

See discussions, stats, and author profiles for this publication at: <https://www.researchgate.net/publication/342110589>

TCC – VICTOR DIOGO DE MORAES CASTRO

Thesis · June 2020

DOI: 10.13140/RG.2.2.13821.59368

CITATIONS

0

READS

21

1 author:



Victor Castro

University of São Paulo

1 PUBLICATION 0 CITATIONS

SEE PROFILE

VICTOR DIOGO DE MORAES CASTRO

ANÁLISE DE CICLO DE VIDA SOBRE BICICLETAS ELÉTRICAS

SÃO PAULO

2020

VICTOR DIOGO DE MORAES CASTRO

ANÁLISE DE CICLO DE VIDA SOBRE BICICLETAS ELÉTRICAS

Monografia apresentada à Escola
Politécnica da Universidade de São
Paulo para obtenção do Título de
Engenheiro

Departamento de Engenharia
Metalúrgica e de Materiais

Orientador: Prof. Dr. Cesar Roberto
de Farias Azevedo

SÃO PAULO

2020

Autorizo a reprodução e a divulgação total ou parcial deste trabalho, por qualquer meio convencional ou eletrônico, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

Catlogação na publicação

Castro, Victor Diogo de Moraes

Análise de Ciclo de Vida sobre bicicletas elétricas / V. D. M. Castro --
São Paulo, 2020.

74 p.

Trabalho de Formatura - Escola Politécnica da Universidade de São
Paulo. Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais.

1.Análise de Ciclo de Vida 2.Bicicletas Elétricas 3.Baterias
I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de
Engenharia Metalúrgica e de Materiais II.t.

*Dedico este trabalho aos meus avôs,
René (in memoriam) e Raul (in
memoriam), que foram parte importante
da minha criação e certamente estariam
orgulhosos desta conquista. Dedico,
também, às minhas avós, Ana e Amália,
que me inspiram todos os dias a buscar
ser uma pessoa cada vez melhor.*

Agradecimentos

Agradeço a todos os amigos que fiz durante minha graduação na Escola Politécnica, cuja presença no meu dia a dia certamente tornou esse período mais leve e prazeroso. Tenho certeza de que levarei muitas dessas amizades para o resto da vida.

Agradeço à minha companheira ao longo de boa parte desses anos, Gabriela Kalleder, por estar incondicionalmente ao meu lado, vibrando por cada uma das minhas conquistas e me suportando em todos os momentos difíceis. É impossível imaginar essa caminhada sem a sua presença diária.

Agradeço a todo o corpo docente da Universidade de São Paulo com o qual tive contato nas salas de aula, sem os quais eu jamais teria me desenvolvido, pessoal e profissionalmente, para chegar ao final da graduação com a certeza de que a Universidade foi absolutamente transformadora para mim.

Agradeço, em especial, ao professor César Azevedo, que me orientou de forma magistral neste trabalho de formatura e que, em sala de aula, sempre se preocupou em abordar temas essenciais para a nossa formação como cidadãos, extrapolando o conteúdo técnico que lhe cabia ensinar.

Agradeço, por fim, aos meus pais, que há mais de duas décadas se esforçam para proporcionar a mim as melhores condições possíveis, de modo que eu pudesse focar na minha vida acadêmica e extrair o máximo possível desse valioso período que termina agora. Esse suporte foi minha grande fortaleza ao longo de toda a minha vida.

Sumário

Agradecimentos	v
Índice de figuras	viii
Índice de tabelas	x
Resumo	xii
Abstract	xiii
1. Introdução.....	1
1.1. Meios de transporte e poluição	1
1.2. Veículos elétricos	2
1.3. Objetivo do trabalho	3
2. Revisão Bibliográfica	4
2.1. Desenvolvimento dos veículos elétricos	4
2.1.1. História	4
2.1.2. Mercado	5
2.1.3. Programas de incentivo a veículos elétricos	11
2.2. Funcionamento das bicicletas elétricas	13
2.2.1. Motor.....	13
2.2.2. Bateria	14
2.2.2.1. Chumbo ácido.....	15
2.2.2.2. Íon-Lítio.....	17
3. Metodologia	19
3.1. CES EduPack 2019	19
3.1.1. Materiais, manufatura e fim de vida.....	20
3.1.2. Transporte	25
3.1.3. Uso.....	26
3.2. Análise de Ciclo de Vida	28
3.2.1. Definição de escopo e objetivo	30
3.2.2. Análise de inventário.....	31
3.2.2.1. Materiais – Quadro e outros componentes metálicos.....	32
3.2.2.2. Materiais – Pneus	33

3.2.2.3. Materiais – Bateria e motor.....	33
3.2.2.4. Transporte	34
3.2.2.5. Uso	35
3.2.3. Análise de impacto	36
3.2.4. Interpretação.....	36
3.3. Dados de entrada	36
4. Resultados.....	40
4.1. Pegada de CO2	40
4.1.1. Efeito da bateria	41
4.1.2. Efeito do país de uso	43
4.2. Energia.....	43
5. Discussão	46
5.1. Desafio de eco design: massa do quadro	46
5.1.1. Fibra de carbono.....	46
5.1.2. Titânio.....	47
5.2. Comparação com outro meio de transporte: motocicleta	48
5.3. Outros problemas das baterias	50
5.3.1. Disponibilidade de lítio no mundo	50
5.3.2. Contaminação por chumbo	53
6. Conclusões	55
7. Referências Bibliográficas	58

Índice de figuras

Figura 1 – Número de novos carros elétricos vendidos por ano e evolução de seu market share em cada país	6
Figura 2 – Número de vendas de bicicletas de todos os tipos, por ano, no Brasil	7
Figura 3 – Estimativa de vendas de bicicletas elétricas no Brasil em 2018	8
Figura 4 – Porcentagem de bicicletas elétricas (laranja) e de bicicletas convencionais (azul) na ciclovia da Faria Lima, importante via de São Paulo	9
Figura 5 – Previsão do crescimento mundial do mercado de e-bikes.....	9
Figura 6 – Pesquisa realizada com varejistas de bicicletas para compreender o motivo de não comercializarem bicicletas elétricas	10
Figura 7 – Consumo total de energia primária na China por fonte de combustível.....	12
Figura 8 – Matriz elétrica brasileira em 2018	13
Figura 9 – Possíveis posições do motor em uma bicicleta elétrica: a) Cubo de roda; b) Movimento central; c) Catraca	14
Figura 10 – Possíveis posições da bateria em uma e-bike: a) Rack traseiro; b) Quadro; c) Tubo inferior.....	15
Figura 11 – Funcionamento de uma bateria de chumbo ácido.....	16
Figura 12 – Baterias chinesas recarregáveis de chumbo ácido para bicicletas	16
Figura 13 – Funcionamento de uma bateria de íon-lítio	18
Figura 14 – Bateria de íon-lítio para bicicleta elétrica de uso urbano	18
Figura 15 – Estrutura da Análise de Ciclo de Vida realizada por meio da ferramenta Eco Audit do software CES EduPack 2019.....	20
Figura 16 – Tela de seleção dos componentes da análise, com o quadro da bicicleta usado como exemplo.....	21
Figura 17 – Tela de seleção do material de cada componente, com a liga de alumínio 6061 T6 usada como exemplo.....	22
Figura 18 – Tela de seleção de quantidade de conteúdo reciclado no material de origem, massa do componente, processo primário de produção e fim de vida	23

Figura 19 – Informações do programa sobre a liga de alumínio 6061 T6, com destaque para a média mundial de taxa de reciclagem deste material.....	24
Figura 20 – Tela de escolha do transporte do produto manufaturado até a loja.....	25
Figura 21 – Tela de escolha dos parâmetros de uso do produto.....	27
Figura 22 – Estrutura e interação entre as etapas da Análise de Ciclo de Vida	29
Figura 23 – Distribuição dos modais de transporte de países de grande extensão territorial.....	35
Figura 24 – Tela de escolha de parâmetros da bicicleta convencional usada no Brasil	37
Figura 25 – Tela de escolha de parâmetros da bicicleta convencional usada na China	37
Figura 26 – Tela de escolha de parâmetros da bicicleta elétrica com bateria de íon-lítio usada no Brasil	38
Figura 27 – Tela de escolha de parâmetros da bicicleta elétrica com bateria de íon-lítio usada na China.....	38
Figura 28 – Tela de escolha de parâmetros da bicicleta elétrica com bateria de chumbo ácido usada no Brasil.....	39
Figura 29 – Tela de escolha de parâmetros da bicicleta elétrica com bateria de chumbo ácido usada na China	39
Figura 30 – Pegadas de CO ₂ (kg) de cada produto em todo o ciclo de vida.....	40
Figura 31 – Variação da pegada de CO ₂ (kg) de cada produto em função do valor correspondente à bicicleta convencional usada no Brasil	41
Figura 32 – Gasto de energia (MJ) de cada produto em todo o ciclo de vida.....	44

Índice de tabelas

Tabela 1 – Número de carros licenciados, por tipo de combustível, em média móvel de 12 meses	7
Tabela 2 – Carga tributária sobre bicicletas convencionais e elétricas.....	10
Tabela 3 – Calculadora de CO ₂ que exibe a pegada de CO ₂ per capita em diversos países.....	11
Tabela 4 – Gasto de energia e pegada de CO ₂ associados a cada opção de transporte disponível	26
Tabela 5 – Gasto energético e pegada de CO ₂ por quilômetro rodado para cada tipo de transporte disponível no modo móvel	28
Tabela 6 – Descrição dos cenários analisados no estudo.....	31
Tabela 7 – Componentes considerados na ACV das bicicletas convencionais	31
Tabela 8 – Componentes considerados na ACV das bicicletas elétricas com bateria de íon-lítio.....	32
Tabela 9 – Componentes considerados na ACV das bicicletas elétricas com bateria de chumbo ácido	32
Tabela 10 – Pegada de CO ₂ (kg) calculada pelo software para cada etapa da ACV e para cada produto.....	41
Tabela 11 – Aumento da pegada de CO ₂ causada pela bateria nos cenários de uso no Brasil	42
Tabela 12 – Aumento da pegada de CO ₂ causada pela bateria nos cenários de uso na China.....	42
Tabela 13 – Pegada de CO ₂ (kg) calculada pelo software para a etapa de uso e o total da ACV em função do país considerado	43
Tabela 14 – Comparação entre pegadas de CO ₂ e gastos energéticos na fase de uso das bicicletas elétricas por país	45
Tabela 15 – Pegada de CO ₂ (kg) de quadros de bicicleta	47
Tabela 16 – Comparação entre pegadas de CO ₂ (kg) de motocicletas e de bicicletas elétricas com bateria de chumbo ácido.....	49

Tabela 17 – Comparação entre pegadas de CO ₂ (kg) de motocicletas e de bicicletas elétricas com bateria de íon-lítio	49
Tabela 18 – Produção anual de 2013 a 2015 e estimativa de reservas acumuladas de lítio ao final desse período nos principais países produtores do metal, em toneladas.	51
Tabela 19 – Produção anual de 2018 e 2019 e estimativa de reservas atuais de lítio nos principais países produtores do metal, em toneladas.....	52

Resumo

Os meios de transporte que contêm motores a combustão são grandes causadores de poluição, sobretudo em grandes centros urbanos, onde estão presentes em enormes quantidades. Dentre os gases poluentes emitidos por tais veículos, destaca-se o CO₂, que, em excesso, provoca problemas ambientais como o aquecimento global e a chuva ácida. A crescente importância de pautas ambientais resulta na busca por alternativas a tais automóveis e esse contexto fez com que veículos elétricos ganhassem importância ao longo dos últimos anos, recebendo investimentos significativos de empresas gigantes. Apesar do grande destaque dos carros no mercado de veículos elétricos, as bicicletas têm tido cada vez mais relevância e já estão estabelecidas em muitos países, dentre os quais destaca-se a China, com boa parte dos usuários mundiais de *e-bikes*. Porém, é natural que carros e outros veículos com motores a combustão tenham suas versões elétricas vistas como sustentáveis, uma vez que as baterias eliminam a necessidade de queima de combustíveis, mas o mesmo não ocorre com as bicicletas, cujas versões originais não apresentam nenhum tipo de motor ou bateria, dependendo apenas do esforço do usuário. Para avaliar o impacto da inserção de uma bateria em uma *bike* convencional, é conveniente realizar uma Análise de Ciclo de Vida (ACV) sobre uma *e-bike*, comparando-a a uma bicicleta tradicional e a outros meios de transporte, tomando como principal indicador a pegada de CO₂ ao longo dos ciclos de vida analisados. A ACV permite, ainda, quantificar os impactos associados a diferentes tipos de baterias.

Palavras-chave: Análise de Ciclo de Vida; bicicletas elétricas; baterias; pegada de CO₂; sustentabilidade; mobilidade.

Abstract

Motorized vehicles are significant sources of pollution, especially in large urban areas, where there is a huge number of them. Among the polluting gases emitted by these vehicles, CO₂ is the most relevant, as it can cause many environmental problems, such as global warming and acid rain. The growing importance of environmental topics makes people and industries look for alternatives for those automobiles, and this context has made electric vehicles become more important over the last years, which is why there has been huge investments by big companies in them. Despite the predominance of cars in the electric vehicles market, bicycles have had growing relevance and are already established in many countries, especially in China, where many of the e-bike users around the world live. However, it's natural that cars and other motorized vehicles have their electric versions seen as sustainable, as their batteries eliminate the need of fuel burning, but this is not applicable to bikes, whose original versions don't have any kind of motor or battery, as they just depend on the user's effort to work. In order to evaluate the impact of the insertion of a battery in a regular bicycle, it is convenient to make a Life-Cycle Analysis (LCA) of an e-bike, comparing it to other vehicles and using CO₂ footprint during the whole life-cycle as the main indicator. The LCA also makes it possible to quantify the impacts associated to different types of batteries.

Keywords: *Life-Cycle Analysis; electric bicycles; batteries; CO₂ footprint; sustainability; mobility.*

1. Introdução

1.1. Meios de transporte e poluição

A busca por sustentabilidade no consumo de todos os tipos de produtos tem se intensificado nas últimas décadas. A evolução exponencial da ciência e da tecnologia possibilitou a obtenção de dados que explicitam a urgente necessidade de modificar hábitos de consumo da população mundial, a fim de garantir a sobrevivência sustentável da humanidade a médio e longo prazo.

Os meios de transporte urbanos são parte importante desta discussão. Amplamente usados no Brasil, carros e motocicletas são significativos emissores de poluentes, sobretudo de CO₂, por consumirem uma quantidade considerável de combustíveis fósseis. Os ônibus, em sua maioria, também queimam tais combustíveis em seus motores, mas o fato de transportarem muitas pessoas ao mesmo tempo os torna mais eficientes energeticamente em comparação aos veículos que carregam até cinco pessoas, como os carros de passeio.

O etanol hidratado representa uma alternativa aos combustíveis fósseis. Ele apresenta menores índices globais de emissão de CO₂ por ser proveniente, no Brasil, da cana-de-açúcar, de forma que parte do CO₂ produzido na queima do etanol é capturada pela própria cana plantada. O surgimento dos carros flex, no início do século XXI, e o crescimento dessa tecnologia nos anos seguintes impulsionaram o consumo de etanol hidratado, cuja comercialização bateu recordes na região centro-sul em maio de 2019, segundo a União da Indústria de Cana-de-Açúcar (UNICA).

Caminhões também são responsáveis por uma grande parcela das emissões de CO₂ provenientes de veículos motorizados. O diesel, combustível altamente poluente usado em grande parte dos caminhões, e a grande predominância do modal rodoviário em relação ao ferroviário e ao marítimo no Brasil são fatores que impulsionam esse elevado nível de emissão. Porém, este estudo tem o objetivo de comparar veículos usados para locomoção de pessoas

em ambientes urbanos, de modo que os caminhões não serão analisados neste trabalho.

