

**UNIVERSIDADE DO VALE DO RIO DOS SINOS**  
**UNIDADE ACADÊMICA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA**  
**NÍVEL MESTRADO**

**LENON AUDIBERT CISCO**

**COMPARAÇÃO DE DIFERENTES TECNOLOGIAS DE BATERIAS PARA  
SISTEMAS SOLARES FOTOVOLTAICOS CONECTADOS À REDE**

**SÃO LEOPOLDO - RS**  
**2023**

Lenon Audibert Cisco

COMPARAÇÃO DE DIFERENTES TECNOLOGIAS DE BATERIAS PARA SISTEMAS  
SOLARES  
FOTOVOLTAICOS CONECTADOS À REDE

Dissertação apresentada como pré-requisito  
parcial para a obtenção do título de Mestre em  
Engenharia Mecânica, pelo Programa de Pós-  
Graduação em Engenharia Mecânica da  
UNISINOS

Orientador: Prof. Dr. Paulo Roberto Wander

Banca Examinadora:  
Jacqueline Biancon Copetti  
Enoque Dutra Garcia  
Fernando Santos

**SÃO LEOPOLDO**  
2023

C579c Cisco, Lenon Audibert.  
Comparação de diferentes tecnologias de baterias para sistemas solares fotovoltaicos conectados à rede / Lenon Audibert Cisco. – 2023.  
68 f. : il. ; 30 cm.

Dissertação (mestrado) – Universidade do Vale do Rio dos Sinos, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, 2023.  
“Orientador: Prof. Dr. Paulo Roberto Wander”.

1. Baterias. 2. Sistemas fotovoltaicos. 3. Avaliação de ciclo de vida. 4. Vítor. I. Título.

CDU 621.7

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)  
(Bibliotecária: Amanda Schuster – CRB 10/2517)

## **AGRADECIMENTOS**

O desenvolvimento de um trabalho de dissertação, assim como a conclusão dele é perpassado por um fator coletivo. Não seria concluído sem o apoio de diversas pessoas, seja este apoio a nível direto de pesquisa ou pessoal.

Em primeiro lugar, agradeço ao meu núcleo familiar e a um grupo de amigos próximos que estiveram presentes ao longo destes anos, não cito todos individualmente para não cometer o ato falho de omitir alguém importante.

Agradeço a meu orientador Paulo Wander por aceitar este desafio e me auxiliar na busca por este título.

Agradeço aos colegas de mestrado que me auxiliaram diretamente neste trabalho, sendo eles Eduardo, Kristian, Esmael e Fernanda, assim como aos bolsistas e colegas do laboratório.

Agradeço à banca pelas colocações relevantes e a avaliação do trabalho.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

## RESUMO

A geração de energia solar fotovoltaica conectada à rede é uma realidade no Brasil, e a crescente expansão da mesma apresenta vantagens e também desafios para a rede elétrica. A fim de minimizar os efeitos da dependência climática e picos de geração durante os horários de sol, a utilização de sistemas de armazenamento de energia se apresenta como solução. Porém a implementação e utilização de baterias representa também um aumento no custo do sistema e de impactos ambientais associados. Neste trabalho foram comparadas três tecnologias de baterias via método de decisão multi-objetivo Vikor: Íon-Lítio, Chumbo-Ácido e Níquel-Cádmio, visando obter uma recomendação de sistema que melhor se adeque aos parâmetros: emissões de carbono e custo de energia, desempenho técnico, vida útil da bateria e aspectos econômicos. O algoritmo de decisão é aplicado para situação em que cada parâmetro tem o mesmo peso, e também em cenários alternativos onde a decisão tenha um viés direcionado ambiental, econômico ou de desempenho elétrico. Para o levantamento dos aspectos ambientais, utiliza-se dados de avaliação do ciclo de vida berço ao portão, sendo o sistema dimensionado para uma residência padrão de baixo consumo. O presente trabalho encontrou que a bateria de íon-lítio apresenta o melhor desempenho dentre os aspectos avaliados, sendo a bateria chumbo ácido a intermediária e a bateria de níquel-cádmio a tecnologia com a maior distância da solução ideal. Em cenários alternativos onde a tomada de decisão favoreça aspectos ambientais e elétricos, a bateria de íon lítio ainda se coloca como a recomendada pelo método. Já em um cenário onde o custo seja priorizado, encontrou-se uma recomendação da utilização de baterias de níquel-cádmio.

Palavras-chave: Baterias. Sistemas Fotovoltaicos. Avaliação de ciclo de vida. Vikor.

## **ABSTRACT**

Grid-connected photovoltaic solar power generation is a reality in Brazil, and its growing expansion presents both advantages and challenges for the electricity grid. In order to minimize the effects of climate dependence and generation peaks during sunny hours, the use of energy storage systems is a solution. However, the implementation and use of batteries also represents an increase in system costs and associated environmental impacts. In this work, three battery technologies were compared via the Vikor multi-objective decision method: Lithium-Ion, Lead-Acid and Nickel-Cadmium, with the aim of obtaining a recommendation for the system that best suits the parameters: carbon emissions and energy costs, technical performance, battery life and economic aspects. The decision algorithm is applied to situations where each parameter has the same weight, and to alternative scenarios where the decision has an environmental, economic, or electrical performance bias. To assess environmental aspects, cradle-to-grave life cycle assessment data is used, and the system is sized for a standard low-consumption home. This study found that the lithium-ion battery had the best performance among the aspects evaluated, with the lead-acid battery being intermediate and the nickel-cadmium battery being the technology furthest from the ideal solution. In alternative scenarios where decision-making favors environmental and electrical aspects, the lithium-ion battery is still recommended by the method. In a scenario where cost is prioritized, nickel-cadmium batteries were recommended.

**Keywords:** Batteries. Photovoltaic Systems. Life Cycle Assessment. Vikor.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 Circuito equivalente de uma célula de bateria (Guimarães <i>et al.</i> , 2014). .....	16
Figura 2 Exemplo de ciclo de vida completo para baterias de lítio. Adaptado de Porzio e Scown (2021).....	22
Figura 3 Triângulo do lítio (The Economist, 2017).....	24
Figura 4 Emissões médias de CO <sub>2</sub> para produção de 1kg de bateria, adaptado de Sullivan (2012). .....	26
Figura 5 Comparação entre a composição de uma célula de bateria entre chumbo-ácido e íon-lítio (BAI, 2020). .....	28
Figura 6 Processo de reciclagem de uma bateria chumbo ácido. Adaptado de Li (2016). .....	28
Figura 7 (a) Modelo simplificado de uma célula fotovoltaica (Graosque, 2017) e (b) Circuito elétrico equivalente de uma célula, (Keles <i>et al.</i> , 2013) .....	30
Figura 8 Módulos solares fotovoltaicos associados em série e paralelo. (Guimarães <i>et al.</i> , 2014) .....	31
Figura 9 Curvas de corrente e tensão e potência e tensão para um módulo genérico (Brito, 2013) .....	31
Figura 10 Configurações de sistema conectado à rede (Graosque, 2017) .....	33
Figura 11 Sistema solar FV conectado à rede com armazenamento Adaptado de Tiwari (2016).....	34
Figura 12 Exemplo de curva de carga da rede ao longo dos anos com perfil de “duck curve” na Coreia do Sul (Kwon, Lee e Park, 2022).....	35
Figura 13 Solução ideal em relação à função compromisso (Kreuzberg, 2017).....	39
Figura 14 Algoritmo de solução, adaptado de Mardani <i>et al.</i> (2016).....	40
Figura 15 Fluxograma da metodologia aplicada. ....	42
Figura 16 Ambiente de simulação Simulink. ....	46
Figura 17 Detalhes dos blocos do sistema de geração solar e conversor.....	47
Figura 18 Curva de carga do consumo por unidade sazonal (Santos, 2016).....	48
Figura 19 Progressão dos pesos para a tomada de decisão ambiental. ....	53
Figura 20 Progressão dos pesos para a tomada de decisão econômica.....	54
Figura 21 Progressão dos pesos para a tomada de decisão elétrica. ....	55

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 1</b> Propriedades chave de baterias. Adaptado de Sullivan (2012). .....	15
<b>Tabela 2</b> Propriedades de diferentes baterias de Íon-Lítio, adaptado de Porzio e Scown (2021) .....	18
<b>Tabela 3</b> Tensões características de células e baterias de NiCd (Guimarães <i>et al.</i> , 2014).....	19
<b>Tabela 4</b> Energias de produção de berço ao portão para diferentes baterias (Sullivan, 2012)	25
<b>Tabela 5</b> Principais contaminantes e seus efeitos ecológicos e toxicológicos. Adaptado de Melchor-Martinez, 2021.....	27
<b>Tabela 6</b> Dados de entrada das células solares .....	47
<b>Tabela 7</b> Parâmetros das células de bateria.....	48
<b>Tabela 8</b> Resultados de dimensionamento .....	49
<b>Tabela 9</b> Critérios aplicados ao método Vikor .....	50
<b>Tabela 10</b> Listagem de critérios.....	50
<b>Tabela 11</b> Resultados Vikor para pesos iguais .....	51
<b>Tabela 12</b> Resultados Vikor pesos ponderados ambientais.....	52
<b>Tabela 13</b> Resultados Vikor pesos ponderados econômicos.....	53
<b>Tabela 14</b> Resultados Vikor pesos ponderados elétricos .....	54

## **LISTA DE SIGLAS**

ACV	Avaliação de Ciclo de Vida
FV	Fotovoltaica
MDMO	Método de Decisão Multi Objetivo

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	<b>10</b>
<b>1.1.1 Objetivo Geral</b> .....	<b>11</b>
<b>1.1.2 Objetivos Específicos</b> .....	<b>12</b>
1.2 JUSTIFICATIVA .....	12
<b>2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	<b>13</b>
2.1 ARMAZENAMENTO DE ENERGIA .....	13
2.2 BATERIAS: PRINCIPAIS CARACTERÍSTICAS E PROPRIEDADES ELÉTRICAS ..	14
<b>2.2.1 Eficiência</b> .....	<b>15</b>
<b>2.2.2 Bateria de Chumbo Ácido</b> .....	<b>16</b>
<b>2.2.3 A célula apresenta uma tensão quando aberta, mas quando começa a fornecer corrente esta tensão cai. Ainda existe o efeito Joule, onde a bateria dispersa potência na resistência interna, porém é um efeito de pouca magnitude, sendo avaliado através da eficiência global da bateria (Nair e Garimella, 2010).</b> Bateria de Íon de Lítio .....	<b>17</b>
<b>2.2.4 Bateria de Níquel-Cádmio</b> .....	<b>18</b>
2.3 AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA .....	19
<b>2.3.1 Avaliação do ciclo de vida: um breve histórico</b> .....	<b>19</b>
<b>2.3.2 Modalidades de ACV</b> .....	<b>21</b>
<b>2.3.3 Aspectos externos</b> .....	<b>22</b>
<b>2.3.4 ACV berço ao portão para baterias na literatura</b> .....	<b>24</b>
2.4 DESCARTE DE BATERIAS.....	26
<b>2.4.1 Reciclagem de baterias</b> .....	<b>27</b>
2.5 ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA .....	29
2.6 SISTEMAS SOLARES FOTOVOLTAICOS CONECTADOS À REDE .....	32
<b>2.6.1 Sistemas solares fotovoltaicos conectados à rede com armazenamento de energia</b>	<b>33</b>
2.7 CURVA DE DEMANDA .....	34
2.8 SIMULAÇÃO DE MODELOS VIA MATLAB .....	36
2.9 ALGORITMOS DE DECISÃO MULTI OBJETIVO .....	36
<b>2.9.1 Método Vikor</b> .....	<b>37</b>
<b>3 METODOLOGIA</b> .....	<b>41</b>
3.1 LEVANTAMENTO DAS RESTRIÇÕES DO PROBLEMA.....	42
3.2 DIMENSIONAMENTO DO CASO BASE VIA MATLAB-SIMULINK.....	43
3.3 DEFINIÇÃO DOS PARÂMETROS DE AVALIAÇÃO MULTI OBJETIVO .....	43

<b>3.3.1 Energia consumida e emissões na produção de cada tipo de bateria .....</b>	<b>44</b>
<b>3.3.2 Eficiência de armazenamento e ciclos de carga .....</b>	<b>44</b>
<b>3.3.3 Custo total do sistema e custo de implementação .....</b>	<b>44</b>
3.4 COMPARAÇÃO VIA MÉTODO VIKOR .....	45
<b>4 RESULTADOS.....</b>	<b>46</b>
4.1 DIMENSIONAMENTO VIA MATLAB .....	46
4.2 DEFINIÇÃO DO SISTEMA E DAS BATERIAS .....	49
4.3 TRATAMENTO DE PARÂMETROS E TABELA VIKOR .....	49
4.4 RESULTADOS VIKOR .....	50
4.5 CENÁRIOS ALTERNATIVOS DE PESOS DE AVALIAÇÃO.....	51
<b>4.5.1 Tomada de decisão ambiental .....</b>	<b>52</b>
<b>4.5.2 Tomada de decisão econômica.....</b>	<b>53</b>
<b>4.5.3 Tomada de decisão por desempenho elétrico.....</b>	<b>54</b>
<b>5 CONCLUSÕES .....</b>	<b>56</b>
<b>6 ANEXOS.....</b>	<b>66</b>
6.1 CÓDIGO VIKOR, EM R. ....	66
6.2 ORÇAMENTO COMPLETO .....	68

## 1 INTRODUÇÃO

De acordo com as tendências mundiais e tendo em vista a crise climática iminente, a energia solar se consolida como uma alternativa sustentável que impacta positivamente na pegada de carbono mundial (Usman e Radulescu, 2022). A energia solar fotovoltaica é uma fonte de energia renovável, ou seja, não gera emissões durante sua geração e está em estágio de aplicação, sendo a fonte de energia renovável que mais cresce mundialmente. No Brasil, existe um potencial disponível que tem sido aproveitado em todas as regiões, visto que os módulos solares são versáteis e podem se adaptar aos mais diferentes tipos de edificações (Marcuzzo *et. Al.*, 2023).

Um sistema fotovoltaico pode ser conectado à rede ou não. Quando não é conectado à rede, considera-se o mesmo com um sistema isolado, e o mesmo necessita obrigatoriamente de um sistema de armazenamento compatível a fim de que a unidade possa consumir potência em quaisquer horários, não dependendo exclusivamente da irradiação solar em tempo integral. Já em sistemas conectados à rede, não existe a necessidade de armazenamento de energia, afinal toda potência gerada pode ser injetada diretamente na rede através de inversores. Porém, existe uma série de vantagens na utilização de armazenadores de energia: redução da intermitência, despacho controlado, menos perdas por excedente em dia com alta insolação e uso mais eficiente da energia (Graosque, 2017).

Instalações de sistemas fotovoltaicos conectados à rede tem como principais componentes o módulo fotovoltaico, conversor CC-CC, controlador de carga, estação de obtenção de dados e medição, inversor e sistema de armazenamento. O inversor tem papel fundamental em sistemas deste tipo pois é o equipamento que realiza a conversão da corrente contínua gerada em cada uma das células fotovoltaicas para corrente alternada na mesma frequência da rede.

Uma das principais características de sistemas de energia solar é a dependência das condições climáticas disponíveis no local de instalação, sendo que a incidência da luz solar sobre os semicondutores que formam cada célula é a fonte de energia. As oscilações na irradiação solar, causadas por variação na luminosidade, encobrimento causado por nuvens e mesmo sombreamento causam a formação de intermitências. Intermitências são variações na entrega de potência a partir do módulo e podem causar variações na geração, desde poucos segundos até a ordem de minutos (Islam *et al.*, 2016). Sistemas de armazenamento garantem que as intermitências não sejam direcionadas diretamente para a rede, garantindo uma saída constante de potência do sistema. Sistemas de armazenamento propiciam gerenciamento da

energia, nivelamento de carga, fornecer energia em casos de emergência e queda da rede, além de estabilização da saída de potência.

Os sistemas de armazenamento mencionados funcionam da forma de banco de carga, onde toda energia excedente é direcionada para o carregamento deste banco de baterias, que quando estiver carregada acima de limites definidos por cada tecnologia, passa e entregar potência para o sistema e para a rede de forma estabilizada e sem nenhum tipo de intermitência. Todos estes sistemas realizam o armazenamento da energia elétrica a partir da eletroquímica, onde a energia elétrica é armazenada indiretamente (Paolella et al., 2020).

Em sistemas de grande porte de geração distribuída com fontes renováveis, o armazenamento de energia desempenha um papel muito importante no controle de cargas do sistema interligado, onde sistemas com armazenamento podem entregar energia de acordo com a demanda, não sendo entregue exclusivamente de acordo com a geração (Salkuti, 2021).

Um dos pontos de comparação a serem utilizados é a avaliação dos aspectos ambientais envolvidos na utilização de cada tecnologia. Baterias de íons de lítio por exemplo são uma tecnologia consolidada e altamente utilizadas, com indicadores de desempenho energético altos, como alta densidade de carga, não apresentando perdas dos níveis de tensão nominal ao ser descarregada e com muitos ciclos de carga disponíveis. Porém a obtenção de sua matéria prima e o descarte da mesma está atrelada a fatores de alto impacto, visto que as principais reservas de lítio estão centralizadas na Bolívia, sendo motivo de disputas geopolíticas.

A relevância deste trabalho se estabelece na crescente expansão dos sistemas de energias renováveis de pequeno e médio porte no mercado brasileiro e mundial, sendo importante encontrar ferramentas de comparação, a fim de que a virada energética ocorra da forma mais sustentável possível. Identificar as vantagens e desvantagens de cada sistema para o uso específico em energia solar podem fazer com que cada tecnologia seja aplicada de forma otimizada, onde suas características supram as necessidades de operação, com reduzido impacto associado.

### **1.1.1 Objetivo Geral**

Realizar a comparação entre diferentes tipos de baterias eletroquímicas para utilização em conjunto com sistemas fotovoltaicos conectados à rede, levando em conta os aspectos técnico-econômicos das baterias, aspectos ambientais da produção de baterias, vida útil e entrega de eficiência.

### 1.1.2 Objetivos Específicos

- Comparar as tecnologias de baterias selecionadas: chumbo-ácido, íon-lítio e níquel-cádmio, aplicadas ao mesmo sistema e cumprindo os mesmos requisitos de funcionamento;
- Dimensionar sistema fotovoltaico residencial conectado à rede utilizando armazenamento de energia;
- Aplicar o método de decisão multi objetivo Vikor e recomendar a melhor tecnologia para esta aplicação.

### 1.2 JUSTIFICATIVA

A utilização de sistemas de armazenamento de energia em sistemas solares fotovoltaicos traz uma série de benefícios que impactam positivamente na qualidade da energia e na estabilidade da rede. Um dos grandes problemas da utilização em larga escala de fontes renováveis como energia solar fotovoltaica e energia eólica é a imprevisibilidade das condições climáticas que interferem no princípio físico de funcionamento da geração de energia. Ao serem acoplados sistemas de armazenamento, a entrega de carga é regular e pode ser controlada de acordo com a demanda.

Como apresentado nos objetivos, este trabalho utiliza uma comparação que passa pela ótica ambiental, comparando diferentes tecnologias de armazenamento, a fim de termos uma visão mais global e alinhada com os objetivos de sustentabilidade.

Este estudo se justifica a partir da necessidade de encontrarmos opções que minimizem o impacto ambiental cumprindo com os requisitos do sistema, além de salientar as vantagens da utilização de sistemas de armazenamento de energia em instalações FV.

O estudo realizado aqui utilizando metodologias de simulação e métodos de decisão é relevante ao trazer mais pontos de debate para a área de energias renováveis, apontando os limites das tecnologias e seus contrapontos.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 ARMAZENAMENTO DE ENERGIA

O armazenamento da energia elétrica é um ponto fundamental para projetos em sistemas de energias renováveis, podendo ser aplicado em instalações de pequeno, médio e grande porte ou até mesmo diretamente na rede (Salkuti, 2021). Seu princípio de funcionamento consiste em utilizar propriedades químicas, físicas ou gravitacionais para transformar excedentes de energia gerados por algum sistema em um potencial energético que possa ser despachado de acordo com as necessidades de consumo. Sistemas de energias renováveis como solar fotovoltaico e eólico se beneficiam grandemente de sistemas de armazenamento, por apresentar geração intermitente e que depende de fatores não controláveis, como o clima.

Das vantagens de um sistema com armazenamento, é possível ressaltar: gerenciamento, backup de energia, regulação da frequência e nivelamento e estabilização de carga, redução de harmônicos e custo relativamente baixo (Shaqsi et al., 2020).

