



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE ENERGIAS RENOVÁVEIS

WALTER VIANA DE SOUSA

**ESTUDO DE CASO DE UM SISTEMA SOLAR OFF-GRID PARA O INSTITUTO DO
MEIO AMBIENTE DO MUNICÍPIO DE ITAPIPOCA**

FORTALEZA

2022

WALTER VIANA DE SOUSA

ESTUDO DE CASO DE UM SISTEMA SOLAR OFF-GRID PARA O INSTITUTO DO
MEIO AMBIENTE DO MUNICÍPIO DE ITAPIOCA

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Engenharia de Energias Renováveis do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de Engenheiro de Energias Renováveis.

Orientadora: Profa. Dra. Fernanda Leite Lobo

FORTALEZA

2022

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Biblioteca Universitária
Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

S698e Sousa, Walter Viana de.
Estudo de caso de um sistema solar off-grid para o Instituto do Meio Ambiente do Município de Itapipoca / Walter Viana de Sousa. – 2022.
72 f. : il. color.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Curso de Engenharia de Energias Renováveis, Fortaleza, 2022.
Orientação: Profa. Dra. Fernanda Leite Lobo.

1. Energias renováveis. 2. Armazenamento de energia. 3. Baterias. 4. Energia solar off-grid. 5. Viabilidade econômica e ambiental. I. Título.

CDD 621.042

WALTER VIANA DE SOUSA

ESTUDO DE CASO DE UM SISTEMA SOLAR OFF-GRID PARA O INSTITUTO DO
MEIO AMBIENTE DO MUNICÍPIO DE ITAIPOCA

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
ao curso de Engenharia de Energias
Renováveis do Departamento de Engenharia
Mecânica da Universidade Federal do Ceará,
como requisito parcial à obtenção do título de
Engenheiro de Energias Renováveis.

Aprovado em: ___/___/_____.

BANCA EXAMINADORA

Profa. Dra. Fernanda Leite Lobo (Orientadora)

Universidade Federal do Ceará (UFC)

Profa. Dra. Ana Fabíola Leite Almeida

Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Cleiton da Silva Silveira

Universidade Federal do Ceará (UFC)

À minha família.

AGRADECIMENTOS

À Deus, que sempre me abençoou concedendo sabedoria, segurança e paz durante toda minha vida, em especial a partir de minha vinda à Fortaleza e início da vida universitária.

Aos meus pais, que nunca mediram esforços para que eu obtivesse acesso às melhores oportunidades dentro da nossa realidade. Em especial à minha mãe, Elieuda Viana, que desde os primeiros anos escolares ressaltou a importância da educação, estando ao meu lado em todas as minhas conquistas e sempre me incentivando a buscar mais.

Ao meu irmão, Valber Viana, por todo o companheirismo e por ter sido exemplo de excelência acadêmica.

À minha irmã, Edilaíne Viana, por estar comigo em todas as ocasiões e por ser esse exemplo de mulher tão forte, inteligente e determinada.

À minhas tias, Elisneide Viana e Elisângela Viana, que sempre foram um exemplo de competência e perseverança.

Aos meus queridos amigos Lucas Matias e Kátia Maria, que por tantas vezes me fizeram sorrir em momentos difíceis e pelo apoio incondicional.

Aos amigos da graduação, Ana Amélia e Francisco Thalysson, que apesar de serem de outros cursos, estiveram comigo durante toda a minha jornada acadêmica.

Ao colega Jorge Andrade, por me disponibilizar de maneira muito gentil um curso de dimensionamento de sistemas solares off-grid, sendo muito importante para o desenvolvimento deste trabalho.

Ao senhor Hamilton Viana, por acolher minha ideia de monografia e por estar sempre disponível para disponibilizar dados pertinentes ao IMMI para realização deste trabalho.

À Prof^a Dr^a Fernanda Leite Lobo, pela pronta disponibilização para orientação desta monografia e pelas sugestões de grande valia dadas.

À Universidade Federal do Ceará, por me acolher e por fornecer uma estrutura adequada para minha formação e permanência na universidade.

À banca avaliadora, pela disponibilidade e contribuições.

“A contradição existe, em parte, porque o mundo que queremos não é um completo oposto do mundo que não queremos, mas uma superação do que rejeitamos.” (Sabrina Fernandes)

“É do conhecimento das condições autênticas de nossa vida que é preciso tirar a força de viver e razões para agir.” (Simone de Beauvoir)

RESUMO

Os efeitos do uso desordenado das fontes fósseis fizeram com que as energias renováveis ganhassem notoriedade e se tornassem peça importante na busca por um desenvolvimento sustentável. Entretanto, é possível dizer que a maioria das fontes renováveis possui a intermitência como característica, interferindo em sua difusão. Dessa forma, o armazenamento de energia surge como uma alternativa que pode contribuir com o crescimento e consolidação das renováveis, como a energia solar, que não possui geração durante todo o dia. Porém, uma vez que a energia solar off-grid ainda não é uma tecnologia amplamente explorada, há a necessidade de se analisar seus impactos ambientais e econômicos, além de se entender sua competitividade frente aos sistemas sem uso de baterias. Neste sentido, o presente estudo tem como objetivo observar o progresso e a possibilidade de aplicação dos sistemas de armazenamento de energia através do dimensionamento de um sistema de energia solar off-grid que atenda o Instituto do Meio Ambiente do Município de Itapipoca (IMMI). Assim sendo, foram levantados os dados de consumo do local e determinados todos os equipamentos necessários para a geração de energia exigida. Com base nestes resultados foi possível realizar uma avaliação da emissão de gases poluentes decorrentes da instalação do sistema, bem como uma análise econômica, definindo o tempo de payback, e uma comparação simples destas verificações anteriores entre a energia solar off-grid e on-grid. Foi observado que com a instalação do sistema 46,51 toneladas de CO₂ deixariam de ser emitidas, mas seriam lançadas ao meio ambiente 7,7 toneladas de CO₂-eq, 0,566 gramas de material particulado e a taxa de acidificação do solo e da água doce seria de 74,358 mol de H⁺-eq. O payback do sistema seria de 26,09 anos, assim o trabalho mostrou que apesar do benefício proporcionado ao meio ambiente, é necessário um grande custo para aplicação destes sistemas.

Palavras-chave: Energias renováveis; Armazenamento de energia; Baterias; Energia solar off-grid; Viabilidade econômica e ambiental.

ABSTRACT

The effects of the disorganized use of fossil sources have made renewable energy sources gain notoriety and become an important part in the search for sustainable development. However, it is possible to say that most renewable sources have intermittency as a characteristic, interfering with their diffusion. Thus, energy storage emerges as an alternative that can contribute to the growth and consolidation of renewable energy sources, such as solar energy, which does not have generation all day long. However, since off-grid solar energy is not yet a widely explored technology, there is a need to analyze its environmental and economic impacts, as well as to understand its competitiveness compared to systems without the use of batteries. In this sense, the present study has the objective of observing the progress and the possibility of application of the energy storage systems through the sizing of a solar off-grid energy system that serves the Instituto do Meio Ambiente do Município de Itapipoca (IMMI). Therefore, the local consumption data was collected and all the necessary equipment for the required energy generation was determined. Based on these results it was possible to perform an evaluation of the emission of pollutant gases resulting from the installation of the system, as well as an economic analysis, defining the payback time, and a simple comparison of these previous verifications between off-grid and on-grid solar energy. It was observed that with the installation of the system 46.51 tons of CO₂ would no longer be emitted, but 7.7 tons of CO₂-eq, 0.566 grams of particulate matter would be released into the environment, and the soil and freshwater acidification rate would be 74.358 mol of H⁺-eq. The payback of the system would be 26.09 years, thus the work showed that despite the benefit provided to the environment, a large cost is required for the application of these systems.

Keywords: Renewable energies; Energy storage; Batteries; Off-grid solar energy; Economic and environmental viability.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Evolução da Energia Solar Fotovoltaica no Brasil	25
Figura 2 - Sistema Solar On-grid.....	26
Figura 3 - Sistema off-grid	27
Figura 4 - Tecnologias de Armazenamento de Energia	30
Figura 5 - Pilha de Leclanché	33
Figura 6 - Estrutura de Baterias de Chumbo-Ácido	34
Figura 7 - Carga de uma Bateria de Íons de Lítio Genérica	35
Figura 8 - Fluxograma de Blocos Simples da Metodologia Aplicada.....	42
Figura 9 - Vista Frontal/Aérea do IMMI.....	43
Figura 10 - Dados de Irradiação Solar do IMMI.....	46
Figura 11 - Fatura de Energia Referente a maio/2022 do Cliente da Distribuidora Enel.....	55
Figura 12 - Disposição dos Módulos Solares no Telhado do IMMI	57
Figura 13 - Diagrama de Instalação do Sistema Off-grid.....	60

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Matriz Elétrica Mundial de 2019	21
Gráfico 2 - Matriz Elétrica Brasileira de 2020	22
Gráfico 3 - Radiação Solar Incidente	23
Gráfico 4 - Perfil de Consumo Residencial de Eletricidade	23
Gráfico 5 - Produção de Cobalto no Mundo	38
Gráfico 6 - Payback do Sistema Solar Off-grid.....	62

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Valores Médios Para o Fator de Envelhecimento de Baterias e Eficiência Coulômbica.....	47
Tabela 2 - Fator de Emissão Utilizado	49
Tabela 3 - Taxas de emissão do ciclo de vida de CO ₂ -eq (GEE), de poluentes inorgânicos respiratórios e de acidificação do solo e da água doce.	50
Tabela 4 - Tarifa de fornecimento – Baixa Tensão Enel Ceará.....	51
Tabela 5 - Levantamento de Cargas do IMMI	52
Tabela 6 - Levantamento de Consumo do IMMI	54
Tabela 7 - Consumo Mensal em kWh	56
Tabela 8 - Resumo de Dados do Banco de Baterias.....	58
Tabela 9 - Material Requerido Para o Sistema Off-grid.....	59

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABAQUE	Associação Brasileira de Armazenamento e Qualidade de Energia
ABCE	Associação Brasileira de Companhias de Energia Elétrica
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
CA	Corrente Alternada
CC	Corrente Contínua
COFINS	Contribuição para o Financiamento da Seguridade Social
CRESESB	Centro de Referência para as Energias Solar e Eólica Sérgio de Salvo Brito
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
FLA	<i>Flooded Lead Acid Batteries</i> (Baterias de Chumbo-ácido Inundadas)
ICMS	Imposto sobre Circulação de Mercadorias e Serviços
IEA	<i>International Energy Agency</i> (Agência Internacional de Energia)
IMMI	Instituto do Meio Ambiente do Município de Itapipoca
INMETRO	Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia
IRENA	<i>International Renewable Energy Agency</i> (Agência Internacional para as Energias Renováveis)
LIB	<i>Lithium-ion Batteries</i> (Baterias de Lítio-íon)
MPPT	<i>Maximum Power Point Tracking</i> (Rastreamento Máximo de Pontos de Energia)
Mtep	<i>Million tons of oil equivalent</i> (Milhões de toneladas equivalentes de petróleo)
NR	Norma Regulamentadora
NBR	Norma Brasileira
PHS	<i>Pumped Hydroelectric Storage</i> (Armazenamento Hidroelétrico Bombeado)
PIS	Programa de Integração Social

PRODEEM	Programa de Desenvolvimento Energético dos Estados e Municípios
PWM	<i>Pulse Width Modulation</i> (Modulação de Largura de Pulso)
SAE	Sistemas de Armazenamento de Energia
SIN	Sistema Interligado Nacional
TE	Tarifa de Energia
TUSD	Tarifa de Uso do Sistema de Distribuição
VLRA	<i>Valve Regulated Lead Acid Batteries</i> (Baterias de Chumbo-ácido Reguladas por Válvula)

LISTA DE SÍMBOLOS

MnO_2	Dióxido de manganês
NH_4Cl	Cloreto de amônia
ZnCl_2	Cloreto de zinco
Zn	Zinco
NH_4	Amônio
Mn_2O_3	Óxido de manganês
NH_3	Amoníaco
Pb	Chumbo
PbO_2	Óxido de chumbo
H_2SO_4	Ácido sulfúrico
PbSO_4	Sulfato de chumbo
H_2O	Água
LiFePO_4	Fosfato de ferro e lítio
LiCoO_2	Óxido de cobalto e lítio
LiMn_2O_4	Óxido de lítio manganês
LiNiMnCoO_2	Óxido de lítio níquel manganês cobalto

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	16
1.1	Objetivos	18
<i>1.1.1</i>	<i>Objetivo Geral</i>	<i>18</i>
<i>1.1.2</i>	<i>Objetivos Específicos</i>	<i>18</i>
1.2	Organização do trabalho	18
2	ENERGIAS RENOVÁVEIS: INTERMITÊNCIA E POSSIBILIDADES	20
2.1	Geração de eletricidade	20
2.2	Aproveitamento de energia	22
2.3	Sistemas de energia solar	24
3	ARMAZENAMENTO DE ENERGIA: TECNOLOGIAS E FUNCIONAMENTO	28
3.1	Contextualização	28
3.2	Evolução tecnológica	29
<i>3.2.1</i>	<i>Pilha de Volta</i>	<i>31</i>
<i>3.2.2</i>	<i>Pilha de Daniell</i>	<i>31</i>
<i>3.2.3</i>	<i>Pilha de Leclanché</i>	<i>32</i>
<i>3.2.4</i>	<i>Bateria de Chumbo-Ácido</i>	<i>33</i>
<i>3.2.5</i>	<i>Baterias de Íons de Lítio</i>	<i>35</i>
3.3	Impactos Socioambientais dos SAE e da Produção de Baterias	36
3.4	Eficiência, Custos e Segurança de Baterias para Sistemas Solares	39
4	METODOLOGIA	42
4.1	Coleta de dados	43
<i>4.1.1</i>	<i>Caracterização do local</i>	<i>43</i>
<i>4.1.2</i>	<i>Levantamento de Cargas</i>	<i>43</i>
<i>4.1.3</i>	<i>Levantamento de Consumo</i>	<i>44</i>

4.2	Dimensionamento do Sistema Off Grid.....	44
4.2.1	Dimensionamento dos Módulos e Controlador de Carga.....	45
4.2.2	<i>Dimensionamento do Inversor</i>	46
4.2.3	<i>Dimensionamento das Baterias</i>	46
4.2.4	<i>Proteções e Cabos</i>	47
4.3	Análise Ambiental	48
4.4	Análise Econômica.....	50
4.5	Análise Comparativa.....	51
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	52
5.1	Síntese e estimativa de dados.....	52
5.2	Determinação dos Equipamentos Elétricos e de Proteção.....	56
5.3	Avaliação Ambiental	60
5.4	Avaliação Econômica	61
5.5	Avaliação Comparativa.....	62
6	CONCLUSÃO.....	64
	REFERÊNCIAS	65

1 INTRODUÇÃO

As energias renováveis ganharam bastante destaque no cenário internacional a partir da crise do petróleo ocorrida na década de 1970, havendo uma busca por fontes energéticas que se mostrassem mais seguras em relação a sua disponibilidade e abundância. Desde então, muitas tecnologias se desenvolveram, com destaque para os equipamentos de aproveitamento de energia solar fotovoltaica e eólica. Entretanto, a maioria das fontes renováveis possui como ponto em comum sua intermitência, havendo, portanto, a necessidade de armazenamento para atendimento integral da crescente demanda humana.

Segundo o Balanço Energético Anual de 2020 apresentado pela Agência Internacional de Energia (IEA, 2020), o consumo total de energia mundial, entre 1971 e 2018, aumentou 2,3 vezes, atingindo 9.238 Mtep em 2018. Dessa forma, o setor elétrico busca por soluções para que possa implementar as energias renováveis e assim atender a sua demanda. Os planos de execução de novas intervenções com maior produção e consumo de energia elétrica necessitam de tecnologias de armazenamento que visem evitar o desperdício e o suprimento da demanda com reaproveitamento futuro (CAVALCANTE; CARVALHO; LIMA, 2005).

Embora as medidas tomadas na expansão da rede elétrica e na demanda flexível permitam uma melhor distribuição e um conseqüente equilíbrio dos fluxos de eletricidade, os Sistemas de Armazenamento de Energia (SAE) são capazes de administrar as flutuações e podem compensar uma incompatibilidade de geração e consumo de energia por meio de um fornecimento de energia e mudança no tempo de energia coordenados (HESSE *et al.*, 2017).

No contexto de eminente carência de dispositivos de armazenamento de energia, diversas tecnologias para tal finalidade foram criadas, como, por exemplo, Armazenamento Hidroelétrico Bombeado (PHS), Armazenamento de Energia de Ar Comprimido, Supercondutores Magnéticos de Energia, Células a Combustível e Baterias de Armazenamento de Energia.

As baterias foram os equipamentos que obtiveram uma maior maturação com o decorrer dos anos, sendo, de acordo com Zobaa (2013), os dispositivos de armazenamento de energia mais populares. Existem diversas tecnologias a respeito da composição de seus acumuladores eletroquímicos, sendo as baterias de chumbo-ácido e lítio-íon as mais difundidas. Dentre estas, as baterias de lítio-íon se tornaram protagonistas devido sua alta

densidade energética, sendo também a principal tecnologia usada em veículos elétricos e dispositivos eletrônicos, como celulares.

Em relação ao desempenho das baterias recarregáveis de íons de lítio, é possível afirmar que houve uma melhora constante nas últimas décadas. A quantidade de energia armazenada em um pacote de um litro mais do que triplicou, de cerca de 200 Watts-hora por litro (Whl^{-1}) para mais de 700Whl^{-1} (TURCHENIUK *et al.*, 2018). Cientistas e engenheiros de bateria têm construído baterias até 10% mais eficiente todo ano pelos últimos 25 anos (EVARTS, 2015).

Entretanto, apesar dos grandes avanços das baterias, e dos SAE de forma geral, propiciarem uma maior difusão das energias renováveis e uma consequente menor dependência dos combustíveis fósseis, é possível observar que a crescente demanda por estas tecnologias também pode acarretar na eclosão de adversidades para a sociedade.

Um dos impasses observados está na obtenção de materiais para sua produção, tais como cobalto e o lítio, que são essenciais para o funcionamento das baterias mais relevantes para o mercado atualmente. A abundância e a disposição geográfica desses componentes são aspectos primordiais que podem desencadear problemas para as comunidades locais, além de impactos ambientais.