Combustíveis usados nos meios de transporte urbanos, sejam eles de origem fóssil ou não, geram emissões de poluentes, dentre os quais destaca-se o CO₂, em maiores ou menores níveis. Para atingir um patamar mais elevado de sustentabilidade, as indústrias associadas à mobilidade urbana têm procurado desenvolver novas tecnologias, buscando aliar rapidez no transporte e eficiência energética aos objetivos financeiros. Nesse contexto, as baterias surgiram como alternativas à queima de combustíveis, fornecendo a energia necessária para a locomoção dos meios de transporte.

1.2. Veículos elétricos

O mercado de meios de transporte movidos a eletricidade tem crescido vigorosamente, sobretudo por meio dos carros elétricos. Montadoras buscam cada vez mais investir no desenvolvimento dessa tecnologia, que é vista como promissora por eliminar – parcialmente, no caso dos veículos híbridos – a emissão de poluentes causada pelo uso de combustíveis líquidos durante o funcionamento dos automóveis. Ônibus e caminhões também possuem suas versões elétricas, que ainda são produzidas em escala reduzida, mas representam enorme potencial de redução nos níveis de emissões de poluentes por substituírem veículos movidos quase que exclusivamente a diesel.

No entanto, reduzir ou eliminar a emissão de CO₂ e outros gases não é o único objetivo atrelado à produção de meios de transporte elétricos. Patinetes e bicicletas são exemplos de produtos que, em suas concepções originais, dependem apenas da energia mecânica fornecida por seus usuários para se moverem. A recente inserção de baterias tem como objetivo poupar os esforços de quem os usa, sem alterar a independência desses veículos em relação a combustíveis. Dessa forma, são oferecidas alternativas mais confortáveis aos consumidores sem que os produtos percam o rótulo de sustentáveis.

1.3. Objetivo do trabalho

É natural que as *e-bikes* sejam vistas como veículos de emissão zero, já que não dependem diretamente da queima combustíveis. Porém, há de se analisar a proveniência da energia elétrica que alimenta suas baterias, bem como o processo de produção dos componentes das *bikes* e, por fim, o descarte de todos os materiais. Portanto, é preciso realizar uma Análise de Ciclo de Vida sobre as bicicletas elétricas para quantificar os níveis de emissão de poluentes atrelados a elas. A proposta deste estudo é realizar justamente essa análise, com foco nas baterias – diferencial entre as bicicletas elétricas e as convencionais –, considerando suas possíveis composições e diferentes locais de uso.

O estudo propõe, posteriormente, discussões sobre outros desafios relacionados à produção desse tipo de meio de transporte, abordando, inclusive, aspectos não quantificados na Análise de Ciclo de Vida.

2. Revisão Bibliográfica

2.1. Desenvolvimento dos veículos elétricos

2.1.1. História

A data exata do surgimento do primeiro veículo elétrico é imprecisa. Acredita-se que uma série de inovações contínuas ocorridas na Hungria, na Holanda e nos EUA, passando pela bateria e pelo motor elétrico, levou à concepção dos primeiros carros movidos a eletricidade em meados do século XIX (U.S.A. DEPARTMENT OF ENERGY, 2014).

Entre o final do século XIX e o início do século XX, a produção de carros elétricos aumentou substancialmente nos EUA. Porém, os motivos eram diferentes dos atuais: preocupações ambientais não eram comuns e os carros, elétricos ou não, representavam uma mudança disruptiva na forma de locomoção dos indivíduos – o principal meio de transporte na passagem para o século XX ainda era o cavalo. Automóveis movidos a gasolina eram desenvolvidos simultaneamente aos elétricos e a escolha entre um ou outro tipo dependia de vantagens e desvantagens práticas (U.S.A. DEPARTMENT OF ENERGY, 2014).

Apesar de serem mais silenciosos e amigáveis em termos de manuseio, os veículos elétricos foram superados pelos movidos a gasolina. Os menores custos e a possibilidade de percorrerem distâncias muito maiores – fator essencial em decorrência da grande expansão da estrutura de ruas e estradas nos EUA – foram determinantes para que os modelos movidos a gasolina vencessem a concorrência, provocando rápida perda de mercado por parte dos carros elétricos. Ainda, descobertas de petróleo no Texas provocaram reduções no preço da gasolina, acelerando o aumento do consumo de carros movidos a esse combustível. Por fim, os automóveis elétricos praticamente desapareceram

do mercado americano antes da metade do século XX (U.S.A. DEPARTMENT OF ENERGY, 2014).

As primeiras *e-bikes* também surgiram nos EUA – foram registradas diversas patentes do produto no final do século XIX. Porém, o declínio do mercado de carros, principais representantes da tecnologia, teve forte influência sobre outros veículos elétricos, que passariam décadas com poucos avanços tecnológicos e baixíssimos níveis de produção e consumo. Apenas por volta de 1970, com crises internacionais em relação à produção e aos preços do petróleo, foram retomadas discussões sobre a importância de alternativas ao motor movido a combustão (U.S.A. DEPARTMENT OF ENERGY, 2014).

A era tecnológica, iniciada no último quarto do século XX, viabilizou de uma vez por todas a produção dos veículos elétricos: as baterias foram aprimoradas, seus componentes tornaram-se mais baratos e novas formas de geração de energia e recarga das baterias foram descobertas. Tais inovações foram acompanhadas pela crescente discussão sobre desenvolvimento sustentável, que viria a se intensificar no século XXI e abriria caminho para muitas outras novas tecnologias (U.S.A. DEPARTMENT OF ENERGY, 2014).

2.1.2. Mercado

Os carros são os grandes expoentes do crescimento do uso de veículos elétricos nos últimos anos. A figura 1 indica que as vendas de automóveis movidos a eletricidade atingiram recordes históricos em 2018, com destaque para o *market share* de 46% na Noruega dentre todos os tipos de novos carros no mercado. Nota-se que o número de automóveis elétricos vendidos praticamente dobrou de 2017 para 2018, saltando de aproximadamente 1 milhão para quase 2 milhões. A China mantém-se como líder absoluta nesse mercado: de acordo com o *Global Electric Vehicle Outlook 2019*, da *International Energy Agency*, o país abriga 55% da frota mundial desse tipo de veículo, enquanto representa aproximadamente 33% do mercado mundial de carros de todos os tipos, o que demonstra que os chineses estão, de fato, investindo na produção de carros elétricos.

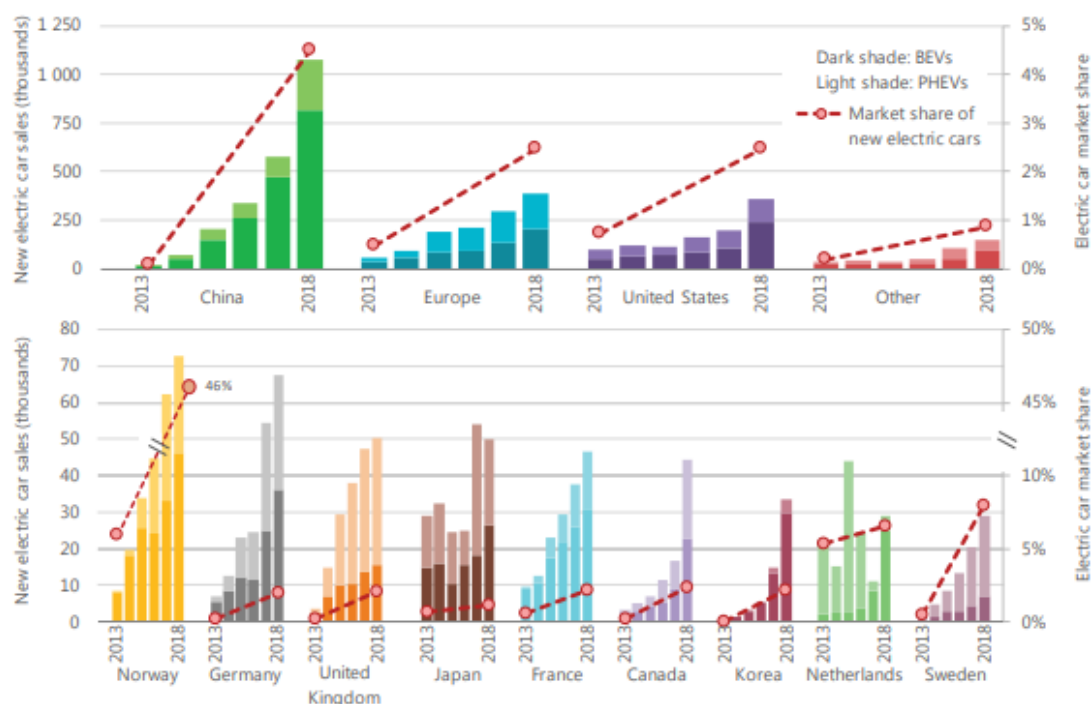


Figura 1 – Número de novos carros elétricos vendidos por ano e evolução de seu market share em cada país

Fonte: *Global Electric Vehicles Outlook Report 2019, International Energy Agency*

No Brasil, a tecnologia de carros elétricos ainda está em fase embrionária de desenvolvimento. De acordo com a tabela 1, apenas 4.050 veículos elétricos foram licenciados entre agosto de 2017 e julho de 2018. Apesar do crescimento de 51,9% contra os 12 meses anteriores, o número é extremamente baixo quando comparado aos mais de 2 milhões movidos a gasolina e/ou etanol no mesmo período, e ainda mais baixo quando confrontado com as vendas representadas na figura 1.

Combustível	jul/18*	jul/17	jul/16	2018/2017	2017/2016
Gasolina	78.831	71.220	99.114	26,6%	-28,1%
Elétrico ¹	4.050	2.044	863	51,9%	136,8%
Flex Fuel	2.056.993	1.796.346	1.870.811	12,5%	-4,0%
Diesel	202.211	163.830	145.335	27,1%	12,7%
TOTAL	2.342.085	2.033.440	2.116.123	15,2%	-3,9%

Tabela 1 – Número de carros licenciados, por tipo de combustível, em média móvel de 12 meses

Fonte: FGV Energia

A dominância dos chineses no mercado de veículos elétricos também é significativa no caso das *e-bikes*. Apesar de os modelos comercializados na China possuírem diferenças em relação aos do Brasil e de outros grandes mercados mundiais, como os EUA e a Europa, a dominância do país asiático é ampla e será difícil que outra nação supere a China.

De forma similar aos carros movidos a eletricidade, o mercado brasileiro de bicicletas munidas dessa tecnologia cresce em um ritmo muito lento e está longe de alcançar os índices dos gigantes asiáticos, europeus e norte-americanos. A figura 2 exibe a quantidade de bicicletas – de qualquer tipo – comercializadas no Brasil por ano, enquanto a figura 3 contém a estimativa anual de vendas de *e-bikes* no país, com a porcentagem que estas representam em relação ao mercado brasileiro mostrado na figura 2.



Figura 2 – Número de vendas de bicicletas de todos os tipos, por ano, no Brasil

Fonte: IBGE, 2018



Figura 3 – Estimativa de vendas de bicicletas elétricas no Brasil em 2018

Fonte: IBGE, 2018

O índice de 0,3% de *bikes* elétricas em relação ao número total de bicicletas comercializadas no Brasil em 2016 é tímido, mas a figura 3 evidencia um crescimento que está em linha com tendências mundiais e que pode indicar boas perspectivas futuras a longo prazo para esse mercado no país. O gráfico exibido na figura 4 também indica que há crescimento no uso do produto, ainda que discreto. No entanto, a figura 5 comprova que o ritmo de crescimento desse segmento no Brasil ainda deve seguir lento em relação a outros países nos próximos cinco anos.

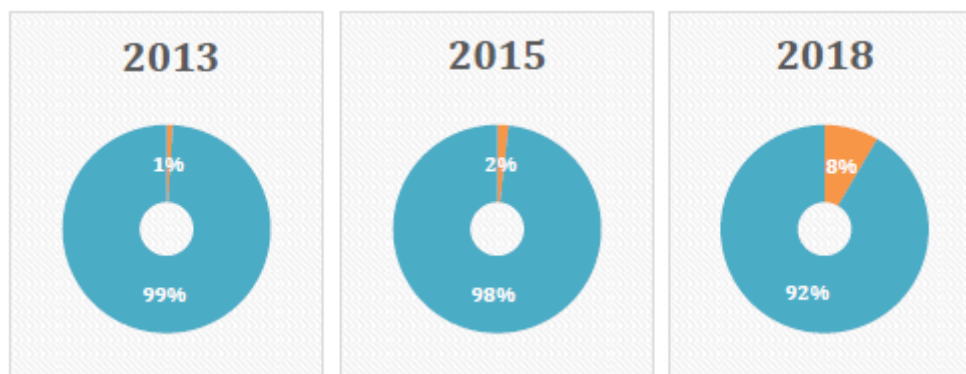


Figura 4 – Porcentagem de bicicletas elétricas (laranja) e de bicicletas convencionais (azul) na ciclovia da Faria Lima, importante via de São Paulo

Fonte: Sidera Consult, 2018



Figura 5 – Previsão do crescimento mundial do mercado de e-bikes

Fonte: Mordor Intelligence, 2018

Um fator que contribui para as baixas vendas do produto no Brasil é o alto preço para o consumidor final. Isso se deve a uma série de aspectos, dentre os quais destacam-se os altíssimos impostos, nacionais e de importação, atrelados às bicicletas. Os dados da tabela 2 exibem a carga tributária que incide sobre os modelos convencionais e elétricos.

Impostos	Bicicletas Convencionais	Bicicletas Elétricas
II (%)	35%	20%
IPI (%)	10%	35%
PIS / PASEP (%)	2,1%	2,1%
COFINS (%)	9,65%	9,65%
ICMS (%)	18%	18%
Total	75%	85%

Tabela 2 – Carga tributária sobre bicicletas convencionais e elétricas

Fonte: Sidera Consult, 2018

Portanto, a carga tributária sobre bicicletas é, de fato, elevada, atingindo 40% sobre o custo dos modelos convencionais – 75% para produtos importados. Os 65% de impostos sobre o custo dos modelos elétricos – 85% para os importados – são determinantes para tornar seu preço demasiadamente alto, uma vez que esses modelos naturalmente têm maior custo de produção por conta da bateria. Por fim, os varejistas de bicicletas que responderam à pesquisa exibida na figura 6 endossam a tese de que o preço é uma grande barreira para a expansão do mercado de *e-bikes* no Brasil atualmente.



Figura 6 – Pesquisa realizada com varejistas de bicicletas para compreender o motivo de não comercializarem bicicletas elétricas

Fonte: Aliança Bike, 2018

É notável a defasagem do Brasil em relação a países desenvolvidos nos principais índices de mercado referentes a veículos elétricos, sejam carros ou bicicletas. É natural que tais países tenham maiores preocupações em reduzir emissões de poluentes, uma vez que muitos destes foram historicamente e seguem sendo os maiores responsáveis por índices mundiais de poluição, conforme mostra a tabela 3. No entanto, esse fenômeno de transição energética mundial, do qual fazem parte os veículos elétricos, mostra-se cada vez mais importante e é responsabilidade de todos os países promover e incentivar alternativas sustentáveis em todos os âmbitos, o que evidencia a necessidade de que o Brasil invista em políticas públicas efetivas para mudar o cenário em que se encontra, hoje, em relação à mobilidade urbana.

País	Emissão per capita (ton CO ₂ e/hab.ano)
Brasil	7,85
EUA	27,31
China	8,24
Coreia do Sul	12,52
Canadá	21,73
Argentina	9,28
México	6,91
Suíça	6,78
África do Sul	8,61
Moçambique	14,70
Arábia Saudita	17,18
Rússia	18,14
Cuba	4,42

Tabela 3 – Calculadora de CO₂ que exhibe a pegada de CO₂ per capita em diversos países

Fonte: CAMPANHA, J. C., 2016

2.1.3. Programas de incentivo a veículos elétricos

A adoção de políticas por parte dos governos de cada país é fundamental para proporcionar o crescimento do uso de veículos elétricos. O *Global Electric*

Vehicles Outlook 2019, da *International Energy Agency*, exibe medidas tomadas por cada nação e suas respectivas metas.

