mesmo os combustíveis fósseis, a diversificação da frota é considerada a alternativa mais viável, pois, desta forma, pode-se trabalhar em paralelo com várias realidades.

## REFERÊNCIAS

- ADEPETU, A.; KESHAV, S. The relative importance of price and driving range on electric vehicle adoption: Los Angeles case study. **Transportation**, 44, p. 353-373, 2017.
- AFONSO, J. C.; BUSNARDO, R. G.; BUSNARDO, N. G. Baterias de lítio: novo desafio para a reciclagem. **Ciência Hoje**, Instituto de Química da Universidade Federal do Rio de Janeiro, 35, p. 72-75, 2015.
- ALGHAZO, J.; OUDA, O. K. M.; HASSAN, A. EL. E-waste environmental and information security threat: GCC countries vulnerabilities. **Euro-Mediterranean Journal for Environmental Integration**, 3, p. 1-10, 2018.
- ALI, A. A. M. M. Environmental Life Cycle Assessment of a Residential Building in Egypt: A Case Study. **Procedia Technology**, 19, p. 349-356, 2015.
- ANEEL. **Chamada de Projeto de P&D Estratégico nº 022/2018**: Desenvolvimento de Soluções em Mobilidade Elétrica Eficiente. MME, Brasília, 2018.
- \_\_\_\_\_. **Matriz de Capacidade de Geração e Operação do Brasil**. MME, Brasília, 2019.
- ANFAVEA. **Estatísticas de Veículos**, 2015. Disponível em: <http://www.anfavea.com.br/estatisticas-2015.html>.
- \_\_\_\_\_. **Estatísticas de Veículos**, 2019. Disponível em: <http://www.anfavea.com.br/estatisticas-2019.html>.
- ASHNANI, M. H. M.; MIREMADI, T.; JOHARI, A.; DANEKAR, A. Environmental Impact of Alternative Fuels and Vehicle Technologies: A Life Cycle Assessment Perspective. **Procedia Environmental Sciences**, 30, p. 205-210, 2015.
- ASSUNÇÃO, A. R. S. **Viabilidade técnica e económica da reutilização de baterias de veículos elétricos integradas com sistemas fotovoltaicos no sector residencial**. FCTUC, Universidade de Coimbra, 2016.
- AUTRIQUE. **Camille Jenatzy & La Jamais Contente**. 2017. Disponível em: <http://www.autrique.be/en/calendar/exhibitions/event/373-camille-jenatzy-la-jamais-contente>. Acesso em: 12 jul. 2018.
- BADGER, K. **The Effects of End-of-Life Electric Car Lithium Batteries on the Waste Stream, EPR Programs, and the Reverse Supply Chain**. Texas Christian University, p. 1-43, 2015.
- BARAN, R. **A introdução de veículos elétricos no Brasil: avaliação do impacto no consumo de gasolina e eletricidade**. UFRJ, Rio de Janeiro, 2012.
- BBC. **Por que terminamos usando gasolina se já tínhamos carros elétricos e a vapor?**. British Broadcasting Corporation, São Paulo, 2016.
- BCG. **Carro Elétrico no Brasil**. Boston Consulting Group, São Paulo, 2019.
- BENAJES, J.; GARCÍA, A.; MONSALVE-SERRANO, J.; MARTÍNEZ-BOGGIO, S.

Optimization of the parallel and mild hybrid vehicle platforms operating under conventional and advanced combustion modes. **Energy Conversion and Management**, 190, p. 73-90, 2019.

BNEF. **Electric Vehicle Outlook 2018**. Bloomberg New Energy Finance, New York, 2018.

BRASIL. **Lei 12.305/2010**, de 2010. Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS).

\_\_\_\_\_. **Lei 12.715**, de 2012. Programa de Incentivo à Inovação Tecnológica e Adensamento da Cadeia Produtiva de Veículos Automotores.

\_\_\_\_\_. **Lei 13.755**, de 2018. Programa Rota 2030 - Mobilidade e Logística.

CAETANO, M. O.; LEON, L. G.; PADILHA, D. W.; GOMES, L. P. Análises de risco na operação de usinas de reciclagem de resíduos eletroeletrônicos (REEE). **Gestão e Produção**, 26. n. 2, 2019.

