

ALTERNATIVAS PARA MOBILIDADE URBANA SUSTENTÁVEL: COMPARAÇÃO ENTRE VEÍCULO ELÉTRICO A BATERIA ÍON-LÍTIO E A CÉLULA A COMBUSTÍVEL (UTILIZANDO ACV)

Estevão Brasil Ruas Vernalha^{1,2}
Sônia Regina da Cal Seixas¹

¹Universidade Estadual de Campinas

²Centro Universitário Unifaat

DOI: 10.47168/rbe.v28i4.771

RESUMO

A eletrificação da frota de veículos apresenta-se como uma alternativa com grande potencialidade de redução de emissões de Gases do Efeito Estufa (GEE) no setor de transporte. Atualmente, o sistema mais utilizado, cujo fornecimento da propulsão ao veículo ocorre através da eletricidade, envolve o uso de baterias íon-lítio com recarga *plug-in*. Outra possibilidade que se investiga é a utilização de veículos equipados com célula a combustível (C_aC), um reator eletroquímico capaz de converter hidrogênio (H₂) e o oxigênio do ar em eletricidade. No Brasil, a utilização de etanol como insumo na produção de H₂ para abastecimento de veículos a C_aC apresenta-se como uma possibilidade expressiva, dada a magnitude da infraestrutura de produção e distribuição de etanol já previamente instaladas no país. Este artigo apresenta um estudo de Avaliação do Ciclo de Vida que compara o desempenho ambiental destes dois sistemas – i) Veículo Elétrico convencional, com baterias íon-lítio e recarga *plug-in* (VE-Li), e ii) Veículo Elétrico movido a C_aC (VE-C_aC) utilizando H₂ obtido da reforma-vapor do etanol – realizada no posto de combustível (sistema *off-board* descentralizado). O sistema VE-Li apresentou melhor desempenho em cinco categorias de impacto ambiental; o sistema VE-C_aC performou melhor em seis. Quanto à categoria Aquecimento Global (GWP100a), o sistema VE-C_aC apresentou um impacto 12% menor que o sistema VE-Li, mostrando potencial expressivo para redução de emissões de GEE. Os resultados do sistema VE-Li reforçaram a necessidade de se manter a matriz elétrica com baixa participação de combustíveis fósseis para que, em um eventual cenário de ampliação da demanda por eletricidade alavancada pela eletrificação da frota, este sistema possa representar efetivamente uma alternativa de baixa emissão.

Palavras-chave: Avaliação do Ciclo de Vida; Veículo elétrico; Hidrogênio; Etanol.

ABSTRACT

The electrification of the vehicle fleet is an alternative with great potential to reduce Greenhouse Gas (GHG) emissions in the transport sector. Currently, the most used system in which the vehicle is propelled by electricity involves the use of lithium-ion batteries with plug-in recharge. Another possibility being investigated is the use of vehicles equipped with a fuel cell (FC), an electrochemical reactor capable of converting hydrogen (H₂) and oxygen into electricity. In Brazil, the use of ethanol as an input in the production of H₂ to supply FC vehicles is a significant possibility, given the magnitude of the infrastructure for the production and distribution of ethanol previously installed in the country. This article presents a Life Cycle Assessment study that compares the environmental performance of these two systems – i) Conventional Electric Vehicle, with lithium-ion batteries and plug-in recharge (EV-Li), and ii) Electric Vehicle powered by FC (EV-FC) using H₂ obtained from the steam reforming of ethanol – carried out at the fuel station (decentralized off-board system). The EV-Li system performed better in five environmental impact categories; the EV-FC system performed better in six. As for the Global Warming category (GWP100a), the EV-FC system had a 12% lower impact than the EV-Li system, showing significant potential for reducing GHG emissions. The results of the EV-Li system reinforced the need to maintain the electrical matrix with a low participation of fossil fuels so that, in a possible scenario of increased demand for electricity leveraged by the electrification of the fleet, this system could effectively represent a low-cost alternative.

Keywords: Life Cycle Assessment; Electric Vehicle; Hydrogen; Ethanol.

1. INTRODUÇÃO

A queima de combustíveis fósseis no setor de transporte configura-se como uma das principais fontes antrópicas de emissão de gases do efeito estufa (GEE) (COVERT et al., 2016; RAMADHAS, 2016). Neste sentido, a eletrificação da frota de veículos apresenta-se como uma alternativa com potencialidade expressiva de redução de emissões no setor de transporte. O veículo elétrico não apresenta emissões de escapamento (fase de uso) e suas taxas de emissão de GEE dependem sobretudo da estruturação do sistema responsável pela geração e fornecimento da eletricidade utilizada no veículo (EGEDE, 2017), configurando-se como uma rota com possibilidade de contribuir para a transição energética da economia em direção à descarbonização.