De acordo com o relatório, a China, principal mercado dessa tecnologia, estabeleceu um sistema de “créditos de *New Energy Vechicles*”, obrigando montadoras a produzirem uma porcentagem mínima de veículos considerados limpos em relação à sua produção total. Além disso, o país tem como metas ter 150 mil carregadores públicos e 5 milhões de veículos elétricos até 2020.

Tais medidas, porém, contrastam com a matriz elétrica chinesa. Apesar dos esforços do país para “limpar” suas fontes de energia elétrica, ainda há a predominância de fontes não renováveis e poluentes, conforme indica a figura 7. A efeito de comparação, a figura 8 mostra a matriz elétrica do Brasil em 2018, em que se pode observar a predominância de fontes renováveis e limpas.

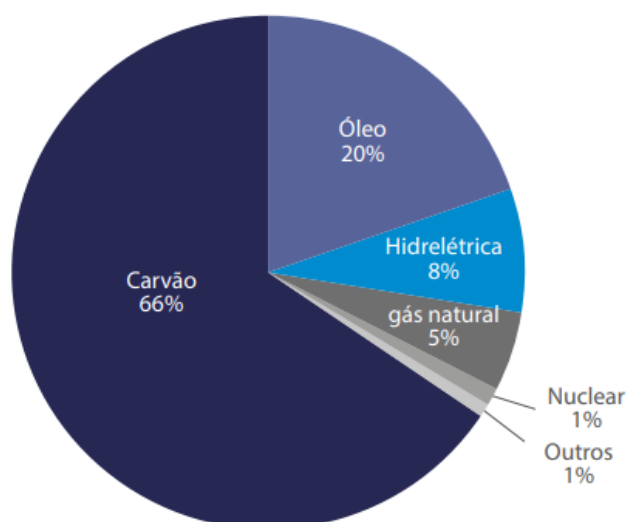


Figura 7 – Consumo total de energia primária na China por fonte de combustível

Fonte: *World Energy Outlook 2016*, *International Energy Agency*

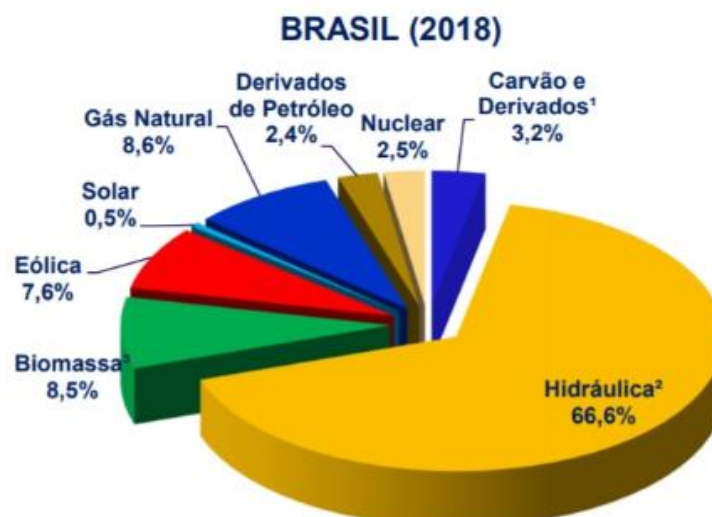


Figura 8 – Matriz elétrica brasileira em 2018

Fonte: Balanço Energético Nacional, 2019

A União Europeia também atua nesse sentido: os limites de emissão de CO₂ por veículos estão sendo reduzidos cada vez mais e a *European Battery Alliance* trabalha para desenvolver a indústria da bateria no continente, investindo em pesquisas sobre alternativas às composições existentes e em melhorias na eficiência das baterias de um modo geral.

O Brasil, no entanto, não tem medidas ou políticas detalhadas no relatório. Atualmente, grande parte dos veículos elétricos existentes no país provém de exportação (FGV, 2018), tornando clara a defasagem da indústria brasileira no segmento de veículos elétricos. Os exemplos da China e dos países da União Europeia evidenciam a importância de incentivos por parte do governo para fomentar o desenvolvimento dessa indústria local tão promissora.

2.2. Funcionamento das bicicletas elétricas

2.2.1. Motor

Em termos de conforto do usuário, a grande vantagem da bicicleta elétrica é a presença de um motor que pode ser acionado de acordo com comandos do ciclista. Em trechos íngremes de subida ou em momentos de cansaço do usuário, tal alternativa é bastante valiosa. Quando ocorre o acionamento, a bateria fornece a energia necessária para o funcionamento do motor.

A figura 9 indica as possibilidades de posicionamento de um motor em uma bicicleta elétrica.



Figura 9 – Possíveis posições do motor em uma bicicleta elétrica: a) Cubo de roda; b) Movimento central; c) Catraca

Fonte: SCHORNER, 2013

2.2.2. Bateria

Diversos tipos de bateria podem ser usados em uma *e-bike*. As mais utilizadas desde a concepção desse meio de transporte são as de chumbo ácido, mas as de íon-lítio vêm ganhando cada vez mais espaço no mercado. Cada uma tem vantagens e desvantagens, que serão abordadas posteriormente neste trabalho.

A figura 10 representa os locais em que a bateria pode ser colocada em uma *e-bike*.



Figura 10 – Possíveis posições da bateria em uma e-bike: a) Rack traseiro; b) Quadro; c) Tubo inferior

Fonte: SCHORNER, 2013

2.2.2.1. Chumbo ácido

Baterias de chumbo ácido são antigas e apresentam fabricação registrada desde o início do século XX. Possuem durabilidade e consumo de energia razoáveis e apresentam baixo custo em relação a outras composições de bateria, fator determinante para o seu amplo uso em carros, bicicletas e diversos outros dispositivos (CARNEIRO *et al*, 2017).

Durante o uso, o principal problema da bateria de chumbo ácido é o peso elevado. Esse fator não é relevante quando ela está inserida em produtos grandes, mas tem influência considerável em uma bicicleta, cujo peso deve ser baixo para proporcionar níveis minimamente aceitáveis de conforto ao usuário. Além disso, há a necessidade de manutenção constante do dispositivo, por conta da perda de água que ocorre durante as reações químicas do dispositivo – a bateria de chumbo ácido selada tem um sistema que evita tal perda, solucionando o problema da manutenção recorrente (CARNEIRO *et al*, 2017).

As maiores complicações que podem ser geradas por essa bateria, porém, estão relacionadas ao seu destino após o uso. O chumbo, principal metal de sua composição, não pode ser descartado normalmente por ser um metal pesado, com enorme potencial de dano à natureza e aos seres humanos. Por isso, é necessário reciclar a bateria, com cuidados especiais e recuperação do metal. O processo de reciclagem também é importante para assegurar a disponibilidade de chumbo para o mercado: segundo o Instituto de Metais Não Ferrosos (ICZ), em publicação sem data, o metal é obtido no Brasil predominantemente por meio de importação e, em seguida, da reciclagem de baterias.

A figura 11 ilustra o mecanismo eletroquímico envolvido no funcionamento da bateria de chumbo ácido e a figura 12 corresponde a baterias para bicicletas que estão disponíveis para compra na China.

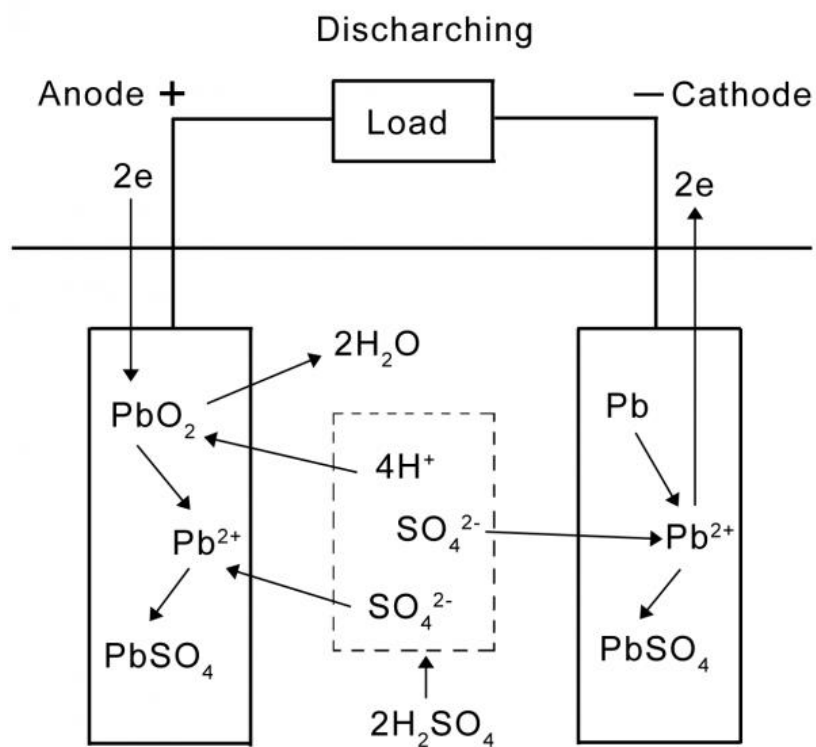


Figura 11 – Funcionamento de uma bateria de chumbo ácido

Fonte: itacanet.org



Figura 12 – Baterias chinesas recarregáveis de chumbo ácido para bicicletas

Fonte: jopower.com

2.2.2.2. Íon-Lítio

A bateria de íon-lítio tem seus primeiros registros de venda por volta de 1970. Hoje, a tecnologia é majoritariamente usada em dispositivos eletrônicos, como celulares e notebooks, mas também tem participação importante no mercado de bicicletas elétricas, oferecendo-se como alternativa fortemente competitiva à bateria de chumbo ácido (BOCCHI *et al*, 2019).

A tecnologia de íon-lítio tem uma série de vantagens: a densidade de carga é elevada nesse tipo de bateria, permitindo que ela armazene a mesma quantidade de energia com apenas um terço do volume ocupado pela de chumbo ácido, reduzindo, assim, o espaço ocupado e o peso; há baixa recorrência de manutenção; não ocorre o efeito memória, que consiste no “vício” da bateria decorrente de cargas incompletas; e a taxa de auto descarga é baixa, otimizando sua oferta de energia (BOCCHI *et al*, 2019).

A grande desvantagem desse tipo de bateria é o custo elevado, decorrente, dentre outros fatores, do maior custo do lítio e da baixa disponibilidade do metal, que tende a se agravar com o forte crescimento da demanda por baterias de dispositivos eletrônicos e de veículos elétricos. Além disso, é necessário que haja um circuito de proteção no sistema para prevenir incêndios, limitando as tensões e controlando a temperatura do dispositivo ao longo do uso, o que também colabora para o encarecimento da tecnologia (BOCCHI *et al*, 2019).

A figura 13 ilustra o funcionamento de uma bateria de íon-lítio do ponto de vista eletroquímico e a figura 14 exhibe um modelo desse tipo de bateria disponível para comercialização e uso em bicicletas elétricas.

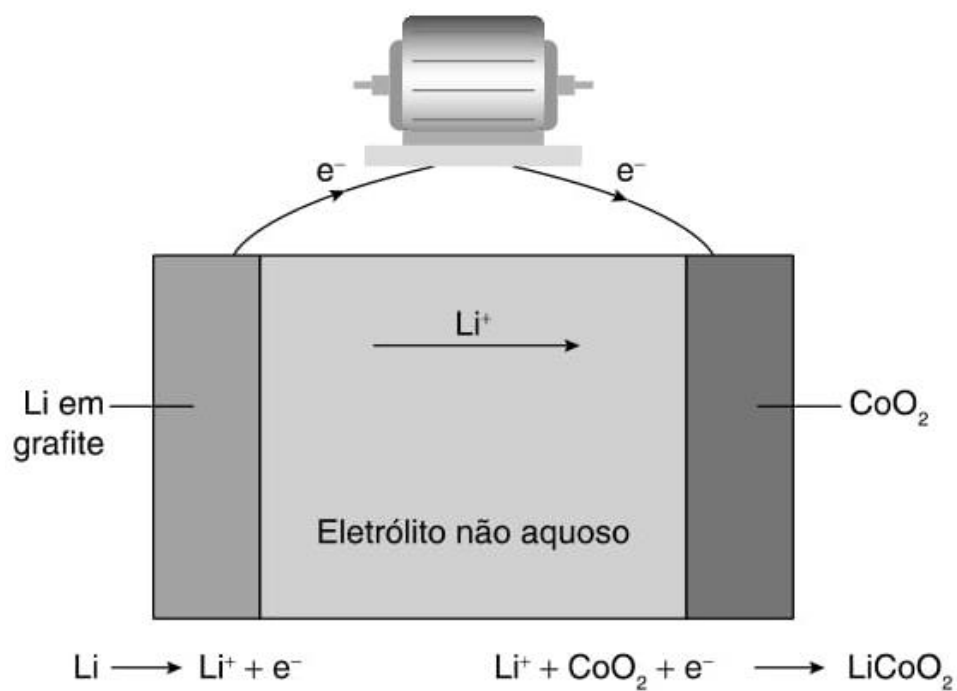


Figura 13 – Funcionamento de uma bateria de íon-lítio

Fonte: Uninassau, 2019

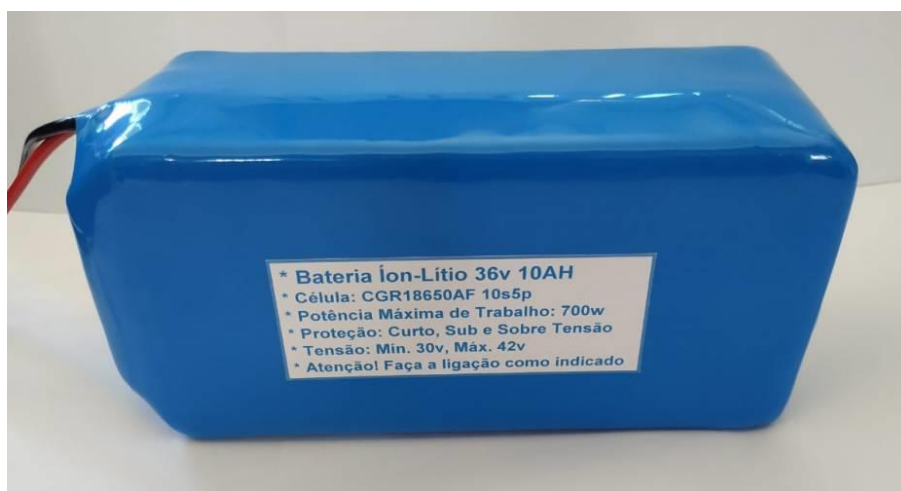


Figura 14 – Bateria de íon-lítio para bicicleta elétrica de uso urbano

Fonte: voltagebikes.com.br

3. Metodologia

A Análise de Ciclo de Vida das bicicletas elétricas será realizada por meio de dados obtidos a partir do programa CES EduPack 2019, da Granta Design. O *software* dispõe da ferramenta *Eco Audit*, que permite a realização da análise por meio dos principais indicadores envolvidos no problema – o gasto de energia e a pegada de CO₂ – de acordo com os materiais usados na fabricação do produto, passando pelos processos de extração e fabricação de cada um, pelo transporte, pelo uso e, por fim, pelo descarte dos materiais.

3.1. CES EduPack 2019

O CES EduPack é um programa desenvolvido para fins acadêmicos e educacionais. Ele viabiliza uma série de estudos relacionados a materiais, não apenas sob a ótica da Engenharia de Materiais, mas também das Engenharias Mecânica, Aeroespacial, entre outras. Desenvolvido pelo professor Mike Ashby, da Universidade de Cambridge, o *software* possui um amplo banco de dados que permite, por exemplo, a simulação de situações reais de equipamentos utilizados em indústrias ou a estimativa sobre a melhor combinação de materiais para uma determinada aplicação.