CASALS, L. C.; GARCÍA, B. A.; CREMADES, L. V. Electric vehicle battery reuse: Preparing for a second life. **Journal of Industrial Engineering and Management**, 10, p. 266-285, 2017.

CASTRO, B. H. R. D.; FERREIRA, T. T. **Veículos elétricos**: aspectos básicos, perspectivas e oportunidades. **BNDES Setorial**, 32, p. 267-310, 2010.

CASTRO, C. P.; CONSONI, F. L. Diagnóstico dos cenários de manejo ambiental do uso e disposição final de baterias de lítio de veículos elétricos. **Revista Científica E-Locução**, 1(17), 19, 2020.

CHANG, N-B.; PAN, Y. C.; HUANG, S. D. Time series forecasting of solid waste generation. **J Resour Manag Technol**, 21, p. 1-10, 1993.

CHANG, N-B.; LIN, Y. T. An analysis of recycling impacts on solid waste generation by time series intervention modeling. **Resour Conserv Recycl**, 19, p. 165-186, 1997.

CHANG, H. Research gaps related to the environmental impacts of electronic cigarettes. **Tobacco Control**, 23. n. SUPPL. 2, p. 54-58, 2014.

CHEN, H. W.; CHANG, N-B. Prediction of solid waste generation via grey fuzzy dynamic modeling. **Resour Conserv Recycl**, 29, p. 1-18, 2000.

CHEN, H.; LI, A.; FINLOW, D. The lead and lead-acid battery industries during 2002 and 2007 in China. **J Power Sources**, 191, p. 22-27, 2009.

CHESF. **Relatório da Administração 2018**. Companhia Hidro Elétrica do São Francisco, Recife, 2019.

CHEVROLET. **Ficha Técnica do Bolt EV**. GM, Mogi das Cruzes, 2020.

CNA. **Panorama do Agro**. Confederação da Agricultura e Pecuária do Brasil, Brasília, 2020.

COBO, P. A. **Converter design with current-doubler and synchronous rectification for LiFePO<sub>4</sub> battery charging**. Universidad de Cantabria, 2019.

CONTE, A. A. Reverse logistic, recycling and eco-efficiency of the batteries: review. **RBCIAMB**, n.39, p. 124-139, 2016.

CONTESTABILE, M.; PANERO, S.; SCROSATI, B. A Laboratory-Scale Lithium-Ion Battery Recycling Process. **Journal of Power Sources**, 92. n. 1-2, p. 65-69, 2001.

COSTA, V. B. S.; SILVA, W. J. M. S.; ALMEIDA, G. M. A.; FERREIRA, M. H. G.; OLIVEIRA, T. H.; GALVÍNCIO, J. D.; PIMENTEL, R. M. M. Influence of Air Pollution in Terminalia catappa L. in Urban Areas. **Revista Brasileira de Geografia Física**, 08. n. 02, p. 236-252, 2015.

CPRM. **Projeto Avaliação do Potencial do Lítio no Brasil**, 2018. Disponível em: [http://rigeo.cprm.gov.br/jspui/bitstream/doc/17648/1/ evento\\_litio\\_brasil.pdf](http://rigeo.cprm.gov.br/jspui/bitstream/doc/17648/1/evento_litio_brasil.pdf).

CSPower. **Baterias de Chumbo-Ácido São Recicláveis?**. 2009. Disponível em: <http://pt.cspowerbattery.com/industry-155457>. Acesso em: 10 mar. 2020.

DANIELL, W. E.; VAN-TUNG, L.; WALLACE, R. M.; HAVENS, D. J.; KARR, C. J.; DIEP, N. B.; CROTEAU, G. A.; BEAUDET, N. J.; BAO, N. D. Childhood lead exposure from battery recycling in Vietnam. **BioMed Res Int**, p. 1-10, 2015.

DINGER, A.; MARTIN, R.; MOSQUET, X.; RIZOULIS, D.; RUSSO, M.; STICHER, G. **Batteries for electric cars: challenges, opportunities, and the outlook to 2020**. Focus BCG, 2010.