A energia elétrica em si é impossível de ser armazenada, porém dada sua capacidade de transmissão e conversão imediata em outras formas de energia mais úteis (destacando-se térmica e mecânica) ela tornou-se a principal forma que a humanidade utiliza energia para realizar as mais diversas formas de trabalho. A ideia de armazenar energia aproveita-se desta capacidade de conversão, sendo que as principais formas são: eletroquímica (através de baterias), campo magnético (supercondutores), cinética, gravitacional (movimentação de massas de água através de bombas para reservatórios elevados) e campos elétricos (capacitores e supercapacitores) (Huggins, 2016).

A utilização de sistemas de armazenamento é necessária em instalações fotovoltaicas isoladas, visto que os excedentes são armazenados de forma a suprir as demandas noturnas e de períodos nublados ou com chuva. Em sistemas conectados à rede é possível a utilização de sistemas de armazenamento para operação do tipo ilha, embora no Brasil não seja regulada essa forma de operação, onde em situação de ilha é necessário o desligamento da geração com o objetivo de tornar as manutenções mais seguras e evitar acidentes elétricos (Guimarães *et al.*, 2014).

## 2.2 BATERIAS: PRINCIPAIS CARACTERÍSTICAS E PROPRIEDADES ELÉTRICAS

A descoberta dos fenômenos eletroquímicos e da construção do que hoje se reconhece como a primeira bateria acontece no séc. XIX. Desde então diversas tecnologias foram desenvolvidas, sendo que atualmente estão consolidadas no mercado e na utilização de baterias dos mais variados tipos, destacando-se as baterias de íons de lítio, chumbo-ácido, níquel-cádmio, níquel hidreto e sódio sulfúrico.

O princípio físico de uma bateria consiste na conversão de energia elétrica em energia química durante sua carga, e posteriormente a conversão de energia química em energia elétrica durante a descarga, sendo que os intervalos de carga e descarga são controlados pelo usuário, a fim de que a energia previamente armazenada possa ser utilizada conforme necessidade. A bateria é considerada um conjunto de pilhas ou células organizadas em série e paralelo, a fim de atingir os valores de tensão e corrente desejados para cada aplicação (Huggins, 2016).

Baterias podem ser divididas entre recarregáveis ou não, de acordo com o tipo de célula que a compõe. Células primárias são dispositivos que uma vez descarregados são descartados, sendo utilizadas em sistemas de baixa potência como aparelhos portáteis. As células secundárias são as baterias do tipo recarregável, onde quando submetidas a uma fonte de energia elétrica são capazes de retornar ao estado de carga próximo ao original podendo ser utilizadas em ciclos constantes de carga e recarga. Baterias secundárias são as utilizadas em aplicações de longo período de tempo.

Vale mencionar que baterias espontaneamente se descarregam, através de perdas internas em processos químicos. A autodescarga pode ser avaliada como uma taxa nominal perdida por mês, por exemplo baterias de Chumbo ácido tem uma taxa de autodescarga variando de 5%-30% fora de uso. A taxa varia de acordo com a temperatura e a composição química da bateria (Guimarães *et al.*, 2014).

Cada tecnologia de bateria tem suas propriedades elétricas específicas, sendo elas: energia específica (Wh/kg), tensão individual por célula (V), ciclos de carga e eficiência energética. Na tabela 1 podemos verificar as propriedades para as principais tecnologias de baterias do mercado, em uma variação média.

**Tabela 1** Propriedades chave de baterias. Adaptado de Sullivan (2012).

<b>Tecnologia</b>	<b>Energia Específica (Wh/kg)</b>	<b>Ciclos de carga</b>	<b>Tensão de circuito aberto da célula (V)</b>	<b>Eficiência (%)</b>
Chumbo-Ácido	20-32	700-1500	2,1	70-84
NiCd	22-30	1200-5500	1,3	70
Li-Íon	80-120	6000-8500	1,85	85-95

A tensão gerada e armazenada nas baterias é contínua, sendo assim, todas as suas aplicações dependem de um sistema que seja capaz de operar em tensão contínua ou contenha inversores e controladores de carga para ser realizada a conversão entre corrente alternada e contínua. Sistemas solares fotovoltaicos produzem tensão contínua, dessa forma tendo sinergia com o armazenamento em baterias (Dias, 2015).

### **2.2.1 Eficiência**

A eficiência, de forma simplificada pode ser avaliada como a razão entre a entrega útil de energia e a entrada de energia. Em uma bateria existem duas principais eficiências a serem avaliadas, a eficiência de Ampère-hora e a eficiência de tensão.

A eficiência de ampère-hora é a relação entre a carga fornecida de uma célula ao longo do processo de descarga e a quantidade de carga para restaurar o estado inicial. Esta eficiência é afetada pelas reações químicas secundárias que ocorrem em uma célula e varia de acordo com o tipo de bateria assim como dos materiais. Em condições apropriadas de operação, esta eficiência é da ordem de 95% em baterias de Chumbo-ácido (Guimarães *et al.*, 2014). A eficiência de ampère-hora é dependente do estado de carga da bateria.

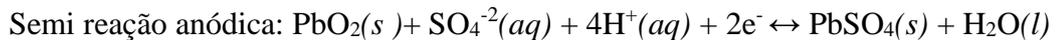
Já a eficiência de tensão é a relação entre a tensão durante a descarga da bateria com a tensão necessária durante o processo de carga para retornar ao estado inicial. A eficiência de tensão também é influenciada pelo estado de carga da bateria.

Quando avaliadas ambas as eficiências mencionadas, é possível calcular a eficiência global da bateria, dada pelo produto da eficiência de ampère-hora e da eficiência de tensão. A eficiência global é a mais usada para comparação de baterias e será adotada nesse trabalho.

### 2.2.2 Bateria de Chumbo Ácido

A primeira bateria de chumbo ácido foi criada em 1859, com o mesmo princípio eletroquímico das baterias utilizadas atualmente, porém construída com placas planas de chumbo sólido. Atualmente, as baterias de chumbo ácido são construídas de um cátodo de dióxido de chumbo e um ânodo de chumbo esponjoso. Os eletrodos ficam imersos em uma solução de ácido sulfúrico e água, o eletrólito.

A reação química completa da bateria de chumbo ácido é a seguinte:



No processo de descarga, o ácido sulfúrico reage com as placas, produzindo água e diluindo o eletrólito, ambas as placas tornam-se iguais quimicamente, sendo transformadas em sulfato de chumbo. Já no processo de carga, o sulfato de chumbo formado durante a descarga é novamente transformado em chumbo, dióxido de chumbo e ácido sulfúrico.

Uma célula da bateria pode ser modelada eletricamente de acordo com o circuito elétrico da fig. 1. Este circuito conta com a resistência interna e a tensão em circuito aberto da célula. Estes parâmetros dependem de aspectos construtivos, da temperatura e do estado de carga do elemento. Durante a carga, existe a liberação de ácido sulfúrico no eletrólito, aumentando a quantidade de íons, e conseqüentemente a densidade de carga, reduzindo a resistência interna e aumentando a tensão da célula. Para a descarga o processo é inverso, onde a resistência interna aumenta e a densidade de carga diminui.

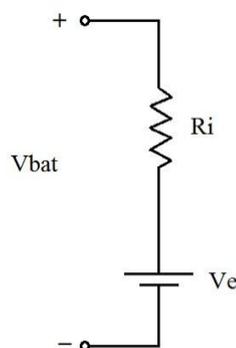


Figura 1 Circuito equivalente de uma célula de bateria (Guimarães *et al.*, 2014).

**2.2.3 A célula apresenta uma tensão quando aberta, mas quando começa a fornecer corrente esta tensão cai. Ainda existe o efeito Joule, onde a bateria dispersa potência na resistência interna, porém é um efeito de pouca magnitude, sendo avaliado através da eficiência global da bateria (Nair e Garimella, 2010). Bateria de Íon de Lítio**

A necessidade de baterias de tamanhos reduzidos surgiu juntamente com o avanço dos eletrônicos portáteis, sendo que diversas tecnologias foram e são utilizadas desde antes do avanço das baterias de íon-lítio. As principais motivações na pesquisa e desenvolvimento das baterias de íon-lítio são a crise do petróleo de 1970 e a invenção do transistor, que demandou novas tecnologias de armazenamento de energia com alta densidade energética, mas tamanho reduzido (Schaller, 1997). A busca de sistemas com maior densidade energética levou os pesquisadores a investigar o lítio por seu alto potencial de redução (-3,04 V) e pequena massa atômica (Li *et al.*, 2018).

Com o estabelecimento da tecnologia e a conseqüente comercialização, as baterias de íon-lítio se tornaram padrão em smartphones e notebooks, e hoje dominam o mercado de carros elétricos, sendo a tecnologia de armazenamento químico de energia que mais cresce em termos de mercado (Li *et al.*, 2018).

Quimicamente, o funcionamento padrão de uma bateria de íon-lítio é descrito pela seguinte reação eletroquímica:



Na reação, M representa um metal de transição, presente no cátodo que é representado por LiMO<sub>2</sub>. Já o ânodo está representado por C<sub>n</sub>, um composto de carbono. Uma célula de bateria íon-lítio apresenta tensão na ordem de 3,5V. Dentre as principais vantagens da célula de íon-lítio está a ausência de afundamento, ou seja, da perda de capacidade máxima de tensão quando carregada, além de apresentar um tempo mais curto para carga e descarga quando comparado com as outras tecnologias de baterias (Guimarães *et al.*, 2014).

Pelo alto potencial comercial, a tecnologia continua sendo desenvolvida, sendo avaliadas alternativas tecnológicas para os eletrodos, diferentes configurações, e variações de eletrólito sólido ou líquido. A utilização de um sistema de baterias de íon-lítio apresenta a necessidade de um sistema de controle robusto, a fim de aumentar a segurança, visto que o material pode ser explosivo e é sensível a variações de temperatura. A utilização em sistemas

solares fotovoltaicos no Brasil está presente em estudos, e bancos de baterias de lítio já vem sendo utilizados em diversas localidades do mundo (Soares *et al.*, 2012).

Baterias de íon-lítio são tipicamente classificadas de acordo com o material catódico, sendo os principais: óxido de manganês e lítio (LMO), óxido de lítio manganês cobalto níquel (NMC), lítio fosfato de ferro (LPF) e óxido de lítio níquel cobalto alumínio (NCA). O ânodo utilizado em cada uma dessas tecnologias é o mesmo, de carbono (Porzio e Scown, 2021). As características principais destas tecnologias estão presentes na tabela 2.

**Tabela 2** Propriedades de diferentes baterias de Íon-Lítio, adaptado de Porzio e Scown (2021)

<b>Tecnologia Íon-Lítio</b>	<b>Energia específica na célula [Wh/kg]</b>	<b>Tensão nominal [V]</b>	<b>Ciclos de carga</b>	<b>Expectativa de vida útil [anos]</b>	<b>Usos típicos</b>	<b>Custo por Kwh</b>
NMC-Grafite	140-200	3,7	2000+	8-10	Equipamentos de potência, Carros elétricos	Médio/alto
NCA- Grafite	200-250	3,6	2000+	8-10	Carros elétricos	Médio
LPF- Grafite	90-140	3,2	3000+	8-12	Carros elétricos, usos estacionários	Baixo
LPF-LTO	≤80	2,7	5000+	10+	Eletrônicos portáteis	Muito alto
LMO-Grafite	100-140	3,7	1000-2000	6-10	Equipamentos de potência, Carros elétricos	Baixo

#### 2.2.4 Bateria de Níquel-Cádmio

Uma bateria de Níquel-Cádmio estruturalmente se assemelha às baterias de chumbo-ácido, onde o cátodo é uma placa de hidróxido de níquel e o ânodo formado por uma placa de liga de cádmio e ferro. O eletrólito é formado por uma solução de hidróxido de potássio e água. Diferentemente da bateria de chumbo-ácido, o eletrólito da bateria de níquel-cádmio é uma base, sendo considerada uma bateria de tecnologia alcalina (Guimarães *et al.*, 2014).

A reação eletroquímica padrão de uma bateria de níquel-cádmio é a seguir:



Onde a descarga é identificada no lado esquerdo da equação e a carga no lado direito.

A grande vantagem estrutural da tecnologia é sua grande amplitude térmica, podendo operar em condições abaixo da temperatura de congelamento da água. Outras vantagens a se considerar são: resistência a sobrecarga, poder ser armazenadas descarregadas sem danos às placas de eletrodos e apresentam tensão constante durante a descarga. Na tabela 3 estão dispostos os parâmetros típicos de uma célula e bateria de níquel-cádmio.

**Tabela 3** Tensões características de células e baterias de NiCd (Guimarães *et al.*, 2014)

<b>Tensões características</b>	<b>Célula (V)</b>	<b>Bateria com 10 células (V)</b>
Nominal	1,25	12
Tensão máxima para baterias abertas	1,50 - 1,65	15,0 - 16,5
Tensão de flutuação para baterias abertas	1,40 - 1,45	14,0 - 14,5
Tensão de circuito aberto para baterias seladas	1,20 - 1,35	12,0 - 13,5
Tensão mínima limite	0	9

## 2.3 AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA

A avaliação de ciclo de vida (ACV) é uma metodologia que em seu centro tem como objetivo quantificar os impactos ambientais diretos e indiretos relacionados a um produto ou um serviço (Finkbeiner *et al.*, 2006), servindo também como uma ferramenta útil de comparação entre diferentes tecnologias que cumprem o mesmo objetivo. A ACV leva em consideração todos os aspectos envolvidos ao longo da vida de um produto, desde a extração das matérias primas até seu descarte, com o objetivo de converter todas as externalidades em uma unidade funcional de energia ou de emissões de carbono equivalente, a fim de gerar uma base mensurável para comparações.

### 2.3.1 Avaliação do ciclo de vida: um breve histórico

De acordo com Guinée *et al.* (2011) o estudo em impactos ambientais de produtos tem início nas décadas de 60 e 70 do século passado. O contexto de comparação, com objetivo de

identificar qual produto é melhor em aspectos ambientais era motivo de forte debate, o que é compreensível em um contexto com cada vez maior diversidade de produtos disponíveis no mercado para finalidades semelhantes.

É amplamente reconhecido que para a maior parte dos produtos de consumo, seu principal impacto ambiental está nas etapas de extração da matéria prima, transporte e descarte, e não apenas na utilização direta do mesmo. A partir disso, surgem as ideias que originaram a avaliação do ciclo de vida (Guinée *et al.*, 2011).

Os primeiros estudos reconhecidos parcialmente como avaliações do ciclo de vida aparecem no final da década de 60, e início de 70, onde o escopo do mesmo era limitado a análises unicamente de energia. A necessidade de serem apontadas as emissões e descarte envolvidos em um produto surgem em trabalhos publicados a partir dos anos 80. Este período inicial entre os primeiros estudos até meados dos anos 90 podem ser resumidos segundo Guinée *et al.* (2011) como trabalhos realizados através de abordagens amplamente divergentes, com resultados e análises que dificilmente podem ser comparados com estudos semelhantes, com uma lacuna de padronização científica. Uma das consequências dessa falta de padronização foi o surgimento de estudos encomendados por setores industriais a fim de fortalecer seu mercado e sua imagem de produto ambientalmente sustentável, embora estudos diferentes sobre o mesmo produto pudessem gerar resultados divergentes.

Dessa forma, a comunidade científica internacional através dos grupos europeu e estadunidense da SETAC (*Society of Environmental Toxicology and Chemistry*) organizou discussões e plataformas de padronização para que estudos de avaliação do ciclo de vida pudessem ser realizados seguindo um método claro, que permitisse reprodutibilidade do mesmo (Consoli *et al.*, 1993). A partir de 1994 a organização internacional pela padronização (ISO) iniciou seu envolvimento direto na ACV, fornecendo guias de métodos e procedimentos para a mesma, sendo as normas ISO 14040 e ISO 14044 servindo como guia desde 2006 (Guinée *et al.*, 2011).

Desde então, a avaliação do ciclo de vida tem feito parte de estudos das mais variadas áreas do conhecimento e sendo inserida em legislações por diversos lugares do mundo, especialmente na Europa, com a plataforma europeia em ciclo de vida realizando um grande papel na disseminação destes estudos e estabelecendo padrões de pegada de carbono para diversos produtos.

### 2.3.2 Modalidades de ACV

Toda ACV inicia com o processo da matéria-prima, independente do escopo. É definido, então, se a avaliação terá enfoque em um caso de uso específico e então, se deve estender os limites do sistema através da fase de uso e fim de vida útil. As avaliações de ciclo de vida podem ser classificadas de acordo com seu escopo, utilizando as denominações de berço ao portão, berço ao túmulo e berço ao berço. Uma ACV do berço ao portão engloba todas as emissões e consumos de energia envolvidas nas etapas de extração da matéria prima, transporte, fabricação e saída da fábrica. Sendo o portão considerado a porta de saída do estoque da unidade produtora. Em geral, para baterias esta é a principal classificação utilizada.

Uma ACV do berço ao túmulo, engloba todos os processos já mencionados no berço ao portão, porém avança até as etapas de transporte até o comércio, comercialização, utilização do produto e por fim descarte. Este tipo de ACV é utilizada em ciclos que se encerram em aterros ou que apresentam alguma forma de reciclagem.

Quando o objetivo é avaliar um produto pensando em economia circular, a metodologia de ACV utilizada é considerada de berço ao berço, onde se assume que o produto descartado é separado e reciclado de acordo com suas potencialidades, reintegrando seus componentes no ciclo produtivo, gerando o mínimo de descartes possíveis (Bjørn,2018).

No caso de baterias, em geral se normaliza os estudos de acordo com o tipo de serviço entregue: energia. Porém existe grande dificuldade de comparação entre diferentes tecnologias de acordo com sua etapa de uso ao longo da vida útil, sendo dessa forma utilizada a comparação de ACVs do berço ao portão (Porzio e Scown, 2021). A fig. 2 apresenta um exemplo de ciclo de vida completo para uma bateria de íon-lítio utilizada em veículo elétrico.

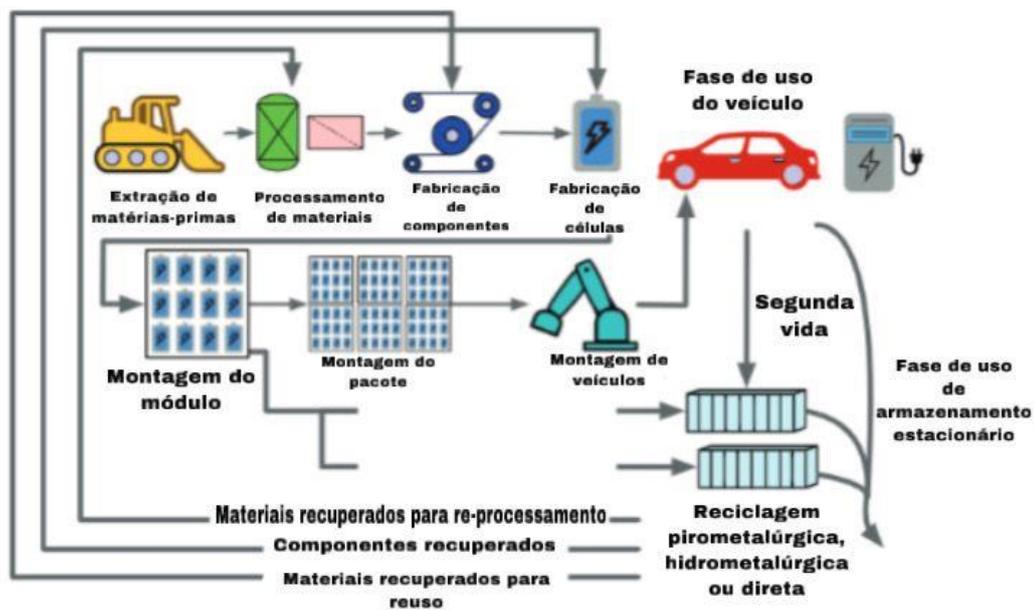


Figura 2 Exemplo de ciclo de vida completo para baterias de lítio. Adaptado de Porzio e Scown (2021).

Segundo (Finkbeiner *et al.*, 2006) é possível definir quatro fases principais para um estudo de ACV: definição do objetivo e escopo, análise de inventário, avaliação de impactos, e por fim, interpretação. Durante a fase de escopo e definição é necessário avaliar quais as principais perguntas a serem respondidas, os limites do sistema avaliado e as unidades utilizadas (Porzio e Scown, 2021).

### 2.3.3 Aspectos externos

Associadas a qualquer forma de produção sempre se encontram externalidades, ou impactos externos associados que não necessariamente são quantificados na métrica de energia ou de emissões totais de carbono. Podem se considerar nesta categoria impactos sociais, geopolíticos e uma série de impactos ambientais, como empobrecimento de solo, contaminação por metais tóxicos relacionados à mineração, dentre outros.