Atualmente, o sistema mais utilizado, cujo fornecimento da

propulsão ao veículo ocorre através da eletricidade, envolve o uso de baterias íon-lítio com recarga *plug-in* (CANO et al., 2018). Alternativamente, outra possibilidade que tem sido investigada é a utilização de veículos equipados com célula a combustível (CaC) (SOUZA et al., 2020), um reator eletroquímico capaz de converter o hidrogênio e o oxigênio do ar em eletricidade – além de água e calor.

Dentre os diversos insumos que podem ser utilizados para a produção de hidrogênio, no Brasil o etanol apresenta particularidades relevantes. Considerando a magnitude da infraestrutura de produção e distribuição deste energético já instalada no país, atrelar seu uso a uma tecnologia capaz de atender às novas demandas mundiais por padrões cada vez mais elevados de sustentabilidade pode representar uma ação estratégica. Trata-se de um movimento que poderia adicionar valor a um biocombustível cuja expertise brasileira ocupa posição de destaque no cenário internacional.

2. OBJETIVO E ESCOPO

O presente artigo apresenta um estudo de Avaliação do Ciclo de Vida (ACV), que tem como objetivo comparar o desempenho ambiental de dois sistemas capazes de atender à eletrificação da frota de veículos do Brasil – i) Veículo Elétrico convencional, com baterias íon-lítio e recarga *plug-in* (VE-Li), e ii) Veículo Elétrico movido a CaC (VE-CaC) utilizando hidrogênio obtido da reforma-vapor do etanol – realizada no posto de combustível (sistema *off-board* descentralizado). Em termos de escopo geográfico, a avaliação debruça-se sobre o cenário brasileiro. Já quanto ao escopo temporal, o estudo foca o cenário atual, obtendo-se resultados associados a uma abordagem atribucional de ACV.

Sobre as fronteiras de ambos os sistemas, os processos elementares do sistema VE-CaC estão representados pela Figura 1 e, do sistema VE-Li, pela Figura 2:

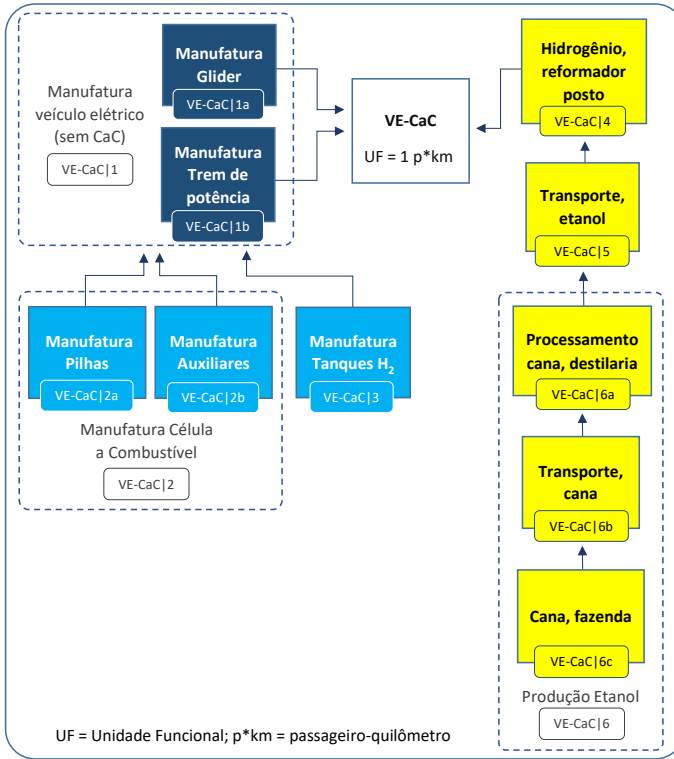


Figura 1 – Fronteiras do sistema VE-CaC

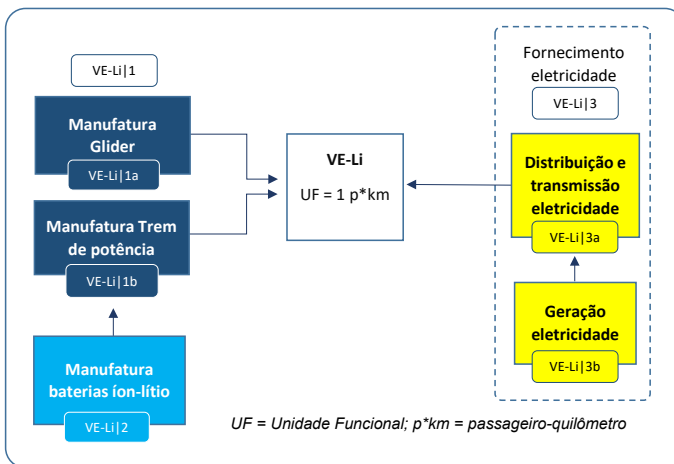


Figura 2 – Fronteiras do sistema VE-Li

Considerando a função dos sistemas analisados – transportar passageiros, a unidade funcional (UF) utilizada é 1 passageiro-quilômetro.

Quanto ao manejo dos coprodutos, o estudo utiliza o modelo de sistema da base Ecoinvent 3.8 denominado “alocação, corte por classificação”, no qual o tipo de manejo ocorre em função da classificação de cada subproduto – resíduo, material reciclável ou produto alocável (ECOINVET, 2022).

No caso do resíduo, as cargas ambientais associadas ao seu tratamento são completamente alocadas à atividade geradora do resíduo. Caso o tratamento do resíduo dê origem a algum subproduto que não seja considerado resíduo, nenhum crédito é dado à atividade geradora do resíduo, e esse subproduto é disponibilizado na base de dados como insumo inteiramente livre de cargas, podendo ser utilizado por outras atividades (ECOINVET, 2022).

Quando o subproduto é classificado como material reciclável, ele não é vinculado a nenhuma atividade de tratamento de resíduos, e é disponibilizado na base de dados como um insumo livre de cargas. Neste contexto, o ciclo de uso secundário se inicia com a coleta do material reciclável no local onde foi gerado, seguido de seu transporte ao local onde será processado (ECOINVET, 2022).

Por fim, após o manejo dos resíduos e dos materiais recicláveis, ocorre o processo de alocação para todos os subprodutos gerados pela atividade, classificados como alocáveis. Este procedimento ocorre seguindo os fatores de alocação definidos em cada conjunto de dados da base Ecoinvent, sendo que os fatores são definidos pelo autor do conjunto de dados (ECOINVET, 2022).

Sobre o método de Avaliação de Impacto do Ciclo de Vida (AICV), utilizou-se o CML-IA *baseline*, disponível no *software* OpenLCA 1.11.0 (GREENDELTA, 2020).

Visando ao atendimento do princípio da completeza – preconizado pela principal família de normas que padroniza os estudos de ACV (ABNT, 2014), o estudo contemplou todas as categorias de impacto ambiental presentes no método CML-IA *baseline*, a saber: depleção abiótica, depleção abiótica/recursos fósseis, acidificação, eutrofização, ecotoxicidade de água doce, aquecimento global (GWP100a), toxicidade humana, ecotoxicidade marinha, depleção da camada de ozônio (ODP), oxidação fotoquímica e ecotoxicidade terrestre.

Por fim, a obtenção dos dados que subsidiam a análise apoia-se majoritariamente na base de dados Ecoinvent 3.8 (WERNET et al., 2016). Adicionalmente, também conta com dados de artigos científicos de relevância internacional e dados coletados junto à empresa Hytron – Energia e Gases Industriais, que possui atuação em âmbito

internacional e contempla o processo de reforma-vapor do etanol dentre as operações que realiza. A sistematização dos dados e a realização dos cálculos envolvendo os fluxos de entrada e saída foram operadas no software OpenLCA 1.11.0 (GREENDELTA, 2020).

3. INVENTÁRIO DE CICLO DE VIDA (ICV)

Para o sistema VE-CaC, o veículo utilizado como referência de consumo médio foi o Toyota Mirai: 0,76 kg H₂/100 km (H2.LIVE, 2022), ou seja, 7,6e-3 kg H₂/km, operando com dois tanques de H₂ (TOYOTA, 2018). A potência líquida da CaC considerada foi de 80 kW, uma potência nominal representativa em se tratando de veículos de médio porte (USAI et al., 2021).

fator de consumo de etanol no reformador é 7,65 L de etanol por kg H₂ produzido – dados da empresa Hytron (LOPES, 2021). Assim, considerando-se a massa específica do etanol – 0,811 kg/L, tem-se que o fator de consumo é 7,65 L x 0,811 kg/L = 6,20 kg de etanol por kg de H₂ produzido.