DJEKIC, I. Environmental Impact of Meat Industry – Current Status and Future Perspectives. **Procedia Food Science**, 5, p. 61-64, 2015.

DNPM. **Lítio**, 2017. Disponível em: [http://www.anm.gov.br/dnpm/publicacoes/serie-estatisticas-e-economia-mineral/sumario-mineral/sumario-brasileiro-mineral-2017/litio\\_sm\\_2017.pdf](http://www.anm.gov.br/dnpm/publicacoes/serie-estatisticas-e-economia-mineral/sumario-mineral/sumario-brasileiro-mineral-2017/litio_sm_2017.pdf).

DU, J.; LIU, Y.; MO, X.; LI, Y.; LI, J.; WU, X.; OUYANG, M. Impact of high-power charging on the durability and safety of lithium batteries used in long-range battery electric vehicles. **Applied Energy**, 255, 113793, 2019.

ECYCLE. **Como a combustão nos veículos gera gases poluentes**. eCycle Epartners, São Paulo, 2016.

EDP. **Rede de recarga ultrarrápida de veículos elétricos do Brasil**. Distribuidora de Energia EDP São Paulo, 2019.

EGEDE, P. Life cycle assessment of electric vehicles - A framework to consider influencing factors. **Procedia CIRP**, 29, p. 233-238, 2015.

ELAVARASAN, G.; KANNAN, M.; KARTHIKEYAN, D. Reasons to Reduce Our Reliance upon Crude Oil Based Internal Combustion Engines. **International Journal of Scientific Research & Engineering Trends**, 5, p. 713-717, 2019.

ELETROBRAS. **Angra 1**. Eletrobras Eletronuclear, Rio de Janeiro, 2020.

EPE. **Anuário Estatístico de Energia Elétrica 2019**. MME, Rio de Janeiro, 2019.

\_\_\_\_\_. **Matriz Energética e Elétrica**. MME, Rio de Janeiro, 2018.

FAGAN, A.; SIRCAR, I. Europeanisation and multi-level environmental governance in a post-conflict context: the gradual development of environmental impact assessment processes in Bosnia-Herzegovina. **Environment and Planning C: Government and Policy**, 33. n. 5, p. 919-934, 2015.

FARIA, D. A. O.; OLIVEIRA, A. L. Considerações sobre o descarte e reciclagem de pilhas e baterias no Brasil. **Revista Interface Tecnológica**, 16. n. 2, 2019.

FEM. **O impacto de carros autônomos em grandes cidades**. BCG, 2016. Disponível em: <https://www.bcg.com/pt-br/d/news/26july2016-estudo-mostra-impacto-de-carros-autonomos-em-grandes-cidades-75715>.

FGV. **O mercado de veículos elétricos no Brasil: os avanços e as lições aprendidas**. FGV Energia, Rio de Janeiro, 2018.

GALIVEETI, H. R.; GOSWAMI, A. K.; DEV CHOUDHURY, N. B. Impact of plug-in electric vehicles and distributed generation on reliability of distribution systems. **Engineering Science and Technology, an International Journal**, 21. n. 1, p. 50-59, 2018.

GM. **Ficha Técnica do Bolt EV**. 2020. Disponível em: <https://www.chevrolet.com.br/carros/bolt-ev>. Acesso em: 13 de maio de 2020.

GÓMEZ, J. M.; CHAMON, P. H.; LIMA, S. B. Towards a new world energy order? potentialities and perspectives of the energy issue between the BRICS countries. **Contexto Internacional**, Rio de Janeiro, 34, n. 2, 2012.

GUPT, Y. Economic instruments and the efficient recycling of batteries in Delhi and the National Capital Region of India. **Environment and Development Economics**, 20, p. 236-258, 2014.

GUPT, Y.; SAHAY, S. Managing used lead acid batteries in India: evaluation of EPR-DRS approaches. **Journal of Health and Pollution**, 5, p. 52-63, 2015.