Uma externalidade pode ser descrita como um resultado que afeta terceiros não envolvidos no processo produtivo, e seus danos ou custos ou impactos acabam por não ser incorporados diretamente (Carvalho, 2011)

Quando analisada produção de baterias, os principais aspectos externos identificados estão relacionados à extração de materiais críticos. Desde a questão de disponibilidade dos

mesmos, identificando as reservas totais, até os aspectos territoriais da distribuição dos mesmos. Baterias de íon-lítio por exemplo, tem em sua composição minérios com produção altamente centralizada, sendo os principais o lítio, cobalto e o grafite natural (Porzio e Scown, 2021).

De acordo com Elkind *et al.* (2020) a produção de baterias representa 60% da demanda mundial de Co, utilizado nos eletrodos. Estima-se que pelo menos metade das reservas mundiais de cobalto se encontram de República Democrática do Congo, que sofre com impactos extensivos ambientais e sociais que vão desde trabalho infantil até intoxicação por metais pesados, advindos da mineração em pequena escala (Igogo *et al.*, 2019).

A produção de lítio se concentra no Chile, Argentina e Austrália, fornecendo sozinhos 90% da demanda mundial de lítio. O Brasil também fornece minério de lítio para o mercado mundial, mas em menor escala (Haves *et al.*, 2018). A distribuição de lítio na crosta terrestre se dá de duas formas: como minério composto rochoso espudomênio e como composto diluído em salmouras evaporativas. A região mais rica em lítio do planeta, conhecida como triângulo do lítio é uma região em relativo isolamento por suas características topográficas e climáticas, no topo da cordilheira dos Andes, compartilhada entre a Argentina, Bolívia e Chile. Esta região pode ser visualizada na fig. 3. Este isolamento não diminui o interesse internacional no recurso, podendo resultar em diversas tensões geopolíticas entre América Latina e os Estados Unidos (Rodrigues e Padula, 2012). O controle das reservas de lítio tomou grandes proporções no debate geopolítico mundial com diversas declarações após o golpe de estado ocorrido na Bolívia em 2018 (Aponte-García, 2020), que contém as maiores reservas mundiais em seus salares.



Figura 3 Triângulo do lítio (The Economist, 2017).

Dadas estas condições de obtenção de materiais críticos, caso as tecnologias de armazenamento não se desenvolvam independentes destes materiais, a reciclagem passará a ser ainda mais crucial (Porzio e Scown, 2021).

#### 2.3.4 ACV berço ao portão para baterias na literatura

A aplicação de ACV para baterias é desafiadora por diversas razões metodológicas, e a comparação entre estudos encontra dificuldades por conta da não padronização de unidades de medida. Porém avaliações do tipo berço ao portão facilitam a comparação.

Estima-se que a extração de matéria prima represente aproximadamente um terço da demanda total de energia para a produção de uma unidade padrão, sendo os outros dois terços do consumo de energia referentes ao processo de manufatura (Elkind *et al.*, 2020).

A energia utilizada para a extração de matérias primas e processamento de materiais pode ser expressa em uma combinação de combustíveis fósseis para operar os equipamentos de mineração e transporte e eletricidade para realizar processos mecânicos. De forma geral, o tipo de material é o que define a necessidade de maior ou menor uso de energia, por exemplo o alumínio necessita de grandes etapas de derretimento e refino, consumindo grandes

quantidades de energia. A maior parte da produção de alumínio está na China, que tem uma matriz energética majoritariamente de combustíveis fósseis, aumentando as emissões associadas ao material (Porzio e Scown, 2021). Mesmo que a energia seja um parâmetro importante, ainda há os aspectos externos associados à obtenção da matéria prima, que não são capturados diretamente nas medições.

O processo de fabricação das baterias é estimado como responsável por dois terços da energia total em uma ACV de berço ao portão. A escala de produção pode fazer com que essa razão varie consideravelmente, mas majoritariamente os impactos associados nesta etapa são relacionados diretamente ao uso de energia nos processos (Porzio e Scown, 2021).

Na tabela 4 estão dispostos os resultados de consumo de energia para produção das diferentes baterias encontradas na literatura.

**Tabela 4** Energias de produção de berço ao portão para diferentes baterias (Sullivan, 2012)

Bateria	Tipo	Energias de produção MJ/kg				Energia específica	
		$E_{mp}$	$E_{cycl}$	$E_{mf}$	$E_{ctg}$	Wh/kg	Ano
PbA Chumbo- Ácido	Média	11.4		81.9	93.3		2006
		15–25	9.0–14 <sup>b</sup>	8.4–13	23.4–38	20–32	2005
				16.6		35–55	1999
					77		1999
		16.8		6.7	23.5		1996
		15 <sup>f</sup>				50	1995
		25.1	8.4 <sup>d</sup>	11.3	36.4		?
		17.5		8.81	26.1		1980
		19.8		9.6	29.5		
		44–60	22–30 <sup>b</sup>	46–63	90–123	22–30	2005
NiCd	Média	44.0		53.9	97.9		1996
		102.8				57	1995
		49.3		54.3	103.6		
Íon-Lítio	Média	121		88	209	112	2011
		119		86	205	88	2011
				1.3 <sup>d</sup>	104	114	2010
		112.9		91.5	204.4		2006
		53–80	25–37 <sup>b</sup>	96–144	149–224	80–120	2005
					223	<b>100–150</b>	1999
		93.3	4.8 <sup>d</sup>	32	125.3		?
		113	3.6 <sup>d</sup>	30	143		?
		<b>99.0</b>		<b>81.1</b>	<b>180.1</b>		

Em termos de emissões de CO<sub>2</sub>, a fig. 4 apresenta a média dos resultados encontrados.

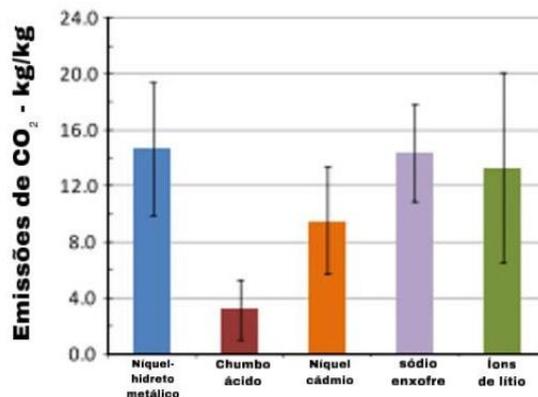


Figura 4 Emissões médias de CO<sub>2</sub> para produção de 1kg de bateria, adaptado de Sullivan (2012).

## 2.4 DESCARTE DE BATERIAS

Um aspecto importante da avaliação ambiental é o descarte de baterias. Como mencionado anteriormente, na avaliação de ciclo de vida do berço ao portão, a etapa de utilização e descarte não está mensurada, pois é estritamente ligada ao tipo de uso e ao território. Dessa forma, alguns dados referentes aos impactos associados ao descarte de baterias são trazidos neste momento.

Segundo Melchor-Martinez (2021), houve um incremento de 8% no descarte anual de baterias para dispositivos eletrônicos, com expectativa de expansão de até 30% em 2030. Não existe regulação internacional para descarte e gestão apropriadas dos diferentes tipos de baterias, fazendo com que boa parte acabe em aterros sanitários. São poucos os países que são capazes de reciclar baterias em quantidades industriais, e mesmo assim estima-se que seja reciclado menos que 5% dos resíduos totais.

Outro aspecto relevante no cenário do mercado de baterias, é a expansão da utilização de veículos elétricos com a justificativa de reduzir a dependência do petróleo. Neste processo, o armazenamento de energia com baterias tem avançado fortemente, especialmente com as baterias de íon lítio, estas responsáveis por 75% do total (Dunn *et al.*, 2011).

O descarte adequado é de preocupação ambiental significativa, já que fazem parte de sua composição metais pesados e substâncias tóxicas, além de no caso específico das baterias de íon-lítio, questões de segurança. Em situações específicas e a altas temperaturas, as mesmas podem expandir ou até mesmo explodir. Apesar de existirem diversas regulações de segurança para a utilização das mesmas, as condições em cenários práticos (especialmente de baterias no fim de sua vida útil) podem ser imprevisíveis, onde as normas de teste não cobrem todas as situações reais (Lai *et al.*, 2022).

Dentre os principais contaminantes, podem ser destacados na tabela 5 os efeitos ecológicos e toxicológicos dos mesmos.

**Tabela 5** Principais contaminantes e seus efeitos ecológicos e toxicológicos. Adaptado de Melchor-Martinez, 2021.

<b>Contaminante</b>	<b>Efeitos ecológicos e toxicológicos</b>
Cádmio	Absorvido por ingestão de alimentos contaminados. A acumulação no corpo humano pode causar doenças renais.
Cobalto	Efeitos cancerígenos, O cobalto afeta a biomassa e as atividades fisiológicas de culturas vegetais.
Cobre	Absorvido por ingestão de alimentos contaminados. Danos no fígado e no Sistema digestivo. Pode causar complicações neurológicas.
Chumbo	Absorvido por ingestão de alimentos contaminados. Efeitos negativos no sistema nervoso, rins e outros órgãos. Provoca doenças cardiovasculares e apresenta efeitos cancerígenos.
Lítio	Alteração no desenvolvimento de invertebrados, interfere na síntese do DNA. A acumulação no solo pode causar severa fitotoxicidade.
Níquel	Alto stress oxidativo em mamíferos e grupos de plantas.

#### 2.4.1 Reciclagem de baterias

A melhor forma de lidar com o descarte final da vida de uma bateria, é através da sua reciclagem que desempenha um papel crucial na minimização dos impactos ambientais do descarte de baterias, sendo possível recuperar materiais valiosos para a fabricação de novas baterias ou outros produtos. A reciclagem reduz a necessidade de extração de recursos naturais.

Neste cenário, as baterias de chumbo-ácido são o maior exemplo da possibilidade de economia circular, berço ao berço. Estima-se que 99% das baterias de chumbo ácido sejam recicladas nos EUA (Gaines, 2014), ao contrário das outras tecnologias.

O fator mais relevante para a quase perfeita taxa de reciclagem das baterias de chumbo-ácido é sua estrutura relativamente simples e ao aproveitamento direto de seus

componentes na fabricação de novas baterias, o que infelizmente não é o caso da bateria de íon-lítio, como pode ser visto na fig. 5.

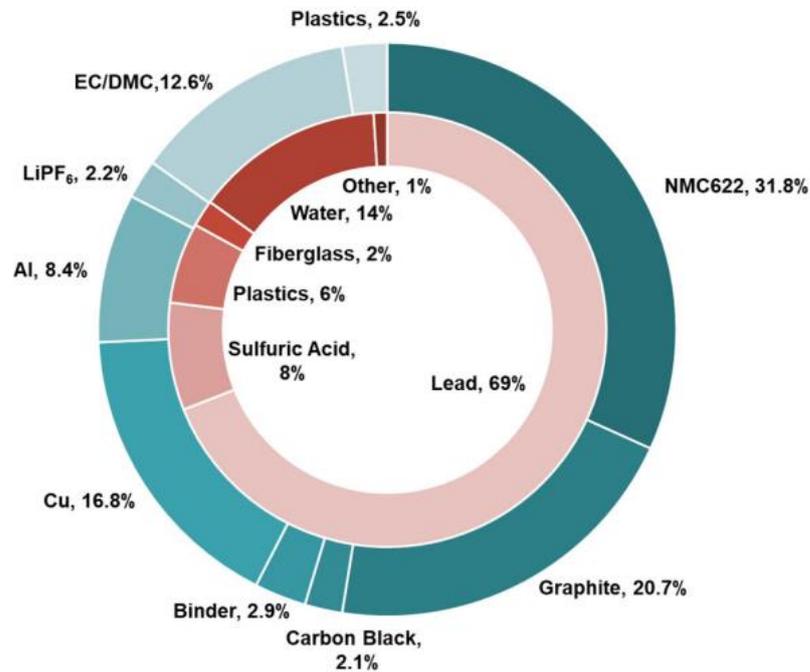


Figura 5 Comparação entre a composição de uma célula de bateria entre chumbo-ácido e íon-lítio (BAI, 2020).

A reciclagem envolve várias etapas, sendo padrão: a coleta, desmontagem e separação inicial, separação química e mecânica, e por fim refino e purificação. Na fig. 6, pode ser visto o fluxograma básico do processo para a bateria de chumbo ácido.

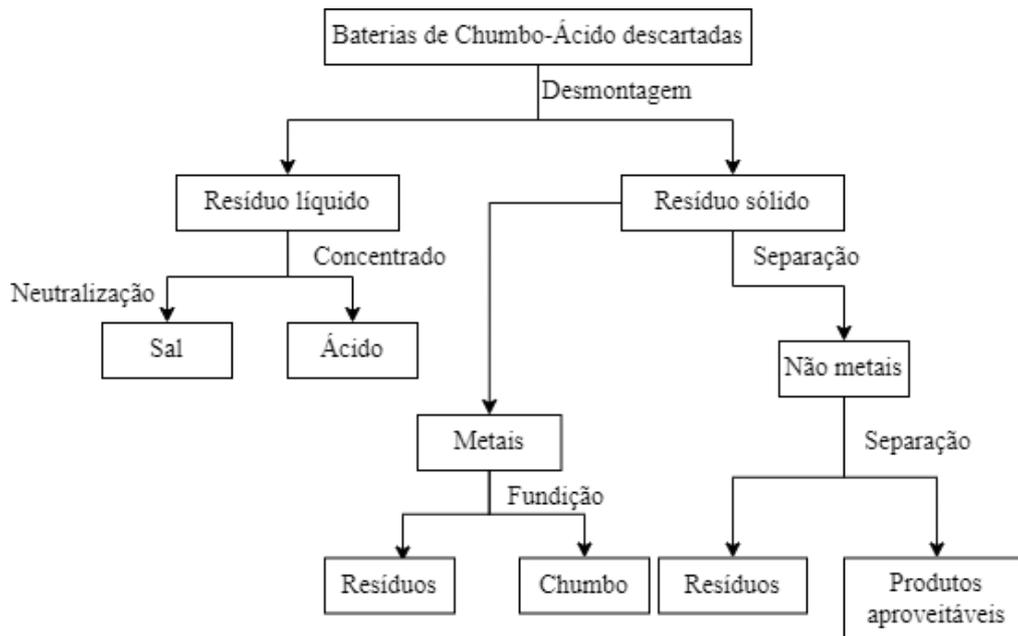


Figura 6 Processo de reciclagem de uma bateria chumbo ácido. Adaptado de Li (2016).

O processo de reciclagem pode se aproveitar da expansão do garimpo urbano e da crescente preocupação com o lixo eletrônico. É fundamental apontar neste momento a potencialidade de reciclagem, e apesar dos desafios para as tecnologias íon-lítio e níquel-cádmio, o exemplo das baterias de chumbo-ácido pode ensinar diversas lições, quando existe potencial de retorno econômico e principalmente evitando a extensão de impactos ambientais, onde estes dispositivos podem acabar em aterros sanitários (Li, Liu e Han, 2016).

## 2.5 ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA

A energia solar pode ser convertida em energia elétrica de duas principais maneiras: através de células solares e o efeito fotoelétrico, ou através de conversão indireta térmica. A conversão térmica utiliza a radiação solar concentrada através de dispositivos refletores para aquecer algum fluido, de forma análoga a uma termoelétrica. Tanto a geração fotovoltaica ou a térmica são sujeitas a variações de entrega de potência de acordo com efeitos climáticos (Ding *et al.*, 2015).

Um sistema solar fotovoltaico baseia-se no aproveitamento do efeito fotoelétrico, descoberto em meados do séc. XIX, mas somente explicado em 1905 no famoso artigo de Albert Einstein, que levou o mesmo a ganhar o prêmio Nobel de física. O efeito fotoelétrico consiste no surgimento de diferença de potencial elétrico entre eletrodos conectados a junções de cristais semicondutores dopados quando expostos à luz (Guimarães *et al.*, 2014).

A geração de energia através deste fenômeno é considerada renovável e limpa, pois não apresenta emissões durante a geração de energia elétrica e depende de uma fonte inesgotável: a luz solar. Seu potencial está disponível de forma distribuída por toda superfície do planeta, sendo uma tendência que cada vez ocupa maior relevância na geração de energia elétrica.

Um gerador fotovoltaico pode ser definido como um dispositivo capaz então de converter esta radiação incidente em eletricidade utilizando o efeito fotoelétrico. A unidade básica de conversão é a célula fotovoltaica, que é formada por duas camadas semicondutoras de silício, cada uma contendo impurezas específicas a fim de apresentar as propriedades elétricas desejadas (Tiwari, Tiwari e Shyam, 2016).

Uma célula fotovoltaica, como vista de forma simplificada na fig. 7 (a) consiste na junção de cristais de silício dopado tipo N com cristais de silício dopado tipo P (sendo

análogos a um diodo, como pode ser visto na fig 7. (b), onde está descrito o circuito equivalente de uma célula solar). A incidência de luz solar gera uma diferença de potencial entre os eletrodos, que quando conectados a uma carga fornece uma corrente, e consequentemente potência é dissipada sobre a mesma. Uma célula solar pode ser comparada a uma fonte de corrente.

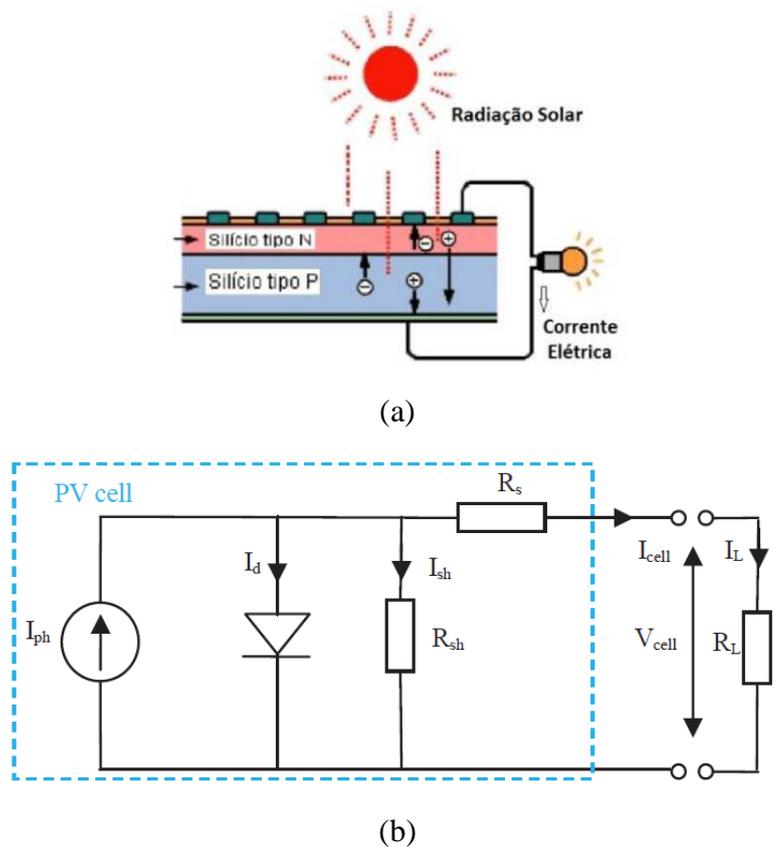


Figura 7 (a) Modelo simplificado de uma célula fotovoltaica (Graosque, 2017) e (b) Circuito elétrico equivalente de uma célula, (Keles *et al.*, 2013)

A fim de realizar a conversão da radiação solar em energia elétrica, são usados módulos que consistem em um conjunto de células fotovoltaicas associadas em série. As condições nominais de um módulo são medidas para 25 °C de temperatura e com irradiância de 1000 W/m<sup>2</sup>, a intensidade da irradiância é diretamente proporcional à entrega de potência da célula solar (dentro de limites definidos pelo material). Existe uma influência relevante na geração de energia elétrica de acordo com a temperatura da célula, efeito este que impacta na eficiência da mesma (Graosque, 2017).

Objetivando-se obter valores determinados de tensão e corrente, os módulos são associados em série e em paralelo. Quando dois módulos são associados em série, suas

tensões são somadas e suas correntes são iguais. Já em uma associação em paralelo, as tensões em ambos os módulos é a mesma, e as correntes são somadas, como pode ser visualizado na fig. 8.