O *software* possibilita a realização da Análise de Ciclo de Vida de um conjunto de materiais por meio da ferramenta *Eco Audit*. As principais etapas da metodologia estão descritas na Figura 15.

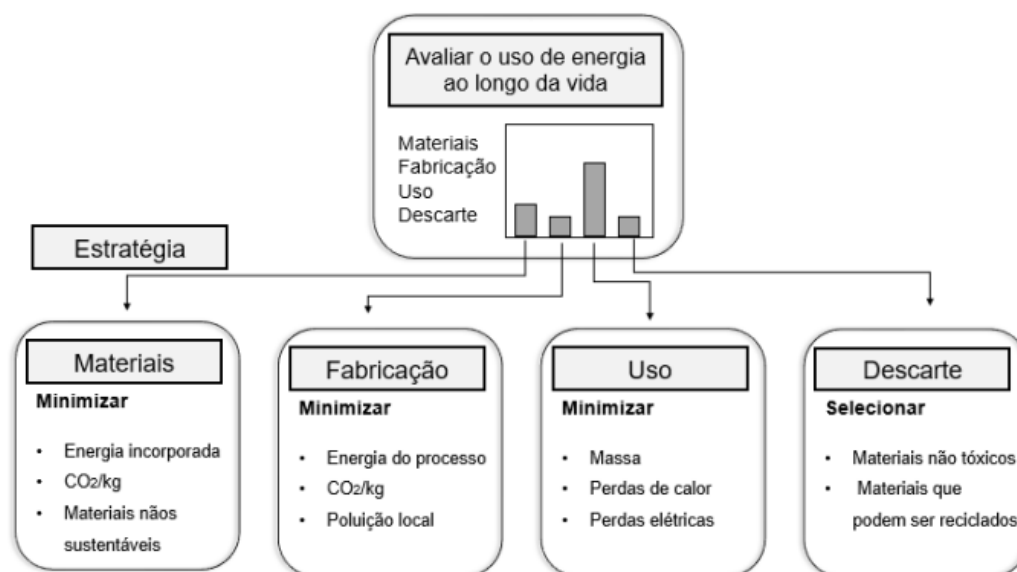


Figura 15 – Estrutura da Análise de Ciclo de Vida realizada por meio da ferramenta *Eco Audit* do software CES EduPack 2019

Fonte: ASHBY, 2005

O uso da ferramenta *Eco Audit* requer o preenchimento de diversos parâmetros segmentados em três partes:

- Materiais, manufatura e final de vida;
- Transporte;
- Uso.

3.1.1. Materiais, manufatura e fim de vida

Uma análise simplificada de ciclo de vida requer que apenas os componentes correspondentes a pelo menos 95% da massa do material sejam considerados. Com isso, pequenas peças podem ser desprezadas na etapa de inserção dos materiais (ASHBY, 2016).

É necessário fornecer ao programa os seguintes parâmetros de cada material:

- Quantidade;

- Nome do componente (escolhido livremente pelo usuário);
- Material;
- Porcentagem de material reciclado;
- Massa (em kg);
- Processo primário de fabricação;
- Modo de descarte.

A figura 16 reproduz a tela do programa em que são imputados todos os parâmetros que irão compor a análise desta etapa. Na figura 17, observa-se a variedade de materiais disponíveis na base de dados do nível 3 do programa, com a ramificação da categoria de metais e ligas.

Material, manufacture and end of life ?						
Qty.	Component name	Material	Recycled content	Mass (kg)	Primary process	End of life
1	Quadro	 Aluminum, 6061, T6	 Typical %	14	Extrusion, foil rolling	Recycle

Figura 16 – Tela de seleção dos componentes da análise, com o quadro da bicicleta usado como exemplo

Fonte: CES *EduPack* 2019

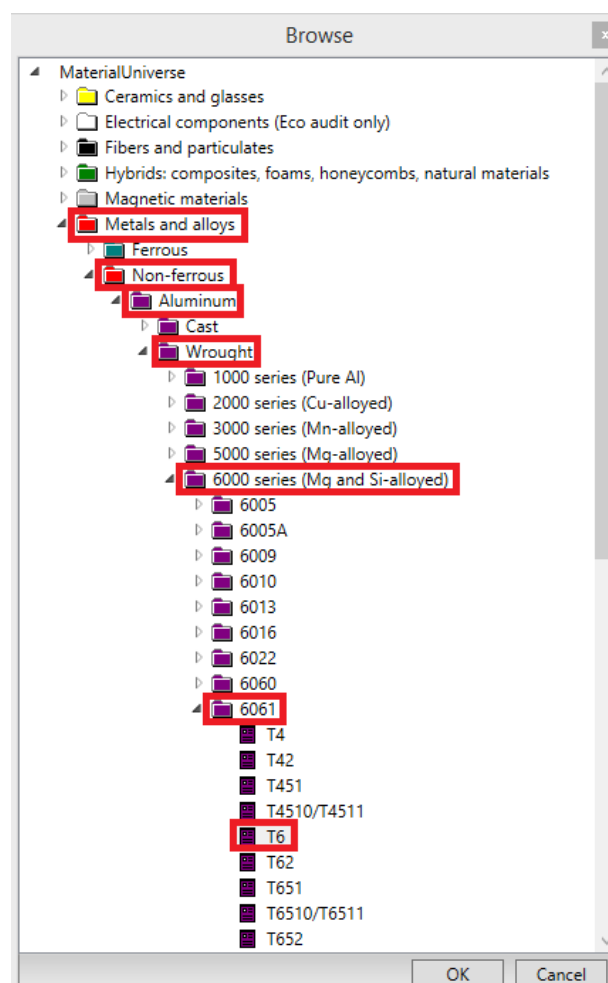


Figura 17 – Tela de seleção do material de cada componente, com a liga de alumínio 6061 T6 usada como exemplo

Fonte: CES EduPack 2019

A figura 18 ilustra as opções pré-determinadas pelo programa em relação a reciclagem, processo primário de fabricação e fim de vida do produto.

Recycled content	Mass (kg)	Primary process	End of life
Typical % ▾	14	Extrusion, foil rolling	Recycle
Virgin (0%)		Roll forming	Landfill
Typical %		Forging	Downcycle
Reused part		Extrusion, foil rolling	Recycle
		Wire drawing	Re-manufacture
		Metal powder forming	Reuse
		Vaporization	None

Figura 18 – Tela de seleção de quantidade de conteúdo reciclado no material de origem, massa do componente, processo primário de produção e fim de vida

Fonte: CES EduPack 2019

- **Conteúdo reciclado** – A opção “*virgin (0%)*” indica que o material usado na análise não é reciclado, enquanto “*reused part*” representa 100% de reciclagem desse componente e “*typical %*” corresponde a uma taxa padrão de reciclagem para cada material – a Figura 19 exibe qual é o valor considerado pelo programa para a liga de alumínio usada neste trabalho.
- **Processo primário de fabricação** – Selecionado de acordo com uma lista disponibilizada pelo *software* em função do material escolhido. As opções disponíveis para todos os metais são laminação, forjamento, extrusão, trefilação, formação por pó metálico e vaporização.
- **Fim de vida** – São disponibilizadas sete opções, das quais seis estão presentes na figura 16 e cujas considerações são fornecidas pelo próprio *software*:
 - Aterro: descarte em aterros sanitários, sem benefícios energéticos e aplicável a qualquer material não tóxico;
 - Incineração: processo realizado para recuperação de energia calorífica, mas é aplicável apenas a materiais de origem orgânica com entalpia de combustão superior a 5 MJ / kg – o que explica a sua ausência na figura 18 – e gera emissão de gases poluentes;

- Downcycle: aplicável a qualquer material, pode ser um processo de cominuição, reprocessamento ou reaproveitamento de metais, cuja finalidade é dar ao material uma nova aplicação, com qualidade inferior à anterior;
- Reciclagem: é o reprocessamento do material, com qualidade final semelhante à anterior e cuja economia de energia e CO₂ é calculada pela diferença entre os gastos com a produção do material virgem e os gastos associados ao processo de reciclagem;
- Refabricação: consiste na recuperação dos componentes de um produto, promovendo o reuso destes em novos produtos ou como peças de reposição de outros já existentes, com aplicação a qualquer material;
- Reuso: é a simples extensão da vida útil do produto, de modo que não há nenhum processo envolvido e os ganhos ambientais são máximos;
- Nenhum descarte: opção disponível para componentes que são apenas deixados em seus lugares originais ao fim da vida, como a fundação de um prédio após sua demolição, de forma que não há nenhum benefício ou custo ambiental.

Recycling and end of life

Recycle	ⓘ	✓			
Embodied energy, recycling	ⓘ	* 32,4	-	35,8	MJ/kg
CO2 footprint, recycling	ⓘ	* 2,54	-	2,81	kg/kg
Recycle fraction in current supply	ⓘ	40,5	-	44,7	%
Downcycle	ⓘ	✓			
Combust for energy recovery	ⓘ	✗			
Landfill	ⓘ	✓			
Biodegrade	ⓘ	✗			

Figura 19 – Informações do programa sobre a liga de alumínio 6061 T6, com destaque para a média mundial de taxa de reciclagem deste material

3.1.2. Transporte

Nesta etapa, é necessário escolher como ocorre o transporte do produto até a loja em que ele será vendido. Trata-se do produto final, completamente montado, de modo que o programa permite a seleção de apenas um modal de transporte com uma única distância pré-determinada. Não é possível inserir no cálculo, por exemplo, os gastos com o transporte das matérias-primas até a fábrica.

A figura 20 exibe as opções de transporte disponíveis, enquanto a tabela 4 gastos de energia e CO₂ relacionados a cada uma. Nota-se que a energia gasta por quilômetro percorrido e por quilograma transportado é menor para os meios marítimos e fluviais, enquanto os gastos são ligeiramente maiores para transportes rodoviários e significativamente maiores para transportes aéreos. A pegada de CO₂ varia de acordo com a energia gasta, com o mesmo valor unitário de 0,072 kg / MJ para todos os modais.

Name	Transport type	Distance (km)
Transporte até a loja	26 tonne (3 axle) truck	100

Use ?

Report ?

Transport type options (from dropdown):

- Ocean freight
- Coastal freight
- River/canal freight
- Rail freight
- 55 tonne (8 axle) truck
- 40 tonne (6 axle) truck
- 32 tonne (4 axle) truck
- 26 tonne (3 axle) truck
- 14 tonne (2 axle) truck
- Light goods vehicle
- Air freight - long haul
- Air freight - short haul
- Helicopter

Figura 20 – Tela de escolha do transporte do produto manufaturado até a loja

Fonte: CES *EduPack* 2019

	Transport energy (MJ/tonne/km)	CO ₂ footprint, source (kg/MJ)
Ocean freight	0.18	0.072
Coastal freight	0.27	0.072
River / canal freight	0.40	0.072
Rail freight	0.35	0.072
55 tonne (8 axle) truck	0.71	0.072
40 tonne (6 axle) truck	0.82	0.072
32 tonne (4 axle) truck	0.94	0.072
26 tonne (3 axle) truck	1.1	0.072
14 tonne (2 axle) truck	1.5	0.072
Light goods vehicle	2.2	0.072
Air freight - long haul	6.5	0.072
Air freight - short haul	13	0.072
Helicopter	55	0.072

Tabela 4 – Gasto de energia e pegada de CO₂ associados a cada opção de transporte disponível

Fonte: Base de dados do CES *EduPack* 2019

3.1.3. Uso

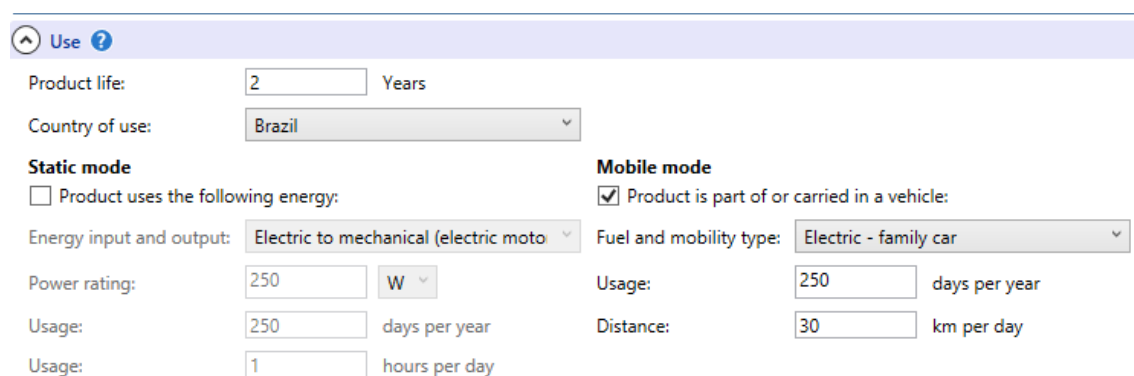
No último passo da ferramenta *Eco Audit* antes da obtenção dos resultados, é necessário fornecer ao programa os seguintes parâmetros:

- Vida útil do produto (em anos);
- País de uso;
- Modo de uso (estático ou móvel);
- Fonte de energia e finalidade ou tipo de mobilidade;
- Potência (apenas no caso de uso estático, em diversas unidades possíveis);
- Frequência de uso (em dias / ano);

- Uso diário (em horas / dia para o modo estático e em km / dia para o modo móvel).

O modo de uso estático é adequado para produtos que funcionam de forma estacionária, mas precisam de energia para tal. O modo móvel refere-se a sistemas de transporte, em que a massa tem ampla influência no consumo de energia.

A figura 21 exibe a tela de seleção dos parâmetros de uso do produto analisado. A tabela 5 quantifica o gasto de energia e a pegada de CO₂ em função do número de quilômetros rodados para cada um dos veículos disponíveis e os elétricos são os únicos em que tais parâmetros são dependentes do país de uso, uma vez que a matriz elétrica exerce influência sobre estes valores.



Use ?

Product life: 2 Years

Country of use: Brazil

Static mode

☐ Product uses the following energy:

Energy input and output: Electric to mechanical (electric moto)

Power rating: 250 W

Usage: 250 days per year

Usage: 1 hours per day

Mobile mode

☒ Product is part of or carried in a vehicle:

Fuel and mobility type: Electric - family car

Usage: 250 days per year

Distance: 30 km per day

Figura 21 – Tela de escolha dos parâmetros de uso do produto

Fonte: CES *EduPack* 2019

Fuel and vehicle type	Energy (MJ/tonne.km)	Energy equivalence, source (MJ/MJ)	CO ₂ footprint, source (kg/MJ)
Diesel - ocean shipping	0.18	1	0.072
Diesel - coastal shipping	0.27	1	0.072
Diesel - barge	0.40	1	0.072
Diesel - rail	0.35	1	0.072
Diesel - 55 tonne (8 axle) truck	0.71	1	0.072
Diesel - 40 tonne (6 axle) truck	0.82	1	0.072
Diesel - 32 tonne (4 axle) truck	0.84	1	0.072
Diesel - 26 tonne (3 axle) truck	1.1	1	0.072
Diesel - 14 tonne (2 axle) truck	1.5	1	0.072
Diesel - light goods vehicle	2.2	1	0.072
Diesel - family car	1.7	1	0.072
Gasoline - family car	2.6	1	0.068
Gasoline - super sports car and SUV	3.4	1	0.068
Hybrid gasoline/electric - family car	1.4	1	0.053
Electric - rail	0.11	Country specific	Country specific
Electric - family car	0.11	Country specific	Country specific
LPG - family car	2.6	1	0.064
Kerosene - long haul aircraft	6.5	1	0.072
Kerosene - short haul aircraft	13	1	0.072
Kerosene - helicopter	55	1	0.072

Tabela 5 – Gasto energético e pegada de CO₂ por quilômetro rodado para cada tipo de transporte disponível no modo móvel

Fonte: CES *EduPack* 2019

3.2. Análise de Ciclo de Vida

O método da Análise de Ciclo de Vida tem como objetivo quantificar os impactos ambientais associados à vida de um produto, permitindo que cada fase desse ciclo seja analisada separadamente – viabilizando a identificação de etapas mais significativas em termos ambientais, denominadas críticas – e facilitando a comparação entre diferentes produtos para definir alternativas mais sustentáveis (MURALIKRISHNA, 2017).