HAEFLIGER, P.; MATHIEU-NOLF, M.; LOCICIRO, S.; NDIAYE, C.; COLY, M.; DIOUF, A.; LAM-FAYE, A.; SOW, A.; TEMPOWSKI, J.; PRONCZUK, J.; FILIPE-JUNIOR, A.; BERTOLLINI, R.; NEIRA, M. Mass lead intoxication from informal used lead-acid battery recycling in Dakar, Senegal. **Environ Health Perspect**, 117, p. 1535-1540, 2009.

HARRISON, G.; THIEL, C. An exploratory policy analysis of electric vehicle sales competition and sensitivity to infrastructure in Europe. **Technological Forecasting and Social Change**, 114, p. 165-178, 2017.

HE, K.; WANG, S.; ZHANG, J. Blood lead levels of children and its trend in China. **Sci Total Environ**, 407, p. 3986-3993, 2009.

- HOFFMANN, J. E. Recovery of Precious Metals from Electronic Scrap. **Journal of Metals**, 44, p. 43-48, 1992.
- HOYER, K. G. The history of alternative fuels in transportation: The case of electric and hybrid cars, **Utilities Policy**, 16, p. 63-71, 2008.
- IEC. **Norm IEC 62133-2:2017** - Lithium systems, 2017. Disponível em: <https://webstore.iec.ch/publication/32662>. Acesso em: 13 mai. 2020.
- IMANI, M. H. Impact Evaluation of Electric Vehicle Parking on Solving Security-Constrained Unit Commitment Problem. **Math Comput Appl**, 23, p. 1-13, 2018.
- IMPINNISI, P. R. **Baterias para VE**. Oficina de trabalho sobre veículos elétricos. BNDES, Rio de Janeiro, 2010.
- INVESTING. **Commodities: Crédito Carbono Futuros (CFI2Z0)**. Fusion Media Limited, Tortola, 2020.
- IPCC. **AR5 Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change**. Fifth Assessment Report – Working Group III from Intergovernmental Panel on Climate Change, 2014.
- ITEMM. **Hibridização veicular**, 2016. Disponível em: <http://www.itemm.org.br/informes-tecnicos/hibridizacao-veicular-2/>.
- JATOBÁ. **A diferença entre carros híbridos e elétricos**. Universo Jatobá, São Paulo, 2014.
- Ji, S. Electric vehicles in China: emissions and health impacts. **Environmental Science and Technology**, 46, p. 2018-2024, 2012.
- KBB BRASIL. **Você sabe quanto a quilometragem impacta o preço do carro usado?**. Kelley Blue Book, São Paulo, 2019.
- KHAN, S. A. R.; ZAMAN, K.; ZHANG, Y. The relationship between energy-resource depletion, climate change, health resources and the environmental Kuznets curve: Evidence from the panel of selected developed countries. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, 62, p. 468-477, 2016.
- KIM, S.; YANG, D.; RHEE, K. Recycling process of spent battery modules in used hybrid electric vehicles using physical / chemical treatments. **Research on Chemical Intermediates**, 40, p. 2447-2456, 2014.
- KUMAR, D.; NEMA, R. K.; GUPTA, S. A comparative review on power conversion topologies and energy storage system for electric vehicles. **International Journal of Energy Research**, 44, p. 7863-7885, 2020.
- LAKATOS, E. M.; MARCONI, M. A. **Fundamentos de metodologia científica**. Atlas., v. 5, São Paulo, 2003.
- LEBRET, E. Integrated environmental health impact assessment for risk governance purposes; across what do we integrate? **International Journal of Environmental Research and Public Health**, 13. n. 1, p. 1-15, 2015.