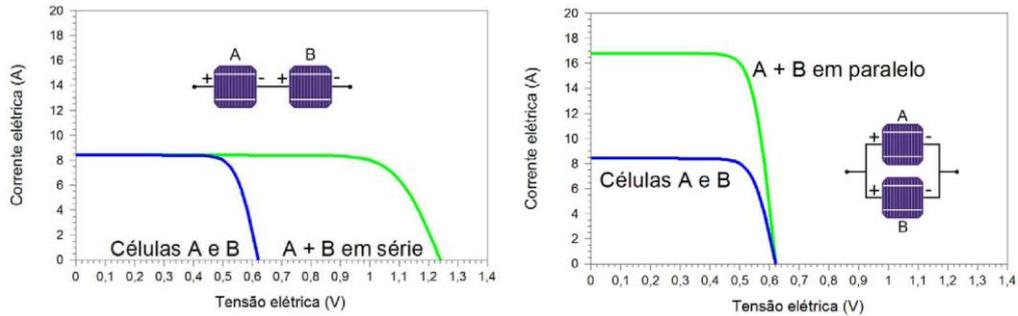


Figura 8 Módulos solares fotovoltaicos associados em série e paralelo. (Guimarães *et al.*, 2014)

Os parâmetros de interesse sobre um módulo fotovoltaico são a tensão de circuito aberto, medida nos polos do módulo quando exposto à radiação solar e a corrente de curto-circuito, inserindo-se um amperímetro entre os polos. A fim de serem avaliados estes parâmetros, os comportamentos da tensão (V) e da corrente (I) são dispostos nas curvas I-V e P-V, obtidas através de ensaios para cada módulo conforme a fig. 9.

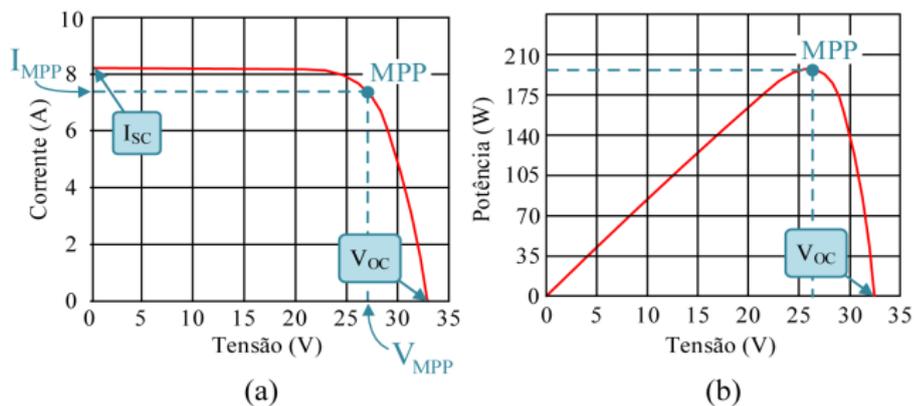


Figura 9 Curvas de corrente e tensão e potência e tensão para um módulo genérico (Brito, 2013)

Os parâmetros apresentados na fig. 9. são:  $I$  corrente;  $V$  tensão;  $P$  Potência;  $I_{sc}$  corrente de curto-circuito;  $V_{oc}$  tensão de circuito aberto;  $M_{pp}$  ponto de máxima potência;  $I_{mpp}$  corrente do ponto de máxima potência;  $V_{mpp}$  tensão do ponto de máxima potência.

A geração de corrente depende da incidência de luz solar direta sobre as células do módulo, dessa forma qualquer sombreamento e diminuição da irradiância causa diminuições e

variações nas variáveis de saída. O sombreamento localizado em uma única célula pode afetar o sistema como um todo, sendo que a corrente produzida nas outras células em série não será capaz de circular, gerando pontos de dissipação de energia através do efeito joule. Esses pontos são conhecidos como ponto-quente (PINHO e GALDINO, 2014).

Para minimizar o efeito causado por estes pontos e por sombreamentos localizados (que podem ter diversas origens, como sujeira, folhas, sombra de árvores, dentre outros) os sistemas usualmente contam com diodos do tipo *bypass*, funcionando como uma ‘rota de fuga’ para a corrente e evitando os danos estruturais.

É possível dividir em três categorias a variação na radiação solar: variação causada pela rotação da Terra (dia e noite), variações ao longo do ano causada pela inclinação da Terra (estações do ano) e por fim as variações causadas pelo encobrimento parcial ou completo do céu por nuvens. Quando apenas parcialmente encoberto, já é possível identificar reduções na ordem de 60% da potência nominal do módulo. Essas variações têm duração que pode ser de poucos minutos até horas, causando intermitência e variação da potência entregue, reduzindo a qualidade da energia. A utilização de sistemas de armazenamento de energia, como baterias por exemplo, é capaz de estabilizar a saída de energia para a rede (Graosque, 2017).

## 2.6 SISTEMAS SOLARES FOTOVOLTAICOS CONECTADOS À REDE

Um sistema solar FV conectado à rede é um sistema que está ligado à rede elétrica através da utilização de inversores. Ao contrário de um sistema isolado, não existe a obrigatoriedade de utilização de armazenamento, porém também se beneficiam do mesmo. A geração é entregue à rede, suprimindo os consumos da residência e em momentos de alta geração, injetar potência excedente (Graosque, 2017).

O elemento central de um sistema deste tipo é o inversor, que converte a corrente contínua produzida pelos módulos solares em corrente alternada compatível com a rede. Existem diferentes configurações de sistema, que são classificados de acordo com o tipo de conexão de inversor, sendo elas: Inversor central, Inversor String, Inversor multi-string e Microinversor.

Na configuração de inversor central, existe um inversor que converte toda geração dos módulos em série e paralelo em corrente alternada. Apresenta custo menor por utilizar menos equipamentos, porém torna o sistema menos confiável e dependente do funcionamento de um único inversor. A configuração de inversor string é utilizada em grupos de módulos em série,

onde cada série é denominada de string, e cada string contém um inversor. Para configuração multi-string, é acrescentado um conversor CC-CC, aumentando a eficiência do sistema. Por fim, a configuração microinversor utiliza inversores individuais para cada módulo, sendo utilizada em menores potências devido a maior custo de equipamento. Na fig. 10 é possível visualizar as configurações descritas.

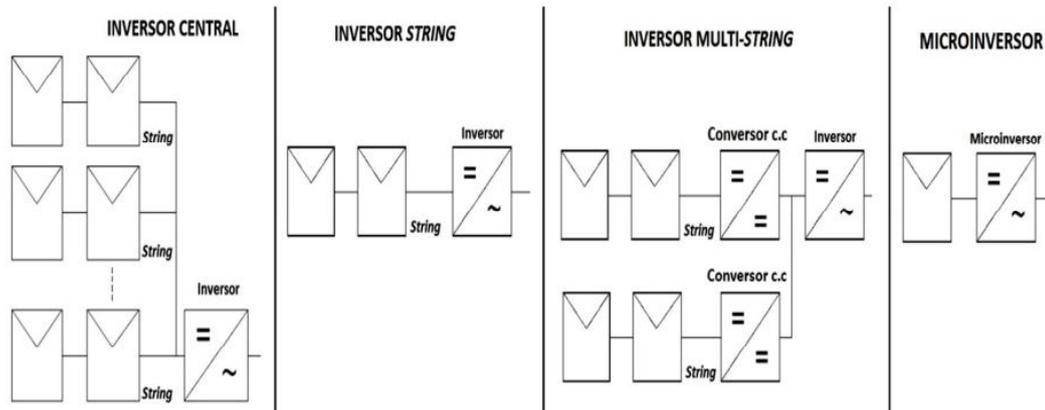


Figura 10 Configurações de sistema conectado à rede (Graosque, 2017)

### 2.6.1 Sistemas solares fotovoltaicos conectados à rede com armazenamento de energia

Quando se analisa a implementação de armazenamento de energia em sistemas solares fotovoltaicos, é possível discernir duas áreas de aplicação. A primeira é um sistema de armazenamento que seja capaz de suprir as demandas diárias independente da incidência solar, suprimindo as cargas noturnas ou de dias nublados. A segunda é o armazenamento sazonal em localidades onde existe diferenças muito grandes de radiação solar entre estações do ano, fenômeno encontrado em altas latitudes. Além destas duas áreas, o armazenamento pode ser usado unicamente no objetivo de entregar à rede uma energia de maior qualidade e com menos intermitência (Sørensen, 2015). Identificar essas possibilidades de armazenamento é relevante para definir a escala de tempo na qual o sistema deve operar, e conseqüentemente qual sua capacidade de armazenamento total.

Para sistemas solares fotovoltaicos conectados à rede no Brasil, a utilização de baterias recarregáveis é solução que cumpre as necessidades operacionais, reduzindo a dependência de condições climáticas. Além disso, é recorrente que a geração de energia dos sistemas solares não tenha seu pico coincidindo com os horários de ponta do consumo, dessa forma os excedentes podem ser armazenados para utilização em horário mais oportuno, simplificando a

operação da rede elétrica interligada e diminuindo o consumo de energia da rede pelo consumidor.

A utilização de armazenadores de energia é um ponto central no planejamento de cidades inteligentes com microgeração distribuída, favorecendo a complementaridade das fontes e suprimindo a demanda necessária nos horários de interesse sem dependência das condições climáticas. A estratégia de armazenar energia excedente em horários de pico e utilizar a mesma em momentos de alta demanda é chamada de energy time-shift (Figueiredo e Bet, 2016).

Um sistema padrão de geração solar fotovoltaica com armazenamento pode ser observado na fig. 11.

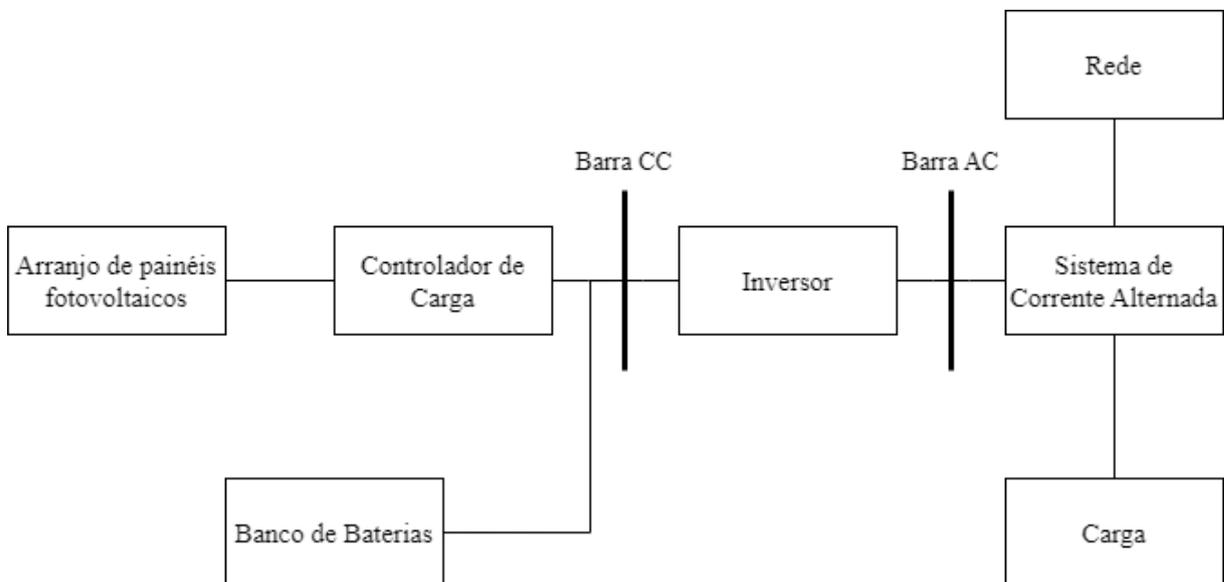


Figura 11 Sistema solar FV conectado à rede com armazenamento Adaptado de Tiwari (2016).

## 2.7 CURVA DE DEMANDA

A rápida expansão de geração de energia de fontes renováveis, em especial solar e eólica levanta também desafios operacionais para a rede elétrica. A utilização de armazenamento em instalações solares FV conectadas à rede é um dos principais métodos de facilitação de operação para a rede. Neste momento o conceito de curva do pato é apresentado, com o objetivo de contextualizar uma das potencialidades da utilização de armazenamento.

O termo “*Duck Curve*” (curva do pato) foi cunhado pelo sistema integrado da Califórnia para designar o impacto do aumento da produção de energia solar nas curvas de

demanda da rede (o nome se dá pela sua semelhança ao animal). A curva do pato pode ser definida como a carga total de eletricidade em um determinado momento menos a geração de energia renovável (Hou *et al.*, 2019). Como pode ser observado na fig. 12, a curva se mantém estável durante a noite, entra em queda ao amanhecer, atingindo o menor ponto de demanda ao meio-dia. A demanda cresce rapidamente próximo ao fim da tarde atingindo o pico em torno das 21h.

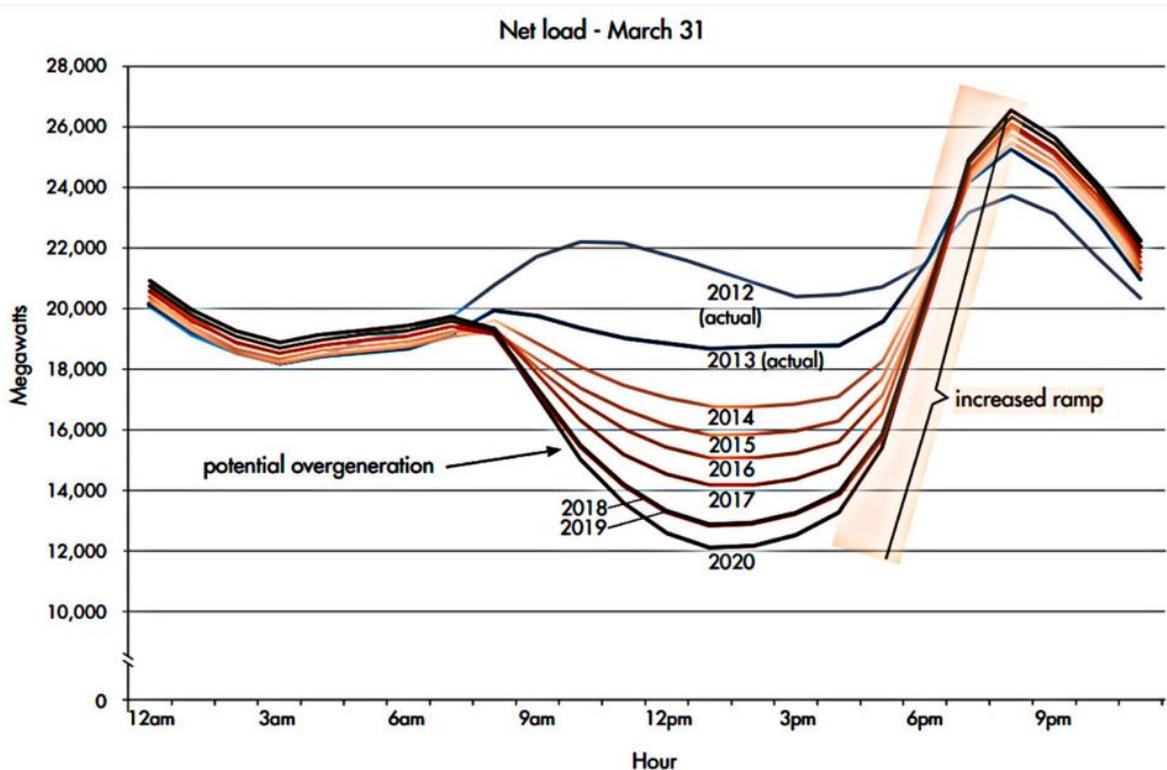


Figura 12 Exemplo de curva de carga da rede ao longo dos anos com perfil de “duck curve” na Coreia do Sul (Kwon, Lee e Park, 2022).

A observação da curva de demanda tem diversas implicações e traz análises valiosas para o cenário onde a geração distribuída de energia solar cada vez representa uma parcela maior na rede elétrica. Sua análise não é capaz de prever comportamentos atípicos, porém representa dias padrão. Uma das maiores implicações é um excedente de energia gerado entre 12h e 18h, fazendo com que o controle da geração necessite reduzir a produção em fontes que não dependem unicamente de fatores climáticos, como termoeletricas e hidrelétricas (Hou *et al.*, 2019).

A curva do pato tem se intensificado gradualmente, e a fim de minimizar os problemas operacionais da mesma existem estratégias de planejamento. Apesar disso, uma das formas de lidar com a mesma é a utilização de sistemas de armazenamento de energia, onde os excedentes produzidos durante a tarde são entregues à rede durante o horário de pico.

A utilização de grandes bancos centralizados de baterias não é considerada viável pelo alto custo, porém sistemas dispersos de geração solar fotovoltaica com armazenamento e a reutilização de baterias são estratégias promissoras (Kwon, Lee e Park, 2022).

Ressalta-se também a crescente preocupação das operadoras do sistema com a rápida expansão da geração distribuída através de fontes renováveis. O incentivo de instalação de sistemas de armazenamento pode ser uma alternativa, através de programas de eficiência, facilitando a viabilidade para o consumidor e a operação para a rede operadora.

## 2.8 SIMULAÇÃO DE MODELOS VIA MATLAB

O MATLAB é um software de programação e resolução de problemas matemáticos de alta complexidade, com potencial de simulação de sistemas multifísicos reais através de diferentes métodos matemáticos. Neste trabalho a utilização do MATLAB se dá através da ferramenta Simulink, que é um ambiente de simulação por blocos de equações diferenciais reais e de problemas multifísicos. Através dele é possível dimensionar e simular sistemas elétricos de geração de energia via energia solar, com a utilização de armazenamento (MathWorks, 2023).

Com a possibilidade de realizar diversas análises o MATLAB apresenta a capacidade de integrar algoritmos de controle e otimização.

A interface gráfica do Simulink é uma forma intuitiva de aplicar teoria de sistemas e controle, integrando fenômenos físicos, e simulando-os através do tempo. Além disso o software conta com uma vasta biblioteca de modelos e exemplos, com destaque para exemplos de geração de energia solar com armazenamento, adaptados para dimensionamento do caso base deste trabalho.

## 2.9 ALGORITMOS DE DECISÃO MULTI OBJETIVO

A análise multi criterial, também chamada de decisão multi objetivo é uma área da matemática que desenvolve métodos e algoritmos de otimização a fim de encontrar resultados com objetivos de maximização e minimização conflitantes. A decisão multi objetivo pode ser considerada um processo dinâmico e complexo, tanto em níveis de gerenciamento como de engenharia (Duckstein and Opricovic, 1980).

Um ponto em comum entre os métodos de decisão multi criterial é a presença de fatores quantitativos e qualitativos (Cristóbal, 2011), além de lidar com conflitos entre os critérios. Em métodos de decisão multi objetivo, também conhecido como programação multi objetivo ou otimização vetorial, uma série de funções objetivo são otimizadas e sujeitas a uma série de restrições.

Segundo Opricovic (2004), os principais passos da solução de um problema multi criterial são:

- Estabelecimento dos critérios de avaliação das capacidades do sistema de acordo com os objetivos;
- Incluir sistemas alternativos para atingir os mesmos objetivos;
- Avaliar as alternativas de acordo com os critérios (os valores das funções criteriosais);
- Aplicação de um método de decisão multi criterial;
- Aceitar uma das alternativas como ótima (alternativa preferida)
- Se a alternativa não for aceita, agregar novas informações para as próximas iterações da otimização.

Os passos de estabelecer critérios e aceitar ou não o resultado são relacionados a fatores qualitativos do problema, e passam por uma análise global do problema, já as outras etapas são tarefas de cálculo. Para que o método seja capaz de apresentar uma solução, uma abordagem é a introdução de pesos para cada objetivo. Estes pesos se colocam como uma modelagem das preferências de resolução do problema, onde cada aspecto pode ser considerado acima dos outros (Opricovic, 2004)

Neste trabalho será utilizado o método VIKOR, que é baseado na busca da função mais próxima do ideal dentre as opções propostas.

### **2.9.1 Método Vikor**

O método VIKOR (*VlseKriterijumska Optimizacija I Kompromisno Resenje*) é um método desenvolvido para análise multi criterial de sistemas complexos. Este método determina a classificação das soluções, através de pesos. Ele se caracteriza através da seleção de um grupo de alternativas quando existem critérios de otimização conflituosos. As alternativas são ordenadas de acordo com a proximidade da solução ideal (Opricovic, 2004).

A utilização do método em pesquisa para energias renováveis pode ser vista em Cristóbal (2011) que aplicou o método para a seleção do projeto de energias renováveis de acordo com as potencialidades e custos regionais da Espanha, apresentando um conjunto de

alternativas como eólica, solar, hidroelétrica e biomassa, encontrando a indicação de utilizar planta de biomassa para a produção de energia. As diferentes alternativas foram comparadas em razão de custo, potência, eficiência e vida útil. Mardani *et al.*, (2016) trazem uma revisão sistemática da aplicação do método Vikor, com destaque para comparação de diversas aplicações na área de energia renovável. Já Siksnyte *et al.*, (2018) elencam exemplos da aplicação do método em: seleção de políticas para energia renovável, avaliação de tecnologias de geração, planejamento nacional, seleção de localidades e por fim comparação direta entre tecnologias para energia renovável.