A norma ISO 14040 define que é possível dividir o método em quatro estágios:

- **Estágio 1 – Definição de escopo e objetivo.** Etapa em que se define qual é o ciclo de vida adotado para o produto e quais são as finalidades da análise.
- **Estágio 2 – Análise de inventário.** Nesta fase, determinam-se quais componentes serão considerados como parte do produto, além das interações entre os materiais e o meio-ambiente.
- **Estágio 3 – Análise de impacto.** Momento em que os impactos ambientais são quantificados, de acordo com as premissas e os dados definidos nas fases anteriores.
- **Estágio 4 – Interpretação.** Esta etapa é dependente das três anteriores e envolve análise crítica sobre os resultados e considerações sobre os dados obtidos, gerando a apresentação final dos resultados.

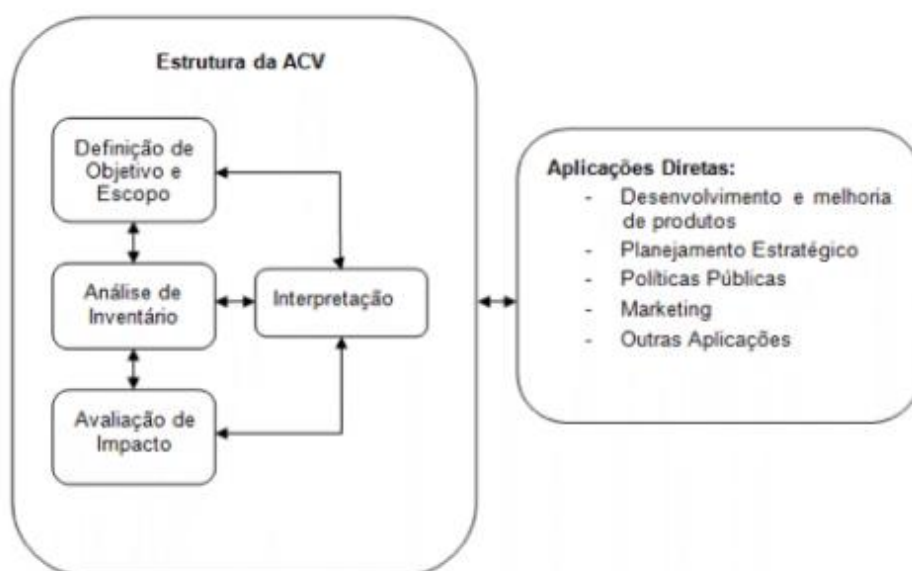


Figura 22 – Estrutura e interação entre as etapas da Análise de Ciclo de Vida

Fonte: GUINEE, 2004

3.2.1. Definição de escopo e objetivo

De acordo com a Figura 22, que representa esquematicamente a norma ISO 14040, a definição de escopo e objetivo é a primeira fase do processo de ACV.

A proposta deste estudo é analisar os impactos ambientais relacionados às bicicletas elétricas, bem como discutir e propor soluções para os problemas atrelados a esse produto. As Figuras 4 e 5, presentes no capítulo 1 deste trabalho, comprovam a relevância do tema na atualidade – a níveis nacional e mundial, respectivamente – ao demonstrarem o crescimento da demanda por bicicletas elétricas.

Diante de tal contexto, a Análise de Ciclo de Vida, realizada neste trabalho por meio da ferramenta *Eco Audit* do programa CES EduPack 2019, tem como principal objetivo identificar quais são as etapas críticas entre produção, transporte, uso e fim de vida das bicicletas elétricas, comparando-as a bicicletas convencionais, com o intuito de avaliar o impacto das baterias, e usando diferentes países na comparação, para mensurar a relevância da composição da matriz elétrica de cada nação nas emissões de poluentes. As bicicletas elétricas terão, ainda, dois tipos de baterias avaliadas, a fim de mensurar impactos e complicações atrelados a cada uma delas para posterior discussão.

Serão, portanto, seis diferentes cenários analisados, e eles estão descritos na tabela 6.

Cenário	Tipo de bicicleta	Tipo de bateria	País de uso
1	Convencional	-----	Brasil
2	Convencional	-----	China
3	Elétrica	Íon-Lítio	Brasil
4	Elétrica	Íon-Lítio	China
5	Elétrica	Chumbo ácido	Brasil
6	Elétrica	Chumbo ácido	China

Tabela 6 – Descrição dos cenários analisados no estudo

Fonte: o autor

3.2.2. Análise de inventário

De acordo com o método de Ashby, apenas os componentes que representam 95% da massa do produto devem ser considerados na Análise de Ciclo de Vida. Portanto, pequenas peças das bicicletas podem ser desprezadas a fim de simplificar a análise. As tabelas 7, 8 e 9 exibem quais serão os componentes considerados na ACV de acordo com os cenários descritos na tabela 6.

Componente	Materiais	Massa estimada (kg)
Quadro e demais peças metálicas	Alumínio (6061 T6)	20
Pneus	Borracha natural + negro de fumo	4

Tabela 7 – Componentes considerados na ACV das bicicletas convencionais

Fonte: o autor

Componente	Materiais	Massa estimada (kg)
Quadro e demais peças metálicas	Alumínio (6061 T6)	20
Pneus	Borracha natural + negro de fumo	4
Bateria de Íon-Lítio	Definidos pelo <i>software</i>	2,5

Tabela 8 – Componentes considerados na ACV das bicicletas elétricas com bateria de íon-lítio

Fonte: o autor

Componente	Materiais	Massa estimada (kg)
Quadro e demais peças metálicas	Alumínio (6061 T6)	30
Pneus	Borracha natural + negro de fumo	4
Bateria de Chumbo Ácido	Definidos pelo <i>software</i>	10

Tabela 9 – Componentes considerados na ACV das bicicletas elétricas com bateria de chumbo ácido

Fonte: o autor

3.2.2.1. Materiais – Quadro e outros componentes metálicos

As opções mais populares de materiais para o quadro de uma bicicleta são o aço e o alumínio. Por possuir propriedades mecânicas superiores ao aço, como a resistência a corrosão, a rigidez e a relação peso-resistência, o alumínio é o metal mais usado atualmente (SANTOS, VALENGA, 2016). Materiais como fibra de carbono e titânio também possuem boas propriedades, mas são mais caros e não se enquadram no escopo deste trabalho, que é a análise de bicicletas usadas para locomoção no dia a dia, e não para a prática de esportes.

Dentre as ligas de alumínio usadas em quadros de bicicleta, as mais comuns são a AISI 6061 e a AISI 7005. A liga 6061 com tratamento térmico T6 foi selecionada para este estudo por ser usada também na fabricação de guidões, pedais e outros componentes das *bikes* (RIBEIRO, 2013). Dessa forma, o quadro tem massa consideravelmente maior do que as outras partes metálicas do produto e o mesmo material do que algumas delas, permitindo que se englobem, por aproximação, todos os componentes metálicos da bicicleta no mesmo item nas tabelas 7, 8 e 9.

Baterias de chumbo ácido são mais pesadas que as de íon-lítio. Isso faz com que o quadro das bicicletas que carregam esse tipo de bateria tenha que ser mais pesado, a fim de suportar mecanicamente o componente. Por isso, o quadro da tabela 9 pesa 10 kg a mais que os quadros das tabelas 7 e 8.

O processo de produção escolhido para o material do quadro foi a extrusão, por ser o processo mais comum para a liga de alumínio 6061 T6 (BUZINELLI, 2000). Assumiu-se, por fim, que ele teria uma porcentagem típica de material reciclado em sua composição e que ele seria reciclado ao fim de sua vida.

3.2.2.2. Materiais – Pneus

Pneus são compostos por mais de um tipo de borracha e por outros materiais, como negro de fumo e cargas metálicas. A proporção entre borracha natural, borracha de butadieno e copolímero de butadieno-estireno, os polímeros mais comuns em pneus, variam de acordo com o uso e o fabricante (WIEBECK, ESPER, FEIJÓ, 2002).

Em veículos de passeio, a borracha natural é o polímero que predomina na composição dos pneus, representando 36% da massa, enquanto derivados de petróleo e outros produtos químicos também representam 36% (MARIANO, 2019). Dessa forma, por aproximação, considera-se neste estudo que os pneus são compostos apenas por borracha natural contendo 15% a 42% de negro de fumo, opção disponível no *software*.

A moldagem de polímero é o único processo de produção disponível para este material no programa. Assume-se que os pneus são virgens, 100% advindos da natureza, e que serão refabricados,

3.2.2.3. Materiais – Bateria e motor

As baterias são o foco do estudo. A presença delas na ACV diferencia bicicletas elétricas das convencionais, e é essa uma das principais comparações

propostas no trabalho. Além disso, o carregamento das baterias causa impactos diferentes de acordo com o país em que isso ocorre, outro aspecto que será abordado.

Conforme o capítulo 2.2.2 deste trabalho, as baterias de chumbo ácido e de íon-lítio são as mais comuns para bicicletas elétricas. Por isso, o estudo conterà uma comparação crítica entre os dois tipos, a partir da qual serão propostas discussões sobre diferentes etapas do ciclo de vida destes componentes.

O processo primário de produção já é associado automaticamente ao tipo de bateria selecionada, de modo que não é possível alterar esse parâmetro. Por fim, considera-se que as baterias são virgens e que elas serão submetidas ao processo de *downcycle* ao final de suas vidas, possibilitando que os metais que as compõem tenham novas aplicações futuramente.

Por fim, os motores das *e-bikes* serão desconsiderados na análise. Isso facilita a avaliação dos impactos associado às baterias, uma vez que elas se tornam a única diferença entre as bicicletas convencionais e as elétricas. Além disso, ao contrário das baterias, que estão disponíveis no software como componentes únicos, os motores precisariam ser montados peça a peça, o que tornaria muito complexa a ACV.

3.2.2.4. Transporte

O meio de transporte selecionado foi o rodoviário, uma vez que este é o principal modal dos países analisados, Brasil e China. A figura 23 traz a representatividade de cada modal para países com portes territoriais semelhantes.

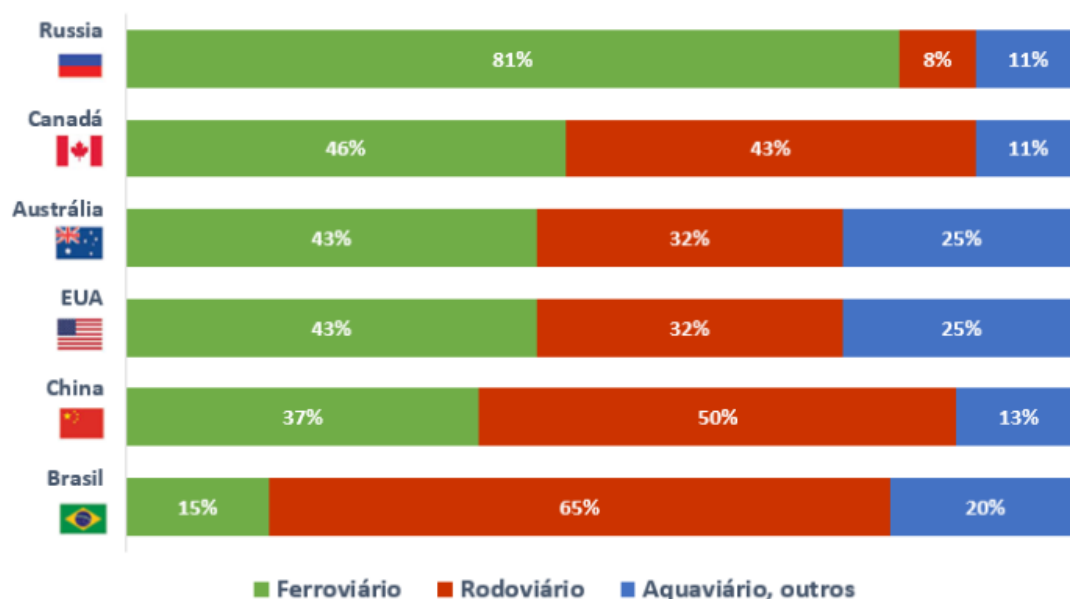


Figura 23 – Distribuição dos modais de transporte de países de grande extensão territorial

Fonte: ANTF – Associação Nacional dos Transportadores Ferroviários, 2019

Adotou-se uma distância de 100 km entre a fábrica da bicicleta e a loja onde ela será vendida, considerando que as vendas ocorrerão em grandes centros urbanos e que a fábrica está localizada a uma distância média. Por fim, foi escolhido o caminhão de 26 toneladas com 3 eixos, o segundo menor dentre as opções do *software*, considerando que o porte das bicicletas não justificaria o uso de um caminhão maior.

3.2.2.5. Uso

Adotou-se como padrão nesta ACV uma vida útil de cinco anos para todas as bicicletas. No caso das elétricas, isso resulta em diferentes quantidades de baterias usadas ao longo desse período estipulado. Isso é consequência da maior durabilidade das baterias de íon-lítio: de acordo com levantamento de Gustavo Figueiredo, do site *ativo.com*, elas duram, em média, 1.000 ciclos, enquanto as de chumbo ácido têm vida útil de apenas 200. O mesmo site indica que a autonomia das baterias é de 30 km por ciclo completo.

A partir destes dados, estabeleceu-se que a distância percorrida por cada bicicleta seria de 30 km – ou seja, um ciclo completo – por dia, com uso em 200 dias por ano, valores adequados pra quem usa o produto para se deslocar ao trabalho apenas em dias de semana, por exemplo. Desta forma, são necessárias cinco baterias de chumbo ácido durante todo o ciclo de vida das bicicletas, enquanto apenas uma bateria de íon-lítio seria suficiente ao longo dos cinco anos estipulados.

3.2.3. Análise de impacto

Esta etapa da Análise de Ciclo de Vida será abordada nos capítulos 4 e 5 deste trabalho.

3.2.4. Interpretação

Esta etapa da Análise de Ciclo de Vida será abordada no capítulo 5 deste trabalho.

3.3. Dados de entrada

As figuras 24, 25, 26, 27, 28 e 29 indicam os parâmetros considerados na ferramenta de *Eco Audit* do *software* e correspondem, respectivamente, aos cenários 1, 2, 3, 4, 5 e 6 definidos na tabela 5, presente no capítulo 3.2.1 deste trabalho. As considerações que levaram à escolha de cada parâmetro estão justificadas na Análise de Inventário, capítulo 3.2.2 deste estudo.

Product information ?

Name:

Material, manufacture and end of life ?

Qty.	Component name	Material	Recycled content	Mass (kg)	Primary process	End of life
1	Quadro	Aluminum, 6061, T6	Typical %	20	Extrusion, foil rolling	Recycle
2	Pneus	Natural rubber (15-42% carbon black)	Virgin (0%)	2	Polymer molding	Re-manufacture

Transport ?

Name	Transport type	Distance (km)
Transporte até a loja	26 tonne (3 axle) truck	100

Use ?

Product life: Years

Country of use:

Static mode

☐ Product uses the following energy:

Energy input and output:

Power rating: W

Usage: days per year

Usage: hours per day

Mobile mode

☐ Product is part of or carried in a vehicle:

Fuel and mobility type:

Usage: days per year

Distance: km per day

Figura 24 – Tela de escolha de parâmetros da bicicleta convencional usada no Brasil

Fonte: ferramenta Eco Audit do software CES *EduPack* 2019

Product information ?

Name:

Material, manufacture and end of life ?