- LI, T. Literature review of tire-pavement interaction noise and reduction approaches. **Journal of Vibroengineering**, 20, p. 2424-2453, 2018.
- LI, Y.; DAVIS, C.; LUKSZO, Z.; WEIJNEN, M. Electric vehicle charging in China's power system: Energy, economic and environmental trade-offs and policy implications. **Applied Energy**, 173. n. 2016, p. 535-554, 2016.
- LI, Y. Infrastructure to Facilitate Usage of Electric Vehicles and its Impact. **Transportation Research Procedia**, 14, p. 2537-2543, 2016.
- LIN, C. Multi-objective optimization design for a battery pack of electric vehicle with surrogate models. **Journal of Vibroengineering**, 18, p. 2343-2359, 2016.
- LINDEN, D.; REDDY, T. B. **Handbook of Batteries**. McGraw-Hill Handbooks, 2008. cap. 34-35.
- LINDGREN, J.; LUND, P. D. Identifying bottlenecks in charging infrastructure of plug-in hybrid electric vehicles through agent-based traffic simulation. **International Journal of Low-Carbon Technologies**, 10, p. 110-118, 2015.
- MALLIG, N.; HEILIG, M.; WEISS, C.; CHLOND, B.; VORTISCH, P. Modelling the weekly electricity demand caused by electric cars. **Future Generation Computer Systems**, 64. n. Ant, p. 140-150, 2016.
- MARCEL, D. **Crise dos combustíveis?** Primeiros veículos eram movidos a energia elétrica, 2016.
- MCKENZIE, E. General exponential smoothing and the equivalent ARMA process. **J Forecast**, 3, p. 333-344, 1984.
- MESSAGIE, M. Environmental and financial evaluation of passenger vehicle technologies in Belgium. **Sustainability (Switzerland)**, 5. n. 12, p. 5020-5033, 2013.
- MORALES, G. Ei scale - an environmental impact assessment scale related to the construction materials used in the reinforced concrete. **Brazilian Archives of Biology and Technology**, 53. n. 6, p. 1511-1518, 2010.
- MORETTIN, P. A.; TOLOI, C. M. **Análise de séries temporais**. 2a edição, São Paulo: Blucher, 2006.
- MORIARTY, P.; WANG, S. J. Can Electric Vehicles Deliver Energy and Carbon Reductions? **Energy Procedia**, 105, p. 2983-2988, 2017.
- MORO, A.; LONZA, L. Electricity carbon intensity in European Member States: Impacts on GHG emissions of electric vehicles. **Transportation Research Part D: Transport and Environment**, 64, p. 5-14, 2017.
- MOURA. **Tendências do Mercado Automotivo**. Acumuladores Moura, Recife, 2019.
- MULHOLLAND, E. The cost of electrifying private transport – Evidence from an empirical consumer choice model of Ireland and Denmark. **Transportation Research Part D: Transport and Environment**, 62, p. 584-603, 2018.

- NAVARRO-ESBRI, J.; DIAMADOPOULOS, E.; GINESTAR, D. Time series analysis and forecasting techniques for municipal solid waste management. **Resour Conserv Recycl**, 35, p. 201-214, 2002.
- NAZRI, G. A.; PISTOIA, G. Lithium Batteries: Science and Technology. **Springer Science Business Media**. Estados Unidos, p. 1-35; 315-442; 545-617, 2003.
- NEJAD, M. M. Online scheduling and pricing for electric vehicle charging. **Journal IISE Transactions**, 49, p. 178-193, 2017.
- NETO, J. C.; SILVA, M. M.; SANTOS, S. M. A time series model for estimating the generation of lead acid battery scrap. **Clean Technologies and Environmental Policy**, 18, n. 6, p. 1931-1943, 2016.
- NOGUCHI, T.; ITAI, T.; MINH-TUE, N.; AGUSA, T.; NGOC-HA, N.; HORAI, S.; TRANG, P.; VIET, P.; TAKAHASHI, S.; TANABE, S. Exposure assessment of lead to workers and children in the battery recycling craft village, Dong Mai, Vietnam. **J Mater Cycles Waste Manag**, 16, p. 46-51, 2014.
- PAOLIELLO, M.; DE CAPITANI, E. Occupational and environmental human lead exposure in Brazil. **Environmental Research**, 103, p. 288-297, 2007.
- PERUJO, A.; THIEL, C.; NEMRY, F. Electric vehicles in urban context: environmental benefits and techno-economic barriers. **Electric vehicles**, 1, p. 19-34, 2011.
- PINDYCK, R. S.; RUBINFELD, D. L. **Econometric models and economic forecasts**. New York: McGraw-Hill Book Company, 1998.
- RAMOS, G. D. O.; BURGUILLO, J. C.; BAZZAN, A. L. C. A self-adapting similarity-based coalition formation approach for plug-in electric vehicles in smart grids. **Multiagent and Grid Systems**, 11, p. 167-187, 2015.
- RIBEIRO, J. M.; MACÁRIO, R.; REIS, V. Soluções mitigadoras das emissões poluentes nos aeroportos. In: PLURIS 2010 - Congresso Luso-Brasileiro para o Planeamento Urbano, Regional, Integrado, Sustentável, 4, 2010. **Anais**. Faro: Universidade do Algarve, 2010.
- ROSATO, A.; SIBILIO, S.; CIAMPI, G.; ENTCHEV, E.; RIBBERINK, H. Energy, Environmental and Economic Effects of Electric Vehicle Charging on the Performance of a Residential Building-integrated Micro-trigeneration System. **Energy Procedia**, 111, n. September 2016, p. 699-709, 2017.
- ROSS, C.; GUHATHAKURTA, S. Autonomous Vehicles and Energy Impacts: A Scenario Analysis. **Energy Procedia**, 143, p. 47-52, 2017.
- RUIZ, V.; PFRANG, A.; KRISTON, A.; OMAR, N.; VAN DEN BOSSCHE, P.; BOON-BRETT, L. A review of international abuse testing standards and regulations for lithium ion batteries in electric and hybrid electric vehicles. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, 81, n. May 2017, p. 1427-1452, 2018.
- SANTOS, M. S.; CABRAL NETO, J.; SILVA, M. M. Forecasting model to assess the potential of secondary lead production from lead acid battery scrap. **Environmental**