Tecnologias de energia renovável, veículos elétricos e armazenamento de energia exigem grandes volumes de materiais ambientalmente sensíveis. Uma vez que estas ferramentas foram idealizadas para construir um desenvolvimento sustentável, as cadeias de suprimentos para esses materiais e tecnologias precisam ser gerenciadas adequadamente, para evitar a criação de novos impactos sociais e ambientais adversos ao longo da sucessão da cadeia (DOMINISH; FLORIN; TESKE, 2019).

Além disso, o valor dos principais equipamentos de armazenamento de energia ainda é um obstáculo para a popularização desta tecnologia. Apesar disso, é possível observar um cenário de diminuição de custos, de forma que segundo BloombergNEF (2021), através da Pesquisa Anual de Preços de Baterias, o preço das baterias de lítio em 2020 apresentou uma queda de 89% em relação a 2010.

No estado brasileiro do Ceará, é possível observar um crescimento massivo na última década da participação de energias renováveis na matriz energética. Quando se trata de uma visão de micro e minigeração, a energia solar fotovoltaica se evidencia, impulsionada pela

implementação da Resolução Normativa 482 da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL).

Sendo assim, apesar do crescimento das tecnologias de captação de energia solar e da grande exposição à irradiação solar no estado cearense, os SAE ainda não possuem números significativos, havendo, portanto, a necessidade de um estudo em que sejam analisados aspectos como a viabilidade econômica, impactos ambientais e desenvolvimento destes frente a outras formas de aproveitamento energético.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo Geral

Este trabalho tem como objetivo geral analisar o nível de aplicabilidade do armazenamento de energia para fontes renováveis através de uma avaliação de um sistema solar off-grid para o Instituto do Meio Ambiente do Município de Itapipoca (IMMI).

1.1.2 Objetivos Específicos

Este trabalho visa atender os seguintes objetivos específicos:

- a) Examinar a possibilidade de instalação de um sistema solar off-grid para o IMMI;
- b) Estudar os principais impactos ambientais causados em decorrência da instalação do sistema solar off-grid para o IMMI;
- c) Avaliar disponibilidade, custos e benefícios da instalação de um sistema solar off-grid para o IMMI.

1.2 Organização do trabalho

O trabalho em questão possui seis seções, sendo divididas em introdução, energia renováveis: intermitências e possibilidades, armazenamento de energia: tecnologias e

funcionamento, metodologia, resultados e discussão e, por fim, conclusão. Logo na primeira seção é realizada uma apresentação geral do tema, introduzindo a discussão a respeito do cenário energético e a atenção que se deve ter sobre armazenamento de energia, além de apontar a justificativa para escolha do tema e os objetivos do trabalho.

A segunda seção discorre sobre o aumento na demanda mundial por energia, com enfoque para a eletricidade, e como as energias renováveis podem auxiliar de forma a suprir a necessidade agredindo menos o meio ambiente. Nesta, também é indicado um dos principais impasses para as fontes renováveis, bem como opções de aplicação.

Para a terceira seção, o debate se acentua nos sistemas de armazenamento de energia, apresentando aspectos relevantes como evolução dos equipamentos e projeções futuras. Ademais, ainda é tratado sobre os impactos socioambientais das baterias e sobre a eficiência dos sistemas de armazenamento de energia para aplicação de aproveitamento de energia solar fotovoltaica.

Na metodologia, quarta seção do trabalho, são descritos os processos de coleta de dados e dimensionamento de módulos fotovoltaicos, controladores de carga, baterias e inversores para o sistema off grid. Além disso, também é exposto o método utilizado para determinação de impactos ambientais e econômicos.

A quinta seção, sobre os resultados do trabalho, exhibe a forma com qual os dados obtidos foram usados, bem como o dimensionamento do material que será preciso para o sistema off-grid em questão e o seu preço. É feita a avaliação ambiental e econômica, apresentado uma análise do tempo de retorno financeiro, além de uma análise comparativa entre os sistemas off-grid e on-grid para energia solar.

Por fim, na sexta e última seção do trabalho são analisadas as conclusões mais importantes extraídas das seções anteriores, com ênfase nos dados obtidos na seção cinco. São elencados os obstáculos mais notáveis para emprego do sistema dimensionado bem como a confiabilidade das avaliações realizadas.

2 ENERGIAS RENOVÁVEIS: INTERMITÊNCIA E POSSIBILIDADES

Segundo Lima (2012), o desenvolvimento da sociedade gira em torno do montante de energia possuída e o seu conseqüente consumo. Dessa forma, conforme a humanidade se desenvolveu, a necessidade energética fez com que as fontes fósseis fossem amplamente exploradas, podendo este fenômeno ser explicado pelo maior grau de conhecimento do ser humano sobre o modo de aproveitamento destas.

Pode-se dizer que a Revolução Industrial foi ponto de partida para difusão dos ideais de preservação ambiental, onde, a partir dos prejuízos causados pelo crescimento econômico desordenado, as sociedades buscaram soluções de preservação da natureza e dos recursos naturais. Por consequência, vários países iniciaram os esforços na procura por possibilidades energéticas alternativas aos combustíveis fósseis (LIMA, 2012).

Assim, os efeitos do uso desequilibrado de combustíveis não renováveis, como o petróleo, resultaram na ampla discussão entre diversas organizações internacionais sobre a demanda de preservação do planeta aliada ao desenvolvimento tecnológico.

Diante disso, em meio a busca de soluções aos problemas ambientais, o termo “desenvolvimento sustentável” ganhou destaque, sendo definido pela Comissão Mundial sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento (1987, p. 24, tradução nossa) como “Aquele que atende às necessidades atuais sem comprometer a possíveis necessidades das gerações futuras”. Desde então o conceito foi sendo bastante debatido em conferências internacionais do clima.

Neste contexto, as energias renováveis cumprem papel determinante para promoção de um desenvolvimento ambientalmente amigável, mas para tanto há necessidade da realização de análises comportamentais destas fontes.

2.1 Geração de eletricidade

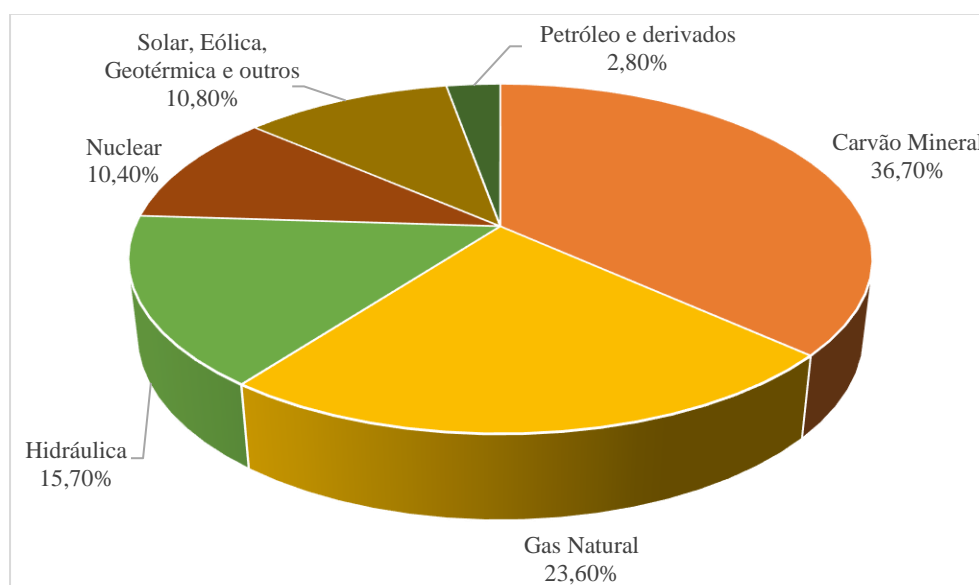
No âmbito da geração de energia, as fontes energéticas como a eólica, solar e biomassa, sendo as mais aproveitadas dentre as renováveis, são consideradas de forma positiva, pois além de contribuírem para uma redução gradativa em impactos menores, as mesmas cooperam de maneira ativa diminuindo a emissão de gás carbônico na atmosfera (GRUBERT; OLIVEIRA, 2019).

Além do apelo ambiental, a redução do preço das fontes renováveis também tem favorecido a ampliação do seu escopo de utilização pelo planeta. Segundo o relatório Custos

de Geração Renovável, apresentado pela Agência Internacional de Energia Renovável (IRENA, 2019), a energia renovável é a fonte de eletricidade mais barata em muitas partes do mundo hoje em dia.

Ao se atentar às necessidades de eletricidade, é possível constatar a importância da energia eólica e da energia solar fotovoltaica entre as fontes renováveis não-hidráulicas. O Gráfico 1 mostra que, segundo o Balanço Mundial de Energia de 2020, as fontes que fazem aproveitamento do vento e do sol, juntamente com outras renováveis, representavam 10,80% de toda a matriz elétrica do mundo em 2019 (INTERNATIONAL ENERGY AGENCY, 2020).

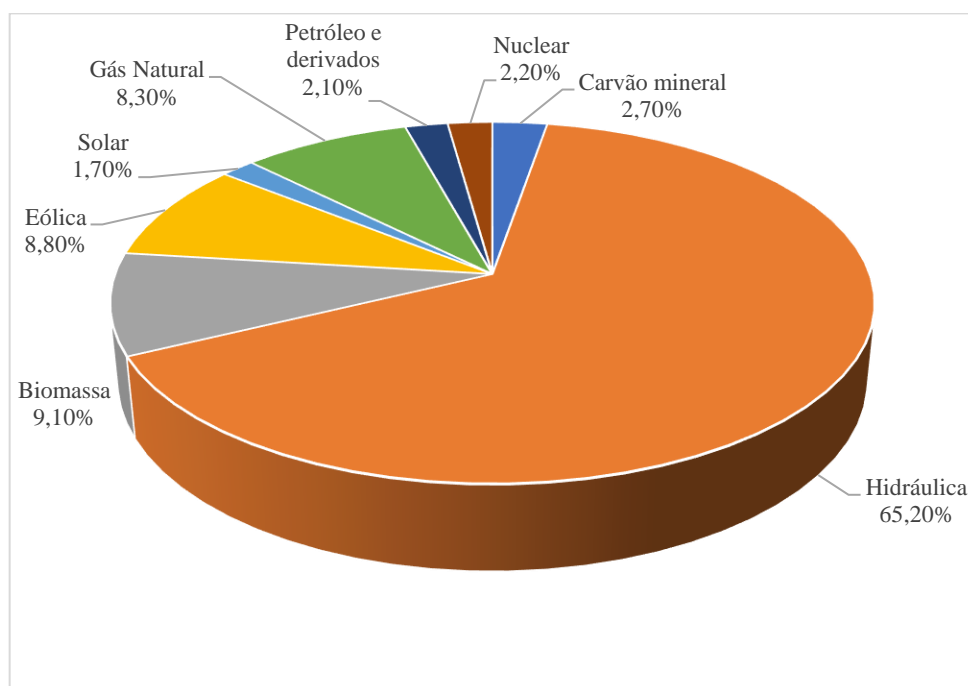
Gráfico 1 - Matriz Elétrica Mundial de 2019



Fonte: Adaptado de International Energy Agency (2020).

Enquanto no Brasil, dados do Balanço Energético Nacional de 2021 mostram que, sozinhas, a energia eólica e a solar representavam em 2020, respectivamente, 8,80% e 1,70% da matriz elétrica nacional, conforme pode ser observado no Gráfico 2 (EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA, 2021).

Gráfico 2 - Matriz Elétrica Brasileira de 2020



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

Apesar das fontes renováveis já apresentarem uma atuação considerável na geração de eletricidade, as perspectivas para o futuro são ainda maiores. Segundo a Agência Internacional de Energia (2021), através do Relatório Anual de Mercado de Renováveis de 2021, até 2026 as energias renováveis devem representar quase 95% do aumento da capacidade global de energia, com a energia solar fotovoltaica sozinha fornecendo mais da metade desse valor.

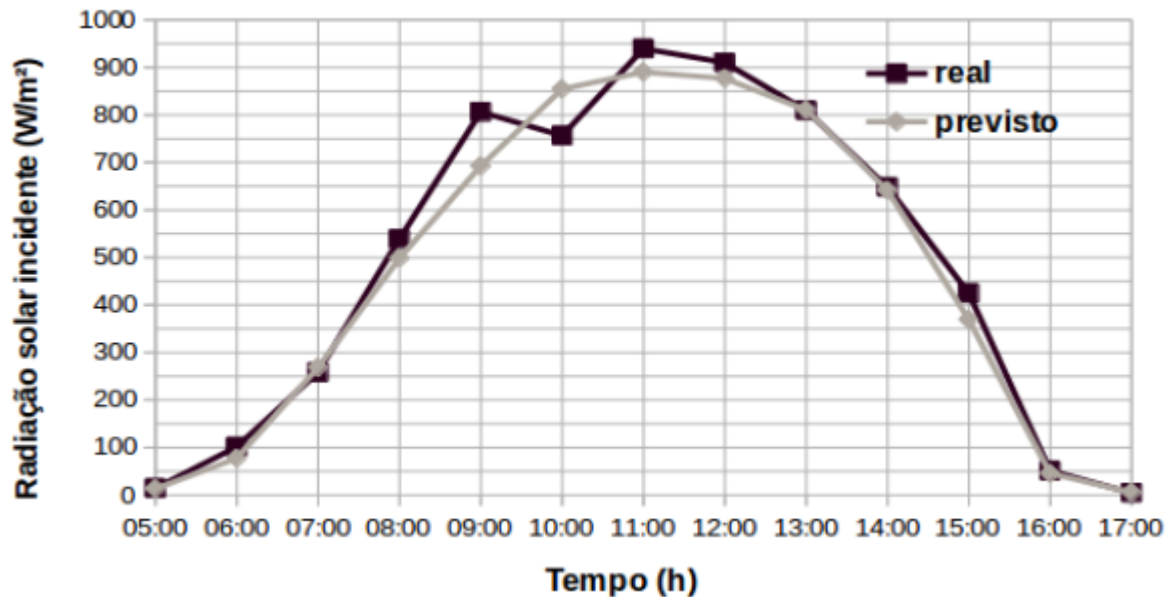
2.2 Aproveitamento de energia

No contexto da energia solar, para além de compreender sua relevância na matriz elétrica, é necessário atentar-se para a forma com que esta pode ser aproveitada. Assim como Roberts (2012) evidencia em seu trabalho, os recursos solares não se encontram disponíveis de forma intermitente, havendo, portanto, a possibilidade da potência elétrica entregue em determinado momento não suprir a demanda momentânea.

O Brasil possui em quase todo o seu território uma grande abundância de energia solar. Quando analisado especificamente o Estado do Ceará é observado uma média anual de radiação solar global diária superior a 20 MJ/m².dia, assim como aponta Camelo *et al.* (2016). Para compreensão da forma de aproveitamento dessa energia, o Gráfico 3 demonstra o perfil

de radiação solar incidente no estado cearense em outubro de 2004, sendo verificado um desempenho semelhante para os demais períodos do ano (CAMELO *et al.*, 2016).

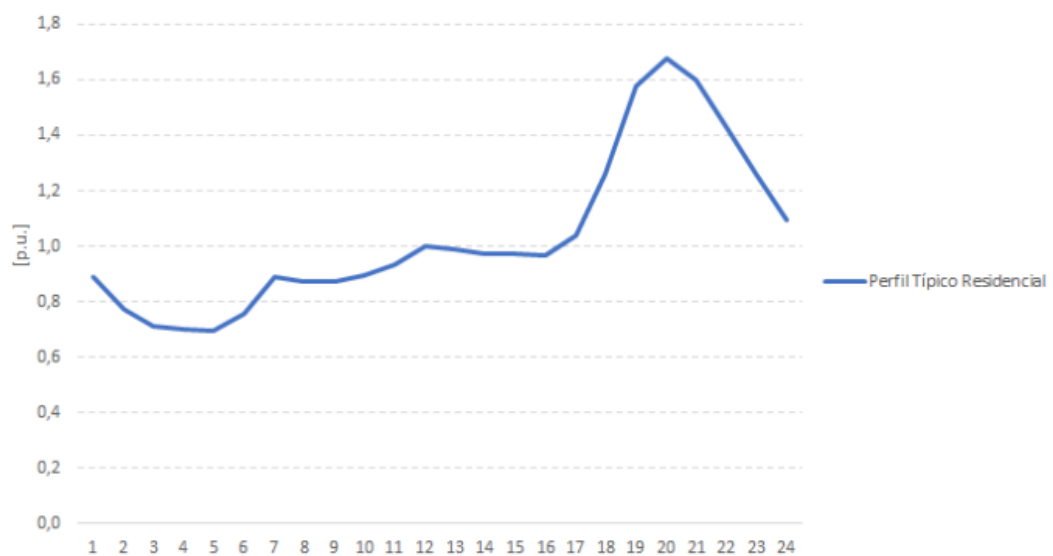
Gráfico 3 - Radiação Solar Incidente



Fonte: Camelo *et al* (2016, p. 226).

Por sua vez, o Gráfico 4 ilustra a curva comum de demanda de eletricidade durante o período de um dia para o perfil de um consumidor residencial típico.

Gráfico 4 - Perfil de Consumo Residencial de Eletricidade



Fonte: Empresa de Pesquisa Energética (2020, p. 18)

Dessa forma, realizando uma comparação entre os gráficos 3 e 4, é possível afirmar que o perfil de consumo de energia não segue o mesmo padrão da radiação solar, portanto, para garantia de uma disponibilidade energética plena, ao se tratar da utilização da energia solar, são necessárias medidas que contornem a periodicidade da luz solar.