A quantidade de eletricidade e água bruta necessárias para a produção de 1 kg H₂ é 2,35 kWh e 30 L, respectivamente (LOPES, 2021).

Para a modelagem do transporte do etanol – destilaria até local de reforma (posto de gasolina), considerou-se a distância entre uma das regiões do país que mais produzem etanol (São José do Rio Preto) e um dos centros que mais consomem combustível visando à mobilidade urbana (São Paulo): \cong 432 km.

Para o sistema de eletrificação envolvendo a bateria íon-lítio, o veículo considerado como referência foi o Nissan Leaf – modelo com capacidade da bateria de 40 kWh e consumo médio de 171 Wh/km (NISSAN, 2022), sendo que o peso total da bateria considerado foi 208 kg (DRIVINGCONNECTIVE, 2022).

Com relação a dados gerais de ambos os veículos, considerou-se vida útil de 150.000 km e peso total – sem baterias e sem CaC – de 1.200 kg.

As Tabelas 1 e 2 sumarizam as fontes dos dados utilizados no ICV:

Tabela 1 – Bases de dados utilizadas em cada processo do sistema VE-CaC

Processo	Base de dados - ICV
Manufatura Veículo	Ecoinvent 3.8 (WERNET et al., 2016)
Manufatura Glíder	
Manufatura Trem de Potência	

Tabela 1 – Bases de dados utilizadas em cada processo do sistema VE-CaC (cont.)

Processo	Base de dados - ICV
Manufatura Célula a Combustível	Usai et al., 2021
Manufatura Pilhas	
Manufatura Auxiliares	
Manufatura Tanques de H2	
Reforma-Vapor do etanol	Hytron (LOPES, 2021); Chen et al., 2020
Transporte Etanol	Ecoinvent 3.8 (WERNET et al., 2016)
Produção Etanol	
Transporte Cana-de-açúcar	
Produção Cana-de-açúcar	

Tabela 2 – Base de dados utilizada nos processos do sistema VE-Li

Processo	Base de dados - ICV
Manufatura Veículo	Ecoinvent 3.8 (WERNET et al., 2016)
Manufatura Glider	
Manufatura Trem de Potência	
Manufatura Bateria	
Geração, transmissão e distribuição eletricidade	

4. AVALIAÇÃO DE IMPACTO DO CICLO DE VIDA (AICV)

A Tabela 3 apresenta os resultados brutos de AICV, enquanto a Figura 3 apresenta os resultados de forma comparativa:

Tabela 3 - Resultados brutos de AICV em nível de midpoint, método CML-IA *baseline*

Indicator	VE-CaC	VE-Li	Unit
Abiotic depletion	1.02164e-5	1.24908e-5	kg Sb eq
Abiotic depletion (fossil fuels)	1.25554e+0	1.18302e+0	MJ
Acidification	1.41836e-3	5.66523e-4	kg SO2 eq
Eutrophication	6.30532e-4	2.82997e-4	kg PO4--- eq
Fresh water aquatic ecotox.	2.95083e-1	3.43945e-1	kg 1,4-DB eq
Global warming (GWP100a)	9.70362e-2	1.10999e-1	kg CO2 eq
Human toxicity	3.28573e-1	3.81067e-1	kg 1,4-DB eq
Marine aquatic ecotoxicity	3.83355e+2	4.18481e+2	kg 1,4-DB eq

Tabela 3 - Resultados brutos de AICV em nível de midpoint, método CML-IA *baseline* (cont.)

Indicador	VE-CaC	VE-Li	Unit
Ozone layer depletion (ODP)	4.77156e-8	6.72611e-9	kg CFC-11 eq
Photochemical oxidation	1.21115e-4	3.46599e-5	kg C2H4 eq
Terrestrial ecotoxicity	3.84412e-4	7.81153e-4	kg 1,4-DB eq