**Science and Pollution Research**, 26, p. 5782-5793, 2019.

SÃO PAULO. **Lei Municipal PL 300/2017**, de 2017. Câmara Municipal de São Paulo.

SCHNEIDER, M.; STENGER, A. The Electric Vehicle-Routing Problem with Time Windows and Recharging Stations. **Transportation Science**, 48, p. 465-694, 2014.

SHAFIE, F. A.; OMAR, D.; KARUPPANNAN, S. Environmental Health Impact Assessment and Urban Planning. **Procedia - Social and Behavioral Sciences**, 85, p. 82-91, 2013.

SHEIKHAN, M.; PARDIS, R.; GHARAVIAN, D. State of charge neural computational models for high energy density batteries in electric vehicles. **Neural Comput & Applic**, v. 22, p. 1171-1180, 2013.

SHI, R.; LI, S.; ZHANG, P.; LEE, K. Y. Integration of renewable energy sources and electric vehicles in V2G network with adjustable robust optimization. **Renewable Energy**, 153, p. 1067-1080, 2020.

SOARES, L. H. B.; ALVES, B. J. R.; URQUIAGA, S.; BODDEY, R. M. **Mitigação das emissões de gases de efeito estufa pelo uso de etanol da cana-de-açúcar produzido no Brasil**. Seropédica: Embrapa, 2009. p. 14.

SOUTO, X. M. COVID-19: general aspects and global implications. **Recital - Revista de Educação, Ciência e Tecnologia de Almenara/MG**, 2, p. 12-36, 2020.

SUN, J.; LI, J.; ZHOU, T.; YANG, K.; WEI, S.; TANG, N.; DANG, N.; LI, H.; QIU, X.; CHEN, L. Toxicity, a serious concern of thermal runaway from commercial Li-ion battery. **Nano Energy**, 27, 2016.

SUSANTO, A.; MULYONO, N. B. Risk assessment method for identification of environmental aspects and impacts at ore processing industry in Indonesia. **Journal of Ecological Engineering**, 9. n. 2, p. 72-80, 2018.

TAHIL, W. The Trouble with Lithium: Implications of Future PHEV Production for Lithium Demand. **Meridian International Research**, 2007.

\_\_\_\_\_. The Trouble with Lithium 2: Under the Microscope. **Meridian International Research**, 2008.

TARTAKOVSKY, L.; ARONOV, B.; MOSYAK, A. Modeling environmental impact of cybernetic transportation system. **Environmental Engineering and Management Journal**, 14. n. 5, p. 1161-1169, 2015.

TRIOLA, M. F. **Introdução à Estatística**. Rio de Janeiro: LTC, 7a. Ed, 1999.