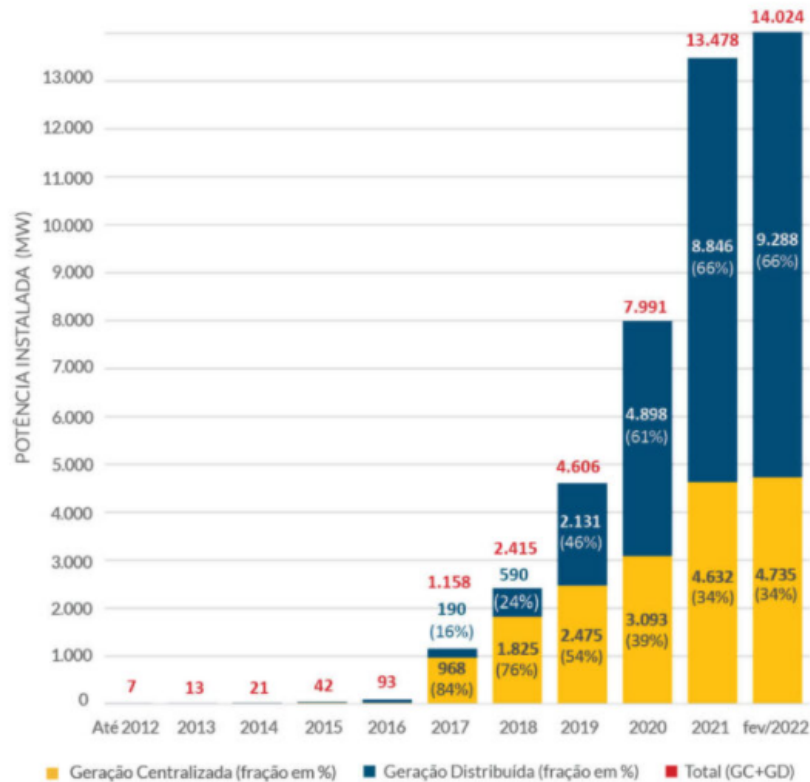
2.3 Sistemas de energia solar

No Brasil, em 2012 a ANEEL regulamentou a Resolução Normativa 482, que estabeleceu regras para instalações de micro e minigeração distribuída no setor elétrico brasileiro. A partir de então o consumidor teve permissão para conectar um sistema gerador de energia elétrica de forma paralela à rede de distribuição da concessionária, contanto que o sistema seja abastecido por fontes renováveis (AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA, 2012).

Em 2015, a NR n° 482/2012 foi atualizada, entrando em vigor a NR n° 687/2015, que teve como principais modificações a redução na potência limite para determinação de micro e minigeração distribuída, onde a potência permitida para microgeração que era de até 100 kW, passou a ser até 75 kW, e para a minigeração, que era permitida de 100 kW a 1 MW, após a NR 687, tornou-se autorizado de 75 kW a 5 MW. Além disso, houve aumento no prazo de utilização dos créditos energéticos, de 36 para 60 meses (AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA, 2012, 2015).

Dessa forma, as resoluções essencialmente possibilitaram a disseminação da geração distribuída, como pode ser visto na Figura 1, que mostra um crescimento da energia solar no Brasil após a consolidação das resoluções.

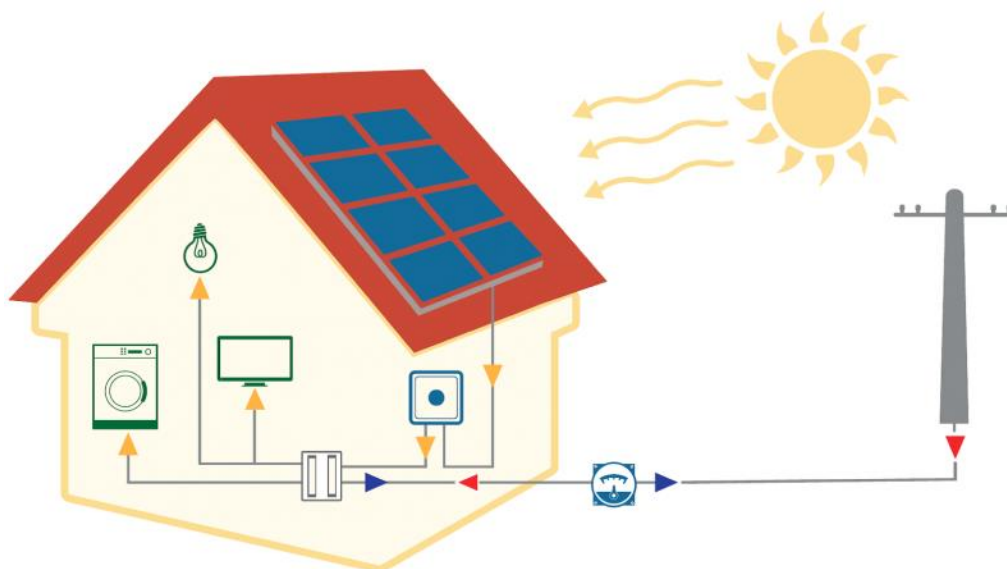
Figura 1 - Evolução da Energia Solar Fotovoltaica no Brasil



Fonte: Absolar (2022).

A geração solar *on-grid* foi a grande responsável por esta evolução, onde neste tipo de sistema, assim como exposto na Figura 2, os módulos fotovoltaicos captam a luz solar e a transformam em Corrente Contínua (CC), sendo enviada ao inversor. O inversor por sua vez converte a corrente contínua em Corrente Alternada (CA) e a envia para a rede de transmissão. O medidor bidirecional contabiliza os valores de energia consumida e gerada, e assim, ao final do mês, é realizado o abatimento na conta de energia pelos dados de geração, havendo a possibilidade de acúmulo de créditos caso o valor gerado seja superior (ABSOLAR, [2021]).

Figura 2 - Sistema Solar On-grid



Fonte: Absolar ([2021]).

No entanto, nos sistemas on-grid a unidade consumidora permanece conectada à rede elétrica para que haja disponibilidade de eletricidade de forma integral, uma vez que à noite, por exemplo, não há geração de energia solar. Dessa forma o consumidor se mantém refém das eventualidades da concessionária, de modo que, em caso de uma falha na rede o consumidor terá seu fornecimento de energia interrompido. Além disso, vale destacar que a energia gerada não é necessariamente aquela que é consumida, dessa forma não há meios de garantia da utilização de uma energia limpa pelo usuário que a produz.

Por sua vez, os sistemas *off-grid* não são conectados à rede elétrica da concessionária, possuindo como principal característica a autossuficiência. Como se trata de um sistema isolado, para que haja disponibilidade energética de forma intermitente, o mesmo promove o armazenamento de energia, sendo geralmente utilizadas baterias para uso em períodos que não haja geração (PORTAL SOLAR, [2020]).

O funcionamento desses sistemas se assemelha bastante, havendo muitos equipamentos em comum, mas com suas particularidades. Na geração off-grid os módulos fotovoltaicos convertem a luz solar em corrente CC que é direcionada para o controlador de carga, o qual tem a função de garantir abastecimento correto das baterias evitando sobrecargas e descargas profundas. Caso as baterias estejam carregadas, ou haja necessidade na rede, o controlador de carga encaminha a corrente para o inversor, que a transforma em CA e distribui entre as cargas do local. A Figura 3 demonstra o funcionamento de sistemas off-grid (MAIA *et al.*, 2021).

Figura 3 - Sistema off-grid



Fonte: Maia *et al.* (2021, p. 82636).

Estes sistemas também se destacam por possibilitarem o acoplamento de um sistema de backup. Dessa forma, é possível adicionar um gerador, ou outro meio, de maneira interativa, que forneça energia caso haja um problema com os módulos fotovoltaicos ou com as baterias.

As soluções de armazenamento de energia se tornam mais interessantes quando analisados dados da ANEEL. As informações estatísticas da agência mostram que o brasileiro fica sem energia por cerca de 14 horas ao ano, de forma que a estatística apenas contabiliza interrupções superiores a 3 minutos, excluindo pequenas flutuações de tensão que podem influenciar processos produtivos, como afirma Machado (2021).

Sendo assim, os SAE se apresentam como importante agente na busca de atenuação das intermitências das energias renováveis. A aplicação de sistemas híbridos também possui potencial de contribuição, mas os sistemas off-grid com aplicação em energia solar serão explorados neste trabalho devido ao seu crescente desenvolvimento e amplo debate internacional.

3 ARMAZENAMENTO DE ENERGIA: TECNOLOGIAS E FUNCIONAMENTO

3.1 Contextualização

Nas últimas décadas foi possível perceber o aperfeiçoamento do homem na produção de eletricidade, influenciado pelo crescimento na demanda. Segundo dados da Associação Brasileira de Companhias de Energia Elétrica (ABCE, 2012), entre 2005 e 2008, houve um acréscimo médio de 195 GW na potência instalada de geração elétrica do mundo, partindo de 4.126 GW até 4.711 GW no período analisado.

O que se observa é que esse modo de fabricação energética é, em sua maior parte, composto por sistemas de geração centralizada. Estes são caracterizados pela produção de energia através de grandes centrais, sendo as usinas hidroelétricas e termoeletricas as mais comuns no Brasil, entretanto também há participação de usinas solares, eólicas e outras fontes renováveis (ZUNINGA, 2018).

Com o advento da geração distribuída, como já mencionado anteriormente, as formas de planejamento e consumo de energia elétrica foram se otimizando, de forma a descentralizar processos, além de também estimularem a aplicação dos SAE.

Os SAE são sistemas que armazenam eletricidade, onde durante sua carga transformam energia elétrica em outra forma de energia (química, mecânica, térmica, etc), sendo observado posteriormente, na sua descarga, o processo inverso (BUENO; BRANDÃO, [2017?]).

Conforme Bueno e Brandão ([2017?]), no estudo Visão Geral da Tecnologia e Mercado para os Sistemas de Armazenamento de Energia Elétrica no Brasil apresentado pela Associação Brasileira de Armazenamento e Qualidade de Energia (ABAQUE), os SAE têm se tornado uma tendência mundial, havendo diversas tecnologias de armazenamento disponíveis, algumas em estágio experimental, enquanto muitas já se encontram acessíveis no mercado com elevado grau de sofisticação.

Apesar do armazenamento de energia elétrica não ser algo novo, as recentes evoluções científicas permitiram a expansão do seu uso. Assim, o armazenamento de energia estacionária se beneficia de processos que partem desde a produção de smartphones e computadores com maior capacidade energética até o desenvolvimento de veículos elétricos.

No Brasil, inicialmente os SAE se mostraram como uma possibilidade de fornecimento de eletricidade para comunidades isoladas. Neste contexto, entre a metade da década de 1990 e o início da década de 2000 foram lançadas políticas públicas com intuito de promover a universalização do acesso à energia através de sistemas de armazenamento, como o Programa de Desenvolvimento Energético dos Estados e Municípios (PRODEEM), o Programa Luz no Campo e o Programa Luz Para Todos (MATIELLO *et al.*, 2018).

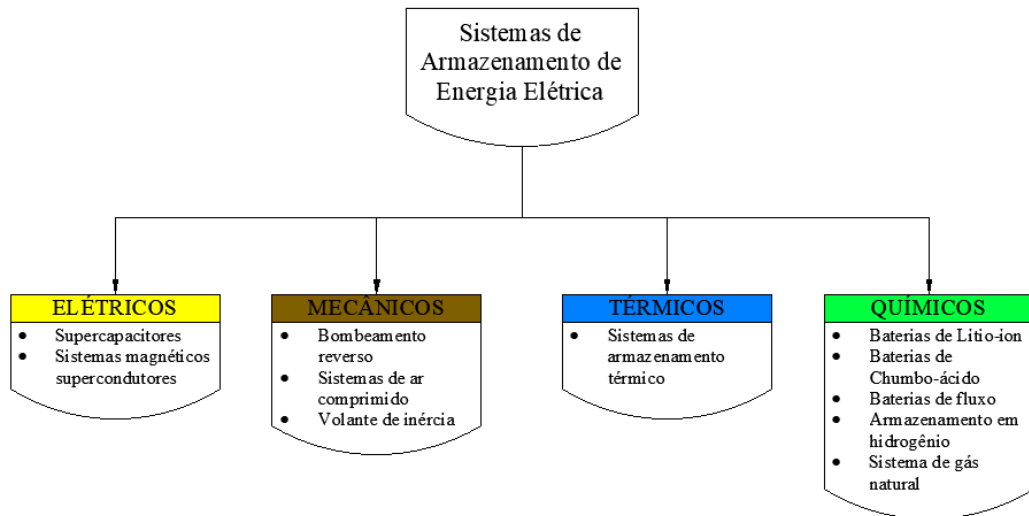
Desde então, os equipamentos que compõem os sistemas de armazenamento de energia têm evoluído de forma a pôr em xeque a viabilidade da aplicação destes apenas em comunidades isoladas.

3.2 Evolução tecnológica

Segundo Mendonça ([2021]), os sistemas de armazenamento de energia fazem parte de uma área do conhecimento que permanece em constante aperfeiçoamento, sendo observadas transformações expressivas no seu processo de contenção energética.

Atualmente, o armazenamento de energia pode ser feito através de diversos mecanismos. A Figura 4 exibe uma esquematização das principais tecnologias de armazenamento de energia no mercado, segundo o relatório Visão Geral da Tecnologia em Armazenamento de Eletricidade (BUENO; BRANDÃO, [2017?]).

Figura 4 - Tecnologias de Armazenamento de Energia



Fonte: Adaptado de Bueno e Brandão ([2017?]).

Os sistemas de armazenamento elétricos podem ser divididos em supercapacitores e supercondutores magnéticos, onde o movimento das cargas elétricas é derivado da energia elétrica disponibilizada. Enquanto os supercapacitores armazenam a energia em um campo elétrico, os supercondutores magnéticos a armazenam em campos magnéticos, que por sua vez são gerados pelo fluxo de corrente contínua em uma bobina (SANTOS, 2016).

O armazenamento de energia elétrica nos sistemas mecânicos é realizado sob a forma de energia cinética ou potencial, que funcionam a partir da libertação dessa energia que aciona turbinas para produção de eletricidade. Já para os sistemas térmicos, Santos (2016) pondera que estes se diferem dos demais pois em sua maioria armazenam calor/frio, e não energia elétrica.

Ademais, dentre essas tecnologias, os armazenadores químicos, que liberam energia através de reações químicas, possuem grande relevância. As baterias em específico se destacam por apresentarem avanços científicos consideráveis e uma capacidade de aplicação abrangente. “As baterias, [...] são tão variadas como a capacidade de acumulação possível. De facto, as baterias provaram ser capazes de armazenar grandes ou pequenas quantidades de energia por períodos de tempo curtos ou longos” (SANTOS, 2016, p.18).

Apesar da utilização de equipamentos para armazenamento de energia estar em concomitância com as tentativas de implementação de objetivos de conferências climáticas

internacionais, como o Acordo de Paris, o desenvolvimento das primeiras tecnologias pode ser observado há mais de 2.000 anos. A primeira bateria que se tem registro foi encontrada em 1936 nas proximidades de Bagdá, sendo constituída por uma jarra de barro, onde era inserida uma haste de ferro no interior de um objeto cilíndrico de cobre (RINCON; TAMANINI, 2013).

Para atingir a maturidade das baterias atuais, ao longo da história diversos cientistas e engenheiros contribuíram com o desenvolvimento de análises epistemológicas. Dessa forma, será disposto a seguir a evolução das tecnologias, ressaltando aquelas com maior importância para consolidação das tecnologias atuais.

3.2.1 Pilha de Volta

O italiano Alessandro Volta (1745-1827) foi um cientista que se desenvolveu em meio a um grande interesse por fenômenos elétricos na Europa, fazendo com que ele se tornasse um dos pioneiros nos estudos de baterias.

Uma das principais motivações de Volta teria sido entender a teoria da eletricidade animal proposta por Luigi Galvani (1737-1798). Volta concluiu que a fonte da eletricidade não seria a pele animal, concentrando seus estudos no papel dos metais na reação. Dessa forma, em 1796, um de seus experimentos foi capaz de detectar uma tensão elétrica entre um par metálico. A partir deste, Volta deduziu que, quando há um contato úmido entre dois metais diferentes, por consequência ocasiona uma atração de diferentes formas da eletricidade neles contida, fazendo com que um se torne mais carregado em relação ao outro (MARTINS, 1999).

Desta forma, a pilha de Volta foi desenvolvida com anseio de alcançar maiores valores de tensão elétrica. De início, Volta promoveu a conexão de diversos metais em série, mas observou que apresentavam os mesmos resultados de um único par metálico. Após muitos esforços, o cientista italiano aprendeu a conectar metais e condutores não-metálicos, colocando camadas de zinco e cobre juntas, separadas por um pano embebido em salmoura. Apesar de pioneira, sua invenção possuía uma capacidade de produção de eletricidade de relativamente muito tempo (MARTINS, 1999).

3.2.2 Pilha de Daniell

A pilha de Daniell representou um grande avanço em relação à Pilha de Volta. Em 1836 o cientista John Frederic Daniell foi instigado pela pequena capacidade de manutenção das correntes elétricas das pilhas da época, construindo assim sua própria pilha com base nos princípios científicos da Eletroquímica introduzidos por Michael Faraday (NISENBAUM, [2014?]).

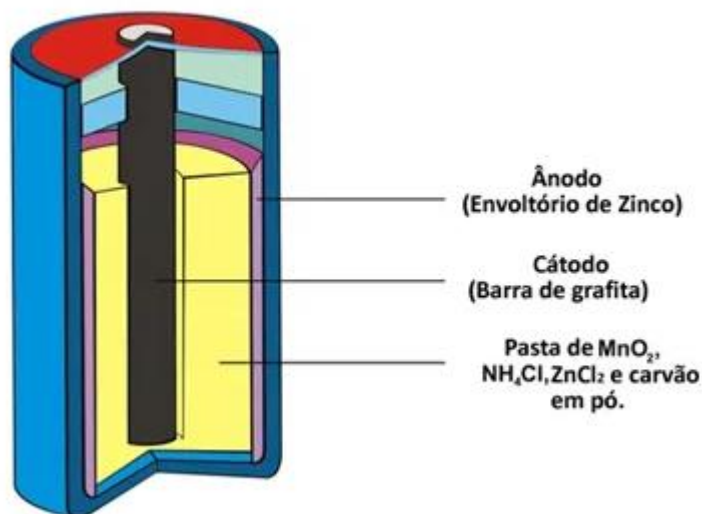
Em sua pilha, Daniell utilizou uma placa de zinco e outra de cobre. Além disso, dois recipientes foram usados, de barro e de vidro, aos quais foram preenchidos com sulfato de zinco e sulfato de cobre, respectivamente. As placas foram emergidas em suas soluções e conectadas entre si. Como resultado, observou-se que a carga da pilha era mantida por maior tempo, sendo deduzido por ele que esta resposta acontecia devido a utilização de dois eletrólitos separados, ao invés de apenas um como na Pilha de Volta (SALGADO *et al.*, 2020).