Qty.	Component name	Material	Recycled content	Mass (kg)	Primary process	End of life
1	Quadro	Aluminum, 6061, T6	Typical %	20	Extrusion, foil rolling	Recycle
2	Pneus	Natural rubber (15-42% carbon black)	Virgin (0%)	2	Polymer molding	Re-manufacture

Transport ?

Name	Transport type	Distance (km)
Transporte até a loja	26 tonne (3 axle) truck	100

Use ?

Product life: Years

Country of use:

Static mode

☐ Product uses the following energy:

Energy input and output:

Power rating: W

Usage: days per year

Usage: hours per day

Mobile mode

☐ Product is part of or carried in a vehicle:

Fuel and mobility type:

Usage: days per year

Distance: km per day

Figura 25 – Tela de escolha de parâmetros da bicicleta convencional usada na China

Fonte: CES *EduPack* 2019

Product information ?

Name: Elétrica (Íon-Lítio) BR

Material, manufacture and end of life ?

Qty.	Component name	Material	Recycled content	Mass (kg)	Primary process	End of life
1	Quadro	Aluminum, 6061, T6	Typical %	20	Extrusion, foil rolling	Recycle
2	Pneus	Natural rubber (15-42% carbon black)	Virgin (0%)	2	Polymer molding	Re-manufacture
1	Bateria	Li-Ion battery (for scooters)	Virgin (0%)	2,5	Incl. in material value	Downcycle

Transport ?

Name	Transport type	Distance (km)
Transporte até a loja	26 tonne (3 axle) truck	100

Use ?

Product life: 5 Years

Country of use: Brazil

Static mode

☐ Product uses the following energy:

Energy input and output: Electric to thermal

Power rating: 0 W

Usage: 0 days per year

Usage: 0 hours per day

Mobile mode

☒ Product is part of or carried in a vehicle:

Fuel and mobility type: Electric - family car

Usage: 200 days per year

Distance: 30 km per day

Figura 26 – Tela de escolha de parâmetros da bicicleta elétrica com bateria de íon-lítio usada no Brasil

Fonte: CES EduPack 2019

Product information ?

Name: Elétrica (Íon-Lítio) CH

Material, manufacture and end of life ?

Qty.	Component name	Material	Recycled content	Mass (kg)	Primary process	End of life
1	Quadro	Aluminum, 6061, T6	Typical %	20	Extrusion, foil rolling	Recycle
2	Pneus	Natural rubber (15-42% carbon black)	Virgin (0%)	2	Polymer molding	Re-manufacture
1	Bateria	Li-Ion battery (for scooters)	Virgin (0%)	2,5	Incl. in material value	Downcycle

Transport ?

Name	Transport type	Distance (km)
Transporte até a loja	26 tonne (3 axle) truck	100

Use ?

Product life: 5 Years

Country of use: China

Static mode

☐ Product uses the following energy:

Energy input and output: Electric to thermal

Power rating: 0 W

Usage: 0 days per year

Usage: 0 hours per day

Mobile mode

☒ Product is part of or carried in a vehicle:

Fuel and mobility type: Electric - family car

Usage: 200 days per year

Distance: 30 km per day

Figura 27 – Tela de escolha de parâmetros da bicicleta elétrica com bateria de íon-lítio usada na China

Fonte: CES EduPack 2019

Product information ?

Name: Elétrica (Chumbo Ácido) BR

Material, manufacture and end of life ?

Qty.	Component name	Material	Recycled content	Mass (kg)	Primary process	End of life
1	Quadro	Aluminum, 6061, T6	Typical %	30	Extrusion, foil rolling	Recycle
2	Pneus	Natural rubber (15-42% carbon black)	Virgin (0%)	2	Polymer molding	Re-manufacture
5	Bateria	Lead-acid battery (for cars)	Virgin (0%)	10	Incl. in material value	Downcycle

Transport ?

Name	Transport type	Distance (km)
Transporte até a loja	26 tonne (3 axle) truck	100

Use ?

Product life: 5 Years

Country of use: Brazil

Static mode

☐ Product uses the following energy:

Energy input and output: Electric to thermal

Power rating: 0 W

Usage: 0 days per year

Usage: 0 hours per day

Mobile mode

☒ Product is part of or carried in a vehicle:

Fuel and mobility type: Electric - family car

Usage: 200 days per year

Distance: 30 km per day

Figura 28 – Tela de escolha de parâmetros da bicicleta elétrica com bateria de chumbo ácido usada no Brasil

Fonte: CES EduPack 2019

Product information ?

Name: Elétrica (Chumbo Ácido) CH

Material, manufacture and end of life ?

Qty.	Component name	Material	Recycled content	Mass (kg)	Primary process	End of life
1	Quadro	Aluminum, 6061, T6	Typical %	30	Extrusion, foil rolling	Recycle
2	Pneus	Natural rubber (15-42% carbon black)	Virgin (0%)	2	Polymer molding	Re-manufacture
5	Bateria	Lead-acid battery (for cars)	Virgin (0%)	10	Incl. in material value	Downcycle

Transport ?

Name	Transport type	Distance (km)
Transporte até a loja	26 tonne (3 axle) truck	100

Use ?

Product life: 5 Years

Country of use: China

Static mode

☐ Product uses the following energy:

Energy input and output: Electric to thermal

Power rating: 0 W

Usage: 0 days per year

Usage: 0 hours per day

Mobile mode

☒ Product is part of or carried in a vehicle:

Fuel and mobility type: Electric - family car

Usage: 200 days per year

Distance: 30 km per day

Figura 29 – Tela de escolha de parâmetros da bicicleta elétrica com bateria de chumbo ácido usada na China

Fonte: CES EduPack 2019

4. Resultados

4.1. Pegada de CO₂

A figura 30 corresponde ao gráfico fornecido pelo *software* como resultado resumido da Análise de Ciclo de Vida realizada, comparando a pegada de CO₂ de cada um dos produtos e em cada uma das etapas do ciclo, ao longo dos cinco anos de vida definidos como padrão. A figura 31 fornece uma comparação entre as pegadas de CO₂ dos produtos, tomando como base (0%) a bicicleta convencional usada no Brasil. A tabela 10, por fim, apresenta os valores de pegada de CO₂ calculados pelo *software* para cada etapa do ciclo de vida dos produtos.

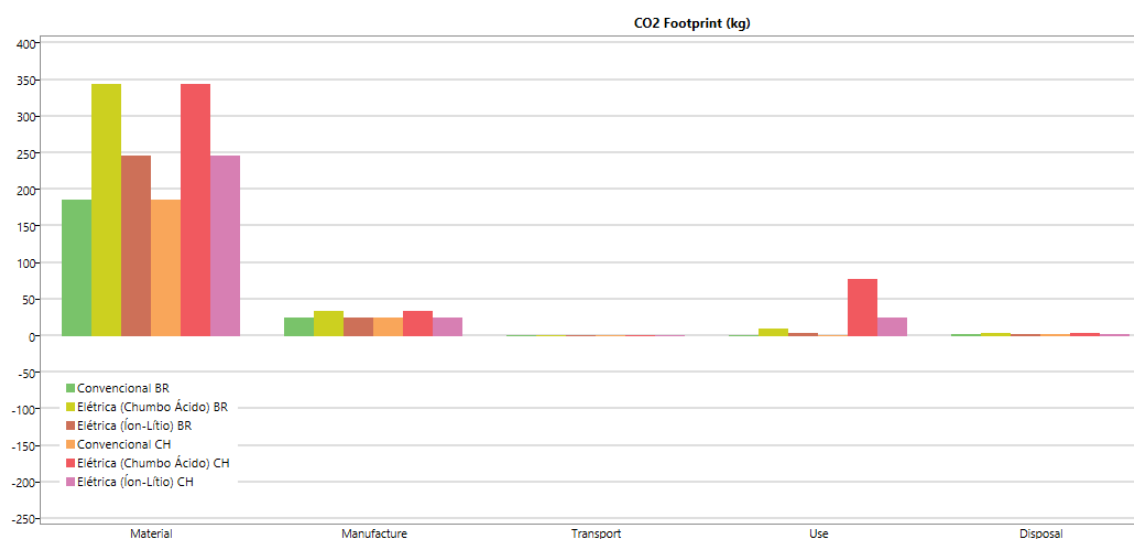


Figura 30 – Pegadas de CO₂ (kg) de cada produto em todo o ciclo de vida

Fonte: CES *EduPack* 2019

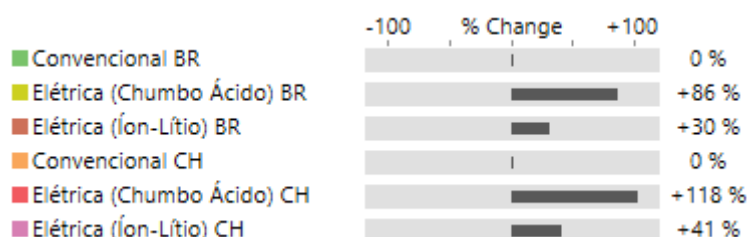


Figura 31 – Variação da pegada de CO₂ (kg) de cada produto em função do valor correspondente à bicicleta convencional usada no Brasil

Fonte: CES *EduPack* 2019

Pegada de CO₂ (kg) por etapa do ciclo de vida e por produto

Produto	Material	Manufatura	Transporte	Uso	Descarte	Total
Bicicleta Convencional (Brasil)	185,0	23,5	0,2	0,0	1,0	209,7
Bicicleta Elétrica - Chumbo Ácido (Brasil)	343,0	32,8	0,7	9,0	3,3	388,7
Bicicleta Elétrica - Íon-Lítio (Brasil)	245,0	23,5	0,2	2,8	1,1	272,7
Bicicleta Convencional (China)	185,0	23,5	0,2	0,0	1,0	209,7
Bicicleta Elétrica - Chumbo Ácido (China)	343,0	32,8	0,7	76,3	3,3	456,0
Bicicleta Elétrica - Íon-Lítio (China)	245,0	23,5	0,2	24,1	1,1	293,9

Tabela 10 – Pegada de CO₂ (kg) calculada pelo software para cada etapa da ACV e para cada produto

Fonte: o autor, com base em dados fornecidos pelo CES *EduPack* 2019

Nota-se que a etapa crítica do ciclo de vida de todos os tipos de bicicleta é a dos materiais, com maiores pegadas de CO₂ para as bicicletas elétricas com bateria de chumbo ácido, seguidas pelas que contêm baterias de íon-lítio. As menores pegadas de CO₂ das bicicletas convencionais indicam que a produção das baterias tem grande peso nas emissões correspondentes à etapa crítica. Além disso, os valores mais expressivos dos produtos utilizados na China também indicam que a influência do país é significativa.

4.1.1. Efeito da bateria

As tabelas 11 e 12 indicam os aumentos da pegada de CO₂ por conta da presença da bateria na bicicleta, respectivamente no Brasil e na China.

Variação (%) da pegada de CO₂ | Bicicleta Convencional vs Elétrica | Brasil

Produto	Material	Manufatura	Transporte	Uso	Descarte	Total
Bicicleta Convencional (Brasil)	185,0	23,5	0,2	0,0	1,0	209,7
Bicicleta Elétrica - Íon-Lítio (Brasil)	245,0	23,5	0,2	2,8	1,1	272,7
Aumento (%) - Convencional x Íon-Lítio	32%	0%	11%	---	8%	30%
Bicicleta Elétrica - Chumbo Ácido (Brasil)	343,0	32,8	0,7	9,0	3,3	388,7
Aumento (%) - Convencional x Chumbo Ácido	85%	40%	250%	---	215%	85%

Tabela 11 – Aumento da pegada de CO₂ causada pela bateria nos cenários de uso no Brasil

Fonte: o autor, com base em dados fornecidos pelo CES *EduPack* 2019

Variação (%) da pegada de CO₂ | Bicicleta Convencional vs Elétrica | China

Produto	Material	Manufatura	Transporte	Uso	Descarte	Total
Bicicleta Convencional (China)	185,0	23,5	0,2	0,0	1,0	209,7
Bicicleta Elétrica - Íon-Lítio (China)	245,0	23,5	0,2	24,1	1,1	293,9
Aumento (%) - Convencional x Íon-Lítio	32%	0%	11%	---	8%	40%
Bicicleta Elétrica - Chumbo Ácido (China)	343,0	32,8	0,7	76,3	3,3	456,0
Aumento (%) - Convencional x Chumbo Ácido	85%	40%	250%	---	215%	117%

Tabela 12 – Aumento da pegada de CO₂ causada pela bateria nos cenários de uso na China

Fonte: o autor, com base em dados fornecidos pelo CES *EduPack* 2019

Os aumentos dos níveis de emissão decorrentes das etapas de transporte e descarte são desprezíveis porque, apesar dos grandes percentuais, são valores absolutos muito baixos, provocando impactos muito pequenos sobre o ciclo de vida como um todo. Ainda, apenas as baterias de chumbo ácido apresentam elevação das emissões na etapa de manufatura.

As etapas mais relevantes na comparação entre bicicletas convencionais e elétricas são a de materiais e a de uso. Adotou-se a premissa de que as baterias seriam produzidas apenas com uso de materiais virgens, fator que exerce influência nesse aumento, e a necessidade de cinco baterias de chumbo ácido ao longo do ciclo de vida de cinco anos, contra apenas uma bateria de íon-lítio, faz com que a variação seja mais expressiva neste caso. Quanto ao uso, não há percentual de aumento porque o valor da pegada de CO₂ é nulo para as bicicletas convencionais, mas as variações são significativas, sobretudo na China.

4.1.2. Efeito do país de uso

Os dados obtidos indicam que o país tem grande influência sobre as emissões de CO₂ na etapa de uso do produto. A China possui uma matriz elétrica mais poluente e com menos fontes renováveis em comparação com o Brasil, conforme indicam as figuras 7 e 8 do capítulo 2.1.3 deste trabalho, o que reflete na energia usada no carregamento das bicicletas. A tabela 13 exibe o aumento percentual da pegada de CO₂, na fase de uso e no ciclo de vida total, dos cenários considerados na China em relação aos cenários do Brasil.

Variação (%) da pegada de CO₂ | Brasil vs China

Produto	Uso	Total
Bicicleta Elétrica - Íon-Lítio (Brasil)	2,8	272,7
Bicicleta Elétrica - Íon-Lítio (China)	24,1	293,9
Diferença (%) - Íon-Lítio	749%	8%
Bicicleta Elétrica - Chumbo Ácido (Brasil)	9,0	388,7
Bicicleta Elétrica - Chumbo Ácido (China)	76,3	456,0
Diferença (%) - Chumbo Ácido	748%	17%

Tabela 13 – Pegada de CO₂ (kg) calculada pelo software para a etapa de uso e o total da ACV em função do país considerado

Fonte: o autor, com base em dados fornecidos pelo CES *EduPack* 2019

Porém, apesar dos grandes aumentos percentuais, os valores das pegadas de CO₂ na fase de uso não superam os da fase de material. Além disso, apenas nos cenários de uso na China tais valores superam os da fase de manufatura. Isso reforça a constatação de que a etapa de material é a crítica.

4.2. Energia

A figura 32 exibe o gráfico fornecido pelo *software* correspondente ao gasto de energia durante o ciclo de vida de cada produto.