TRIVELATO, G. C.; PAOLIELLO, M. M. Recycling of lead and human exposure in Brazil. **Environmental Health Research**, 6, p. 1-34, 2009.

UNFCCC. **Convenção Quadro das Nações Unidas sobre Mudanças do Clima**. Conferência das Nações Unidas sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento Sustentável, 1992.

UNITED NATIONS. **Copenhagen Accord** - Draft decision -/CP.15, 2009.

\_\_\_\_\_. **Kyoto Protocol**. United Nations Framework Convention on Climate Change, 1998.

USGS. **Mineral Commodity Summaries**, 2017. Disponível em: <https://www.usgs.gov/centers/nmic/rare-earths-statistics-and-information>.

VAN DER KUIJP, T.; HUANG, L.; CHERRY, C. Health hazards of China's lead-acid battery industry: a review of its market drivers, production processes, and health impacts. **Environ Health**, 12, p. 1-10, 2013.

VAN MIERLO, J.; MESSAGIE, M.; RANGARAJU, S. Comparative environmental assessment of alternative fueled vehicles using a life cycle assessment. **Transportation Research Procedia**, 25, p. 3439-3449, 2017.

VAN SCHALKWIJK, W. A.; SCROSATI, B. *Advances in Lithium-Ion Batteries*. **Kluwer Academic Publishers**, 1, p. 1-514, 2002.

VARELA, H.; HUGUENIN, F.; MALTA, M.; TORRESI, R. M. Materiais para cátodos de baterias secundárias de lítio. **Química Nova**, 25. n. 2, p. 287-299, 2002.

VIDHI, R.; SHRIVASTAVA, P. A review of electric vehicle lifecycle emissions and policy recommendations to increase EV penetration in India. **Energies**, 11. n. 3, p. 1-15, 2018.

VIEIRA, A. **O Chevrolet Bolt começa a ser vendido em outubro**. Sorocaba: Jornal Cruzeiro, 2019.

VILLELA, G. **Cercada de polêmica, a usina nuclear Angra I é construída na ditadura militar**. Rio de Janeiro: O Globo, 2018.

WANG, Q. G. Environmental Impact Post-Assessment of Dam and Reservoir Projects: A Review. **Procedia Environmental Sciences**, 13. n. 2011, p. 1439-1443, 2012.

WATTSON. **Lítio: o petróleo branco**. 2019. Disponível em: <https://www.wattson.pt/2019/01/08/7908/>. Acesso em: 7 mar. 2020.

WRI BRASIL. **Dados de emissões de CO<sub>2</sub> do Brasil**. 2018. Disponível em: <https://wribrasil.org.br/pt/node/44092>. Acesso em: 02 ago. 2020.

WU, K. Investigation on Li<sub>4</sub>Ti<sub>5</sub>O<sub>12</sub> batteries developed for hybrid electric vehicle. **Journal of Environmental Planning and Management**, 42, p. 989-995, 2012.

YAFFEE, R. A.; MCGEE, M. **An introduction to time series analysis and forecasting: with applications of SAS<sup>®</sup> and SPSS<sup>®</sup>**, 1st Edn. New York: Academic Press, 2000.

YUAN, X. Method for evaluating the real-world driving energy consumptions of electric vehicles. **Energy**, 141, p. 1955-1968, 2017.

ZHANG, L.; YUAN, Z.; BI, J. Predicting future quantities of obsolete household appliances in Nanjing by a stock-based model. **Resour Conserv Recycl**, 55, p. 1087-1094,

2011.

ZHAO, J. Whither the car? China's automobile industry and cleaner vehicle technologies. **Development and Change**, 37. n. 1, p. 121-144, 2006.

ZHAO, S. J. The Projected Pathways and Environmental Impact of China's Electrified Passenger Vehicles. **Transportation Research Part D: Transport and Environment**, 53, p. 334-353, 2017.

ZHENG, X. Manufacturing decisions and government subsidies for electric vehicles in China: A maximal social welfare perspective. **Sustainability (Switzerland)**, 10, p. 1-28, 2018.

ZHU, Z. Greening of the Earth and its drivers. **Nature Climate Change**, 6, p. 791-795, 2016.