3.2.3 *Pilha de Leclanché*

Outra grande descoberta científica para desenvolvimento das baterias foi a pilha de zinco (Leclanché), que apesar de ter sido criada em 1866, esta tecnologia ainda vem sendo utilizada nos dias atuais.

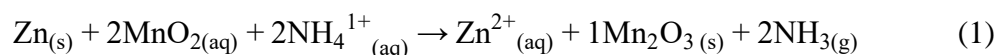
A pilha de zinco, também denominada pilha seca, é composta por um envoltório de zinco que forma o ânodo, e por uma barra de grafita circundada por dióxido de manganês (MnO_2), que atua como agente despolarizante, e por cloreto de amônia (NH_4Cl), cloreto de zinco ($ZnCl_2$) e carvão em pó, que formam o cátodo, assim como mostra a Figura 5. O diferencial de potencial dessas pilhas é de 1,5V (FOGAÇA, 2012; PESSOA, 2021).

Figura 5 - Pilha de Leclanché



Fonte: Fogaça (2012).

Para este tipo de pilha, temos que a reação química geral é:



A pilha de Leclanché é classificada como uma bateria primária, ou seja, estas não possuem a capacidade de recarga. Ademais, sua utilização é indicada para situações em que não seja requerido uma corrente elétrica elevada, para que assim propicie melhores relações de custo benefício (BOCCHI; FERRACIN; BIAGGIO, 2000).

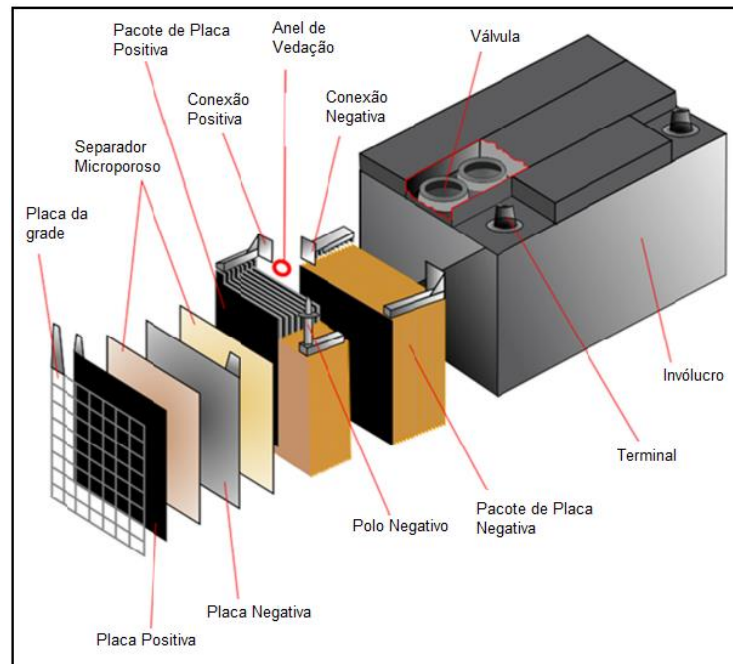
Assim como Bocchi, Ferracin e Biaggio (2000) trazem, um dos principais problemas destas pilhas são as reações paralelas que podem ocorrer durante o armazenamento desses equipamentos, ocasionando vazamentos. Dessa forma, existe uma preocupação em relação aos riscos ambientais, uma vez que em sua composição há metais como o mercúrio.

3.2.4 Bateria de Chumbo-Ácido

A bateria de chumbo-ácido foi idealizada há mais de 150 anos, sendo apresentada em 1860 pelo cientista francês Gaston Planté para a Academia Francesa. O equipamento em questão possuía diversas células, sendo composto por duas folhas espirais de chumbo que se isolavam devido a presença de um tecido poroso, estando envolvidos em ácido sulfúrico (LOURENÇO, 2010).

Atualmente, estas baterias permanecem com os princípios de construção semelhantes aos expostos acima, entretanto é possível classificá-las em duas categorias: Chumbo-ácido inundado (FLA) e Chumbo-ácido Regulado por Válvula (VRLA). A principal diferença entre elas está na presença de uma válvula reguladora de pressão nas VRLAs que elimina a entrada de ar nas células. A Figura 6 exibe a estrutura de uma bateria de chumbo-ácido (CONNOLLY, 2010).

Figura 6 - Estrutura de Baterias de Chumbo-Ácido



Fonte: Adaptado de Connolly (2010).

Apesar dos agentes oxidantes e redutores serem sólidos, não há uma ponte salina para separá-los. Dessa forma, a ausência da ponte salina faz com que a resistência interna da célula seja muito baixa, produzindo assim altas correntes. Para este acumulador, a reação global é apresentada na Equação 2 (CARNEIRO *et al.*, 2017).



Além das correntes elevadas, esta bateria se destaca por ter sido a primeira bateria secundária, ou seja, recarregável, da história. Os benefícios das baterias de chumbo-ácido, segundo Silva (2020), fizeram com que estas se tornassem as mais utilizadas nos últimos 100

anos, principalmente no setor automotivo, contribuindo para seu aprimoramento e diminuição dos custos de fabricação.

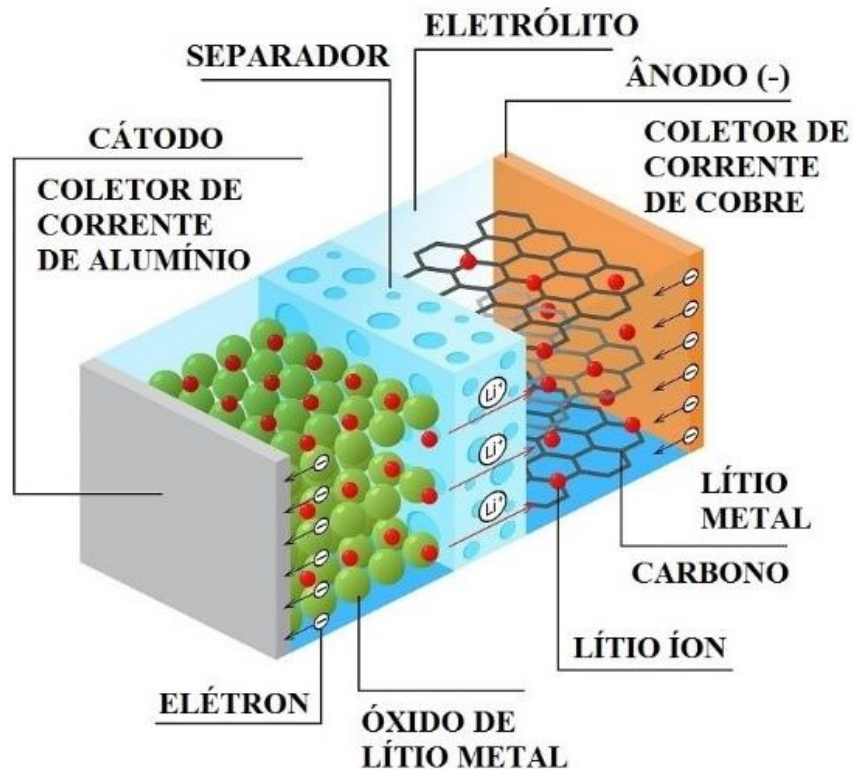
Entretanto, estas também apresentam desvantagens como sua baixa densidade energética e o impacto ambiental tanto na produção quanto no descarte dos equipamentos (SILVA, 2020).

3.2.5 Baterias de Íons de Lítio

O início da comercialização das baterias de íons de lítio deu-se apenas em 1970, entretanto desde 1912 o físico-químico Gilbert Newton Lewis já pesquisava sobre a utilização do lítio em pilhas (NISENBAUM, [2014?]).

As baterias de lítio convencionalmente possuem em sua estrutura três divisões principais, o ânodo de grafite, o cátodo, formado por um óxido metálico de lítio, e o eletrólito, sendo composto por uma solução de sal de lítio envolvido em um solvente orgânico. A Figura 7 esquematiza os processos químicos típicos que ocorrem durante a carga de uma bateria de íons de lítio (SCROSATI; GARCHE, 2010).

Figura 7 - Carga de uma Bateria de Íons de Lítio Genérica



Fonte: STA Eletrônica (2021).

Assim como frisado, geralmente o grafite é o eletrodo negativo da bateria, entretanto para o eletrodo positivo há diversos compostos que podem ser utilizados, como LiFePO_4 , LiCoO_2 , LiMn_2O_4 e o LiNiMnCoO_2 , que caracterizam e diferenciam os diversos tipos de Baterias de Íons de Lítio (LIB).

Como o lítio é o metal mais leve da tabela periódica e o mais eletropositivo, ou seja, possui maior tendência para liberar seus elétrons, o mesmo se torna um elemento de grande relevância para a construção das baterias modernas (EVARTS, 2015).

Segundo Rosolem *et al.* (2020), as LIBs já dominam as tecnologias portáteis, porém também vêm sendo utilizadas para sistemas de geração, transmissão e distribuição de energia elétrica, além de atuarem em cooperação com sistemas de energia renovável, como a solar fotovoltaica, para ampliação de sua disponibilidade. Sua notoriedade pode ser explicada por características como o seu baixo peso e alta densidade energética.

Além disso, deve-se destacar que as células de íons de lítio apresentam design flexível, possibilitando uma construção mais diversificada e adequada para vários formatos e tamanhos. Elas também não apresentam o problema do efeito memória, conhecido como vício de bateria, que faz com que o equipamento obtenha valores de capacidade de carga cada vez menores. Sua autodescarga também se destaca, sendo inferior a 5% ao mês, enquanto outras baterias apresentam valores entre 20 a 30% (ROSOLEM *et al.*, 2020).

De forma geral, mesmo não possuindo a mesma popularidade e maturidade das baterias de chumbo-ácido, por exemplo, pode-se dizer que a tecnologia LIB é uma história de sucesso. Quando analisado desde 1970, período de princípio da sua comercialização, a densidade de energia das LIBs aumentou continuamente entre 7 – 8 Whkg^{-1} por ano, sendo alcançado em 2018 valores de cerca de 250 Whkg^{-1} (NAYAK *et al.*, 2018).

Apesar dos avanços tecnológicos, os custos das células seguiram tendência contrária, sendo observada uma diminuição bastante acentuada no custo das baterias, partindo de 1.000 € kWh^{-1} , na década de 1990, para menos de 200 € kWh^{-1} atualmente. É esperado que este comportamento de queda dos preços se mantenha constante até 2026, com uma diminuição para menos de 100 € kWh^{-1} (NAYAK *et al.*, 2018).

Diante deste cenário, Gauto (2022) aponta que as LIBs se apresentam como boa solução para aplicação em sistemas de armazenamento de energia, destacando as renováveis, e em veículos elétricos. Dessa forma, essas tecnologias se evidenciam como protagonistas no processo de viabilização da transição energética.

3.3 Impactos Socioambientais dos SAE e da Produção de Baterias

À face do exposto, com tecnologias de armazenamento de energia em franca ascensão e aumentando seu escopo de atuação, é preciso atentar-se também as suas implicações ao meio ambiente e a comunidades mais específicas, que são impactadas pelo processo produtivo.

Assim como evidenciado por Serra *et al.* (2016), os SAE além de proporcionarem aumento de estabilidade e flexibilidade da rede de energia elétrica, também se tornam colaboradores na redução da emissão de carbono para a atmosfera. Entretanto, deve-se olhar com atenção para as baterias de forma mais específica.

As baterias de chumbo-ácido, por possuírem o chumbo em sua composição, sendo um metal extremamente danoso quando absorvido pelo organismo, necessitam de inúmeros cuidados em seu uso, transporte, manutenção, armazenamento e disposição final, para evitar problemas de contaminação (FELIX, 2016).

Diante disso, por já existir uma percepção da periculosidade das baterias de chumbo-ácido e com base nas projeções futuras acerca do aumento de capacidade e disponibilidade, que se mostram mais favoráveis às LIBs em relação as tecnologias mais antigas, a discussão a seguir será direcionada para as baterias de íons de lítio.

Conforme Gaines *et al.* (2011), para que seja possível compreender os impactos das baterias é necessário analisar todo o seu ciclo de vida, partindo da etapa de produção dos materiais, fabricação e montagem de sistemas, prestação de serviços, manutenção e reparo e até os processos de fim de vida do equipamento.

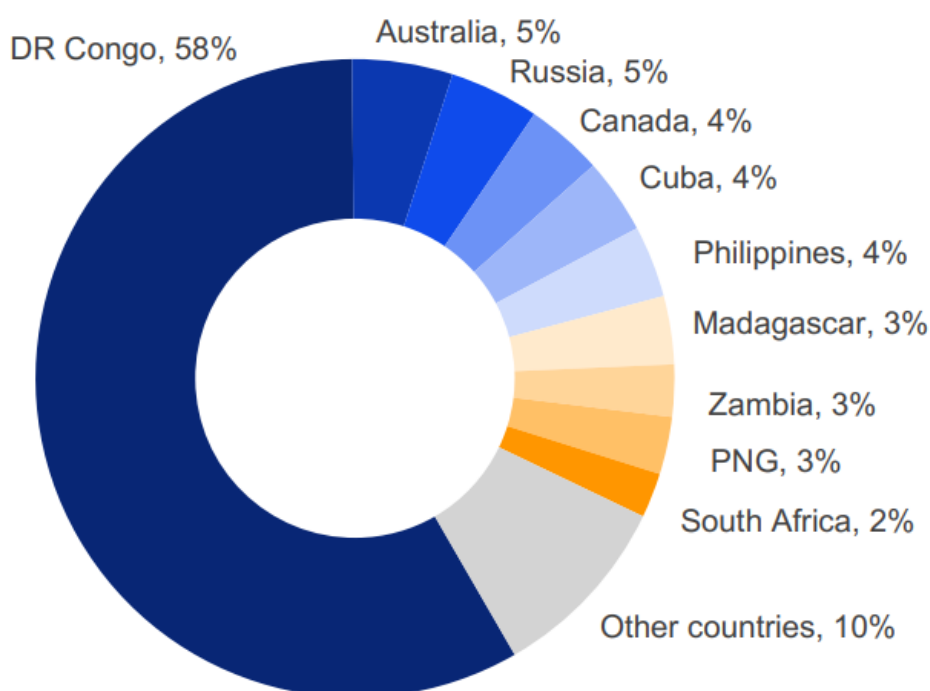
Para se avaliar os materiais que compõem as baterias de íons de lítio e assim caracterizar seus riscos ambientais é preciso realizar um refinamento, com observações mais específicas. Existem diversos tipos de formulações químicas para estas baterias, que podem influenciar em diferenças de custo, performance, ciclo de vida, capacidade específica e energia específica (GAINES *et al.*, 2011).

Para produção do material, os processos de mineração e refino podem apresentar muitos problemas socioambientais. De acordo com Emilsson e Dahllöf (2019), para as principais tecnologias de LIBs, os materiais com maior demanda de mineração são o cobalto, alumínio, cobre, níquel e o próprio lítio.

Dentre estes minérios e metais, alguns se evidenciam por sua exploração desencadear impasses ambientais e reivindicações sociais, como observado para extração do cobalto e do lítio.

As reservas mundiais de cobalto se concentram na República Democrática do Congo (cerca de 50%), que por sua vez também domina a produção desse minério, conforme pode ser visto no Gráfico 5 (DOMINISH; FLORIN; TESKE, 2019).

Gráfico 5 - Produção de Cobalto no Mundo



Fonte: Dominish, Florin e Teske (2019, p. iv).

As comunidades vizinhas das áreas de mineração do país africano foram afetadas por diversos problemas de saúde causados pela contaminação do ar, da água e do solo por metais pesados, como afirma Dominish, Florin e Teske (2019). O local de mineração de cobalto do país é classificado como um dos dez locais mais poluídos do mundo.

Além disso, o aumento da demanda por cobalto influencia os pequenos mineradores, que possuem uma participação considerável na produção do minério e que são sujeitos a condições de trabalho perigosas, havendo também denúncias de exploração de trabalho infantil (DOMINISH; FLORIN; TESKE, 2019).

Outro elemento que é essencial para a fabricação das LIBs é o próprio lítio, o qual sua exploração em determinados locais é alvo de críticas e movimentações sociais contrárias. “Se por um lado o lítio oferece novas possibilidades de desenvolvimento, por outro apresenta dificuldades, [...] pelas implicações jurídicas, econômicas e ambientais deste negócio.” (MOHAMED *et al.*, 2019, p.1, tradução nossa).

Em relação aos impactos ambientais, um dos processos de extração do lítio mais realizados é o de vaporização das águas salinas, utilizando ácidos, produtos químicos e carbonatos de sódio, possuindo um considerável risco de contaminação dos lençóis freáticos. Ademais, vale salientar a grande quantidade de água doce necessária para realização desse processo (MOHAMED *et al.*, 2019).

A zona entre Argentina, Chile e Bolívia, conhecida como ‘Triângulo do Lítio’, possui mais da metade das reservas mundiais de lítio, sendo, portanto, alvo de muita especulação e interesse de empresas multinacionais, uma vez que, segundo Mohamed *et al.* (2019), até 2025 as tendências são para que a demanda do material citado seja triplicada.

Quando analisado de forma mais específica a Bolívia, que possui no Salar de Uyuni cerca de 50% das reservas de lítio do planeta, alguns problemas sociais despontam. Segundo Prashad (2019), desde 2006 o governo boliviano tem buscado construir relações com empresas mineradoras que beneficiem a população local, mas diante disso muitas empresas transnacionais têm promovido golpes ao Estado para se manterem no domínio econômico do metal.

Desta forma, Dominish, Florin e Teske (2019) apontam que o incentivo a reciclagem e reuso desses materiais é uma estratégia chave para promoção de uma administração socioambiental mais responsável. Uma vez que atualmente, por exemplo, todo o lítio é descartado após o fim do seu ciclo de vida, mesmo possuindo um potencial de reciclagem de 95%.

Ações de reciclagem dos materiais base, atreladas ao aumento da eficiência das baterias, são essenciais para melhorar o rendimento do seu ciclo de vida, suportando o aumento na demanda e viabilizando a sustentabilidade das LIBs. Segundo Gaines *et al.* (2011), se os materiais ativos dessas baterias fossem reciclados adequadamente para reuso, a produção da matéria-prima poderia ser reduzida em mais de 50%, diminuindo também a energia gasta nesse processo.