Neste trabalho optou-se por utilizar o método Vikor por ser uma metodologia capaz de trazer indicação de tecnologia, baseado em objetivos de maximização e minimização conflitantes.

Assumindo que cada alternativa selecionada será avaliada de acordo com os critérios de otimização, a classificação delas é realizada através da proximidade de cada alternativa de uma solução ideal fictícia.

O método começa com a determinação da função de compromisso, conforme eq. 3 (Kreuzberg, 2017):

$$L_{p,j} = \left\{ \sum_{i=1}^n \left[ w_i \frac{(f_i^* - f_{ij})}{(f_i^* - f_i^-)} \right]^p \right\}^{1/p} \quad (3)$$

$$1 \leq p \leq \infty \text{ e } j = 1, 2, \dots, J.$$

Onde J representa um critério e n é o número total de critérios no modelo.  $f_i^*$  e  $f_i^-$  (Eqs. 4 e 5) representam o melhor e o pior resultado para cada critério j respectivamente.  $w_i$  são os pesos do critério.

$$f_i^* = \max_j f_{ij} \quad (4)$$

$$f_i^- = \min_j f_{ij} \quad (5)$$

O próximo passo é determinar os pesos  $S_j$  e  $R_j$ , onde  $S_j$  pode ser chamado de grupo de utilidade máxima e  $R_j$  de peso individual mínimo. Assume-se para S:  $p = 1$  e para R:  $p = \infty$ .

$$S_j = \sum_{i=1}^n w_i \frac{(f_i^* - f_{ij})}{(f_i^* - f_i^-)} \quad (6)$$

$$R_j = \max_i \left[ w_i \frac{(f_i^* - f_{ij})}{(f_i^* - f_i^-)} \right] \quad (7)$$

A solução compromisso  $F_C$  é uma solução real mais próxima da solução ideal  $F^*$ , como visto na fig. 13.

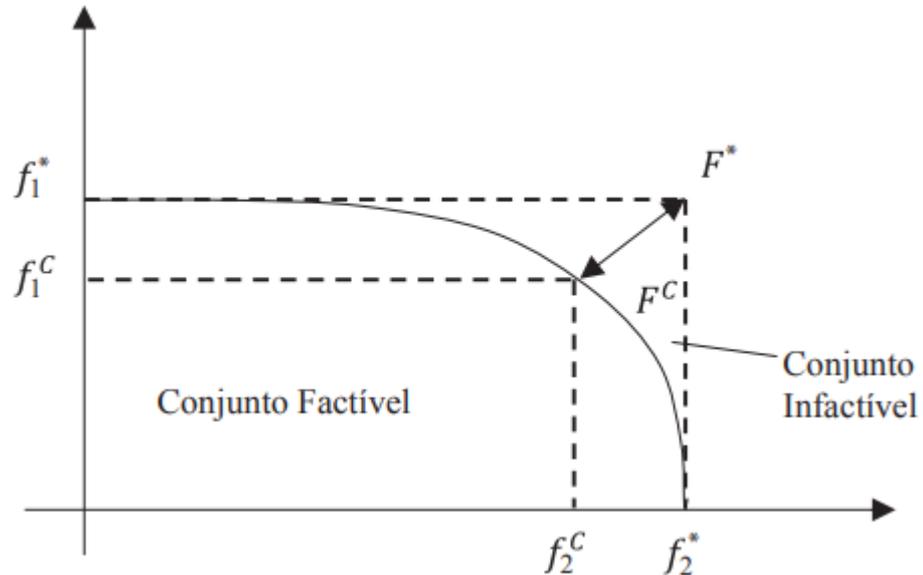


Figura 13 Solução ideal em relação à função compromisso (Kreuzberg, 2017).

Com os pesos  $R$  e  $S$ , calcula-se o critério classificador  $Q$ , segundo a expressão:

$$Q_j = v \frac{(S_j - S^*)}{(S^- - S^*)} + (1 - v) \frac{(R_j - R^*)}{(R^- - R^*)} \quad (8)$$

onde:

$$\begin{aligned} S^* &= \min_j S_j & S^- &= \max_j S_j \\ R^* &= \min_j R_j & R^- &= \max_j R_j \end{aligned}$$

Onde  $v$  é um peso utilizado geralmente como 0,5 por sugestão dos criadores do método, porém pode ser alterado. A melhor alternativa é ranqueada a partir de  $Q$ , onde o menor valor é a solução indicada (Opricovic, 2004). Na fig. 14. É possível verificar um diagrama representando a solução via método Vikor.

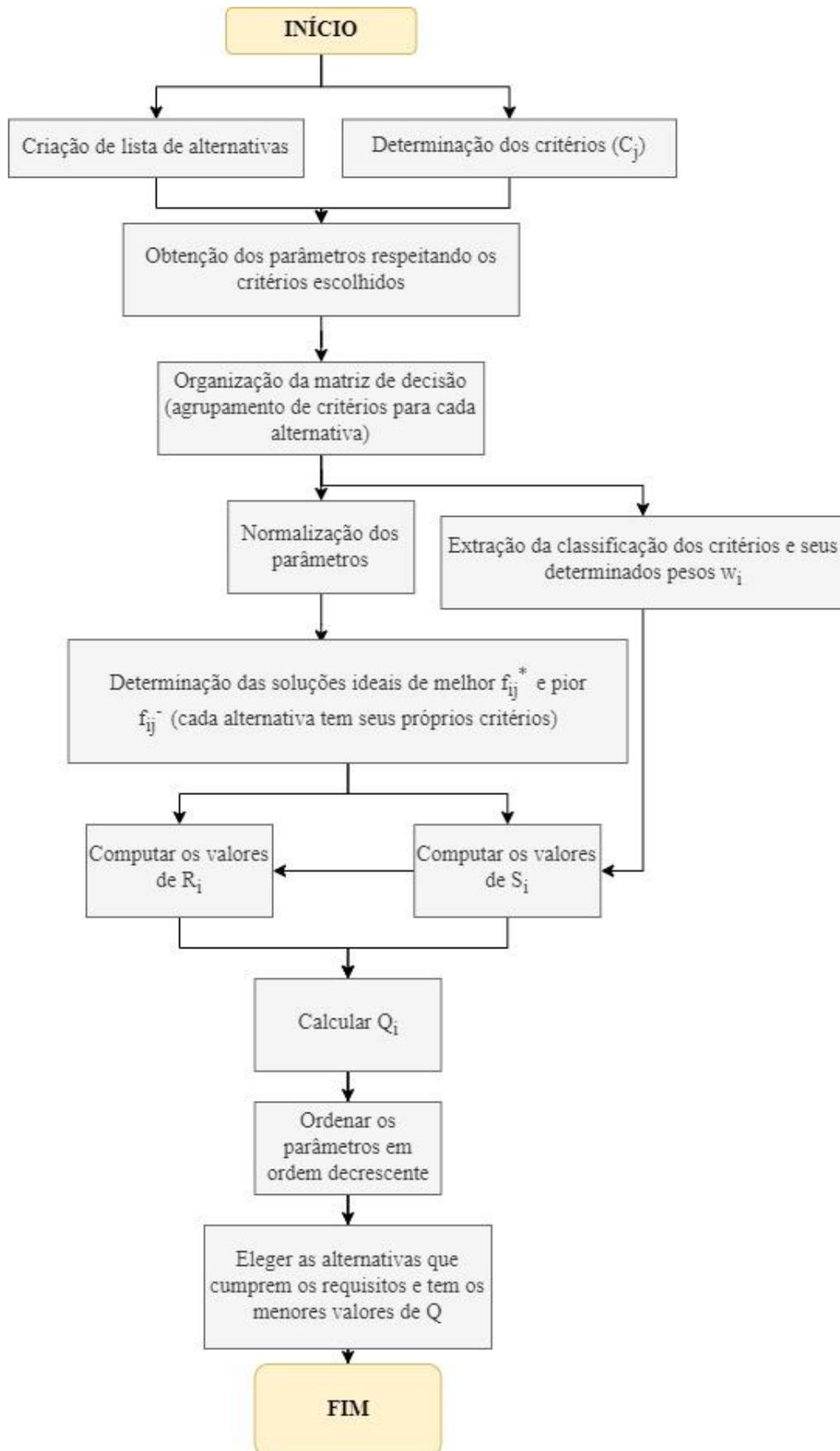


Figura 14 Algoritmo de solução, adaptado de Mardani *et al.* (2016)

### 3 METODOLOGIA

Existe uma vasta literatura acerca das vantagens da utilização de sistemas de armazenamento de energia na geração distribuída de energias renováveis. Há um consenso nos impactos positivos eletricamente, embora haja um custo associado. Partindo deste pressuposto, aqui serão comparadas as tecnologias de baterias mais relevantes do mercado, a partir de diversos parâmetros, a fim de fornecer uma resposta que leve em conta os aspectos técnicos, econômicos e ambientais.

Em primeiro momento foi realizado um extenso levantamento bibliográfico utilizando as bases de dados Science Direct, Scopus e repositórios nacionais como Unisinos e Lume (UFRGS). É possível identificar diversos estudos na área de sistemas de armazenamento de energia para sistemas solares fotovoltaicos, como por ex: Graosque (2017), Saha *et al.* (2022), Dias (2015), Ding *et al.* (2015), Rahman *et al.* (2015), Udeani *et al.* (2021), Abe *et al.* (2015).

Para a avaliação de aspectos ambientais, foi selecionada a metodologia de avaliação de ciclo de vida, que é capaz de quantificar em unidades comparáveis os custos energéticos e emissões ao longo da cadeia de produção de baterias. Estudos como este são: Jasper *et al.* (2022), Porzio e Scown (2021), Sullivan (2012), Gutsch *et al.* (2022).

Além disso, existem avaliações técnico-econômicas de sistemas de armazenamento, que avaliam custos de diferentes sistemas juntamente com os parâmetros elétricos do sistema, como pode ser visto nos trabalhos de Rahman *et al.* (2015), Udeani *et al.* (2021), Macgill *et al.* (2015).

Através do levantamento destes dados na literatura, é identificada uma lacuna de publicações que sejam capazes de comparar os sistemas de armazenamento levando em conta estes diferentes aspectos, sendo assim, são selecionados os parâmetros principais para serem avaliados neste trabalho.

A fig. 15 apresenta o fluxograma da metodologia aplicada neste trabalho, apresentando as etapas sequenciais e paralelas da solução do problema proposto.

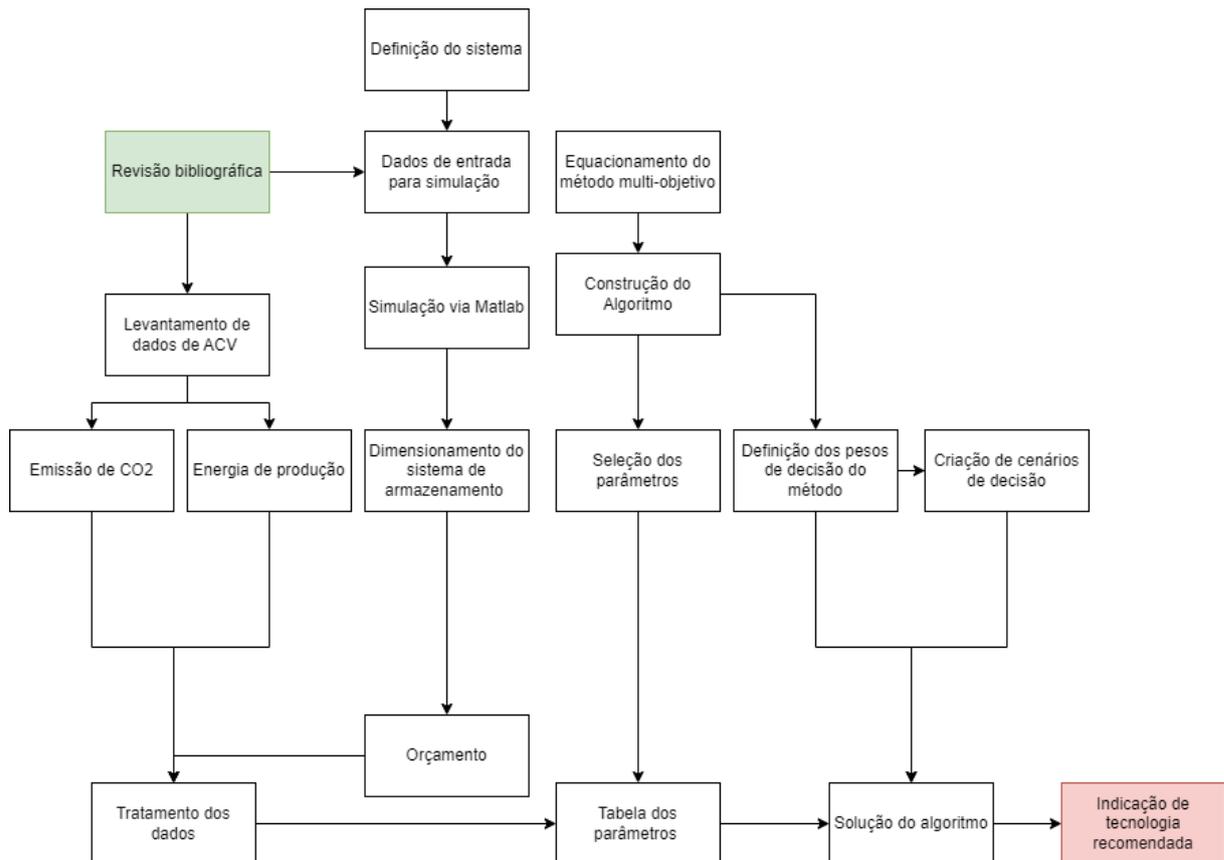


Figura 15 Fluxograma da metodologia aplicada.

### 3.1 LEVANTAMENTO DAS RESTRIÇÕES DO PROBLEMA

A utilização de armazenamento de energia em sistemas solares fotovoltaicos conectados à rede tem objetivo diferente de sistemas isolados. A sua capacidade tem como objetivo gerenciar a produção de energia em relação à demanda da rede, assim como aproveitar melhor a energia produzida para o consumo da própria residência. Dessa forma, considerou-se um sistema residencial, com baterias cuja autonomia não é suficiente para suprir a demanda da residência por dias em caso de falta, mas sim de carregar as baterias ao longo dos horários de maior incidência solar e descarregar durante a noite.

Neste sistema foram dimensionados três sistemas de armazenamento que sejam capazes de suprir esta necessidade, um para cada tecnologia de bateria, contendo essencialmente os mesmos componentes. Dessa forma, serão comparados de acordo com a mesma aplicação, onde cada sistema deve suprir os mesmos requisitos.

### 3.2 DIMENSIONAMENTO DO CASO BASE VIA MATLAB-SIMULINK

O dimensionamento do caso base foi realizado através da ferramenta Simulink, parte da biblioteca do software MATLAB. Utilizou-se um sistema adaptado da ferramenta, contendo os seguintes grupos de blocos: módulos solares, controlador de carga, baterias, inversor e carga.

Para o dimensionamento são utilizados os seguintes parâmetros: dados de fabricante dos módulos fotovoltaicos; parâmetros elétricos das baterias; curva de carga diário residencial para um dia típico; horas médias de insolação para a estação; consumo médio residencial. O dimensionamento é baseado em uma residência padrão de baixo consumo, a fim de identificar um ponto padrão de comparação, onde a única diferença entre os sistemas é o tipo de bateria aplicado. Além disso, o sistema dimensionado é utilizado para orçamento em empresas locais. A partir do dimensionamento são obtidas as quantidades de baterias necessárias de cada tipo para cada sistema.

### 3.3 DEFINIÇÃO DOS PARÂMETROS DE AVALIAÇÃO MULTI OBJETIVO

Este estudo realiza inicialmente o levantamento de seis parâmetros gerais que serão comparados de forma conjunta com o objetivo de apontar a tecnologia de bateria mais promissora para uso em sistemas solares fotovoltaicos conectados à rede. A seleção destes parâmetros se baseou em estudos análogos de aplicação do método de decisão multiobjetivo como Salameh et al. (2022), com a intenção de abarcar os aspectos econômicos, ambientais e elétricos que passam pela tomada de decisão de cada tecnologia.

Os parâmetros selecionados são:

- Energia consumida para a produção de cada bateria;
- Emissões na produção de cada tipo de bateria;
- Eficiência global de armazenamento;
- Ciclos de carga totais;
- Custo total do sistema;
- Custo de implementação.

### **3.3.1 Energia consumida e emissões na produção de cada tipo de bateria**

Este parâmetro é obtido da literatura de ACV e captura os aspectos ambientais envolvidos em cada tecnologia. As unidades base são energia utilizada por kg de bateria ou por unidade e emissões totais de CO<sub>2</sub> por unidade.

O objetivo da incorporação neste estudo é de incrementar dados que capturam os impactos do processo de produção “berço ao portão” das tecnologias de bateria selecionadas. A ACV é uma tecnologia atual e relevante, que vem sendo aplicada também em sistemas de energia.

Após o dimensionamento, é possível calcular a o total de emissões e consumo de energia partir das estimativas de emissão de CO<sub>2</sub> e quantidade de energia consumida na produção de cada bateria por kg, baseado na quantidade total de baterias necessárias para o sistema. Todos estes cálculos se utilizam do levantamento de dados realizado previamente, através da bibliografia de análises de ciclo de vida.

### **3.3.2 Eficiência de armazenamento e ciclos de carga**

Neste momento levanta-se os aspectos técnicos que envolvem o funcionamento do sistema, sendo a eficiência e os ciclos de carga e descarga. Os dados são obtidos através dos fabricantes e da simulação através do MATLAB/Simulink.

Toda tecnologia apresenta suas limitações e degradação lenta ao longo do tempo, de forma que seja capaz de realizar um limitado número de ciclos de carga antes de necessitar substituição.

Neste parâmetro busca-se quantificar o aspecto temporal de uso, visto que um sistema solar fotovoltaico tem expectativa de vida útil longa, dessa forma sendo necessárias ou não substituições no sistema de armazenamento, que impacta o custo e as emissões associadas.

### **3.3.3 Custo total do sistema e custo de implementação**

Parâmetro afetado diretamente pelos aspectos técnicos e ciclos de carga e descarga, assim como pela eficiência. Neste aspecto busca-se quantificar os custos de cada tecnologia de armazenamento selecionada, a fim de que seja levada em conta a viabilidade econômica do sistema. A diferenciação entre os custos está no cálculo de implementação que está

relacionado aos custos imediatos, e no custo total do sistema são incorporadas as recuperações ao longo de todo ciclo.

Foram utilizados valores de orçamento para o ano de 2023, de um sistema solar fotovoltaico instalado no RS, obtido através de empresas locais.

### 3.4 COMPARAÇÃO VIA MÉTODO VIKOR

Após o levantamento de todos os dados mencionados na literatura e na simulação, e após o tratamento dos mesmos, é gerada a tabela de parâmetros VIKOR para a aplicação do método de decisão multi objetivo. O algoritmo de decisão é escrito na linguagem R, vide anexos, e retorna a tecnologia de armazenamento mais indicada dentro dos parâmetros avaliados.

Posteriormente é realizada a avaliação e interpretação dos resultados, com a avaliação de diferentes cenários, variando os pesos individuais de cada categoria.

## 4 RESULTADOS

### 4.1 DIMENSIONAMENTO VIA MATLAB

Nesta primeira etapa é realizado o dimensionamento do caso base via MATLAB Simulink. Considerou-se um sistema residencial de pequeno porte, para uma residência com consumo mensal de 100 kWh, de acordo com Ancines *et al.* (2018). O sistema é composto pelos seguintes itens:

- Painéis Solares Fotovoltaicos;
- Conversor CC-CC do tipo Boost;
- Controlador de carga do tipo MPPT;
- Inversor híbrido;
- Sistema de armazenamento.

Este sistema foi implementado no ambiente do simulink através do conjunto de blocos visível na fig. 16. Para os parâmetros de entrada e a inserção das variáveis de cada sistema de armazenamento foi utilizado o ambiente de trabalho do próprio MATLAB, do qual o simulink busca os parâmetros necessários para realizar os cálculos.