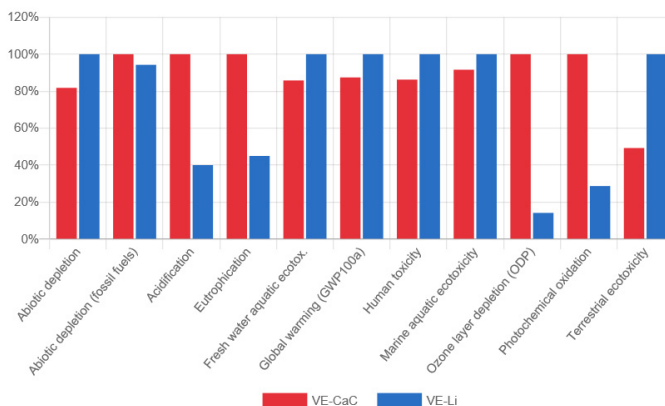


Figura 3 – Resultados comparativos de AICV em nível de *midpoint*, método CML-IA *baseline*

Em termos gerais, o sistema VE-Li mostrou-se mais impactante em seis categorias do método CML-IA *baseline*: depleção abiótica, ecotoxicidade de água doce, aquecimento global (GWP100a), toxicidade humana, ecotoxicidade marinha e ecotoxicidade terrestre. Já o sistema VE-CaC mostrou-se mais impactante em cinco categorias: depleção abiótica, acidificação, eutrofização, depleção da camada de ozônio (ODP) e oxidação fotoquímica.

No caso das mudanças climáticas – categoria de impacto comumente apontada como uma das mais graves em termos de consequências para a vida humana, o sistema VE-Li apresentou impacto 12% maior que o VE-CaC. Neste sentido, os processos do sistema VE-Li que mais contribuíram para as mudanças climáticas foram as frações do *mix* de produção de energia elétrica referentes à geração com carvão mineral e gás natural em termelétricas (Figura 4).

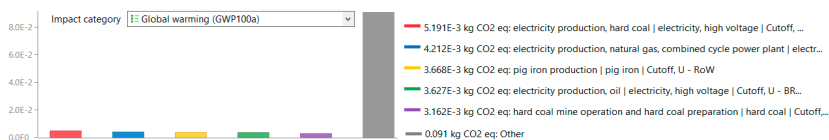


Figura 4 – Processos do sistema VE-Li com maior contribuição para Aquecimento Global

Sobre as categorias que apresentaram resultados com maiores diferenças, o sistema VE-CaC mostrou-se substancialmente mais impactante nas categorias depleção da camada de ozônio e oxidação fotoquímica, e o VE-Li revelou-se expressivamente mais impactante no tema ecotoxicidade terrestre.

5. INTERPRETAÇÃO

A matriz elétrica brasileira é composta por cerca de 84,8% de fontes renováveis, 2,2% de fontes nucleares e apenas 13% de combustíveis fósseis (EPE, 2021), constituindo um perfil de baixa emissão de GEE – sobretudo se comparada à matriz mundial (aproximadamente 63,1% de combustíveis fósseis) (IEA, 2022). Verifica-se, portanto, que o sistema VE-Li conta com uma importante contribuição do perfil da matriz elétrica brasileira no sentido de possibilitar que esse sistema alcance um desempenho de baixas emissões.

Ainda assim, no estudo o sistema VE-CaC apresentou 12% menos impacto que o VE-Li na categoria Aquecimento Global, um desempenho fortemente diferenciado, em termos de baixa emissão de GEE, do veículo com célula a combustível operando com H₂ obtido da reforma-vapor do etanol.

Outro aspecto relevante é que, mesmo com participação substancialmente baixa de gás natural e carvão mineral na matriz elétrica brasileira – 8,3% e 3,1%, respectivamente (EPE, 2021), os processos de geração de eletricidade a partir destas fontes foram os que mais contribuíram, no estudo, para a categoria Aquecimento Global dentro do sistema VE-Li. Assim, reforça-se a importância da observância quanto à necessidade de não ampliação da participação de combustíveis fósseis na matriz elétrica brasileira caso a implementação do sistema VE-Li venha a se tornar uma realidade predominante. Uma vez que essa implementação alavancaria a demanda por eletricidade no país, atender essa demanda adicional de geração com fontes de baixa emissão seria condição indispensável para este sistema representar, efetivamente, uma solução expressiva em termos de redução de emissões de GEE.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR ISO 14040: Gestão ambiental – Avaliação do ciclo de vida – Princípios e estrutura. Rio de Janeiro, 2014.

CANO, Z. P.; BANHAM, D.; YE, S.; HINTENNACH, A.; LU, J.; MICHAEL FOWLER, M.; CHEN, Z. Batteries and fuel cells for emerging electric vehicle markets. *Nature Energy*. *Nature*. v. 3, p. 279–289, abr. 2018. Disponível em: < <https://www.nature.com/articles/s41560-018-0108-1>>. Acesso em: 27 jul. 2019.