3.4 Eficiência, Custos e Segurança de Baterias para Sistemas Solares

Conforme Copetti e Macagnan (2007), os sistemas de armazenamento de energia devem funcionar em função dos seus ciclos, de forma que a quantidade de ciclos de uma bateria pode limitar o seu uso. Sendo assim, para aplicações que haja uma demanda mais elevada, as LIBs apresentam uma eficiência significativa, como traz Automni (2021), onde

estas podem atingir entre 5.000 e 7.000 ciclos, enquanto tecnologias mais antigas, como as baterias de chumbo-ácido, fazem cerca de 1.500 ciclos.

Além disso, a profundidade de descarga também é uma característica das baterias que tem evoluído e assim contribuído com a viabilidade de um sistema. Baterias com poucos ciclos e baixa profundidade de descarga acarretariam na necessidade constante de manutenção e substituição do banco de baterias, encarecendo o sistema.

Outrossim, os SAEs devem ser avaliados através da análise de todos os seus componentes. Dentre estes, se destaca o sistema de conversão de potência, representado pelos inversores, que converte a energia contínua fornecida pelas baterias para energia alternada, utilizada pela maioria dos sistemas elétricos convencionais. Estes equipamentos também têm evoluído, mas ainda são consideravelmente caros e complexos, principalmente para situações mais robustas (COSTA E SILVA; BORTONI, 2016).

Ao se analisar especificamente os SAE para energia solar, um dos principais desafios estava relacionado a garantia da segurança dos equipamentos, uma que vez que poderiam gerar valores de corrente elevada e pontos quentes, diminuindo a eficiência. Entretanto, com a portaria N° 140/2022 o Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia (Inmetro, 2022) ampliou seu escopo de avaliação de sistemas fotovoltaicos, abrangendo os equipamentos de armazenamento de energia. Essa medida, além de promover a seguridade dos equipamentos, pode fomentar o mercado off-grid brasileiro, com a inserção de mais empresas especializadas.

Sendo assim, pode-se dizer que a compreensão da importância das baterias de lítio nos sistemas fotovoltaicos se dá através da análise de eficiência, segurança e relação com os outros equipamentos que compõem o sistema, que têm apresentado progresso conjunto.

Dessa forma, o uso de sistemas de armazenamento de energia pode atuar efetivamente para o beneficiamento de sistemas fotovoltaicos, conforme afirma Costa e Silva e Bortoni (2016), possibilitando uma geração mais satisfatória da energia solar.

Como já mencionado, as baterias de íons de lítio atualmente têm recebido mais atenção ao se buscar armazenar energia. Todavia, há tendência de aprimoramento e surgimento de novas tecnologias, indicando um crescimento de pelo menos 17 vezes nos SAE até 2030, se tornando cada vez mais econômicos (INTERNATIONAL RENEWABLE ENERGY AGENCY, 2019).

Os recentes avanços tecnológicos e projeções para o armazenamento de energia apresentados se colocam de maneira positiva. Posto isso, é importante verificar o progresso desses índices em cenários reais, com aplicações de tecnologias presentes no mercado.

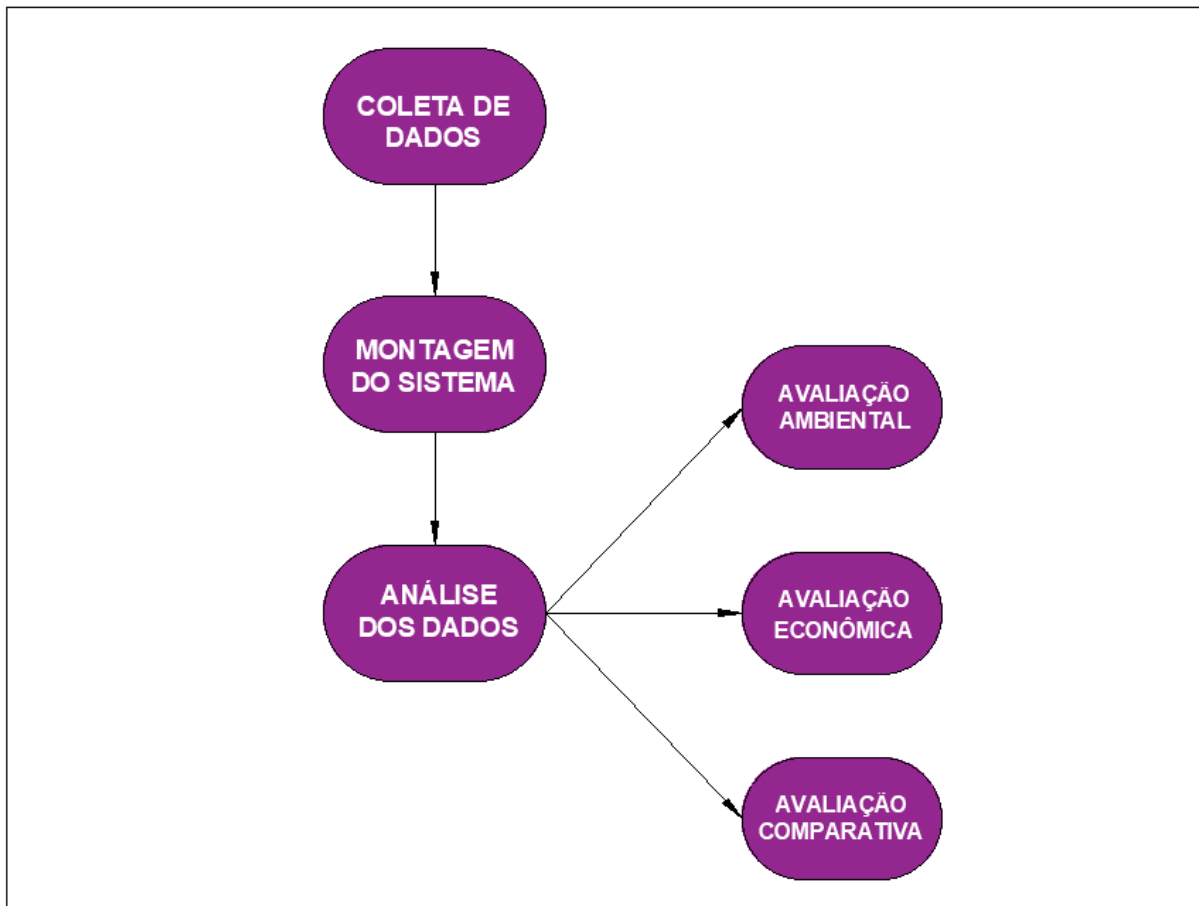
4 METODOLOGIA

A metodologia foi aplicada para atingir o objetivo, verificando o grau de maturidade dos sistemas de energia solar off-grid com base na análise de critérios como diversidade e modernização dos equipamentos que compõem o sistema, viabilidade econômica e redução de impactos ambientais. Além disso, ainda em questão aos custos financeiros e a eficiência, foi realizada uma comparação entre os sistemas on-grid e off-grid.

Para atender o propósito apresentado nos objetivos, foi elaborado um dimensionamento para o Instituto do Meio Ambiente do Município de Itapipoca, a partir das necessidades energéticas da instituição, em relação aos dois tipos de sistema de energia solar explicitados acima.

A Figura 8 exibe o fluxograma da metodologia utilizada para obtenção dos dados. Cada etapa do processo será descrita no decorrer do trabalho, bem como os parâmetros utilizados.

Figura 8 - Fluxograma de Blocos Simples da Metodologia Aplicada



Fonte: Elaborado pelo autor.

4.1 Coleta de dados

4.1.1 Caracterização do local

O IMMI é uma autarquia municipal, a qual desenvolve serviços como realização de licenciamento ambiental, atividades de educação ambiental, fiscalização, entre outros. Há também a promoção de ações que visem contribuir com a preservação ambiental da cidade, como o Programa Itapipoca Verde, que estimula a arborização urbana, e o Itapipoca Sem Queimadas, que busca alternativas sustentáveis para a agricultura da região (REDE ODS BRASIL, 2021).

O instituto é localizado ao lado da Farmácia Viva do município, no bairro Cruzeiro da cidade de Itapipoca, Ceará. Assim como pode ser observado na Figura 9, trata-se de uma área aberta, de fácil acesso e que, apesar de bem arborizado, não apresenta sinais de sombreamento no telhado que possam prejudicar a instalação de um sistema solar.

Figura 9 - Vista Frontal/Aérea do IMMI



Fonte: Elaborado pelo autor.

4.1.2 Levantamento de Cargas

O levantamento de cargas é uma etapa muito importante para a construção de um sistema de armazenamento de energia, uma vez que o mesmo será montado para atender a demanda local. Caso não seja feita uma acurácia dos dados, o sistema pode não conseguir

suportar a energia requerida, ocasionando faltas de energia, ou podendo ocorrer um sobredimensionamento, com muitos equipamentos ociosos.

Dessa forma, entrou-se em contato com o vice presidente do IMMI com objetivo de solicitar os dados da unidade, baseando-se nos equipamentos eletrônicos utilizados. De maneira bastante prestativa, o mesmo concordou em ajudar, fornecendo uma lista com o modelo e a quantidade de cada equipamento.

De posse da lista citada, buscou-se nos sítios eletrônicos dos fornecedores, ou em lojas de comercialização dos produtos, as fichas técnicas de cada equipamento, sendo catalogados as informações de potência, tensão de funcionamento e tipo de carga elétrica.

A potência, expressa em Watts(W), é essencial para determinação da carga geral do sistema. A tensão de funcionamento de cada aparelho também é muito importante pois pode indicar a necessidade da utilização de transformadores de tensão em caso de utilização de dispositivos trabalhando em tensões diferentes, como de 127 V para 220 V. Já o tipo de carga elétrica, sendo resistiva ou indutiva, atua em conjunto com a potência do equipamento, estabelecendo a potência que deve ser considerada para o levantamento de cargas.

Sendo assim, a potência considerada do local, expressa em Volt-Ampère (VA), foi obtida através da razão entre a potência(W) de cada equipamento e o seu fator de potência, identificado através do seu tipo de carga.

4.1.3 Levantamento de Consumo

Para esta etapa, mais dados foram solicitados junto ao vice diretor do IMMI. Além da lista com nome e quantidade dos equipamentos elétricos, foi requisitado que se fosse assinalado o tempo médio de utilização diária de cada um destes, em horas.

O consumo, em Watt hora por dia (Wh/dia) pôde então ser definido pela multiplicação da potência considerada (VA), anteriormente estabelecida, pelas horas de uso de cada aparelho.

Ademais, também foi solicitado uma conta de energia do prédio do IMMI, com a qual seria possível observar o consumo médio em kWh/mês, o tipo de fornecimento do local, se monofásico, bifásico ou trifásico, e a classificação da unidade consumidora. Estes dados foram utilizados para dimensionamento do sistema solar on-grid.

4.2 Dimensionamento do Sistema Off Grid

4.2.1 Dimensionamento dos Módulos e Controlador de Carga

Uma vez conhecidas as demandas energéticas do local, é possível dar início ao dimensionamento dos equipamentos, sendo, à princípio, dado enfoque ao dispositivo responsável por fazer a conversão dos raios solares em corrente elétrica, ou seja, os módulos fotovoltaicos.

O dimensionamento dos módulos fotovoltaicos pode ser realizado por dois métodos distintos, sendo determinados a partir do tipo do controlador de carga escolhido, de tecnologia Pulse Width Modulation (PWM) ou Maximum Power Point Tracking (MPPT).

Os controladores de carga PWM emitem pulsos de tensão de alta frequência para carregar as baterias, limitando a tensão emitida pelos módulos fotovoltaicos. Já os controladores de carga MPPT não limitam a tensão enviada pelos módulos, mas funcionam abaixando essa tensão e aumentando a corrente elétrica, fazendo com que essa tecnologia seja em torno de 60% mais eficiente que a PWM (TRX SOLAR, 2021).

Por sua maior eficiência, optou-se por seguir a metodologia para controladores de carga MPPT. Este método realiza o cálculo da energia gerada diariamente pelo módulo fotovoltaico, que posteriormente será aproveitada pelo sistema. Dessa forma, a energia produzida é dada pela Equação 3, conforme observado abaixo.

$$EP = PPM * Irr * (1 - Pm) \quad (3)$$

Onde:

EP – Energia Produzida (Wh/dia);

PPM – Potência de Pico do Módulo (W/kW/m²);

Irr – Irradiação Solar Diária (kWh/m² dia);

Pm – Perdas dos módulos (%).

A Potência de Pico do Módulo varia de acordo com o modelo escolhido, enquanto suas perdas estão relacionadas a fatores como a sujeira dos equipamentos e temperatura do ambiente, gerando uma perda média de 25%. Já a Irradiação Solar Diária foi determinada através de dados do Centro de Referência para as Energias Solar e Eólica Sérgio de Salvo Brito (CRESESB), com base na localização geográfica do IMMI, assim como exhibe a Figura 10.

Figura 10 - Dados de Irradiação Solar do IMMI

Estação: Itapipoca
 Município: Itapipoca, CE - BRASIL
 Latitude: 3,501° S
 Longitude: 39,549° O
 Distância do ponto de ref. (3,487027° S; 39,586757° O): 4,5 km

#	Ângulo	Inclinação	Irradiação solar diária média mensal [kWh/m ² .dia]												Média	Delta
			Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez		
<input checked="" type="checkbox"/>	Plano Horizontal	0° N	5,17	5,23	5,13	4,70	5,19	5,28	5,51	6,15	6,46	6,32	6,16	5,44	5,56	1,75
<input checked="" type="checkbox"/>	Ângulo igual a latitude	3° N	5,07	5,18	5,12	4,75	5,30	5,42	5,64	6,24	6,48	6,27	6,05	5,32	5,57	1,73
<input checked="" type="checkbox"/>	Maior média anual	4° N	5,04	5,16	5,12	4,76	5,33	5,47	5,68	6,27	6,48	6,25	6,01	5,28	5,57	1,72
<input checked="" type="checkbox"/>	Maior mínimo mensal	10° N	4,82	5,01	5,07	4,81	5,50	5,71	5,91	6,42	6,48	6,09	5,75	5,02	5,55	1,67

Fonte: Centro de Referência para as Energias Solar e Eólica Sérgio de Salvo Brito, 2022.

Após encontrado o valor de Energia Produzida, é preciso definir a quantidade de equipamentos necessários. Para os controladores de carga, deve-se atentar a folha de dados fornecida pelo fabricante, a qual indica a corrente elétrica e tensão máxima suportadas, e assim estimar o número de aparelhos exigidos para não ultrapassar tais valores. Já para os módulos fotovoltaicos, a Equação 4 traz como deve ser determinado este número.

$$N_{mod} = C/EP \quad (4)$$

Onde:

N_{mod} – Número de módulos;

C – Consumo de energia (Wh/dia);

EP – Energia Produzida (Wh/dia).

4.2.2 Dimensionamento do Inversor

O inversor, sendo o equipamento responsável por transformar a corrente contínua em corrente alternada, possui grande importância dentro do sistema de geração de energia.

Para que seja feita a seleção do inversor ideal, é necessário analisar suas especificações técnicas, como eficiência e frequência de saída, e atentar-se para a tensão de operação do inversor e para sua potência máxima, de forma que o consumo de energia não ultrapasse os valores da potência.

4.2.3 Dimensionamento das Baterias

As baterias são peças fundamentais em sistemas off-grid, pois armazenam a energia gerada e proporcionam sua utilização em qualquer período, uma vez que o sistema é desconectado da rede da concessionária de energia elétrica, além de todos os outros aspectos já mencionados no decorrer deste trabalho a respeito das mesmas.

Para o processo de determinação do banco de baterias foram utilizadas as informações de consumo previamente obtidas, bem como os dados relacionados aos equipamentos já dimensionados. Dessa forma, a tensão da bateria foi definida como a mesma tensão do inversor.

O banco de baterias é dimensionado em função da quantidade de Ampère-hora requerida para o sistema por dia. A Equação 5 exibe a formulação usada para determinação da capacidade da bateria.

$$CB = \frac{C * F_{env} * A}{E_{f_{inv}} * PD * E_{f_{cl}} * V_{bat}} \quad (5)$$

Onde:

CB – Capacidade da bateria (Ah);

C – Consumo (Wh/dia);

F_{env} – Fator de envelhecimento da bateria;

A – Autonomia do banco de baterias(dias);

E_{f_{inv}} – Eficiência do inversor (%);

PD – Profundidade de descarga da bateria (%);

E_{f_{cl}} – Eficiência coulômbica ou eficiência de ciclos (%);

V_{bat} – Tensão nominal da bateria (V).

Para F_{env} e E_{f_{cl}} foram assumidos valores de situações usuais, conforme sugerido por Oliveira (2020), enquanto as demais variáveis obedeceram às indicações do fabricante e os dimensionamentos já realizados. A Tabela 1 expõe os valores utilizados para as grandezas citadas.

Tabela 1 - Valores Médios Para o Fator de Envelhecimento de Baterias e Eficiência Coulômbica

Variável	
Fator de envelhecimento da bateria	1,25
Eficiência coulômbica ou eficiência de ciclos	95%

Fonte: Elaborado pelo autor.

4.2.4 Proteções e Cabos

Após estipulado os equipamentos eletrônicos que compõem o sistema solar off-grid, foi realizada a delimitação dos cabos e proteções do sistema. No Brasil, ainda não há uma norma específica para instalação de sistemas off-grid, dessa forma os documentos utilizados foram a NBR 5410, NBR 16690 e NBR 16612, além das orientações contidas nos manuais de cada equipamento.

Não foi incluído o dimensionamento de materiais de proteção dos cabos, tais como eletrodutos, conduletes e conduítes, sendo o escopo deste trabalho apenas a análise do circuito em si. Também não foi analisado a necessidade de adequação do circuito elétrico existente no IMMI, restringindo o estudo apenas até o quadro de distribuição de corrente alternada, que protege os inversores.

4.3 Análise Ambiental

Assim como discutido no decorrer deste trabalho, a avaliação do impacto ambiental de baterias e outros equipamentos deve ser feita analisando todo o ciclo de vida do objeto. Apesar de não ter sido possível identificar de maneira precisa junto aos fabricantes a quantidade de cada material na composição dos equipamentos dimensionados, a classificação do seu ciclo de vida se deu com a aplicação de metodologias mais abrangentes.