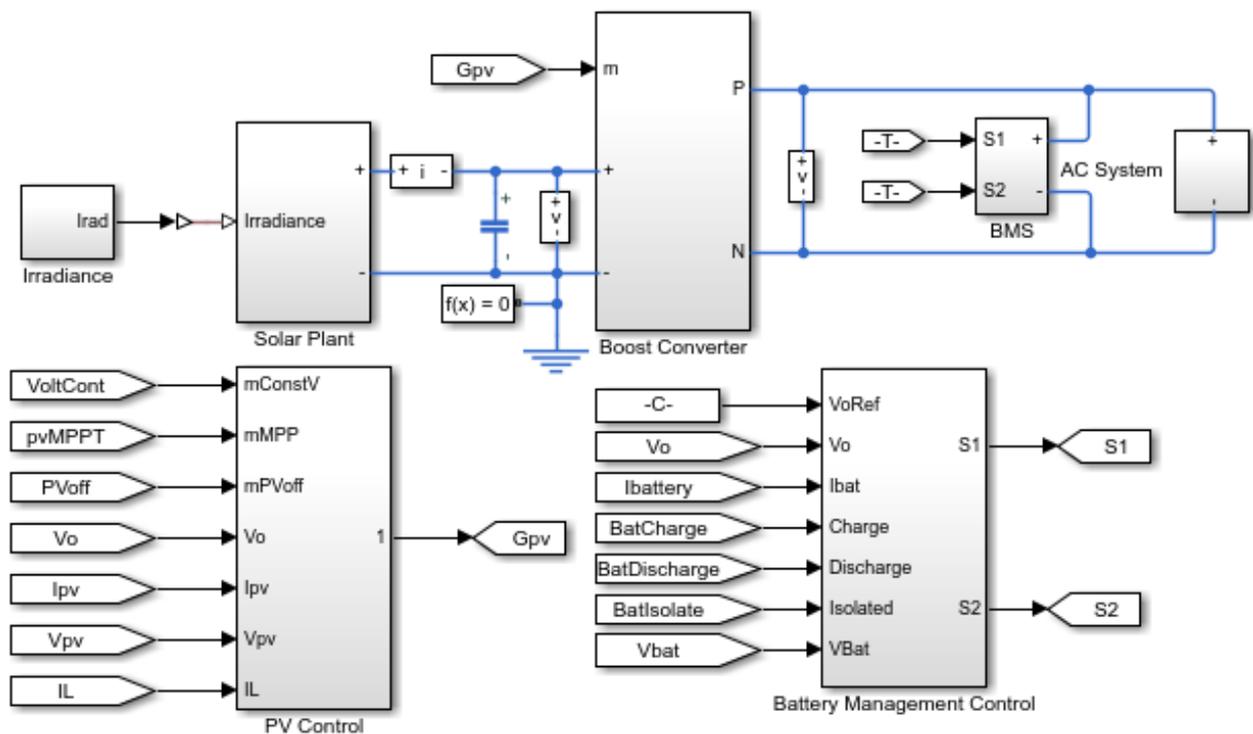
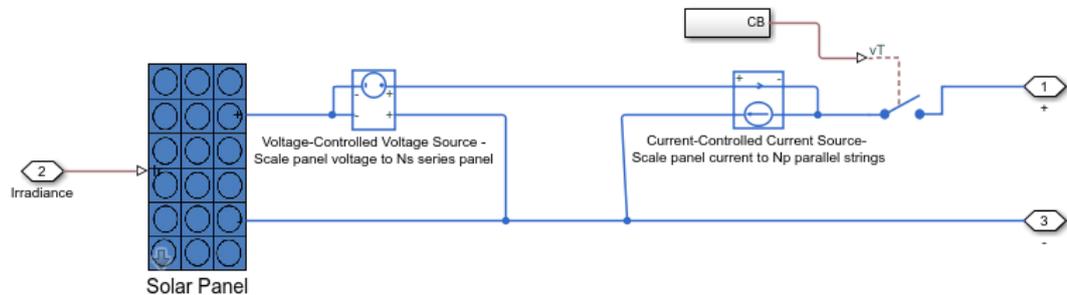
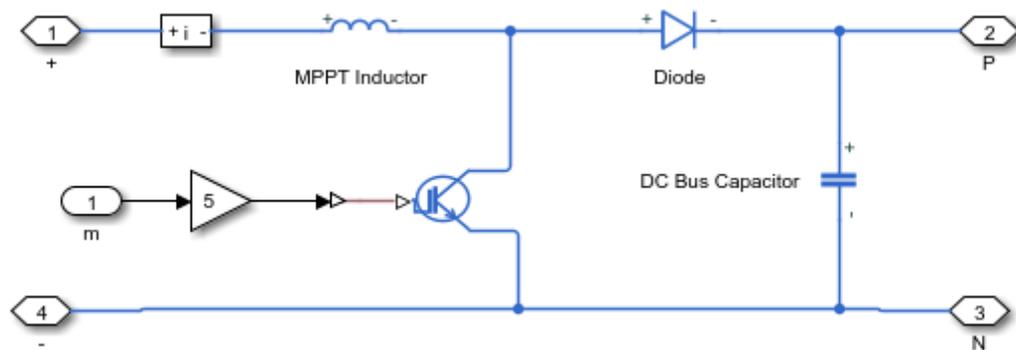


Figura 16 Ambiente de simulação Simulink.

Cada bloco da fig. 16 consiste em um grupo de sub-blocos, por exemplo, aqui são apresentados na fig. 17 (a) o subsistema da geração solar e em fig 17 (b) o subsistema do conversor CC-CC.



(a) Sistema de geração solar.



(b) Conversor CC-CC

Figura 17 Detalhes dos blocos do sistema de geração solar e conversor.

A fim de dimensionar o sistema desejado, foram inseridos como dados de entrada para o programa variáveis da rede e parâmetros elétricos das células solares, de acordo com dados fornecidos por fabricante, disponíveis em Abisolar (2020). Os valores utilizados estão disponíveis na tabela 6.

**Tabela 6** Dados de entrada das células solares

Parâmetro	Valor
Corrente de curto circuito (A)	8,18
Tensão de circuito aberto (V)	36,7
Tensão de máxima potência (V)	29,9
Corrente de máxima potência (A)	7,53
Tensão da rede (V)	230
Frequência da rede (Hz)	60

Como dados de entrada, também são inseridos os parâmetros individuais de uma célula de bateria, neste caso sendo simulados três sistemas equivalentes, alterando apenas os parâmetros de entrada de cada tecnologia de bateria avaliada. Os parâmetros inseridos estão disponíveis na tabela 7 (Shoto, 2020), (Sunica, 2019), (ProStar, 2018).

**Tabela 7** Parâmetros das células de bateria

	Chumbo -Ácido		Íon-lítio		Níquel-Cádmio	
	Verão	Inverno	Verão	Inverno	Verão	Inverno
Tensão nominal da célula [V]	2,1		1,9		1,3	
Tensão mínima da célula [V]	1,8		1,8		0,2	
Profundidade de Descarga [%]	30		80		80	
Tensão limite célula [V]	2,3		2,2		1,5	
SoC maximo [%]	97		97		97	
Horas médias de sol	13,5	10,5	13,5	10,5	13,5	10,5

Outro dado de entrada relevante é a curva de consumo residencial aplicada, para este caso foram utilizadas duas curvas de carga uma para um dia típico de verão e outra para um dia típico de inverno.

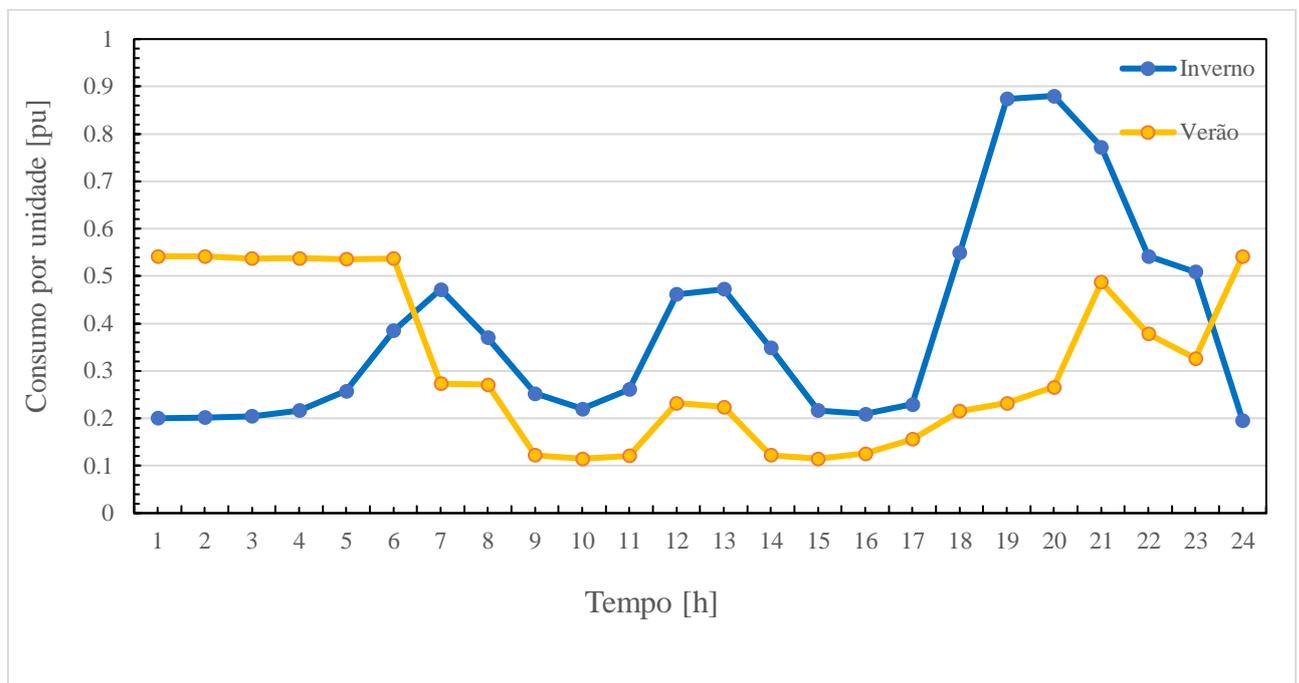


Figura 18 Curva de carga do consumo por unidade sazonal (Santos, 2016).

É importante apontar que o consumo residencial visto na fig 18, onde está representado o consumo típico no inverno e o consumo típico no verão, é utilizado para ambos os extremos do espectro climático a fim de identificar a situação onde o

dimensionamento é mais crítico. Sendo dessa forma utilizado a quantidade de baterias que consegue cumprir as necessidades sistema. A diferença no perfil da curva de carga se dá por conta da diferença de comportamentos médios do consumidor durante as estações, sendo identificado como descrito em Santos (2016) um pico maior em dia típico de inverno após o horário tradicional do trabalho, onde os moradores retornam para suas residências e passam a utilizar uma variedade de equipamentos eletrônicos. Já no verão, o consumo é consideravelmente elevado e constante durante a noite por conta da utilização de equipamentos de climatização.

Neste cenário, a curva de carga sazonal é aplicada no dimensionamento, a fim de identificar os valores críticos onde maior quantidade de armazenamento é necessária.

#### 4.2 DEFINIÇÃO DO SISTEMA E DAS BATERIAS

Após a simulação, foram obtidas as capacidades de armazenamento necessárias para cada tipo de bateria. Com esta capacidade, são definidas as quantidades de baterias necessárias para cada sistema. Selecionou-se a capacidade de armazenamento para o caso onde ela é mais crítica, ou seja, no inverno. Os valores estão disponíveis na tabela 8.

**Tabela 8** Resultados de dimensionamento

	Chumbo -Ácido		Íon-lítio		Níquel-Cádmio	
	Verão	Inverno	Verão	Inverno	Verão	Inverno
Capacidade Ah	424.47	524,94	101.63	125.69	183.88	227.4
Número de baterias	6		2		5	
Massa por bateria [kg]	77		45		46,1	
Ciclo de carga por bateria [-]	2700		8000		5000	

Com as quantidades de baterias necessárias, é possível orçar o sistema, foram solicitados para empresas da região orçamentos de acordo com o sistema necessário, e o único orçamento final contendo os três tipos de armazenamento foi utilizado O orçamento completo está disponível nos anexos.

#### 4.3 TRATAMENTO DE PARÂMETROS E TABELA VIKOR

Em posse de todos os dados necessários para o cálculo dos critérios de avaliação a serem utilizados no código, é definida a tabela de valores de cada critério. Para os critérios ambientais, foram utilizados os valores da tabela 4, onde:

$$Emissões\ totais\ [kg\ de\ CO_2] = Massa\ da\ bateria\ [kg] * Emissão\ parcial\ [\frac{kg\ CO_2}{kg\ de\ bateria}]$$

$$Energia\ de\ produção\ [MJ] = Massa\ da\ bateria\ [kg] * Energia_{berço\ ao\ portão} [\frac{MJ}{kg\ de\ bateria}]$$

Quanto aos custos, os critérios utilizados foram o custo de implementação inicial do sistema, e os custos totais em baterias considerando as substituições necessárias. As substituições foram consideradas através da comparação do número de ciclos de carga médio de cada bateria selecionada. Dessa forma, para o período da vida de uma bateria de íon lítio, são necessárias 2 substituições das baterias de chumbo-ácido e uma substituição da de níquel-cádmio. A comparação de ciclos de carga é o método aplicado aqui para colocar em parâmetro de igualdade os sistemas.

Por fim, os parâmetros elétricos aqui considerados são a eficiência do sistema (retornada pela simulação), e o número de ciclos de carga de cada bateria.

Os critérios podem ser sumarizados na tabela 9:

**Tabela 9** Critérios aplicados ao método Vikor

	Chumbo - Ácido	Íon- lítio	Níquel- Cádmio	Objetivo
Emissões [kg de CO <sub>2</sub> ]	4107	1170	3318	minimizar
Energia de produção [MJ]	40382	16209	38191	minimizar
Implementação [R\$]	7631	36881	6626	minimizar
Custos totais [R\$]	9333,33	32400	3432	minimizar
Eficiência [%]	75	95	70	maximizar
Ciclos de carga	2700	8000	5000	maximizar

#### 4.4 RESULTADOS VIKOR

Considerando a seguinte denominação, vide tab. 10:

**Tabela 10** Listagem de critérios

<b>Critério</b>	
1	Emissões totais de CO <sub>2</sub> na produção das baterias
2	Energia consumida na produção das baterias

3	Custo de implementação inicial do sistema
4	Custo total em baterias
5	Eficiência do sistema
6	Ciclos totais de carga da bateria

Foram aplicados os critérios ao método Vikor, que consiste em um algoritmo reproduzido em código R (vide Anexos) que retorna os valores de  $Q$  ordenados. Os critérios de 1 a 4 tem como objetivo ser minimizados, já os critérios 5 e 6 tem como objetivo serem maximizados. Cada alternativa tem seu conjunto de critérios, vide tabela 9.

Em primeiro momento, os pesos  $w_i$  de cada critério foram considerados iguais, com valor de 1/6 cada. Após a solução do método, obtém-se como resultado a alternativa Íon-Lítio, de acordo com os valores de  $Q_i$  em ordem decrescente.

**Tabela 11** Resultados Vikor para pesos iguais

Bateria	$Q_i$
Íon-Lítio	0,000
Chumbo-Ácido	0,500
Níquel-Cádmio	0,829

Em segundo lugar, a bateria de chumbo-ácido apresenta-se como a alternativa seguinte quando todos os critérios apresentados são levados em conta, e por fim encontra-se a bateria de níquel-cádmio, com o pior valor de  $Q_i$ . O resultado encontrado aponta que as vantagens operacionais, alta eficiência e a vida mais longa do produto faz com que a bateria de íon lítio se destaque mesmo com um custo muito mais elevado do que as alternativas. O resultado aponta que quando estamos considerando como pesos de decisão igual todos os parâmetros, a bateria de íon-lítio tem a melhor relação de custo benefício ambiental e de desempenho operacional.

#### 4.5 CENÁRIOS ALTERNATIVOS DE PESOS DE AVALIAÇÃO

Como a decisão na utilização de uma alternativa passa por parâmetros técnicos diretos e também por parâmetros subjetivos como interesse, familiaridade com a tecnologia e o que a

peessoa que tomará a decisão considera como mais importante, foram desenvolvidos cenários onde os pesos do método Vikor são alterados a fim de favorecer um grupo de critérios.

Para cada um dos casos, considerou-se que o peso  $w_i$  é igual a 0,5 para um grupo e 0,25 para os outros, totalizando a soma de 1. Dessa forma, quando o método de decisão favorece a minimização dos parâmetros ambientais, os pesos são por exemplo:  $w_1 = 0,25$ ,  $w_2 = 0,25$ ,  $w_3 = 0,125$ ,  $w_4 = 0,125$ ,  $w_5 = 0,125$ , e  $w_6 = 0,125$ .

O objetivo é identificar se quando o aspecto mais importante para a tomada de decisão é alterado, a ferramenta indicará ainda a mesma alternativa ou proporá uma alternativa diferente.

#### 4.5.1 Tomada de decisão ambiental

O primeiro cenário avaliado é quando os pesos são modificados para favorecer a minimização dos critérios ambientais. Aplicando se  $w_1 = 0,25$ ,  $w_2 = 0,25$ ,  $w_3 = 0,125$ ,  $w_4 = 0,125$ ,  $w_5 = 0,125$ , e  $w_6 = 0,125$ , o método retorna a solução disponível na tabela 12.

**Tabela 12** Resultados Vikor pesos ponderados ambientais

Bateria	$Q_i$
Íon-Lítio	0,000
Níquel-Cádmio	0,762
Chumbo-Ácido	1,000

O melhor resultado é o da bateria de íon lítio, com níquel-cádmio e chumbo-ácido respectivamente. Este resultado aponta que apesar dos custos ambientais elevados na produção das baterias de lítio, a sua alta densidade energética resultam em menos externalidades ambientais quando comparadas com as outras alternativas. Um destaque é para a sua menor necessidade de substituições ao longo da vida útil do sistema.

O fato da bateria de chumbo-ácido ser a opção mais distante da solução ideal é explicado pela alta necessidade de substituições ao longo do projeto. Como os dados utilizados para a avaliação ambiental somente cobrem os custos de produção, sendo obtidos da avaliação de ciclo de vida berço ao portão, os impactos ambientais do descarte e da pós vida não estão sendo avaliados. Este cenário pode ser relevante considerando-se que as

baterias de chumbo-ácido tem uma taxa maior de reciclagem quando comparadas com as outras.

A fim de identificar quão relevante é a variação dos pesos para tomada de decisão com favorecimento ambiental foi realizada a progressão dos pesos, disponível na figura 19. Na progressão é possível identificar que a bateria de íon de lítio se apresenta como a melhor opção em qualquer cenário onde a prioridade seja ambiental.

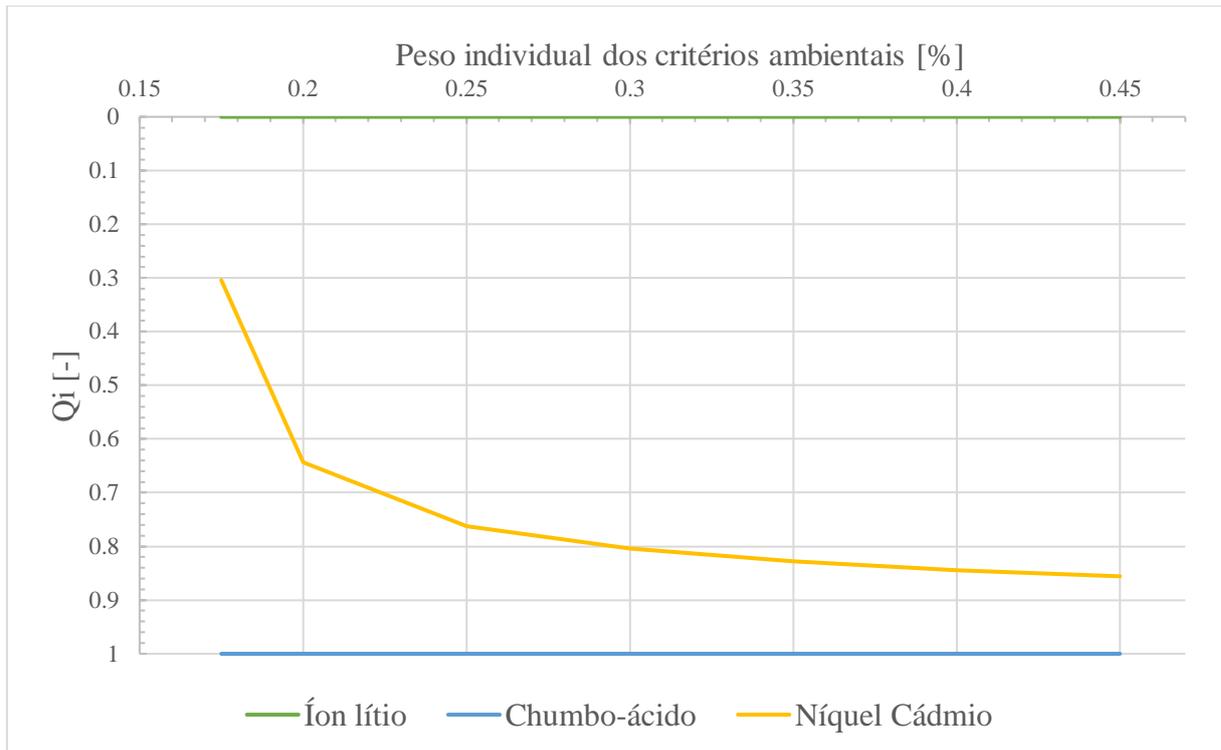


Figura 19 Progressão dos pesos para a tomada de decisão ambiental.