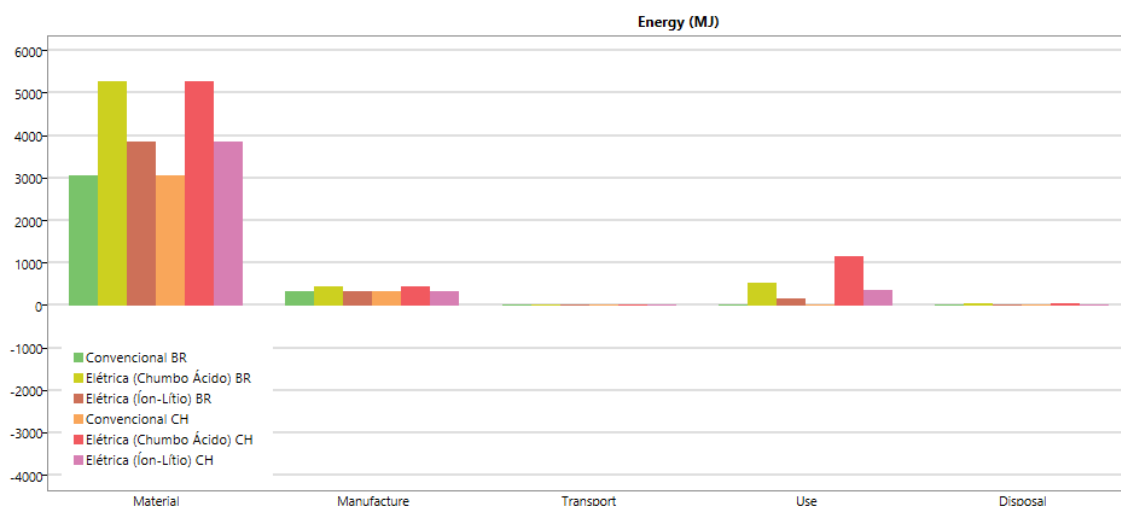


Figura 32 – Gasto de energia (MJ) de cada produto em todo o ciclo de vida

Fonte: CES EduPack 2019

Comparando as figuras 32 e 30, nota-se, pela semelhança entre os gráficos, que a pegada de CO₂ varia linearmente com o gasto de energia em todas as etapas, com exceção da de uso. Nesta, os valores de pegada de CO₂ dependem do país escolhido, conforme mostra a tabela 5, exibida no capítulo 3.1.3 deste trabalho.

A principal diferença observada na etapa de uso está nas bicicletas elétricas usadas no Brasil. Elas apresentam, proporcionalmente, pegadas de CO₂ menores do que os gastos energéticos associados a elas. Essa relação faz sentido pelo fato de que a matriz elétrica do Brasil é mais limpa, de modo que a mesma quantidade de energia causa menores emissões de CO₂ do que causaria em um país cujas fontes de energia elétrica são mais poluentes, como a China.

A tabela 14 exhibe os valores de pegada de CO₂ (kg) e energia (MJ) na etapa de uso para as quatro bicicletas elétricas analisadas, apresentando um cálculo de kg de CO₂ emitido a cada MJ de energia gasta. De acordo com os resultados obtidos e expostos na tabela, essa relação é de 0,02 no Brasil e 0,07 na China, índice 250% superior ao do Brasil.

Pegada de CO₂ (kg) vs Energia (MJ) na etapa de uso

Produto	Pegada de CO ₂ (kg)	Energia (MJ)	Pegada / Energia (kg / MJ)
Bicicleta Elétrica - Chumbo Ácido (Brasil)	9,0	510,8	0,02
Bicicleta Elétrica - Chumbo Ácido (China)	76,3	1.098,4	0,07
Bicicleta Elétrica - Íon-Lítio (Brasil)	2,8	160,1	0,02
Bicicleta Elétrica - Íon-Lítio (China)	24,1	356,2	0,07

Tabela 14 – Comparação entre pegadas de CO₂ e gastos energéticos na fase de uso das bicicletas elétricas por país

Fonte: o autor, com base em dados fornecidos pelo CES *EduPack* 2019

5. Discussão

5.1. Desafio de eco design: massa do quadro

Conforme os resultados apresentados no capítulo 4, a fase de material é a etapa crítica do ciclo de vida das bicicletas elétricas. Ainda, de acordo com as tabelas 11 e 12, as baterias de chumbo ácido apresentam pegada de CO₂ significativamente maior que as de íon-lítio nesta etapa, o que tem forte influência da necessidade de produzir cinco baterias de chumbo ácido ao longo do ciclo de vida e apenas uma de íon-lítio, mas também se deve à maior massa da bicicleta que precisa suportar a bateria de chumbo, que é a mais pesada.

Portanto, a ACV realizada mostra que reduzir a massa do produto seria importante para diminuir a pegada de CO₂ associada às bicicletas. A maneira mais natural de se alcançar tal otimização é a busca por novos materiais para a produção dos componentes metálicos das *bikes*, sobretudo o quadro, que representa grande parte de sua estrutura.

5.1.1. Fibra de carbono

A fibra de carbono é um material compósito usado quando se necessita de boas propriedades mecânicas aliadas a baixo peso. Ela apresenta alta resistência mecânica, alto módulo de elasticidade e baixa massa específica, entre outras características que a tornam interessante em diversas situações (BURAKOWSKI, REZENDE, 2001).

Os ganhos em termos de pegada de carbono associados à fibra são significativos. Na dissertação de Angélica de Azevedo, de 2018, pela Universidade Nova de Lisboa, cujo título é “Análise de Ciclo de Vida de quadros de bicicleta em aço, alumínio e fibra de carbono”, é possível observar, de acordo com a tabela 15 (retirada do estudo), que a pegada de CO₂ atrelada à fibra de carbono é, em média, 73% inferior à do alumínio, mesmo considerando que o alumínio seria reciclado ao final da sua vida, enquanto a fibra de carbono seria

incinerada ou destinada a aterro, opções muito menos interessantes do ponto de vista de sustentabilidade.

Cenário	Alterações Climáticas (kg CO ₂ eq)
Alumínio PT – Reciclagem	4,26E+01
Alumínio TW - Reciclagem	4,57E+01
Carbono PT – Aterro	1,01E+01
Carbono PT – Incineração	1,25E+01
Carbono TW - Aterro	1,30E+01

Tabela 15 – Pegada de CO₂ (kg) de quadros de bicicleta

Fonte: AZEVEDO, 2018

Além do menor peso da fibra de carbono, a autora destaca que o processo primário de produção do alumínio é um fator relevante nessa grande diferença observada.

Sua aplicação, porém, é limitada por conta de seu preço. É um material naturalmente mais caro que o alumínio e o aço, os mais usados atualmente na produção de quadros de bicicleta, o que inviabiliza a produção em larga escala de *bikes* de fibra de carbono. O empecilho relacionado ao preço do material alia-se, ainda, à dificuldade de reciclagem da fibra de carbono, uma vez que os polímeros reforçados com esse material são da classe dos termofixos, cujas ligações cruzadas formadas após o processo de cura tornam problemático o processo de reciclagem (RODRIGUES, 2013).

5.1.2. Titânio

É destacável, também, a alternativa do titânio para a produção de bicicletas. Ligas do metal têm possibilidades de aplicação em diversos componentes das *bikes*, como parafusos e peças do câmbio, e também podem compor o quadro, principal estrutura do produto. Dentre as propriedades do titânio e de suas ligas, destacam-se a alta resistência a corrosão e a elevada resistência mecânica (UEDA, IKEDA, 2019).

Porém, o alto preço e as dificuldades de processamento do metal dificultam seu uso em larga escala na produção de bicicletas, principalmente na composição do quadro, situação em que uma grande quantidade de titânio seria necessária.

O titânio, por fim, não é um metal que proporcionaria redução de massa em relação às bicicletas de alumínio, desafio de *eco design* proposto neste item. Gustavo Figueiredo, do site ativo.com, afirma que sua elevada resistência faz com que os tubos do quadro tenham paredes finas, mas, mesmo assim, as bicicletas de titânio são mais leves apenas do que as de aço, superando, portanto, as de alumínio e de fibra de carbono no peso.

5.2. Comparação com outro meio de transporte: motocicleta

Além das análises realizadas no capítulo 4, comparando bicicletas convencionais e elétricas, é importante cruzar os dados obtidos com informações relativas a outros meios de transporte, para compreender a representatividade impacto ambiental das bicicletas elétricas no âmbito dos automóveis de uma maneira geral.

Por conta das semelhanças na forma – veículo compacto – e no propósito – de transportar apenas uma pessoa – da motocicleta, este é o meio de transporte cuja comparação com as bicicletas elétricas tem mais sentido.

O trabalho de Gustavo José Suto de Souza, de 2011, pela Escola Politécnica da USP, cujo título é “Análise de Ciclo de Vida de uma motocicleta 125cc na cidade de São Paulo usando o *software* CES EduPack 2011”, possibilita comparações com o presente estudo, por apresentar um tema semelhante e usar o mesmo programa.

Em sua dissertação, o autor considera quatro cenários distintos, dos quais dois podem ser adequadamente comparados a este trabalho: uma matriz elétrica composta por 75% de gás natural e diesel – semelhante à China, de acordo com a figura 7 do capítulo 2.1.3 – e a outra exclusivamente de origem hidrelétrica – cenário mais próximo do Brasil, de acordo com a figura 8 do mesmo capítulo.

Em ambos os casos, as motocicletas são abastecidas com gasolina contendo 23% de etanol.

O autor define, ainda, que o ciclo de vida dos produtos é de dez anos, com 300 dias de uso por ano e 40 km diários de rodagem, resultando em 120.000 km totais ao longo do ciclo de vida. No presente estudo, conforme descrito nas figuras 26, 27, 28 e 29, as premissas adotadas são de 200 dias por ano, com 30 km diários de rodagem e um ciclo de vida de cinco anos, resultando em 30.000 km totais. Portanto, para que os valores dos dois estudos sejam comparáveis, os valores associados à etapa de uso da motocicleta serão divididos por quatro.

As tabelas 16 e 17 exibem a comparação entre os dados de ACV da motocicleta e das bicicletas elétricas.

Comparação entre as pegadas de CO₂ (kg) | Bicicletas Elétricas (Chumbo Ácido) vs Motocicletas

Produto	Material	Manufatura	Transporte	Uso	Descarte	Total
Bicicleta Elétrica - Chumbo Ácido (Brasil)	343,0	32,8	0,7	9,0	3,3	388,7
Motocicleta - 100% Hidrelétrica	15,9	2,8	29,8	276,2	5,4	330,1
Variação (%)	-95%	-91%	4381%	2969%	65%	-15%
Bicicleta Elétrica - Chumbo Ácido (China)	343,0	32,8	0,7	76,3	3,3	456,0
Motocicleta - 75% Diesel e Gás Natural	265,1	46,1	29,8	276,2	3,3	620,5
Variação (%)	-23%	41%	4381%	262%	0%	36%

Tabela 16 – Comparação entre pegadas de CO₂ (kg) de motocicletas e de bicicletas elétricas com bateria de chumbo ácido

Fontes: o autor; SOUZA (2011)

Comparação entre as pegadas de CO₂ (kg) | Bicicletas Elétricas (Íon-Lítio) vs Motocicletas

Produto	Material	Manufatura	Transporte	Uso	Descarte	Total
Bicicleta Elétrica - Íon-Lítio (Brasil)	245,0	23,5	0,2	2,8	1,1	272,7
Motocicleta - 100% Hidrelétrica	15,9	2,8	29,8	276,2	5,4	330,1
Variação (%)	-94%	-88%	14090%	9626%	382%	21%
Bicicleta Elétrica - Íon-Lítio (China)	245,0	23,5	0,2	24,1	1,1	293,9
Motocicleta - 75% Diesel e Gás Natural	265,1	46,1	29,8	276,2	3,3	620,5
Variação (%)	8%	96%	14090%	1046%	193%	111%

Tabela 17 – Comparação entre pegadas de CO₂ (kg) de motocicletas e de bicicletas elétricas com bateria de íon-lítio

Fontes: o autor; SOUZA (2011)

Dos quatro cenários comparativos expostos, o único em que a *bike* elétrica apresenta maior pegada de CO₂ ao longo do ciclo de vida é o que contém a bicicleta com bateria de chumbo ácido no Brasil frente à motocicleta em um país cuja eletricidade seria 100% proveniente de fontes hidrelétricas. É importante ressaltar, porém, que este cenário, mesmo sendo o mais próximo do Brasil dentre os disponíveis, apresenta uma matriz elétrica mais limpa, fator que influencia no resultado da comparação. A outra hipótese apresentada pelo autor, com matriz elétrica de 75% de diesel e gás natural, provoca aumentos significativos na pegada de CO₂ das etapas de material e manufatura, evidenciando a influência das origens 100% limpas de eletricidade no cenário anterior.

Na etapa de uso, as motocicletas apresentam pegadas de CO₂ significativamente maiores em todas as comparações realizadas, demonstrando que o carregamento de uma bateria, mesmo em um país de matriz energética suja como a China, não é comparável às grandes emissões geradas pela queima de combustíveis fósseis como a gasolina.

5.3. Outros problemas das baterias

5.3.1. Disponibilidade de lítio no mundo

As vantagens associadas ao uso de baterias de íon-lítio são evidenciadas pelos resultados apresentados neste trabalho, com menores pegadas de CO₂, gastos energéticos e peso em relação aos modelos de chumbo ácido. É natural que tais condições, associadas à crescente busca por soluções mais sustentáveis, provoquem o aumento da demanda por esse metal, não apenas para a produção de baterias de automóveis, mas no mercado de baterias como um todo, o que levanta questionamentos a respeito da disponibilidade do metal no planeta a longo prazo.

Porém, na contramão de tal preocupação, um estudo realizado em 2015 pelo governo dos Estados Unidos da América concluiu que seria possível triplicar

a produção de lítio em relação aos níveis da época e, mantendo esse ritmo constante, o metal estaria disponível na natureza por mais 135 anos.

Segundo Chatsko (2015), a ideia de que as reservas mundiais de lítio são escassas pode estar relacionada aos preços observados no mercado diante do crescimento de sua demanda. No período de 2010 a 2014, o consumo do metal em baterias cresceu 73%, enquanto a produção mundial aumentou em apenas 28%, e esse descompasso provocou grandes aumentos no preço do lítio.

A tabela 18, divulgada pelo governo dos EUA em 2016 no relatório denominado *US Geological Survey*, exibe os valores, em toneladas, de produção de lítio no período de 2013 a 2015 e as reservas estimadas dos principais países desse mercado na época. Em 2020, foram publicados, também pelo governo norte-americano e no relatório de mesmo nome, novos dados correspondentes a 2018 e 2019, além de estimativas atualizadas de reservas mundiais, e eles estão exibidos na tabela 19.

	2013	2014	2015	Reserves
Argentina	2500	3200	3800	2,000,000
Australia	12,700	13,300	13,400	1,500,000
Brazil	400	160	160	48,000
Chile	11,200	11,500	11,700	7,500,000
China	4700	2300	2200	3,200,000
Portugal	570	300	300	60,000
United States	870	W	W	38,000
Zimbabwe	1000	900	900	23,000
World Total (rounded)	33,940	31,700	32,500	14,000,000

Tabela 18 – Produção anual de 2013 a 2015 e estimativa de reservas acumuladas de lítio ao final desse período nos principais países produtores do metal, em toneladas

Nota: valores com W foram omitidos por decisão dos autores

Fonte: U.S. *Geological Survey*, 2016

	Mine production		Reserves ⁵
	2018	2019 ^e	
United States	W	W	630,000
Argentina	6,400	6,400	1,700,000
Australia	58,800	42,000	⁶ 2,800,000
Brazil	300	300	95,000
Canada	2,400	200	370,000
Chile	17,000	18,000	8,600,000
China	7,100	7,500	1,000,000
Namibia	500	—	NA
Portugal	800	1,200	60,000
Zimbabwe	1,600	1,600	230,000
Other ⁷	—	—	1,100,000
World total (rounded)	⁸ 95,000	⁸ 77,000	17,000,000

Tabela 19 – Produção anual de 2018 e 2019 e estimativa de reservas atuais de lítio nos principais países produtores do metal, em toneladas

Nota: valores com W foram omitidos por decisão dos autores

Fonte: U.S. Geological Survey, 2020

É notável o crescimento na produção do metal entre 2015 e 2018, que praticamente triplicou no período. Por outro lado, o aumento da estimativa do total de reservas mundiais ameniza o cenário de criticidade associado à disponibilidade futura de lítio no planeta.