Dessa forma, a análise ambiental foi realizada através da observação da emissão de Gases do Efeito Estufa (GEE) e incidência de impactos ao ar, solo e água.

Primeiramente, foi analisado a quantidade de emissão dos GEE sem a instalação do sistema solar fotovoltaico, a partir de uma adaptação da metodologia de Amaral (2010), em que “foram obtidos os valores totais de consumo [...], convertidos em quantidade correspondente de massa de gás carbônico liberado” (LAWALL, 2018, p. 61 *apud* AMARAL, 2010). A Equação 6 demonstra o apresentado.

$$E = C_{uni} * FE \quad (6)$$

Onde:

E – Emissão (kgCO₂);

C_{uni} – Consumo da unidade (kWh);

FE – Fator de emissão (kgCO₂/kWh).

O fator de emissão (FE) de CO₂ pela geração de energia elétrica no Sistema Interligado Nacional (SIN) foi obtido através de dados do Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovações (2022), com valores referentes ao ano de 2021. A Tabela 2 alude tais valores.

Tabela 2 - Fator de Emissão Utilizado

Fator de Emissão Médio	Energia Elétrica (kgCO ₂ /kWh)
Mensal de 2021	0,1264

Fonte: Adaptado de Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovações (2022).

Feito isto, foi realizada a análise das emissões de gases ocasionadas pelo sistema solar fotovoltaico. Esse método é baseado no estudo apresentado por Krebs *et al.* (2020), que avalia o impacto de todo o ciclo de vida dos equipamentos do sistema, incluindo módulos fotovoltaicos, baterias de LiFePO₄ e demais componentes, como controladores de carga e inversores. Também é realizada a análise do sistema fotovoltaico sem uso de baterias. A Equação 7 mostra os cálculos necessários para determinação da emissão dos gases.

$$Et = Pot * Tx \quad (7)$$

Onde:

Et – Emissão total (t);

Pot – Potência do sistema (kWp);

Tx – Taxas de emissão do ciclo de vida ou pegada ambiental.

Krebs *et al.* (2020) exhibe dados referentes a sistemas de bateria com capacidade de atendimento de cargas CA de 5 kWh, 10 kWh e 20 kWh. Além das taxas de emissão dos gases do efeito estufa (sendo regidos majoritariamente por CO₂), o autor também expõe taxas referentes aos impactos à respiração e acidificação do solo e da água doce, assim como pode ser observado na Tabela 3.

Tabela 3 - Taxas de emissão do ciclo de vida de CO₂-eq (GEE), de poluentes inorgânicos respiratórios e de acidificação do solo e da água doce.

Sistema Fotovoltaico	GEE (kg CO₂-eq/kWh)	Inorgânicos Respiratórios (µg PM_{2.5}/kWh)	Acidificação do solo e da água doce (mmol H⁺-eq/kWh)
Sem baterias	0,054	5,18	0,49
Com baterias (5kWh)	0,080	6,18	0,77
Com baterias (10 kWh)	0,084	6,33	0,81
Com baterias (20 kWh)	0,088	6,47	0,85

Fonte: Adaptado de Krebs *et al.* (2020).

4.4 Análise Econômica

Em relação à questão de custos financeiros, foi realizada a cotação de mercado de todos os equipamentos necessários e seu valor total bruto foi dividido pelo valor médio mensal de consumo, em reais, da unidade consumidora. Dessa forma, foi determinado o tempo necessário para que o valor investido com o sistema seja abatido, apenas com os recursos anteriormente gastos com energia, conforme exhibe a Equação 8.

$$PB = IT/CMM \quad (8)$$

Onde:

PB – Payback (meses);

IT – Investimento Total (R\$);

CMM – Consumo Médio Mensal (R\$/mês).

O consumo médio mensal foi determinado através de uma análise tarifária da conta de energia. A Resolução Homologatória nº 2.859, de 22 de abril de 2021, autorizada pela ANEEL, descreve a atualização das tarifas cobradas pela concessionária Enel Ceará para os grupos A e B. Para o grupo B3, ao qual pertence a unidade consumidora do IMMI, os valores tarifários são expostos na Tabela 4.

Tabela 4 - Tarifa de fornecimento – Baixa Tensão Enel Ceará

Classe/Bandeira	VERDE		AMARELO		VERMELHO PATAMAR 1		VERMELHO PATAMAR 2	
	kWh		kWh		kWh		kWh	
B3 – OUTROS	TUSD	TE	TUSD	TE	TUSD	TE	TUSD	TE
		0,42666	0,30479	0,42666	0,31822	0,42666	0,39971	0,42666

Fonte: Adaptado de Agência Nacional de Energia Elétrica (2021).

Dessa forma, foi realizada a média dos valores das tarifas TE e TUSD e assumiu-se que permaneceriam constantes pelo período analisado, bem como os valores das alíquotas dos tributos ICMS, PIS e COFINS, admitidos como 27%, 0,67% e 3,08% respectivamente.

4.5 Análise Comparativa

Como última etapa da metodologia deste trabalho, foi realizado o dimensionamento de um sistema solar fotovoltaico on-grid, conforme os dados de consumo do IMMI.

Foi utilizada a Equação 3, com os mesmos critérios aplicados anteriormente, onde o valor encontrado foi multiplicado por 30, para definir a geração mensal. Por sua vez, o consumo da unidade foi dividido pela geração mensal para determinação da quantidade necessária de módulos.

Dessa forma, foi selecionado um kit solar, disponibilizado pelas fornecedoras de energia solar, com inversor de capacidade próxima ao valor da potência do conjunto de módulos necessário para o sistema on-grid. Os equipamentos de proteção e cabos foram dimensionados de acordo com as normas NBR 5410, NBR 16690 e NBR 16612.

Os impactos ambientais dos sistemas on-grid e off-grid foram comparados, assim como o investimento inicial (R\$) de cada um.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Síntese e estimativa de dados

Conforme exposto na seção anterior, à princípio foi realizado o levantamento de cargas do IMMI, o qual consistiu na catalogação dos equipamentos que fizessem uso da energia elétrica do local.

Entretanto, não foi possível identificar com exatidão o modelo de alguns aparelhos, pois suas etiquetas apresentavam-se ilegíveis devido a deterioração ocasionada pelo tempo. Para estes casos, o modelo do equipamento foi definido apenas através da sua marca (elemento visível nos equipamentos), de forma a escolher os modelos de maior popularidade no mercado.

A Tabela 5 apresenta o levantamento de cargas realizado através das informações disponibilizadas e dos dados supostos.

Tabela 5 - Levantamento de Cargas do IMMI

Número de identificação	Nome da Carga Marca/Modelo	Potência unitária (W)	Tensão	Resistiva ou Indutiva	Fator de Potência	Potência Considerada Unitária (VA)	Quantidade	Potência Considerada Total (VA)
1	Lâmpada Elgin Led Bulbo E27	9	Bivolt	Resistiva	1	9	16	144
2	Refletor Led SMD IP66	100	Bivolt	Resistiva	1	100	3	300
3	Computador ACER GX-783-BR1	500	Bivolt	Resistiva	1	500	1	500
4	Computador EasyPC com Monitor HQ 19.5"	300	Bivolt	Resistiva	1	300	4	1200
5	Notebook Lenovo Ultrafino IdeaPad 3i	35	220 Vcc	Resistiva	1	35	5	175
6	Ar Condicionado Split Hi Wall Philco 12000 BTUs	1150	220 Vcc	Indutiva	0,92	1250	4	5000
7	Impressoras EPSON L1455	20	Bivolt	Resistiva	1	20	3	60
8	Carregador de Celular Samsung EP-TA20BBBCGBR	15	Bivolt	Resistiva	1	15	1	15
9	Geladeira Eletrolux R0C31	91	Bivolt	Resistiva	1	91	1	91
10	Bebedouro Consul Gela Fácil CJK40A	65	Bivolt	Resistiva	1	65	1	65
TOTAL								7550

Fonte: Elaborado pelo autor.

Os equipamentos em que não foi possível realizar a constatação do seu modelo, sendo necessária a dedução através da marca, foram os aparelhos identificados pelos números 3, 4, 5 e 7, conforme expostos acima. Seus dados exibidos na Tabela 5, bem como para os demais, respeitaram as especificações do fabricante.

Já para os dados de consumo, as horas de utilização dos equipamentos foram estipuladas com base no horário de funcionamento do IMMI. Aqueles equipamentos de menor uso, como as impressoras, não seguiram o padrão apontado, sendo definido uma quantidade de horas menor.

A determinação do consumo dos aparelhos de ar condicionado, geladeira e bebedouro não seguiu a metodologia dos demais equipamentos, explicitada na seção anterior. Como o funcionamento desses equipamentos possui uma particularidade, de operarem em potência máxima apenas até atingir uma determinada temperatura, foi utilizado o valor de consumo médio de cada aparelho indicado pelo fabricante. Dessa forma, a quantidade de horas de uso foi desconsiderada para os mesmos. A Tabela 6 traz os valores de consumo de cada equipamento, bem como o consumo total do local.

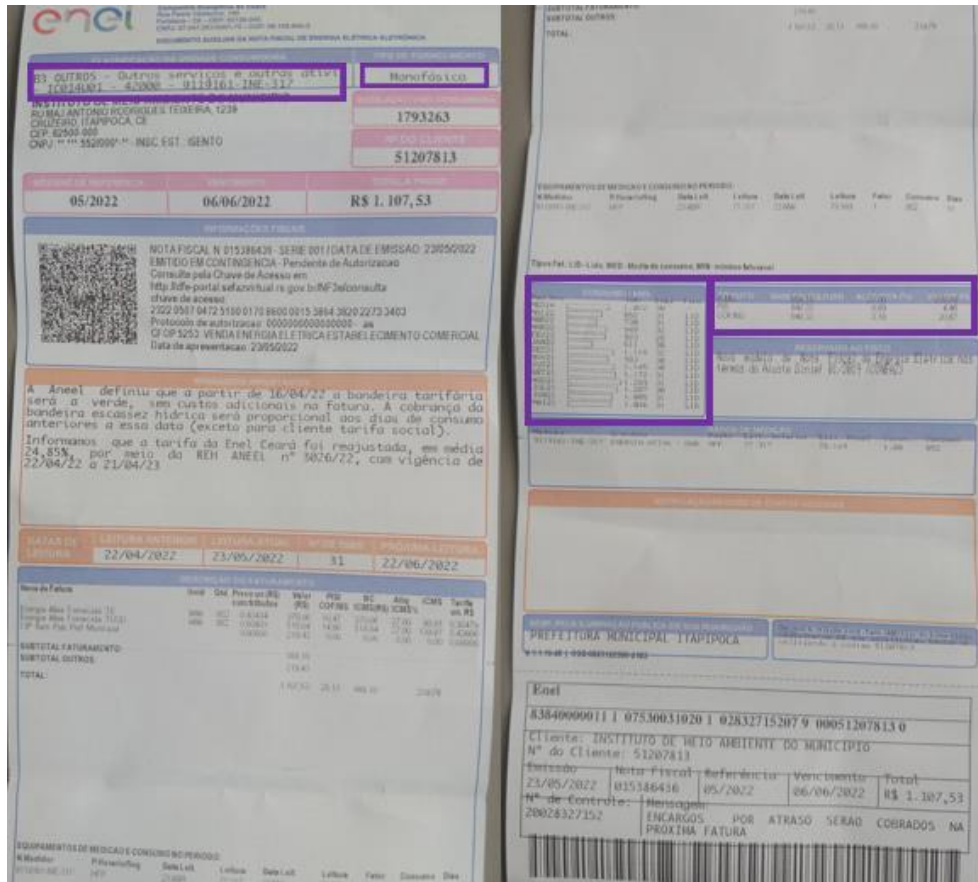
Tabela 6 - Levantamento de Consumo do IMMI

Número de identificação	Nome da Carga Marca/Modelo	Quantidade	Potência Considerada Total (VA)	Horas de Uso Diário	Wh por dia
1	Lâmpada Elgin Led Bulbo E27	16	144	8	1152
2	Refletor Led SMD IP66	3	300	11	3300
3	Computador ACER GX- 783-BR1	1	500	10	5000
4	Computador EasyPC com Monitor HQ 19.5"	4	1200	10	12000
5	Notebook Lenovo Ultrafino IdeaPad 3i	5	175	10	1750
6	Ar Condicionado Split Hi Wall Philco 12000 BTUs	4	5000	-	3226,8
7	Impressoras EPSON L1455	3	60	5	300
8	Carregador de Celular Samsung EP- TA20BBBCGBR	1	15	5	75
9	Geladeira Eletrolux ROC31	1	91	-	796,7
10	Bebedouro Consul Gela Fácil CJK40A	1	65	-	233,3
CONSUMO TOTAL					27833,8

Fonte: Elaborado pelo autor.

Também foram obtidos os valores de consumo através da análise dos dados da fatura de energia da unidade consumidora. No documento, outras informações podem ser inferidas, como a classe a qual o cliente pertence, tipo de fornecimento e as tarifas aplicadas. A Figura 11 exibe a fatura, destacando os elementos apontados.

Figura 11 - Fatura de Energia Referente a maio/2022 do Cliente da Distribuidora Enel.



Fonte: Elaborado pelo autor.

A Tabela 7 exibe os valores de consumo mensal expostos na fatura de energia. Foi observado uma inconsistência entre a média de consumo informada na conta e a média aritmética do histórico de consumo dos últimos 13 meses. Para fins da análise ambiental e econômica, bem como para o dimensionamento do sistema on-grid, foi considerada a média de consumo informada na fatura.

Tabela 7 - Consumo Mensal em kWh

MÊS	CONSUMO (kWh)
05/2022	852
04/2022	730
03/2022	949
02/2022	923
01/2022	611
12/2021	1.118
11/2021	983
10/2021	1.145
09/2021	1.172
08/2021	1.289
07/2021	1.207
06/2021	1.085
05/2021	1.046
MÉDIA ARITMÉTICA	1.008
MÉDIA FATURA	1.022

Fonte: Elaborado pelo autor.

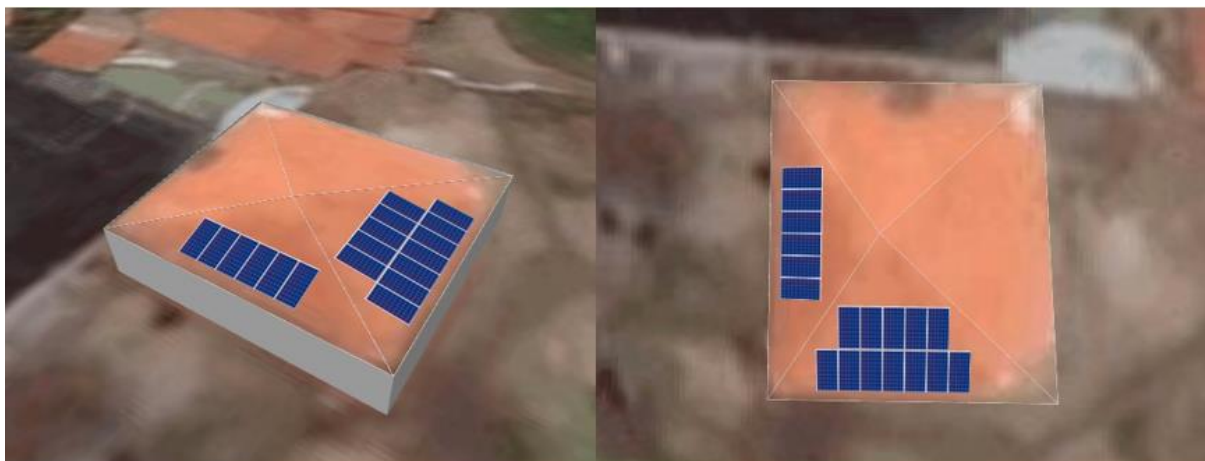
5.2 Determinação dos Equipamentos Elétricos e de Proteção

Com base nos dados obtidos, o sistema foi sendo montado de forma a atender a demanda com uso de equipamentos disponíveis no mercado. O módulo fotovoltaico escolhido foi o OSDA Solar monocristalino ODA450-36-MH, que possui potência de geração de 450 W e boa eficiência. Além disso, o equipamento se destaca por apresentar preço atrativo, com expectativa de vida de 30 anos.

Possuindo os dados dos módulos, para obtenção da energia gerada por cada equipamento é preciso definir sua irradiação solar, conforme exposto na Equação 3. Optou-se pela utilização da irradiação de 4,70 kWh/m² dia, sendo a menor incidência durante o ano, como observado na Figura 10. Assim, é garantido que mesmo no pior período do ano o sistema continue suprindo a demanda local. A energia produzida por módulo foi de 1586,25 Wh/dia.

Seguindo a metodologia apresentada, serão requeridos 18 módulos fotovoltaicos para o sistema e três controladores de carga. A Figura 12 apresenta a forma com que os módulos estariam dispostos no telhado do prédio, dimensionado pela plataforma Designer Solar Edge com base nas informações de satélites da área da cobertura e de dimensões do módulo.

Figura 12 - Disposição dos Módulos Solares no Telhado do IMMI



Fonte: Elaborado pelo autor.

A respeito do inversor, constatou-se uma baixa variedade de equipamentos no mercado brasileiro, onde para sistemas off-grid estes possuem, em sua maioria, pequena potência quando comparados aos inversores on-grid. Dessa forma, o dimensionamento teve que ser feito de forma a agrupar inversores em paralelo, para que sua potência fosse somada. Foram então selecionados três inversores Victron Quattro 10 kW, ultrapassando a demanda de 27,83 kWh.

O inversor em questão possui tensão de funcionamento de 230V e, assim como visto na Tabela 5, todos os equipamentos do local funcionam em 220 V (tensão próxima, não apresentando problemas) ou são bivolt. Sendo assim, não houve necessidade da adição de transformadores de tensão no sistema.

Para determinação das cargas que o banco de baterias deve suportar, conforme visto na Equação 5, uma série de variáveis é necessária, relacionadas tanto a características de consumo dos equipamentos, do inversor e da bateria. Assim, para definir a quantidade de aparelhos de armazenamento de energia, foi escolhida a bateria de íons de lítio Dyness B3, de tecnologia LiFePO₄, por apresentar uma vida útil prolongada de 6.000 ciclos (cerca de 30 anos), ser segura e possuir resfriamento natural.