#### 4.5.2 Tomada de decisão econômica

Em segundo momento, é avaliada a tomada de decisão quando o custo é o mais relevante. Os resultados obtidos para  $Q_i$  estão na tabela 13.

**Tabela 13** Resultados Vikor pesos ponderados econômicos

Bateria	$Q_i$
Níquel-Cádmió	0,000
Chumbo-Ácido	0,500
Íon-Lítio	0,872

O resultado indicado pelo método Vikor é a bateria de Níquel-Cádmio. Este resultado em primeiro momento foge do esperado, pois uma avaliação primária comparando os valores de orçamento apontaria para a bateria de chumbo-ácido. Porém a menor necessidade de substituições e um valor reduzido no custo total faz com que a de Níquel se destaque.

Ao se analisar a progressão dos pesos, disponível na fig. 20, a bateria de íon de lítio apresenta uma pequena vantagem inicial, porém conforme se prioriza percentualmente a decisão econômica ela se torna a pior opção. Progressivamente, a bateria de chumbo-ácido se coloca como uma alternativa muito próxima da bateria de níquel cádmio.

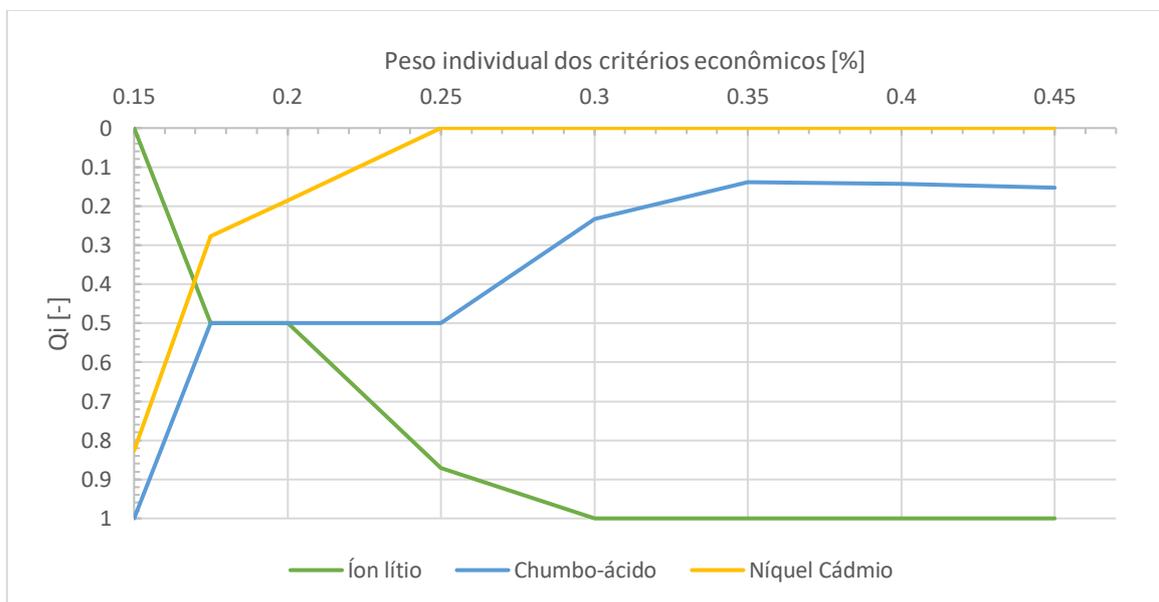


Figura 20 Progressão dos pesos para a tomada de decisão econômica.

#### 4.5.3 Tomada de decisão por desempenho elétrico

Por fim, ao avaliar-se os parâmetros relacionados ao desempenho elétrico como mais relevantes para a tomada de decisão, o método retorna o seguinte resultado:

**Tabela 14** Resultados Vikor pesos ponderados elétricos

Bateria	$Q_i$
Íon-Lítio	0,000
Níquel-Cádmio	0,861
Chumbo-Ácido	1,000

Aqui mais uma vez a bateria de íon-lítio se destaca, já que apresenta a maior eficiência e o maior número de ciclos de carga. Como esperado, a bateria de chumbo ácido coloca-se como a pior alternativa neste momento. Ao ser analisada a progressão dos pesos disponível na fig. 21, identifica-se um momento onde a bateria de Níquel é a melhor alternativa, porém conforme aumenta o peso para a decisão em termos de parâmetros de desempenho, a dominância da bateria de lítio é clara.

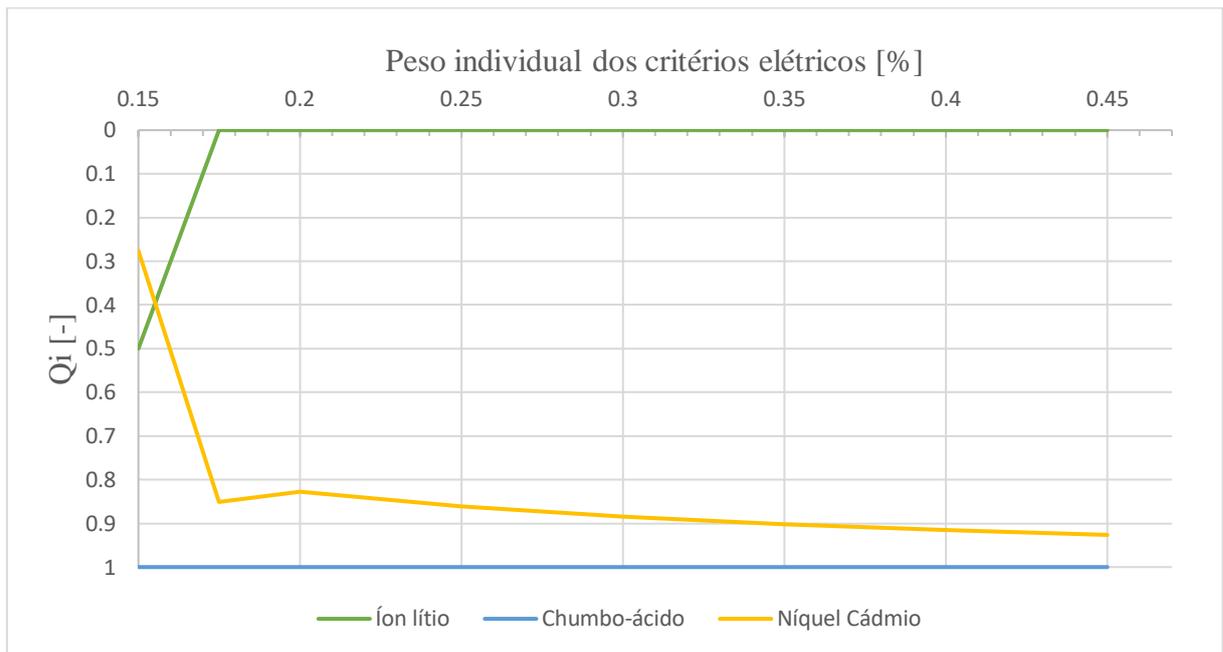


Figura 21 Progressão dos pesos para a tomada de decisão elétrica.

## 5 CONCLUSÕES

A utilização da ferramenta de decisão multi-objetivo Vikor traz resultados e reflexões que se colocam relevantes na área de armazenamento de energia. Cumprindo o objetivo do trabalho de encontrar uma indicação de tecnologia a ser utilizada em um cenário específico de aplicação para energia solar fotovoltaica conectada à rede, o método retorna que a bateria de Íon-Lítio se coloca como a melhor opção geral, e a melhor opção quando considerados dois cenários alternativos.

Este resultado vai de acordo com a dominância completa do mercado de baterias atualmente, utilizada desde eletrônicos portáteis até carros elétricos. Considerando o cenário onde o peso de decisão concentra-se em parâmetros ambientais, a bateria de íon-lítio também é indicada como a melhor alternativa.

Este resultado objetivo é um indicativo válido da superioridade tecnológica e da tendência de expansão do mercado do lítio, porém é de suma importância ressaltar que não estão sendo avaliados os efeitos do descarte nem as externalidades geopolíticas do aumento exponencial da extração deste recurso. Como apontado no capítulo 2.3, a metodologia de ACV é geralmente utilizada para comparar nas etapas de berço ao portão, pela facilidade de colocar os dados em um mesmo patamar de avaliação, porém de dificuldade elevada quando são consideradas as etapas de utilização e descarte.

Os aspectos ambientais oriundos da utilização de baterias em larga escala, e posteriormente seu descarte são intrinsecamente ligadas ao local e território onde estarão sendo aplicadas. Cada região apresenta suas próprias características e tem suas diferentes legislações, impedindo que materiais como lixo eletrônico acabe sendo despejado em aterros.

A utilização do método Vikor se coloca como um auxílio na tomada de decisão e consegue proporcionar um patamar onde cada alternativa é avaliada com seus prós e contras, dentro dos critérios utilizados.

Quanto aos resultados obtidos no cenário onde o custo tem o peso mais relevante, o destaque da bateria de Níquel-Cádmio é surpreendente, visto que sua presença no mercado tem reduzido progressivamente. A sua utilização se dá principalmente em ambientes de temperatura abaixo de zero. Um aspecto importante de mencionar é da dificuldade de encontrar fornecedores que trabalhem com a mesma, a fim de gerar orçamentos. Porém, ao avaliar-se o cenário global, onde o custo total do sistema, considerando que o número de substituições é menor, é compreensível a ferramenta indicar a sua utilização.

O crescente avanço da geração distribuída, com a inserção de cada vez mais fontes renováveis que apresentam imprevisibilidade e intermitência, além de diminuir a qualidade da energia da rede elétrica pela presença de harmônicos traz desafios para as operadoras da rede. A utilização de sistemas de armazenamento distribuídos juntamente aos sistemas residenciais é uma alternativa que apresenta uma série de vantagens como a redução da intermitência e a possibilidade de facilitar a gestão da demanda com a geração.

Após a aplicação da ferramenta de decisão, encontrou-se como indicação a utilização de baterias de Íon-Lítio. Baterias estas que apresentam um custo elevado e tornam-se difíceis de justificar para o consumidor que irá fazer a instalação. Dessa forma, uma sugestão para o planejamento estratégico da rede seria de gerar incentivos, sejam eles na forma de legislação ou fiscal que facilitem a instalação de sistemas de armazenamento de energia juntamente em sistemas de geração de energia solar, mitigando os efeitos adversos da mesma para a rede e trazendo um aproveitamento melhor da energia.

A crescente expansão do mercado de armazenamento de energia surge na onda das energias renováveis e muitas vezes acompanhada de um apelo ambiental. As mudanças climáticas causadas pela ação humana são uma realidade que estamos vivenciando e que cada vez mais se intensifica, trazendo a urgência de ações efetivas de mitigação destes efeitos. Porém, é importante avaliar-se até que ponto este apelo ambiental trará melhorias significativas ou se é apenas um interesse mercadológico de grandes grupos de produtores que priorizam o lucro acima de qualquer outra característica.

A avaliação ambiental é um processo difícil por envolver diversas etapas complexas e ser um estudo que abrange muitas áreas ao mesmo tempo, a metodologia da ACV se coloca como uma forma eficaz de avaliar globalmente os aspectos, quantificando os mesmos em uma unidade comparável. Mas mesmo uma avaliação rigorosa e multidisciplinar como essa é incapaz de incorporar todos as externalidades de um processo produtivo.

Unindo os dados obtidos por ACV, custos presentes e parâmetros elétricos realiza-se uma comparação técnico, econômica e ambiental das tecnologias aqui selecionadas. No mercado destacam-se, de forma generalizada, as baterias de íon-lítio, chumbo-ácido e níquel-cádmio, estas últimas que por sua vez tem se tornado mais raras devidos a suas limitações tecnológicas, apresentando efeito de memória e de perda de tensão máxima quando não carregada completamente em todos os ciclos de carga e descarga.

Cada tecnologia tem suas vantagens, e mesmo dentro de um grupo como a íon-lítio por exemplo, existem variações em seus componentes, especialmente no material catódico.

Para realizar uma comparação global entre estas tecnologias, agrupam-se os dados utilizando valores médios para cada uma.

Uma indicação de tecnologia que tem o melhor desempenho nestes parâmetros pode passar por vieses de autor e por preferências dos tomadores de decisão. A fim de aplicar uma metodologia que possa ser capaz de indicar uma tecnologia de forma imparcial, seleciona-se um método de decisão multi-objetivo, o Vikor.

Foram levantados os critérios individuais de cada alternativa, construída a matriz de decisão e obteve-se em primeiro momento a indicação da bateria de íon-lítio. Posteriormente, são simulados três cenários onde os pesos são variados a fim de priorizar algum critério de otimização. Quando priorizado o custo, obtém-se a indicação de utilização de Níquel-Cádmio. Já quando priorizam-se parâmetros ambientais e elétricos, a bateria de íon-lítio continua como a melhor alternativa.

Espera-se que futuros trabalhos continuem avaliando a possibilidade de armazenamento de energia a fim de melhorar a qualidade de operação da rede, reduzindo efeitos como intermitência e a formação da “curva do pato”.

Para trabalhos futuros sugere-se: aplicação de parâmetros de descarte e pós vida das baterias; Avaliação de diferentes pesos; Aplicação de outras metodologias de decisão como TOPSIS ou NSGA-II; testes para diferentes escalas de sistemas fotovoltaicos; simulação de impactos na rede elétrica; estudos de implementação de armazenamento conectado diretamente a rede e não na unidade consumidora.

## REFERÊNCIAS

ABE, Naoya; ISHIO, Junichiro; KATATANI, Teppei; MUKAI, Toshihiro. **Consumer Perceptions and Acceptance of PV Systems with Energy Storage**. Solar Energy Storage, [S.L.], p. 273-288, 2015. Elsevier. <http://dx.doi.org/10.1016/b978-0-12-409540-3.00012-8>.

ABISOLAR. **Half Cell polycrystalline PV modules**. 2020. Disponível em: <https://cdn.enfsolar.com/z/pp/7x2ro16u4to7u8bc/5216843736254c0eb6b3b5.pdf>. Acesso em: 03 ago. 2022.

ANCINES, Crissiane Alves; SOARES, Lucas Della Méa; RODRIGUES, Letícia Jenisch. **Avaliação Do Desempenho De Sistemas Fotovoltaicos Conectados À Rede Para Residências Com Baixo Consumo Mensal**. In: Congresso Brasileiro de Energia Solar-CBENS. 2018.

BJØRN A., HAUSCHILD M. Z., in **Life Cycle Assessment** (Eds: M. Z. Hauschild, R. K. Rosenbaum, S. I. Olsen), Springer International Publishing, New York 2018, pp. 605–631.

CARVALHO, Pedro Ninô de. **Valoração Das Externalidades Negativas Do Ciclo De Vida Do Etanol - O Caso Da Queima Da Palha Da Cana-De-Açúcar**. 2011. 163 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Planejamento Energético, Ufrj, Rio de Janeiro, 2011.

CONSOLI, F., ALLEN, D., BOUSTEAD, I., OUDE, N. DE FAVA, J., FRANKLIN, W., QUAY, B., PARRISH, R., PERRIMAN, R., POSTLETHWAITE, D., SEGUIN, J., VIGON, B., Eds.; **Guidelines for Life-Cycle Assessment: A ‘Code of Practice’**; 1st ed. SETAC-Europe: Brussels, Belgium, 1993.

CRISTÓBAL, J.R. San. **Multi-criteria decision-making in the selection of a renewable energy project in spain: the vikor method**. Renewable Energy, [S.L.], v. 36, n. 2, p. 498-502, fev. 2011. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.renene.2010.07.031>.

DHANUSHKODI, S. R.; MAHINPEY, N.; SRINIVASAN, A.; WILSON, M.. **Life Cycle Analysis of Fuel Cell Technology**. Journal Of Environmental Informatics, Vancouver, v. 0, n. 0, p. 00-00, 31 mar. 2008 doi:10.3808/jei.200800109

DIAS, Ricardo Machado. **Instalação de uma microrrede fotovoltaica conectada/isolada com estocagem e monitoramento com controle da carga alimentada**. 2015. 117 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade do Vale do Rio dos Sinos, São Leopoldo, 2015.

DING, Yulong; LI, Yongliang; LIU, Chuanping; SUN, Ze. Solar Electrical Energy Storage. **Solar Energy Storage**, [S.L.], p. 7-25, 2015. Elsevier. <http://dx.doi.org/10.1016/b978-0-12-409540-3.00002-5>.

DUCKSTEIN, L., OPRICOVIC, S., 1980. **Multiobjective optimization in river basin development**. Water Resources Research 16, 14–20.

DUNN, B.; KAMATH, H.; TARASCON, J.-M. **Electrical energy storage for the grid: A battery of choices**. Science 2011, 334, 928–935. <http://doi/10.1126/science.1212741>

DUNN, Jennifer B., JAMES, Christine, GAINES, Linda, GALLAGHER, Kevin, DAI, Qiang, and KELLY, Jarod C. **Material and Energy Flows in the Production of Cathode and Anode Materials for Lithium Ion Batteries**. United States: N. p., 2015. Web. doi:10.2172/1224963.

ECONOMIST, The. **A battle for supremacy in the lithium triangle**. 2017. Disponível em: <https://www.economist.com/the-americas/2017/06/15/a-battle-for-supremacy-in-the-lithium-triangle>. Acesso em: 11 nov. 2022.

ELKIND E., HELLER P., LAMM T., **Sustainable Drive, Sustainable Supply: Priorities to Improve the Electric Vehicle Battery Supply Chain**, Center for Law, Energy & the Environment (CLEE) UC Berkeley School of Law, Berkeley, CA 2020.

FIGUEREDO, R. S.; BET, I. **Sistemas fotovoltaicos com armazenamento de energia para operação isolada e conectada à rede**. VI Congresso Brasileiro de Energia Solar. (VI CBENS), (04 a 07 de abril de 2016), 2016.

FINKBEINER, M., INABA, A., TAN, R. **The New International Standards for Life Cycle Assessment: ISO 14040 and ISO 14044**. Int J Life Cycle Assessment 11, 80–85 (2006). <https://doi.org/10.1065/lca2006.02.002>

GAINES, Linda. **The future of automotive lithium-ion battery recycling: charting a sustainable course**. Sustainable Materials And Technologies, [S.L.], v. 1-2, p. 2-7, dez. 2014. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.susmat.2014.10.001>.

GRAOSQUE, Alexandre de Assis Brasil. **Uso De Estocagem Em Sistemas Fotovoltaicos Conectados À Rede Com Microinversores Para Redução Da Intermitência**. 2017. 77 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Unisinos, São Leopoldo, 2017.

GUIMARÃES, A. P. C. RIBEIRO, C. M. BASTOS, L. E. G. VALENTE, L. C. G. SILVA, P. C. d. OLIVEIRA, R. X. **Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos**. Rio de Janeiro: CEPEL - CRESESB, 2014. Disponível em: [http://www.cresesb.cepel.br/publicacoes/download/Manual\\_de\\_Engenharia\\_FV\\_2014.pdf](http://www.cresesb.cepel.br/publicacoes/download/Manual_de_Engenharia_FV_2014.pdf)

GUINÉE, J. B., R. HEIJUNGS, G. HUPPES, A. ZAMAGNI, P. MASONI, R. BUONAMICI, T. EKVALL AND T. RYDBERG (2011). **Life cycle assessment: past, present and future**. *Environ. Sci. Technol.* 45 (1) (2011) 90–96.

GUTSCH, Moritz; LEKER, Jens. Global warming potential of lithium-ion battery energy storage systems: a review. **Journal Of Energy Storage**, [S.L.], v. 52, p. 105030, ago. 2022. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.est.2022.105030>.

HASSAN, M. U.; SAHA, S.; HAQUE, M.e.. A framework for the performance evaluation of household rooftop solar battery systems. **International Journal Of Electrical Power & Energy Systems**, [S.L.], v. 125, p. 106446, fev. 2021. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijepes.2020.106446>

HAVES, Mario Luiz de Sá Carneiro; DIAS, Coralie Heinis; CARDOSO, Daniel Kroeling Rodrigues. **Recursos Minerais De Minas Gerais – LÍTIO**. Belo Horizonte: Ufmg, 2018. 21 p.

HIREMATH, Mitavachan; DERENDORF, Karen; VOGT, Thomas. Comparative Life Cycle Assessment of Battery Storage Systems for Stationary Applications. **Environmental Science & Technology**, [S.L.], v. 49, n. 8, p. 4825-4833, 3 abr. 2015. American Chemical Society (ACS). <http://dx.doi.org/10.1021/es504572q>.