COVERT, T.; GREENSTONE, M.; KNITTEL, C. R. Will We Ever Stop Using Fossil Fuels? *Journal of Economic Perspectives*. *American Economic Association*. v. 30, n. 1, p. 117-138, 2016. Disponível em: <<https://pubs.aeaweb.org/doi/pdfplus/10.1257/jep.30.1.117>>. Acesso em: 01 ago. 2019.

DRIVINGCONNECTIVE. How Much Does A Nissan Leaf Battery Weight. *Faq*. 29 abril 2022. Disponível em <<https://drivingconnective.com/how-much-does-a-nissan-leaf-battery-weight/>>. Acesso em: 9 abr. 2022.

ECOINVENT. System Models. Disponível em <<https://ecoinvent.org/the-ecoinvent-database/system-models/>>. Acesso 25 mai 2022.

EGEDE, P. Electric Vehicles, Lightweight Design and Environmental Impacts. In: _____. *Environmental Assessment of Lightweight Electric Vehicles*. Switzerland: Springer Nature, 2017. cap. 2, p. 9-40. Disponível em: <<https://www.springer.com/br/book/9783319402765>>. Acesso em: 15 mai. 2019.

EPE - Empresa de Pesquisa Energética. Ministério de Minas e Energia. Balanço Energético Nacional – Ano Base 2020. Brasília, 2021. Disponível em < <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-601/topico-596/BEN2021.pdf>>. Acesso em: 25 abr. 2022.

GREENDELTA. OpenLCA: The open source software for sustainability assessment. Versão 1.10.3. Berlin, 2020.

H2.LIVE. Toyota MIRAI – MIRAI means the future. Disponível em: <<https://h2.live/en/wasserstoffautos/toyota-mirai>>. Acesso em: 13 dez. 2022.

IEA - International Energy Agency. Data and statistics. Disponível em < <https://www.iea.org/data-and-statistics/data-browser?country=WORLD&fuel=Energy%20supply&indicator=ElecGEnByFuel>>. Acesso em: 28 abr. 2022.

LOPES, D. G. RE: Doutorado Unicamp - Reforma a Vapor do Etanol. Mensagem recebida por <e-mail> em 4 nov. 2021. Fuel Performers: Product do Come – Ethanol. Hytron – Energia e Gases Industriais. NEA Group. 2021.

NISSAN. Nissan Leaf – Ano Modelo 2022. Disponível em <https://www-europe.nissan-cdn.net/content/dam/Nissan/sk/brochures/Price-lists/NEW_LEAF_SK.pdf>. Acesso em 8 abr. 2022.

RAMADHAS, A. S. Alternative Fuels for Transportation. Boca Ratón: CRC Press - Taylor & Francis Group, 2016.

SOUZA, A. B. B.; SILVA, E. P.; SILVA, D. B.; SILVA, D. O. B.; SOUZA, H. N.; PIMENTEL, J. M.; FURTADO, J. C.; RIEDEL, V. F. Sinergia entre o hidrogênio eletrolítico produzido por energia solar fotovoltaica e sua aplicação em veículos leves. VIII Congresso Brasileiro de Energia Solar. Fortaleza, 2020. Disponível em <<https://anaiscbens.emnuvens.com.br/cbens/article/view/974/974>>. Acesso em 05 mai. 2022.

TOYOTA. 2018 Mirai. 2018. Disponível em: <https://www.toyota.com/content/ebrochure/2018/mirai_FuelCellTech.pdf>. Acesso em: 16 dez. 2020.

USAI, L.; HUNG, C. R.; VÁSQUEZ, F.; WINDSHEIMER, M.; BURHEIM, O. S.; STRØMMAN, A. H. Life cycle assessment of fuel cell systems for light duty vehicles, current state-of-the-art and future impacts. Journal of Cleaner Production. Elsevier, v.280, part 2, jan. 2021. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652620351301?via%3Dihub>>. Acesso em 27 out. 2021.

WERNET, G.; BAUER, C.; STEUBING, B.; REINHARD, J.; MORENO-RUIZ, E.; WEIDEMA, B., 2016. The ecoinvent database version 3 (part I): overview and methodology. The International Journal of Life Cycle Assessment, [online] 21(9), pp.1218–1230. Available at: <<http://link.springer.com/10.1007/s11367-016-1087-8>>. Acesso em 08 jun. 2021.