A Tabela 8 informa todos os valores das incógnitas utilizados na Equação 5, bem como o resultado da capacidade de carga do banco e número de baterias necessárias. Por sua vez, este número foi definido através da divisão de CB por 75 Ah (capacidade de carga da bateria Dyness B3).

Tabela 8 - Resumo de Dados do Banco de Baterias

Variável	Valor
C	27,83 Wh/dia
F_{env}	1,25
A	2 dias
Ef_{inv}	96%
PD	80%
Ef_{cl}	95%
V_{bat}	48 V
CB	1986,94 Ah
Capacidade da bateria	75 Ah
Número de baterias	27

Fonte: Elaborado pelo autor.

Para garantir o funcionamento dos equipamentos em segurança, obedeceu-se ao limite de corrente e tensão elétrica para o dimensionamento dos cabos. Foram inseridos elementos de proteção do sistema entre os módulos e os controladores de carga (stringboxes), entre os controladores de carga e as baterias e entre o inversor e o restante do sistema elétrico.

A Tabela 9 descreve todos os equipamentos necessários para o sistema de geração de energia com armazenamento do IMMI.

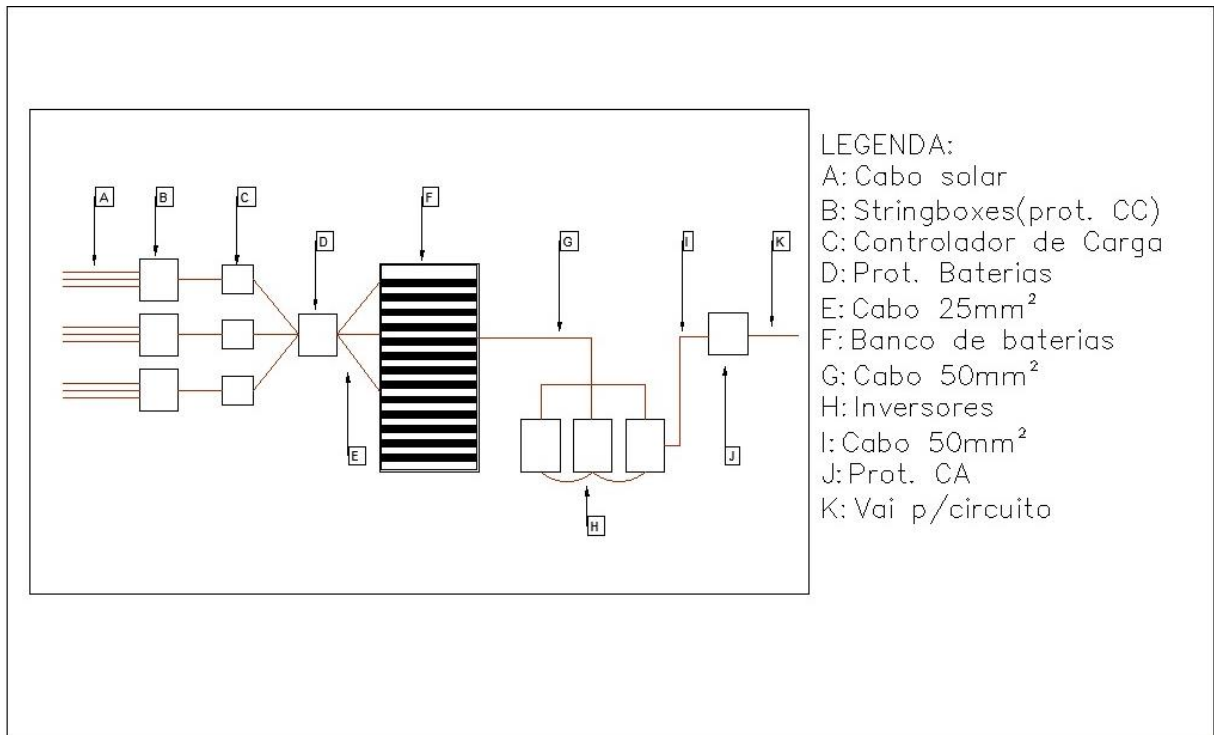
Tabela 9 - Material Requerido Para o Sistema Off-grid

Equipamentos Eletrônicos	Quantidade	Equipamentos de Proteção/Estrutural	Quantidade
Módulo Fotovoltaico Osda Solar - ODA450-36-MH	18	Par de Conector MC4	9
Controlador de Carga MPPT - Victron 150/85	3	Stringbox - CLAMPER 3 entradas e 1 saída	3
Bateria Solar - Dyness B3	27	Cabo Solar (100m)	2
Inversor Off Grid - Victron Quattro 10 kW	3	Fusível CC 120 A	3
		Quadro de Sobrepor	1
		Cabo 25mm ² (rolo de 50 metros)	1
		Cabo 50mm ² (1 metro)	40
		Disjuntor 150A caixa moldada tripolar Steck	1
		DPS Classe II 275V 20 KA	4
		Disjuntor Termomagnético 1P 32A	4
		Quadro de Distribuição Metálico Sobrepor	1
		Barramento tipo pente Monofásico para 12 disjuntores	1
		Barramento tipo pente Trifásico para 12 disjuntores	1
		Barramento para 8 parafusos 150 A	2
		Trilho DIN 12 Disjuntores	1
		Haste de Aterramento 5/8" com conector	1
		Caixa de inspeção para Aterramento	1
		Kit de fixação de estrutura solar	4

Fonte: Elaborado pelo autor.

É recomendado que os equipamentos sejam instalados em uma área protegida do sol e de demais condições climáticas, como chuva. Assim, a Figura 13 exibe o diagrama do sistema, indicando os equipamentos de proteção e a dimensão dos cabos.

Figura 13 - Diagrama de Instalação do Sistema Off-grid



Fonte: Elaborado pelo autor.

Dessa forma, para aquisição dos materiais listados acima, com base na análise do mercado foi levantado que o custo do sistema seria de R\$ 358.120,50. Os equipamentos que representaram maior participação no preço total do sistema foram as baterias Dyness B3 (71%), os inversores Victron Quattro 10 kW (17%) e os módulos fotovoltaicos OSDA Solar ODA450-36-MH (6%).

5.3 Avaliação Ambiental

Possuindo como referência o consumo médio mensal de 1.022 kWh, a emissão de CO₂ que o IMMI gera a cada mês, apenas devido ao uso de energia elétrica, é de 129,18 quilogramas.

Dessa forma, considerando a expectativa de vida dos módulos, baterias e inversores (30 anos), com a implementação do sistema off-grid, 46,51 toneladas de CO₂ não seriam emitidas, considerando o desligamento da rede da concessionária de energia.

Já para a análise das emissões decorrentes da implantação do sistema, para aplicação da Equação 7, a potência do sistema foi definida através da soma da potência do montante de módulos, sendo, portanto, de 8,10 kWp.

Já para as taxas apresentadas na Tabela 3, pode-se observar que as mesmas não abrangem o tamanho do sistema dimensionado (27, 83 kWh). Dessa forma, foram utilizados os dados do sistema fotovoltaico com baterias que atendem cargas CA de 20 kWh, por se aproximarem mais do caso analisado.

Aplicando a Equação 7 para as taxas apontadas, o valor encontrado foi multiplicado por trinta para obtenção de dados mensais. Assim, verificou-se que as emissões de GEE do sistema serão de 21,38 kg CO₂-eq, de inorgânicos respiratórios de 1572,21 µg PM_{2,5} e a acidificação do solo e água doce será de 206,55 mmol H⁺-eq. É importante ressaltar que o sistema não emite poluentes durante sua operação, os valores encontrados foram assim quantificados para efeitos de comparação com a emissão apresentada do consumo de eletricidade do SIN.

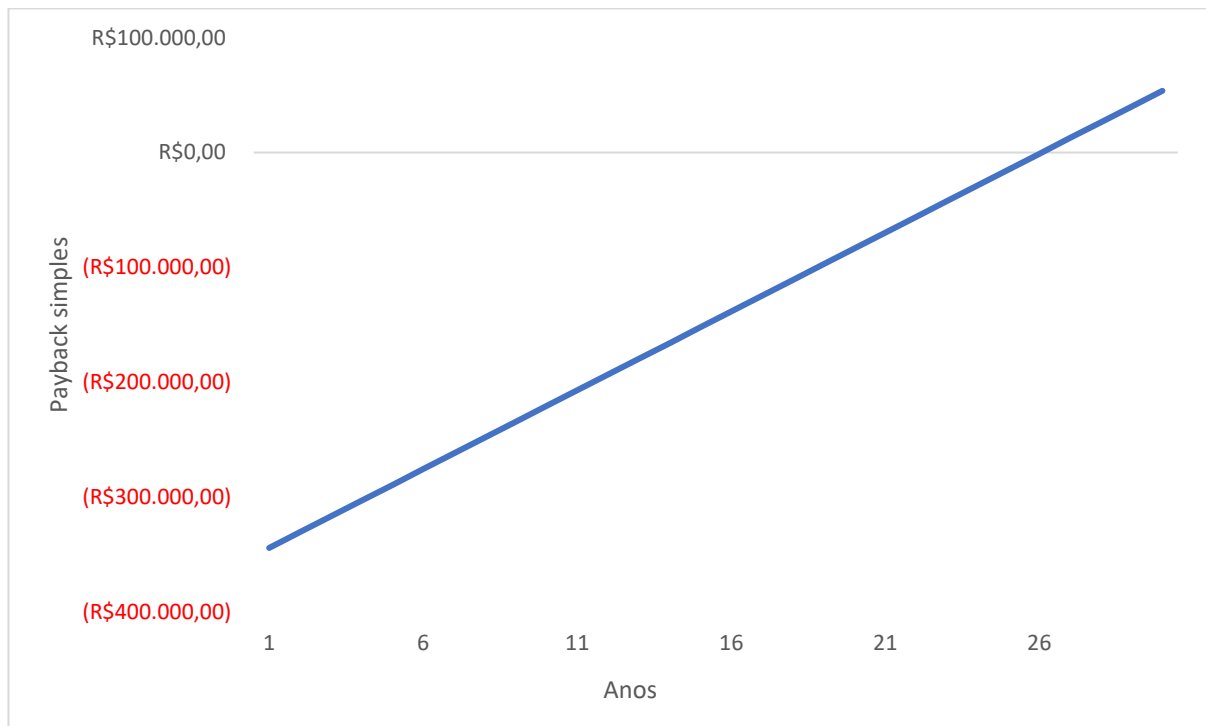
Portanto, para avaliação dos impactos reais do sistema, foi considerado o período total em que é esperado que o mesmo funcione, onde, a emissão de GEE seria de 7,70 toneladas de CO₂-eq, de inorgânicos respiratórios de 0,566 g PM_{2,5} e de acidificação do solo e água doce de 74,358 mol H⁺-eq.

5.4 Avaliação Econômica

A partir da premissa de que as alíquotas tributárias permaneceriam constantes e de que a tarifa aplicada pela concessionária seria a média das bandeiras tabeladas, foi estimado, com base no consumo médio mensal de kWh, uma despesa de R\$ 1.144,02 por mês. Dessa forma, em 30 anos seriam gastos R\$ 411.847,02 em energia, sem contabilizar outros fatores, como a inflação, que poderiam tornar este valor mais expressivo.

Por sua vez, com a implantação do sistema solar off-grid conforme dimensionado neste trabalho, as despesas mensais com energia seriam anuladas. O payback calculado foi de 313,04 meses, ou seja, cerca de 26,09 anos. Ao final dos 30 anos de vida útil dos equipamentos haveria um saldo de R\$ 53.726,70 para as contas da Prefeitura de Itapipoca, sendo este o órgão que mantém o IMMI. O Gráfico 6 apresenta a relação de payback simples do sistema sem considerar a mão de obra de instalação e equipamentos necessários para conexões elétricas.

Gráfico 6 - Payback do Sistema Solar Off-grid



Fonte: Elaborado pelo autor.

5.5 Avaliação Comparativa

Com intuito de possibilitar uma análise mais assertiva entre os sistemas de energia solar com e sem armazenamento de energia, a geração mensal do sistema on-grid foi também dimensionada com módulos fotovoltaicos de potência de 450 W, obtendo uma quantia de 47,59 kWh/mês. Dessa forma, para atender o IMMI, serão necessários 22 módulos.

Os sistemas on-grid possuem um diferencial de serem comercializados também através de kits, contendo todos os equipamentos necessários para o sistema, como inversor e cabos. Assim, com base na potência do conjunto de módulos definido, foi-se determinado o kit ideal para a unidade.

Adicionando os equipamentos de proteção ao kit, o preço do sistema on-grid foi de R\$ 39.503,23, sem contabilizar custos com mão de obra, transporte dos equipamentos e outros.

Como o sistema on-grid não é desligado da rede, mesmo que a geração mensal seja superior ao consumo, a fatura de energia constará com valores referentes à disponibilidade da rede, iluminação pública e ICMS. Sendo assim, o cálculo de payback desse sistema foi realizado de maneira semelhante ao apresentado para o sistema off-grid, mas o investimento

inicial foi dividido pela despesa média de energia menos a quantia dos elementos que ainda constarão na fatura, que representa a quantia máxima que o sistema pode abater.

Assim, o sistema on-grid apresentou uma taxa de retorno financeiro de 5,35 anos, sendo bastante atrativo, principalmente quando comparado ao payback de mais de 26 anos do sistema off-grid.

Já em relação à questão ambiental, a avaliação da implantação do sistema on-grid também foi realizada com base no mesmo método exposto anteriormente, porém agora para um sistema de 9,9 kWp, e nas taxas apresentadas na Tabela 3. Assim, o sistema apresentaria valores de emissão inferiores, sendo de 5,77 toneladas de CO₂-eq de GEE, 0,5538 g PM_{2,5} de poluentes inorgânicos no ar e uma taxa de acidificação de 52,39 mol H⁺-eq.

Entretanto, é preciso atentar-se ao fato que a implementação do sistema off-grid contribuirá com a eliminação direta na emissão de 129,18 kgCO₂/mês, de forma que não se pode afirmar o mesmo para o sistema on-grid. Apesar de não emitir gases durante a fase de operação do sistema, por estar conectado à rede do SIN e eventualmente utilizar de sua energia, o consumo da unidade é incluído no cálculo de emissão realizado pelo Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovações. De fato, a inclusão de sistemas solares ao SIN colabora com a redução do fator de emissão da energia elétrica, porém não o extingue.

6 CONCLUSÃO

Primeiramente, analisando o cenário de aumento na demanda energética, sendo as energias renováveis cada vez mais participativas, os sistemas de armazenamento de energia se apresentam como grandes potencializadores dessas fontes, uma vez que estas possuem a intermitência como uma de suas características. Ultrapassando o campo teórico, assim como exposto por relatórios da IRENA, as tecnologias SAE já possuem um desenvolvimento considerável e têm tendência de evolução bastante elevada para os anos futuros.

Ainda assim, quando estudado o caso específico de aplicação de um SAE para o IMMI, através de um sistema solar off-grid, foram constatadas algumas barreiras até então existentes para maior utilização destes sistemas. A quantidade de capital necessária para investimento é um grande empecilho, sendo observado que as baterias ainda são o elemento que mais influenciam no elevado preço do sistema, representando 71% dos R\$ 358.120,50 necessários para obtenção do sistema. Assim, ressalta-se a importância no avanço de pesquisas para aumento da capacidade das baterias, uma vez que esse aprimoramento resultará em um número menor de equipamentos requisitados.

Além disso, a falta da diversidade de equipamentos e fornecedores que trabalhem com esses tipos de sistemas pode fazer com que, por muitas vezes, os sistemas conectados à rede se apresentem de forma mais atrativa ao consumidor final.

Por fim, é possível concluir que os sistemas solares off-grid contribuem de maneira expressiva para a redução da emissão de poluentes. Constatou-se que a implementação do sistema acarretaria na exclusão de mais de 38 toneladas de CO₂ emitidos, porém seriam geradas 0,566 gramas de material particulado e a taxa de acidificação do solo e da água doce seria de 74,358 mol de H⁺-eq. Apesar desta análise ter sido realizada com base em um sistema de capacidade menor, os valores reais não devem diferir em grande proporção dos expostos, pois, como observadas, as taxas de emissão são bastante similares mesmo entre sistemas diferentes.

REFERÊNCIAS

ABSOLAR. **Energia Solar Fotovoltaica no Brasil**. 2022. 1 infográfico. Disponível em: <https://www.absolar.org.br/mercado/infografico/>. Acesso em: 2 abr. 2022.

ABSOLAR. **Entenda como funciona a energia solar fotovoltaica**. [S. l.], [2021]. Disponível em: <https://www.absolar.org.br/mercado/o-que-e-energia-solar-fotovoltaica/>. Acesso em: 2 abr. 2021.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Resolução Homologatória nº 2.859**, de 22 de abril de 2021.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Resolução Normativa nº 482**, de 17 de abril de 2012.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Resolução Normativa nº 687**, de 24 de novembro de 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE COMPANHIAS DE ENERGIA ELÉTRICA. **Potência Instalada de Geração Elétrica: Brasil e Mundo**. [S. l.]: Ministério de Minas e Energia, 2012. Disponível em: <http://www.abce.org.br/downloads/potenciainstaladaEEBR.pdf>. Acesso em: 5 abr. 2022.

AUTOMNI. **Baterias de Lítio x Baterias de Chumbo: qual a mais relevante para sua transpaleteira?** [S. l.]: Automni, 2021. Disponível em: <https://automni.com.br/baterias-de-litio-x-baterias-de-chumbo-qual-a-mais-relevante-para-sua-transpaleteira/>. Acesso em: 11 maio 2022.

BLOOMBERGNEF. **Battery Pack Prices Fall to an Average of \$132/kWh, But Rising Commodity Prices Start to Bite**. [S. l.], 2021. Disponível em: <https://about.bnef.com/blog/battery-pack-prices-fall-to-an-average-of-132-kwh-but-rising-commodity-prices-start-to-bite/>. Acesso em: 7 mar. 2022.

BOCCHI, Nerilso; FERRACIN, Luiz Carlos; BIAGGIO, Sonia Regina. Pilhas e Baterias: Funcionamento e Impactos Ambientais. **Química Nova na Escola**, [s. l.], n. 11, 2000. Disponível em: <http://qnesc.sbq.org.br/online/qnesc11/v11a01.pdf>. Acesso em: 27 abr. 2022.