HOU, Qingchun; ZHANG, Ning; DU, Ershun; MIAO, Miao; PENG, Fei; KANG, Chongqing. Probabilistic duck curve in high PV penetration power system: concept, modeling, and empirical analysis in china. **Applied Energy**, [S.L.], v. 242, p. 205-215, maio 2019. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.03.067>.

HUGGINS, Robert. **Energy Storage: fundamentals, materials and applications**. 2. ed. Switzerland: Springer Cham, 2016. 509 p. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/978-3-319-21239-5>. Acesso em: 25 mar. 2022.

IGOGO T., SANDOR D., MAYYAS A., ENGEL-COX J., **Supply Chain of Raw Materials Used in the Manufacturing of Light-Duty Vehicle Lithium-Ion Batteries**, Clean Energy Manufacturing Analysis Center, Golden, CO 2019.

ISLAM, Md. Rabiul. **Advances in Solar Photovoltaic Power Plants**. Berlin: Springer Berlin, 2016. 317 p. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/978-3-662-50521-2>. Acesso em: 01 fev. 2023.

JASPER, Friedrich B.; SPÄTHER, Jana; BAUMANN, Manuel; PETERS, Jens F.; RUHLAND, Janna; WEIL, Marcel. Life cycle assessment (LCA) of a battery home storage system based on primary data. **Journal Of Cleaner Production**, [S.L.], v. 366, p. 132899, set. 2022. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.132899>.

KREUZBERG, Fernanda; RODRIGUES, Flávio; JESKE, Marlon; RODRIGUES JUNIOR, Moacir Manoel. **Métodos TOPSIS e VIKOR na verificação da resource advantage theory em empresas têxteis brasileiras**. Contabilidad y Negocios, [S.L.], v. 12, n. 23, p. 96-110, 2017. Sistema de Bibliotecas PUCP. <http://dx.doi.org/10.18800/contabilidad.201701.007>.

KWON, Ochang; LEE, Seongjun; PARK, Jungsoo. A numerical study to compensate duck curve of ESS integrated gas turbine system with reused-battery. **Journal Of Energy Storage**, [S.L.], v. 55, p. 105422, nov. 2022. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.est.2022.105422>.

Lai, X.; Yao, J.; Jin, C.; Feng, X.; Wang, H.; Xu, C.; Zheng, Y. **A Review of Lithium-Ion Battery Failure Hazards: Test Standards, Accident Analysis, and Safety Suggestions**. Batteries 2022, 8, 248. <https://doi.org/10.3390/batteries8110248>

LI, Malan; LIU, Junsheng; HAN, Wei. **Recycling and management of waste lead-acid batteries: a mini-review**. Waste Management & Research: The Journal for a Sustainable Circular Economy, [S.L.], v. 34, n. 4, p. 298-306, 3 mar. 2016. SAGE Publications. <http://dx.doi.org/10.1177/0734242x16633773>.

LI, Matthew; LU, Jun; CHEN, Zhongwei; AMINE, Khalil. **30 Years of Lithium-Ion Batteries**. **Advanced Materials**, [S.L.], v. 30, n. 33, p. 1800561, 14 jun. 2018. Wiley. <http://dx.doi.org/10.1002/adma.201800561>.

LUQUE, A.; HEGEDUS, S. (Ee.) **Handbook of Photovoltaic Science and Engineering**. 2. ed. United Kingdom: Wiley, 2011.

MACGILL, Iain; WATT, Muriel. Economics of Solar PV Systems with Storage, in Main Grid and Mini-Grid Settings. **Solar Energy Storage**, [S.L.], p. 225-244, 2015. Elsevier. <http://dx.doi.org/10.1016/b978-0-12-409540-3.00010-4>.

MARCUZZO, Rafael; SILBERG, Timothy Robert; MALDONADO, Mauricio Uriona. **Growth of Residential Solar Energy in Brazil: a system dynamics approach**. Ssrn, [S.L.], maio 2023. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.4455823>.

MARDANI, Abbas; ZAVADSKAS, Edmundas; GOVINDAN, Kannan; SENIN, Aslan Amat; JUSOH, Ahmad. **VIKOR Technique: a systematic review of the state of the art literature on methodologies and applications**. Sustainability, [S.L.], v. 8, n. 1, p. 37, 4 jan. 2016. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/su8010037>.

MATHWORKS. MATLAB. Disponível em:  
<https://www.mathworks.com/products/matlab.html>. Acesso em: 10 maio 2023.

MATTHEW A. Pellow, HANJIRO Ambrose, DUSTIN Mulvaney, RICK Betita, SHAW Stephanie, **Research gaps in environmental life cycle assessments of lithium ion batteries for grid-scale stationary energy storage systems: End-of-life options and other issues**, Sustainable Materials and Technologies, Volume 23,2020, <https://doi.org/10.1016/j.susmat.2019.e00120>.

MELCHOR-MARTÍNEZ, Elda M.; MACIAS-GARBETT, Rodrigo; MALACARA-BECERRA, Alonso; IQBAL, Hafiz M.N.; SOSA-HERNÁNDEZ, Juan Eduardo; PARRA-SALDÍVAR, Roberto. **Environmental impact of emerging contaminants from battery waste: a mini review**. Case Studies In Chemical And Environmental Engineering, [S.L.], v. 3, p. 100104, jun. 2021. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cscee.2021.100104>.

MELIDEO, D., ORTIZ CEBOLLA, R. and WEIDNER, E., **Life cycle assessment of Hydrogen and Fuel Cell Technologies: Inventory of work performed by projects funded under FCH JU**, EUR 29986 EN, Publications Office of the European Union, Luxembourg, 2020, ISBN 978-92-76-13185-4, doi:10.2760/434747, JRC116599.

NAIR, N.-K. C.; GARIMELLA, N. **Battery energy storage systems: Assessment for smallscale renewable energy integration**. Energy and Buildings, n. 42, 2010. p. 2124-2130.

OPRICOVIC, Serafim; TZENG, Gwo-Hshiung. **Compromise solution by MCDM methods: a comparative analysis of vikor and topsis**. European Journal Of Operational Research, [S.L.], v. 156, n. 2, p. 445-455, jul. 2004. Elsevier BV. [http://dx.doi.org/10.1016/s0377-2217\(03\)00020-1](http://dx.doi.org/10.1016/s0377-2217(03)00020-1).

PAOLELLA, Andrea; VIJH, Ashok; GUERFI, Abdelbast; ZAGHIB, Karim; FAURE, Cyril. **Review—Li-Ion Photo-Batteries: challenges and opportunities**. Journal Of The Electrochemical Society, [S.L.], v. 167, n. 12, p. 120545, 9 set. 2020. The Electrochemical Society. <http://dx.doi.org/10.1149/1945-7111/abb178>.

PEREIRA, Enio Bueno; MARTINS, Fernando Ramos; GONÇALVES, André Rodrigues; COSTA, Rodrigo Santos; LIMA, Francisco J. Lopes de; RÜTHER, Ricardo; ABREU, Samuel Luna de; TIEPOLO, Gerson Máximo; PEREIRA, Silvia Vitorino; SOUZA, ; Jefferson Gonçalves de. **Atlas brasileiro de energia solar**. 2. ed. São José dos Campos: Inpe, 2017.

PETERS J. F. M. BAUMANN, B. ZIMMERMANN, J. BRAUN, M. WEIL, **Renewable Sustainable Energy Rev.** 2017, 67, 491.

PORZIO, J., SCOWN, C. D., **Life-Cycle Assessment Considerations for Batteries and Battery Materials**. *Adv. Energy Mater.* 2021, 11, 2100771. <https://doi.org/10.1002/aenm.202100771>

PROSTAR. **GPD90-12: lead-acid battery datasheet**. Lead-Acid Battery datasheet. Disponível em: <https://drive.google.com/file/d/1LbWSAFv9-t3D2JT9sHshGggWoc5wsYn8/view>. Acesso em: 11 jul. 2022.

RAHMAN, F.; BASEER, M.A.; REHMAN, S.. **Assessment of Electricity Storage Systems**. *Solar Energy Storage*, [S.L.], p. 63-114, 2015. Elsevier. <http://dx.doi.org/10.1016/b978-0-12-409540-3.00004-9>.

RODRIGUES, Bernardo Salgado; PADULA, Raphael. **Geopolítica Do Lítio No Século XXI. Austral: Revista Brasileira de Estratégia e Relações Internacionais**, Porto Alegre, v. 6, n. 11, p. 197-220, out. 2012.

SAHA, S.; HASSAN, M.u.; LIEBRICH, F.; MENDIS, N.; ISLAM, S.N.; MAHMUD, M.A.; HAQUE, M.e.. A comparative study of commonly used batteries in household rooftop solar battery systems based on test data of commercial batteries. **Sustainable Energy Technologies And Assessments**, [S.L.], v. 52, p. 102252, ago. 2022. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.seta.2022.102252>.

SALAMEH, Tareq; KUMAR, Polamarasetty P.; OLABI, A.G.; OBAIDEEN, Khaled; SAYED, Enas Taha; MAGHRABIE, Hussein M.; ABDELKAREEM, Mohammad Ali. **Best battery storage technologies of solar photovoltaic systems for desalination plant using the results of multi optimization algorithms and sustainable development goals**. *Journal Of Energy Storage*, [S.L.], v. 55, p. 105312, nov. 2022. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.est.2022.105312>.

SALKUTI, Surender Reddy. **Electrochemical batteries for smart grid applications**. *Int. J. Electr. Comput. Eng*, v. 11, n. 3, p. 1849-1856, 2021.

SANTOS, Thays Aparecida de Abreu. **Determinação De Perfil De Curva De Carga Residencial Baseado Num Sistema-Fuzzy**. 2016. 68 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Estadual de São Paulo, Ilha Solteira, 2016.

SCHALLER R. R., **IEEE Spectrum** 1997, 34, 52.

SHAQSI, Ahmed Zayed Al; SOPIAN, Kamaruzzaman; AL-HINAI, Amer. **Review of energy storage services, applications, limitations, and benefits**. *Energy Reports*, [S.L.], v. 6, p. 288-306, dez. 2020. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.egy.2020.07.028>.

SHOTO. **SDA10-48100**: lithium-ion battery system. Lithium-ion battery system. 2020. Disponível em: <https://www.enfsolar.com/pv/storage-system-datasheet/6209>. Acesso em: 02 ago. 2022.

SIKSNELYTE, Indre; ZAVADSKAS, Edmundas; STREIMIKIENE, Dalia; SHARMA, Deepak. **An Overview of Multi-Criteria Decision-Making Methods in Dealing with Sustainable Energy Development Issues**. Energies, [S.L.], v. 11, n. 10, p. 2754, 15 out. 2018. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/en11102754>.

SOARES, GUILHERME FLEURY W.; VIEIRA, LEONARDO DOS SANTOS R.; GALDINO, MARCO ANTONIO.; LOPES, FRANCISCO DA C.; **Análise de Baterias de íon-Lítio para Sistemas de Geração Suprindo Pequenas Comunidades Isoladas**. Eletroevolução – Sistemas de Potência. ISSN 1806-1877. pp. 62-68. no 66. Março de 2012;

SØRENSEN, Bent. **Solar Energy Storage**. London: Elsevier, 2015. 391 p.

SULLIVAN J.L., L. GAINES, **Status of life cycle inventories for batteries**, Energy Conversion and Management, Volume 58, 2012, Pages 134-148, ISSN 0196-8904, <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2012.01.001>.

SUNICA. **Sunica.plus Ni-Cd Batteries: solution for off-grid solar systems**. Solution for off-grid solar systems. 2019. Disponível em: [https://www.norwatt.es/files/products/pdf/batteries\\_nicd\\_saft\\_sunica\\_plus\\_en.pdf](https://www.norwatt.es/files/products/pdf/batteries_nicd_saft_sunica_plus_en.pdf). Acesso em: 07 ago. 2022.

TIWARI, G.N.; TIWARI, Arvind; SHYAM. **Handbook of Solar Energy: theory, analysis and applications**. Singapore: Springer Nature, 2016. 774 p.

UDEANI, Chukwudi; JARAMILLO, Paulina; WILLIAMS, Nathaniel J.. A techno-economic and environmental assessment of residential rooftop solar - Battery systems in grid-connected households in Lagos, Nigeria. **Development Engineering**, [S.L.], v. 6, p. 100069, 2021. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.deveng.2021.100069>.

USMAN, Muhammad; RADULESCU, Magdalena. **Examining the role of nuclear and renewable energy in reducing carbon footprint: does the role of technological innovation really create some difference?**. Science Of The Total Environment, [S.L.], v. 841, p. 156662, out. 2022. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.156662>.

ZIEGLER, Micah S., MUELLER, Joshua M., PEREIRA, Gonçalo D., SONG, Juhyun, FERRARA, Marco, CHIANG, Yet-Ming, and TRANCIK, Jessika E. **Storage Requirements and Costs of Shaping Renewable Energy Toward Grid Decarbonization**. United States: N. p., 2019. Web. doi:10.1016/j.joule.2019.06.012.

## 6 ANEXOS

### 6.1 CÓDIGO VIKOR, EM R.

```

#VIKOR (Visekriterijumska Optimizacija Kompromisno Resenje)
#Authors: Opricovic e Tseng (2004)
#Code created by: Eduardo HTC
#Code Adapted by: Lenon AC
#-----INFORMACOES DE ENTRADA-----
#arquivo de dados
#vikor_data = as.data.frame(vikor_data)
#definicao dos pesos de cada variavel -> a soma dos pesos deve ser = 1
vikor_w = c(1/8,1/8,1/4,1/4,1/8,1/8)
bnfts = c('-', '-', '-', '-', '+', '+')
#peso VIKOR (valor entre 0 e 1)
#v = (nrow(vikor_data)+1)/(nrow(vikor_data)*2)
v = 0.5
data_file = dados_lenon
vikor_data = data_file[,c('x1','x2','x3','x4','x5','x6')]
#-----PROGRAMA EM ACAO-----
#valores elevados ao quadrado
sqrd_values = matrix(nrow = nrow(vikor_data), ncol = ncol(vikor_data))
for (i in 1:nrow(vikor_data)){
  for (j in 1:ncol(vikor_data)){
    sqrd_values[i,j] = vikor_data[i,j]^2
  }
}
#soma dos valores
summ = vector(length = ncol(vikor_data))
for (j in 1:ncol(sqrd_values)){
  summ[j] = sum(sqrd_values[,j])
}
#NORMALIZACAO DOS DADOS
vikor_data_scaled = matrix(nrow = nrow(vikor_data), ncol = ncol(vikor_data))
for (i in 1:nrow(vikor_data)){
  for (j in 1:ncol(vikor_data)){
    vikor_data_scaled[i,j] = vikor_data[i,j]/sqrt(summ[j])
  }
}
#achando o maximo e minimo de cada caso
best_value = vector(length = ncol(vikor_data_scaled))
worst_value = vector(length = ncol(vikor_data_scaled))
for (j in 1:ncol(vikor_data_scaled)){
  if (bnfts[j] == '+'){
    best_value[j] = max(vikor_data_scaled[,j])
    worst_value[j] = min(vikor_data_scaled[,j])
  }else if (bnfts[j] == '-'){
    best_value[j] = min(vikor_data_scaled[,j])
    worst_value[j] = max(vikor_data_scaled[,j])
  }
}

```

```

}
}
# UTILITY MEASURE (S+ AND S-)
#+---++-+
u_matrix = matrix(nrow = nrow(vikor_data_scaled), ncol = ncol(vikor_data_scaled))
for (i in 1:nrow(vikor_data_scaled)){
for (j in 1:ncol(vikor_data_scaled))
u_matrix[i,j] = vikor_w[j]*((best_value[j]-vikor_data_scaled[i,j])/(best_value[j]-
worst_value[j]))
}
#Si calculation
Si = vector(length = nrow(u_matrix))
for (i in 1:nrow(u_matrix)){
Si[i] = sum(u_matrix[i,])
}
Si_max = max(Si)
Si_min = min(Si)

#Ri calculation
Ri = vector(length = nrow(u_matrix))
for (i in 1:nrow(u_matrix)){
Ri[i] = max(u_matrix[i,])
}
Ri_max = max(Ri)
Ri_min = min(Ri)

#Qi calculation
Qi = vector(length = nrow(u_matrix))
for (i in 1:nrow(u_matrix)){
Qi[i] = (v*((Si[i]-Si_min)/(Si_max-Si_min)))+((1-v)*((Ri[i]-Ri_min)/(Ri_max-Ri_min)))
}
Qi_final_results = rbind(Qi,rank(Qi))
Qi_final_results = t(Qi_final_results)
# Results
DP = vector(length = length(solution))
for (i in 1:length(solution)){
DP[i] = vikor_data[solution[i],2]/vikor_data[solution[i],1]
}
print(DP)
solution = which.min(Qi_final_results)
print(data_file[solution,])

plot(vikor_data, main = 'VIKOR decision')
points(x = max(vikor_data[,1]), y = min(vikor_data[,2]), col = 'green', pch = 19)
points(x = min(vikor_data[,1]), y = max(vikor_data[,2]), col = 'red', pch = 19)
points(x = vikor_data[which(Qi_final_results[,2]==1),1], y =
vikor_data[which(Qi_final_results[,2]==1),2], col = 'blue', pch = 19)

vikor_decision = write.csv(data_file[solution,], file = 'vikor_decision.csv')

```

## 6.2 ORÇAMENTO COMPLETO

## KIT FOTOVOLTAICO 1,65 kWp

DESCRIÇÃO	QTDE	Preço un. sem impostos e frete	Preço total sem impostos e frete	Preço total com impostos e frete	
MÓDULO FOTOVOLTAICO RISEN - RSM144-9-550W - 1500V - F35MM	3	R\$ 663.55	R\$ 1,990.65	R\$ 2,193.55	Módulo FV
INVERSOR FOTOVOLTAICO DEYE - SUN-3K-G - 3KW - 1MPPT - 220V - MONO - C/ MONIT	1	R\$ 1,520.64	R\$ 1,520.64	R\$ 1,675.64	Inversor String ON Grid - CC/CA
Sices Solar 2.0 Perfil Ceramic Rooftop 1,57 metros	6	R\$ 26.65	R\$ 159.90	R\$ 176.20	Estrutura metálica para telhado cerâmico
Sices Solar 2.0 Junção Ceramic Rooftop	4	R\$ 6.12	R\$ 24.48	R\$ 26.98	
Terminal Final Sices 2.0 35mm	4	R\$ 2.77	R\$ 11.08	R\$ 12.21	
Terminal Intermediário Sices 2.0 35mm	4	R\$ 2.69	R\$ 10.76	R\$ 11.86	
SICES SOLAR PARAFUSO CABECA MARTELO M10 28/15	8	R\$ 0.99	R\$ 7.92	R\$ 8.73	
SICES SOLAR PORCA M10 INOX A2	8	R\$ 0.34	R\$ 2.72	R\$ 3.00	
SICES SOLAR 2.0 - GANCHO TUBULAR DE ALUMÍNIO	8	R\$ 17.37	R\$ 138.96	R\$ 153.12	Cabos CC
CABO SOLAR 6MM-1000V_PRETO_NXS_PRY_BAL	30	R\$ 3.19	R\$ 95.70	R\$ 105.45	
CABO SOLAR 6MM-1000V_VERMELHO_NXS_PRY_BAL	30	R\$ 3.19	R\$ 95.70	R\$ 105.45	Conectores MC4
CONECTORES FEMEA/ MACHO WEID_CABUR_TE_MC4_ou compativel	2	R\$ 4.03	R\$ 8.06	R\$ 8.88	
			R\$ 4,066.57	R\$ 4,481.07	
<b>Sistema 1</b>					
Controlador de Carga MPPT XTRA 4210N	1	R\$ 667.97	R\$ 667.97	R\$ 729.00	Controlador de carga com MPPT
Bateria Chumbo-Ácido	6	R\$ 472.50	R\$ 2,835.00	R\$ 3,150.00	Baterias
				R\$ 7,631.07	
<b>Sistema 2</b>					
Controlador de Carga MPPT XTRA 4210N	1	R\$ 667.97	R\$ 667.97	R\$ 729.00	Controlador de carga com MPPT
Bateria íon-lítio	2	R\$ 15,390.00	R\$ 30,780.00	R\$ 32,400.00	Baterias
				R\$ 36,881.07	
<b>Sistema 3</b>					
Controlador de Carga MPPT XTRA 4210N	1	R\$ 667.97	R\$ 667.97	R\$ 729.00	Controlador de carga com MPPT
Bateria Níquel-Cádmio	5	390	1950	2145	Baterias
				R\$ 6,626.07	