O *US Geological Survey* de 2020 fornece a análise de que os números decresceram de 2018 para 2019 em razão do excesso de produção ocorrido em 2018, com níveis de consumo consideravelmente menores do que as 95 mil toneladas produzidas, e também pela queda do preço do metal no mercado. Ainda, mesmo com a produção reduzida em 2019, o consumo foi menor do que o esperado, e um dos principais motivos foi a queda na venda de veículos elétricos.

Se essa queda observada em 2019 significar uma tendência de estabilização do consumo de lítio, a preocupação com a disponibilidade do metal deve ser reduzida no futuro. Considerando que a produção mundial de lítio se mantenha em 86 mil toneladas por ano, média entre os valores de 2018 e 2019 da tabela 19, as reservas mundiais seriam esgotadas apenas em cerca de 200 anos, considerando que a estimativa de 17 milhões de toneladas do estudo não fosse alterada. Em dois séculos, espera-se que novas tecnologias surjam e substituam as atuais, evitando que se chegue ao cenário de esgotamento.

Porém, se a demanda voltar a crescer, sobretudo impulsionada pelo crescimento nas vendas de veículos elétricos, essa questão se tornará cada vez mais alarmante. Assumindo que a produção volte a triplicar em pouco tempo, como ocorreu entre 2015 e 2018, e que a produção média dos próximos anos seja de 258 milhões de toneladas por ano – três vezes a média entre 2018 e 2019 –, o esgotamento das reservas estimadas de 17 milhões de toneladas ocorreria em 66 anos, momento muito mais próximo do que a estimativa anterior. É difícil prever se haveria tempo hábil para que a evolução da ciência proporcionasse alternativas ao lítio, tornando incerto o cenário futuro para um dos metais mais relevantes da atualidade.

5.3.2. Contaminação por chumbo

Conforme a explicação do capítulo 3.2.2.3, correspondente à Análise de Inventário das baterias, assumiu-se que estas seriam submetidas ao processo de *downcycle* ao final de suas vidas, possibilitando que seus componentes tivessem novas aplicações futuras, ainda que com qualidade inferior à original. O destino final adotado é, portanto, uma alternativa sustentável, e é possível observar, nas figuras 30 e 32 exibidas nos resultados deste estudo, que o descarte dos produtos resulta em pequenos índices de pegada de CO₂ e gasto de energia.

Porém, a destinação incorreta das baterias ao final do ciclo de vida, sobretudo as de chumbo, pode gerar enormes problemas ambientais. Ao serem descartadas em locais inadequados, as baterias de chumbo ácido podem promover a contaminação dos solos, das águas e dos vegetais por conta das características do chumbo, que é um metal pesado e tem grande potencial bioacumulador no organismo dos seres vivos (MARCHI *et al.*, 2009).

De acordo com a explicação do capítulo 3.1.1, o fim de vida com descarte em aterro é uma das opções do *software*, mas se aplica somente a materiais não tóxicos, de modo que não é possível simular esse tipo de descarte para as baterias. Além disso, a contaminação promovida pelo chumbo é um problema que extrapola os aspectos mensurados pelo CES *EduPack* 2019.

O Brasil registra acidentes com contaminação por chumbo ao longo de sua história. De acordo com o Ministério da Saúde, os mais graves ocorreram em Adrianópolis (PR) e em Santo Amaro da Purificação (BA), em meados do século XX, ambos em decorrência de atividades de mineração.

A reciclagem de baterias de chumbo ácido, além de evitar acidentes ambientais, pode ser interessante do ponto de vista econômico. De acordo com dados do Ministério do Meio Ambiente, boa parte do chumbo usado no país é proveniente de importação, e a reciclagem de baterias seria uma alternativa vantajosa para reduzir essa dependência, podendo suprir até 75% da demanda nacional por meio da simples reinserção das baterias usadas na cadeia produtiva. Em 2020, o governo fechou um acordo com a Associação Brasileira de Baterias Automotivas e Indústrias (Abrabat), a Associação Nacional dos Sincopeças do Brasil (Sincopeças-BR) e o Instituto Brasileiro de Energia Reciclável (IBER) para implementar esse sistema de logística reversa, com o potencial de reciclagem de 16 milhões de baterias por ano, correspondentes a 155 mil toneladas de chumbo.

O programa foi baseado, porém, em baterias de automóveis movidos a combustíveis como gasolina, etanol e diesel, que são mais presentes no mercado do que as baterias de veículos elétricos. Caso haja, no Brasil, um crescimento exponencial na produção e na venda de carros, bicicletas, patinetes e outros meios de transporte movidos a eletricidade, será necessária uma maior capacidade de coleta e reciclagem de baterias. Se ela não for compatível com o ritmo de crescimento do consumo, problemas de contaminação por chumbo podem se agravar. Nesse sentido, os modelos de íon-lítio apresentam vantagens ambientais, uma vez que o lítio não é um metal pesado e não apresenta, portanto, o mesmo potencial de contaminação de pessoas e do meio ambiente.

6. Conclusões

- Foram realizadas uma série de aproximações no uso da ferramenta *Eco Audit* do software CES *EduPack* 2019, como a extensão do material do quadro para os demais componentes metálicos da bicicleta e a desconsideração do motor das *e-bikes*, a fim de simplificar a análise e facilitar a compreensão dos impactos das baterias nos indicadores avaliados;
- A etapa crítica do ciclo de vida de todos os modelos de bicicleta estudados, independentemente do país de uso, da presença ou do tipo das baterias, é a de material, tanto do ponto de vista de pegada de CO₂ quanto sob a ótica de energia gasta ao longo do ciclo;
- Os produtos que apresentaram maiores pegadas de CO₂ foram as bicicletas elétricas com baterias de chumbo ácido, principalmente por conta da menor autonomia desse tipo de bateria, cuja vida útil é aproximadamente cinco vezes menor em comparação com as de íon-lítio, fazendo com que seja necessário produzir, consumir e descartar cinco baterias ao longo do ciclo de vida, de acordo com as condições de uso estipuladas no estudo;
- As bicicletas elétricas com baterias de íon-lítio possuem pegadas de CO₂ maiores do que os modelos convencionais, mas com apenas 30% de aumento no Brasil e 41% na China, enquanto essas taxas atingem 86% no Brasil e 118% na China para os modelos de chumbo ácido;
- Por conta das diferentes composições de matrizes elétricas, o país exerce forte influência sobre a pegada de CO₂ na etapa de uso, com mais de 700% de aumento das emissões quando o uso das *e-bikes* ocorre na China em relação a quando ele acontece no Brasil, mas, mesmo na China, as emissões nessa fase do ciclo de vida são pequenas em relação aos valores observados na etapa de material;
- Os gastos de energia variam praticamente de forma linear em relação às pegadas de CO₂ em todas as etapas do ciclo de vida, com exceção da de uso, em que o país de uso exerce forte influência, algo evidenciado pela

relação de 0,07 kg CO₂ / MJ na China contra apenas 0,02 kg CO₂ / MJ no Brasil;

- O fato de a etapa crítica em todos os cenários analisados ser a de material cria o desafio de *eco design* de redução de massa das bicicletas, e, nesse contexto, a fibra de carbono representa um material com boas S de substituir o alumínio e o aço, caso seu preço se torne mais acessível com o passar dos anos – o titânio é outro material promissor, mas por propriedades não relacionadas à massa, já que as bicicletas feitas com esse metal não são mais leves que as de alumínio;
- A motocicleta pode ser considerada um meio de transporte semelhante a uma bicicleta elétrica e, ao comparar o presente estudo a uma ACV realizada sobre motos considerando países cujas fontes de energia são semelhantes às de Brasil e China, observa-se que, de uma forma geral, as motocicletas apresentam pegadas de CO₂ maiores frente às *e-bikes*;
- Baterias de chumbo ácido são mais baratas, mas sua massa elevada faz com que a bicicleta precise ser mais pesada para suportá-la – elevando a pegada de CO₂ da etapa crítica, a de material – e elas apresentam uma série de outras desvantagens, além de terem um grande potencial de contaminação de solos, águas e vegetais caso seja descartada incorretamente, algo que pode ocorrer com um eventual crescimento desenfreado no consumo de veículos elétricos;
- Baterias de íon-lítio são mais vantajosas por terem menor massa, menor volume, maior durabilidade e menor necessidade de manutenção, entre outros fatores, e apresentam como grande incógnita a disponibilidade de lítio no futuro, uma vez que, se o ritmo atual de produção do metal aumentar significativamente, suas reservas podem ser esgotadas ainda no século atual;
- Bicicletas elétricas com baterias de íon-lítio podem ser consideradas sustentáveis quando comparadas a *bikes* convencionais e a outros meios de transporte como as motocicletas, sobretudo se usadas em países cuja matriz elétrica é limpa;
- Desenvolver novas tecnologias e novos tipos de baterias é fundamental para que se tenha alternativas aos modelos mais usados atualmente, mas

os avanços nesse campo são pouco divulgados e/ou pouco detalhados por conta de interesses comerciais.

7. Referências Bibliográficas

ASHBY, M. **Materials and Sustainable Development**. Butterworth-Heinemann, 2016.

ASHBY, M. **Materials Selection in Mechanical Design**. Butterworth-Heinemann, 2005.

AZEVEDO, A. **Análise do Ciclo de Vida de quadros de bicicleta em aço, alumínio e fibra de carbono**. Universidade Nova de Lisboa, 2018.

AZIZ, M.; GORDON, R. **A Neutral pH Aqueous Organic–Organometallic Redox Flow Battery with Extremely High Capacity Retention**. 2017.

BOCCHI, N.; BIAGGIO, S.; ROCHA-FILHO, R. **Prêmio Nobel de Química de 2019 – Láurea pelo Desenvolvimento das Baterias de Íons Lítio**. Química Nova na Escola, 2019.

BURAKOWSKI, L.; REZENDE, M. **Modificação da rugosidade de fibras de carbono por método químico para aplicação em compósitos poliméricos**. Polímeros. 2001.

CAMPANHA, J. C.; Ong Iniciativa Verde (Org.). **Calculadora de CO₂**. Disponível em < <http://www.iniciativaverde.org.br/calculadora/index.php> >. Acesso: 05 abr. 2020.

CARNEIRO, R.; Molina, J.; Antoniassi, B.; Magdalena, A.; Pinto, E. **Aspectos essenciais das Baterias Chumbo-Ácido e Princípios Físico-Químicos e Termodinâmicos do seu Funcionamento**. Revista Virtual de Química, 2017.

CASTRO, B.; BARROS, D.; VEIGA, S. **Baterias automotivas: panorama da indústria no Brasil, as novas tecnologias e como os veículos elétricos podem transformar o mercado global**. BNDES, 2013.

CHATSKO, M. **The Tesla gigafactories are coming, can global lithium supply keep it up?** Motley Fool, 2018

DELGADO, F.; FEBRARO, J. **Chronos: China e as suas questões de segurança energética**. FGV Energia, 2017.

FIGUEIREDO, G. **Os prós e contras dos materiais usados na fabricação de bicicletas**. Disponível em: < <https://www.ativo.com/bike/papo-de-pedal/materiais-fabricacao-de-bicicletas/> >. Acesso em: 19 abr. 2020.

[IEA] International Energy Agency. **Global Electric Vehicles Outlook Report 2019**.

ITACA. **How Lead-Acid Batteries Work**. Disponível em: < <https://www.itacanet.org/a-guide-to-lead-acid-batttries/part-1-how-lead-acid-batteries-work/> >. Acesso em: 11 mar. 2020.

JASKULA, B.W. **Geological Survey Lithium, U.S.**, 2015

JOPOWER. **Rechargeable sealed lead acid battery foi electric scooter**. Disponível em: < <http://jopower.com/sale-10417780-12v-20ah-rechargeable-sealed-lead-acid-battery-for-electric-scooter-electric-bicycle.html> >. Acesso em: 22 mar. 2020.

LUCHETTI, A. **Bicicleta elétrica: dicas básicas antes da compra**. Disponível em: < <http://www.ativo.com/bike/mobilidade/bicicleta-eletrica-dicas-basicas/> >. Acesso em: 19 abr. 2020.

LIMA, G. **Mobilidade por bicicleta: o uso de bicicletas elétricas em Paraopeba (MG)**. 2019.

MARIANO, L. **História do Pneu**. Disponível em: < <https://www.portalsaofrancisco.com.br/historia-do-brasil/historia-do-pneu> >. Acesso em: 09 mai. 2020.

[MMA] Ministério do Meio Ambiente. **Brasil avança na reciclagem de baterias de chumbo ácido**. Disponível em: < <https://www.mma.gov.br/informma/item/15703-brasil-avan%C3%A7a-na-reciclagem-de-baterias-de-chumbo-%C3%A1cido.html> >. Acesso em: 03 mai. 2020.

[MS] Ministério da Saúde. **Incidentes com chumbo no Brasil**. Disponível em: < <https://www.saude.gov.br/vigilancia-em-saude/vigilancia-ambiental/vigipeq/contaminantes-quimicos/chumbo/incidentes-com-chumbo-no-brasil> >. Acesso em: 03 mai. 2020.

MORDOR INTELLIGENCE. **E-bike market – growth, trends and forecast (2020 – 2025)**. 2019.

MURALIKRISHNA, I.; MANICKAM, V. **Environmental Management**. Butterworth-Heinemann, 2017.

NARINS, T. **The battery business: Lithium availability and the growth of the global electric car industry**. The Extractive Industries and Society, 2017.

RIBEIRO, P. **Análise dinâmica de um quadro de bicicleta**. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2013.

RODRIGUES, G. **Reciclagem e caracterização de fibra de carbono presente em composto de resina epóxi**. 2013.

SANTOS, A.; VALENGA, L. **Análise estrutural de quadros de bicicleta utilizando o método dos elementos finitos**. 2016.

SIDERA CONSULT; ALIANÇA BIKE. **Projeções e análise da demanda por bicicletas elétricas no Brasil**. 2018.

SOUZA, G. J. **Análise do ciclo de vida de uma motocicleta 125cc na cidade de São Paulo utilizando o software CES EduPack 2011**. 2011.

THYSSENKRUPP BRASIL. **Baterias de fluxo redox: sistemas de armazenamento de energia renovável**. Disponível em: < <https://www.thyssenkrupp-brazil.com/pt-br/empresa/inovacao/tecnologias-de-transicao-para-renovaveis/redox-flow-batterien-energiespeicher-fuer-erneuerbare-5.html> >. Acesso em: 7 jun. 2020.

UEDA, M.; IKEDA, M. **Titanium for consumer applications**. Chapter 7 – Sporting Goods: components for bicycles, 2017.

U.S.A. DEPARTMENT OF ENERGY. **The History of the Electric Car**. Disponível em: < <https://www.energy.gov/articles/history-electric-car> >. Acesso em: 18 nov. 2019.

U.S.A. DEPARTMENT OF THE INTERIOR. **Mineral Commodity Summaries 2016**. U.S. Geological Survey, 2016.

U.S.A. DEPARTMENT OF THE INTERIOR. **Mineral Commodity Summaries 2020**. U.S. Geological Survey, 2020.

[UNICA] União da Indústria de Cana de Açúcar. **Vendas de etanol hidratado no Centro-Sul registram recorde em maio**. 2019. Disponível em: < <https://unica.com.br/noticias/vendas-de-etanol-hidratado-no-centro-sul-registram-recorde-em-maio/> >. Acesso em: 28 mar. 2020.

[UNINASSAU] Centro Universitário Maurício de Nassau. **As baterias de íon-lítio são dispositivos importantes**. 2019.

VOLTAGE BIKES. **Bateria de Lítio para Bicicleta Elétrica - Bike Shop**. Disponível em: < <https://www.voltagebikes.com.br/Bateria-de-Litio-para-bicicleta-Eletrica> >. Acesso em: 22 mar. 2020.

WIEBECK, H.; ESPER, F.; FEIJÓ, A. C. **Tecnologia da Borracha**. Cooperação Universidade Empresa CECAE/USP, 2002.