BUENO, A. F. M.; BRANDÃO, C. A. L. **Visão Geral de tecnologia e Mercado para os Sistemas de Armazenamento de Energia Elétrica no Brasil**. 1. ed. Belo Horizonte: Associação Brasileira de Armazenamento e Qualidade de Energia, [2017?]. Disponível em: http://abaque.com.br/wp-content/uploads/2017/07/Estudo_Mercado_Armazenamento_Brasil.pdf. Acesso em: 4 abr. 2022.

CAMELO, H. do N. *et al.* PREVISÃO DE RADIAÇÃO SOLAR INCIDENTE NO ESTADO DO CEARÁ - BRASIL. **HOLOS**, [S. l.], v. 7, p. 218–230, 2016. DOI: 10.15628/holos.2016.2706. Disponível em: <https://www2.ifrn.edu.br/ojs/index.php/HOLOS/article/view/2706>. Acesso em: 30 maio 2022.

CARNEIRO, R. L. *et al.* Aspectos essenciais das Baterias Chumbo-Ácido e Princípios Físico-Químicos e Termodinâmicos do seu Funcionamento. **Revista Virtual de Química**, Bauru, v. 9, n. 3, p. 889 – 911, 2017. DOI 10.21577/1984-6835.20170057. Disponível em: http://rvq.s bq.org.br/detalhe_artigo.asp?id=775. Acesso em: 3 maio 2022.

CAVALCANTE, Antônio Wilton Araújo; CARVALHO, Paulo Cesar Marques de; LIMA, Lutero Carmo de. Célula combustível e bateria integrados a sistema fotovoltaico. *Rev. Tecnol.*, Fortaleza, v. 26, n. 2, p. 196-206, dez. 2005.

COMISSÃO MUNDIAL SOBRE MEIO AMBIENTE E DESENVOLVIMENTO. **Nosso Futuro Comum**. [S. l.]: [s. n.], 1987. Título original: Our Common Future. Disponível em: <https://ambiente.files.wordpress.com/2011/03/brundtland-report-our-common-future.pdf>. Acesso em: 9 mar. 2022.

CONNOLLY, David. **A Review of Energy Storage Technologies**: For the integration of fluctuating renewable energy. 2010. Tese (Doutorado em Philosophy in Energy Planning) – Department of Physics and Energy, University of Limerick, Limerick, 2010. Disponível em: <https://vbn.aau.dk/en/publications/the-integration-of-fluctuating-renewable-energy-using-energy-stor>. Acesso em: 5 maio 2022.

COPETTI, J.; MACAGNAN, M. Baterias em sistemas solares fotovoltaicos. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENERGIA SOLAR, 1., 2007, Fortaleza. **Anais do Congresso Brasileiro de Energia Solar**. Fortaleza: Associação Brasileira de Energia Solar, 2007. Disponível em: <http://professor.unisinos.br/jcopetti/artigos/cbens2007.PDF>. Acesso em: 15 maio 2022.

COSTA E SILVA, Yáscara F. F.; BORTONI, Edson C. Sistemas de Armazenamento de Energia Elétrica em Redes Inteligente: Características, Oportunidades e Barreiras. **Revista Brasileira de Energia**, Itajubá, v. 22, n. 1, p. 48 – 72, 2016.

DOMINISH, E.; FLORIN, N.; TESKE, S. **Responsible Minerals Sourcing for Renewable Energy**. [Sydney, Austrália]: Institute for Sustainable Futures, 2019. Disponível em: <https://www.uts.edu.au/research-and-teaching/our-research/institute-sustainable-futures/our-research/resource-futures/responsible-minerals-for-renewable-energy>. Acesso em: 3 mar. 2022.

EMILSSON, Erik; DAHLLÖF, Lisbeth. **Lithium-Ion Vehicle Battery Production - Status 2019 on Energy Use, CO2 Emissions, Use of Metals, Products Environmental Footprint, and Recycling**. Estocolmo, Suécia: IVL Swedish Environmental Research Institute, 2019. Disponível em: <https://www.ivl.se/english/ivl/publications/publications/lithium-ion-vehicle-battery-production---status-2019-on-energy-use-co2-emissions-use-of-metals-products-environmental-footprint-and-recycling.html>. Acesso em: 20 fev. 2022.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Balço Energético Nacional 2021: Ano base 2020**. Rio de Janeiro: EPE, 2021. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-601/topico-596/BEN2021.pdf>. Acesso em: 17 mar. 2022.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Nota Técnica NT/EPE/DEA-005/2020 – Metodologia: Projeção de Curva de Carga Horária, de março de 2020**.

EVARTS, Eric C. Lithium batteries: To the limits of lithium. **Nature**, [s. l.], v. 526, n. 7575, p. S93 – S95, 2015. Disponível em: <https://www.nature.com/articles/526S93a>. Acesso em: 8 mar. 2022.

FELIX, Vivianne Freire. **Proposição de melhorias ao processo de logística reversa de pós-consumo de bateria de chumbo-ácido em uma distribuidora no Estado da Paraíba**. 2016. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Administração) – Centro de Ciências Sociais Aplicadas, Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2016.

FOGAÇA, Jennifer Rocha Vargas. **Pilha Seca de Leclanché**. [S. l.]: Brasil Escola, 2012. Disponível em: <https://brasilecola.uol.com.br/quimica/pilha-seca-leclanche.htm>. Acesso em: 23 abr. 2022.

GAINES, Linda *et al.* Life-Cycle Analysis of Production and Recycling of Lithium Ion Batteries. **Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board**, Washington, Estados Unidos, v. 2252, n. 1, p. 57 – 65, 2011. Disponível em: <https://journals.sagepub.com/doi/10.3141/2252-08>. Acesso em: 20 fev. 2022.

GAUTO, Marcelo. Lítio, hidrogênio e a eletrificação da frota. **epbr**, [s. l.], [s. n.], 4 fev. 2022. Seção Transição energética. Disponível em: <https://epbr.com.br/litio-hidrogenio-e-a-eletrificacao-da-frota/>. Acesso em: 11 mar. 2022.

GRUBERT, S. S.; OLIVEIRA, V. A. De. Evolução das Energias Renováveis e Perspectivas para o Futuro Utilizando a Biomassa. **Revista Jurídica Direito, Sociedade e Justiça**, [s. l.], v. 6, n. 8, 2021. Disponível em: <https://periodicosonline.uems.br/index.php/RJDSJ/article/view/6431>. Acesso em: 9 abr. 2022.

HESSE, Holger C. *et al.* Lithium-Ion Battery Storage for the Grid—A Review of Stationary Battery Storage System Design Tailored for Applications in Modern Power Grids. **Energies**, Munique, Alemanha, v.10, n. 12, 2017. DOI: 10.3390/en10122107. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1996-1073/10/12/2107>. Acesso em: 5 mar. 2022.

INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA, QUALIDADE E TECNOLOGIA. **Portaria nº 140**, de 21 de março de 2022.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **Balances Energéticos Mundiais de 2020: Visão Geral**. França: IEA, 2020. Disponível em: https://iea.blob.core.windows.net/assets/23f096ab-5872-4eb0-91c4-418625c2c9d7/World_Energy_Balances_Overview_2020_edition.pdf. Acesso em: 03 mar. 2022.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **Renewables 2021**. Paris: IEA, 2021. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/renewables-2021>. Acesso em: 20 mar. 2022.

INTERNATIONAL RENEWABLE ENERGY AGENCY. **Renewable Power Generation Costs in 2018**. Abu Dhabi: IRENA, 2019. Disponível em: <https://www.irena.org/publications/2019/May/Renewable-power-generation-costs-in-2018>. Acesso em: 15 mar. 2022.

KREBS, L. *et al.* **Environmental Life Cycle Assessment of Residential PV and Battery Storage Systems**. [Sydney]: International Energy Agency PVPS Task 12. 2020.

LAWALL, Vitória. **Avaliação do Uso de Alternativas Sustentáveis em Residências para Diminuição da Pegada Ecológica**. 2018. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Ambiental) – Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2018. Disponível em: <https://www.lume.ufrgs.br/handle/10183/199257>. Acesso em: 17 maio 2022.

LIMA, R. A. A Produção de Energias Renováveis e o Desenvolvimento Sustentável: Uma Análise no Cenário da Mudança do Clima. **Revista Direito E-nergia**, [s. l.], v. 5, 2014. Disponível em: <https://periodicos.ufrn.br/direitoenergia/article/view/5145>. Acesso em: 9 mar. 2022.

LOURENÇO, Fabrício. **Estudo de confiabilidade de baterias de chumbo-ácido e o impacto do tempo de pátio na sua confiabilidade**. 2010. Dissertação (Mestrado em Engenharia Automotiva) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2010. doi:10.11606/D.3.2010.tde-26122014-180708. Acesso em: 3 maio 2022.

MACHADO, Nayara. Cenários do PDE apontam dificuldade para viabilizar GD com armazenamento na próxima década. **epbr**, [s. l.], [s. n.], 6 jul. 2021. Seção Diálogos da Transição. Disponível em: <https://epbr.com.br/cenarios-do-pde-apontam-dificuldade-para-viabilizar-gd-com-armazenamento-na-proxima-decada/>. Acesso em: 30 abr. 2022.

MAIA, Diógenes Silva *et al.* Benefícios e eficiência econômica da energia solar fotovoltaica para uma pequena propriedade rural. **Brazilian Journal of Development**, [Minas Gerais], v. 7, n. 8, p. 82633 – 82643, 2021. DOI: 10.34117/bjdv7n8-461. Disponível em: <https://brazilianjournals.com/index.php/BRJD/article/view/34722>. Acesso em: 2 abr. 2022.

MARTINS, Roberto de Andrade. Alessandro Volta e a invenção da pilha: dificuldades no estabelecimento da identidade entre o galvanismo e a eletricidade. **Acta Scientiarum**, Campinas, v. 21, n. 4, p. 823 – 835, 1999. Disponível em: <http://www.ghc.usp.br/server/pdf/ram-73.pdf>. Acesso em: 20 abr. 2022.

MATIELLO, Sabrina *et al.* Energia e desenvolvimento: alternativas energéticas para comunidades isoladas da Amazônia. **Revista Presença Geográfica**, [s. l.], v. 5, n. 1, p. 11 – 21, 2018. DOI 10.36026/rpgeo.v5i1.2723. Disponível em: <http://www.periodicos.unir.br/index.php/RPGeo/article/view/2723/2329>. Acesso em: 5 abr. 2022.

MENDONÇA, Alisson Henrique Duarte França de. **Sistemas de Armazenamento de Energia**. [2021]. Trabalho apresentado no Congresso Técnico Científico da Engenharia e da Agronomia, 7., 2021, [s. l.].

MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA E INOVAÇÕES. **Fator médio - Inventários corporativos**. [S. l.]: Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovações, 2022. Disponível em: https://antigo.mctic.gov.br/mctic/opencms/ciencia/SEPED/clima/textogeral/emissao_corporativos.html. Acesso em: 17 maio 2022.

MOHAMED, Amir *et al.* **El triángulo del Litio** – Un análisis geopolítico. [Madrid, Espanha]: Facultad de Ciencias Políticas y Sociología, 2019. Disponível em: https://www.academia.edu/53282326/El_tri%C3%A1ngulo_del_Litio_Un_an%C3%A1lisis_geopol%C3%ADtico. Acesso em: 15 mar. 2022.

NAYAK, Prasant Kumar *et al.* From Lithium-Ion to Sodium-Ion Batteries: Advantages, Challenges, and Surprises. **Angewandte Chemie International Edition**, Weinheim, Alemanha, v. 57, n. 1, p. 102 – 120, 2017. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/anie.201703772>. Acesso em: 8 mar. 2022.

NEVES, Guilherme Macedo das; SHAYANI, Rafael Amaral. Precificação da emissão de gases de efeito estufa da energia solar fotovoltaica e da energia termelétrica a gás natural: estudo de caso na Universidade de Brasília. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENERGIA SOLAR, 8., 2020, Fortaleza. **Anais do Congresso Brasileiro de Energia Solar**. Fortaleza: Associação Brasileira de Energia Solar, 2020. Disponível em: <https://anaiscbens.emnuvens.com.br/cbens/article/view/1022>. Acesso em: 20 maio 2022.

NISENBAUM, Moises André. Pilhas e Baterias. [Rio de Janeiro]: [s. n.], [2014?]. Disponível em: https://www.academia.edu/31733577/Pilhas_e_Baterias_Moises_Andr%C3%A9_Nisenbaum. Acesso em: 6 maio 2022.

OLIVEIRA, Guilherme Peterlini de. **Ficando fera em off grid**. [S. l.], 2020. Disponível em: <https://hotmart.com/pt-br/marketplace/produtos/ficando-fera-em-off-grid/P42745843R>. Acesso em: 11 abr. 2022.

PESSOA, Sávio Mateus Ferreira. **Avaliação da capacidade de baterias tipo AAA**. 2021. 43f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Elétrica) – Centro de Engenharia Elétrica e Informática, Universidade Federal de Campina Grande, Paraíba, 2021. Disponível em: <http://dspace.sti.ufcg.edu.br:8080/jspui/handle/riufcg/21051>. Acesso em: 23 abr. 2022.

PORTAL SOLAR. **Sistema de Energia Solar Off Grid**. [S. l.], [2020]. Disponível em: <https://www.portalsolar.com.br/sistema-energia-solar-off-grid>. Acesso em: 2 abr. 2022.

PRASHAD, Vijay. As multinacionais, o valioso lítio da Bolívia e a urgência de um golpe. **Brasil de Fato**, São Paulo, [s. n.], 13 nov. 2019. Seção Internacional. Disponível em: <https://www.brasildefato.com.br/2019/11/13/artigo-or-o-litio-da-bolivia-e-a-urgencia-de-um-golpe>. Acesso em: 8 maio 2022.

REDE ODS BRASIL. **Instituto de Meio Ambiente - Prefeitura de Itapipoca/CE**. [S. l.]: Redes ODS Brasil, 2021. Disponível em: <https://www.redeodsbrasil.org/post/instituto-de-meio-ambiente-prefeitura-de-itapipoca-ce>. Acesso em: 19 maio 2022.

RICON, Maria Luciana; TAMANINI. BATERIA DE BAGDÁ: MISTERIOSA PILHA MILENAR INTRIGA ARQUEÓLOGOS ATÉ HOJE. [S. l.], 2013. Disponível em: <https://www.megacurioso.com.br/misterios/36250-bateria-de-bagda-misteriosa-pilha-milenar-intriga-arqueologos-ate-hoje.htm>. Acesso em: 27 mar. 2022.

ROBERTS, Justo José. **Análise de desempenho de um sistema híbrido de geração de energia solar-eólico-diesel considerando variações probabilísticas da carga e dos recursos renováveis**. 2012. 152 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2012. Disponível em: <http://hdl.handle.net/11449/99329>. Acesso em: 17 mar. 2022.

ROSOLEM, Maria de Fátima Negreli Campos *et al.* DESENVOLVIMENTO DE BATERIA DE LÍTIO-ÍON PARA SERVIÇOS ANCILARES. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENERGIA SOLAR, 8., 2020, Fortaleza. **Anais do Congresso Brasileiro de Energia Solar**. Fortaleza: Associação Brasileira de Energia Solar, 2020.

SALGADO, José Ricardo C. *et al.* Pilhas e baterias: relato científico nas principais descobertas para sua formação. **A Física na Escola**, [Foz do Iguaçu, Paraná], v. 18, n. 1, p. 23 – 29, 2020. Disponível em: <http://www1.fisica.org.br/fne/phocadownload/Vol18-Num1/FnE-18-1-190806.pdf>. Acesso em: 6 maio 2022.

SANTOS, Ana Sofia Pereira dos. **Análise da Evolução Tecnológica na Área de Armazenamento de Energia Elétrica**. 2016. Dissertação (Mestrado Integrado em Engenharia da Energia e do Ambiente) – Faculdade de Ciências, Universidade de Lisboa, 2016.

SCROSATI, Bruno; GARCHE, Jürgen. Lithium batteries: Status, prospects and future. **Journal of Power Sources**, Roma, v. 195, n. 9, p. 2419 – 2430, 2010. DOI 10.1016/j.jpowsour.2009.11.048. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0378775309020564?via%3Dihub>. Acesso em: 10 maio 2022.

SERRA, Eduardo T. *et al.* **Armazenamento de Energia: Situação atual, perspectivas e recomendações**. Comitê de Energia da Academia Nacional de Engenharia, 2016. Disponível em https://energiasroraima.com.br/wp-content/uploads/2020/01/ACUMULACAO-DE-ENERGIA-_Armazenamento-de-Energia-Fev-2017.pdf. Acesso em: 20 abr. 2022.

SILVA, Cynthia Tamires da. **Baterias de chumbo ácido**. [S. l.]: Embarcados, 2020. Disponível em: <https://www.embarcados.com.br/baterias-de-chumbo-acido/>. Acesso em: 10 maio 2022.

STA ELETRONICA. **Como Funciona Uma Bateria De Lítio Íon**. [S. l.], 2021. Disponível em: <https://www.sta-eletronica.com.br/artigos/baterias-recarregaveis/baterias-de-litio/como-funciona-uma-bateria-de-litio-ion>. Acesso em: 15 maio 2022.

TRX SOLAR. **Controladores de carga MPPT x PWM**. São Paulo: TRX Solar, 2021. Disponível em: <https://loja.trxsolar.com/loja/noticia.php?loja=655927&id=53>. Acesso em: 21 maio 2022.

TURCHENIUK, Kostiantyn *et al.* Ten years left to redesign lithium-ion batteries. **Nature**, [s. l.], v. 559, n. 7715, p. 467 – 470, 2018. Disponível em: <https://www.nature.com/articles/d41586-018-05752-3>. Acesso em: 6 mar. 2022.

ZOBAA, Ahmed Faheem. **Energy Storage - Technologies and Applications**. Londres: InTech, 2013. Disponível em: https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/5089982/mod_resource/content/1/Energy%20Storage%20-%20Technologies%20and%20Applications%20-%20Ahmed%20Faheem%20Zobaa%20%28InTech%2C%202013%29.pdf. Acesso em: 6 fev. 2022.

ZUNINGA, Caio. **Geração de Energia Elétrica: Centralizada ou Distribuída**. [S. l.], 2018. Disponível em: <https://blog.rexperts.com.br/geracao-de-energia-eletrica-centralizada-ou-distribuida/>. Acesso em: 7 abr. 2022.