



**UNIVERSIDADE ESTADUAL DO PIAUÍ CENTRO DE TECNOLOGIA  
E URBANISMO**

**CURSO BACHARELADO EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

**ADRIAN WILLY PITOMBEIRA DA SILVA**

**DESENVOLVIMENTO DE BANCADA DE ESTUDO DE  
ARMAZENAMENTO DE ENERGIA POR MEIO DE  
BATERIAS CHUMBO ÁCIDO E ÍONS DE LÍTIO COM  
SUPRIMENTO ENERGÉTICO FOTOVOLTAICO**

**TERESINA**

**2025**

**ADRIAN WILLY PITOMBEIRA DA SILVA**

**DESENVOLVIMENTO DE BANCADA DE ESTUDO DE  
ARMAZENAMENTO DE ENERGIA POR MEIO DE  
BATERIAS CHUMBO ÁCIDO E ÍONS DE LÍTIO COM  
SUPRIMENTO ENERGÉTICO FOTOVOLTAICO**

Trabalho de Dissertação submetido à banca  
examinadora designada pela Universidade estadual do  
Piauí, apresentado como parte dos requisitos para  
obtenção do diploma de Bacharelado em Engenharia  
Elétrica.

Orientador: Prof. Juan Gonçalves de Aguiar

**TERESINA**

**2025**

## ATA DE DEFESA DE TCC

Aos 28 dias de NOVEMBRO de 2025, realizou-se, no Núcleo de Formação e Pesquisa em Energias Renováveis do Piauí - NUFPERPI, a defesa do Trabalho de Conclusão de Curso do aluno **ADRIAN WILLY PITOMBEIRA DA SILVA**, do Curso de Bacharelado em Engenharia Elétrica da Universidade Estadual do Piauí – UESPI, intitulado **DESENVOLVIMENTO DE BANCADA DE ESTUDO DE ARMAZENAMENTO DE ENERGIA POR MEIO DE BATERIAS CHUMBO ÁCIDO E ÍONS DE LÍTIO COM SUPRIMENTO ENERGÉTICO FOTOVOLTAICO**, realizado sob a orientação do Profº. Me. **JUAN GONÇALVES DE AGUIAR GONÇALVES** tendo como banca avaliadora, o Profº. Esp. **MARCELO HELVÉCIO OMENA DE ALBUQUERQUE MÁXIMO** e o Eng. **HALYSSON CARVALHO SILVA JUNIOR**, que após o término da arguição atribuíram o conceito **Aprovado**, nota **8,8** pelo seu TCC. Não tendo nada mais a constar, assinam esta ata o professor orientador, os componentes da banca e o acadêmico que realizou a defesa de seu TCC.

Documento assinado digitalmente  
 JUAN DE AGUIAR GONCALVES  
Data: 29/11/2025 08:21:15-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

---

Orientador: Me. Juan de Aguiar Gonçalves



Assinado de forma digital por  
MARCELO HELVECIO OMENA DE  
ALBUQUERQUE MAXIMO:93271859353  
Dados: 2025.11.28 22:00:47 -03'00'

---

Examinador 1: Esp. Marcelo Helvécio Omena de Albuquerque Máximo

Documento assinado digitalmente  
 HALYSSON CARVALHO SILVA JUNIOR  
Data: 29/11/2025 06:56:52-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

---

Examinador 2: Eng. Halysson Carvalho Silva Junior

Documento assinado digitalmente  
 ADRIAN WILLY PITOMBEIRA DA SILVA  
Data: 28/11/2025 21:39:40-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

---

Acadêmico: Adrian Willy Pitombeira da Silva

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço primeiramente a Deus pela dádiva da vida, e por ter-me amparado e me dado forças para eu superar todos os obstáculos que encontrei ao longo do curso.

Agradeço a minha esposa Suzana do Nascimento Oliveira que sustentou minha mão para que fosse possível estar aqui, obrigado pelo seu companheirismo e compreensão. A minha mãe Maria Isabel Pitombeira da Silva por todos os ensinamentos, valores, amor e compreensão que foi importante para que hoje esteja sendo realizado esse sonho e ao meu irmão que mesmo indiretamente me ajudaram.

Aos meus colegas de turma que me ajudaram ao longo do curso.

Aos demais amigos, familiares que mesmo diretamente ou indiretamente me ajudaram muito obrigado.

E o professor Mestre Juan Gonçalves de Aguiar que cedeu seu tempo em determinadas horas de divertimento com sua família parou para me ajudar na realização deste trabalho.

Obrigado por contribuir com sua paciência e dedicação, pois sua ajuda foi fundamental para que esse trabalho fosse desenvolvido.

Aos Professores da UESPI que até aqui me repassaram seus discernimentos e por me proporcionarem que tudo isso fosse possível.

"A ciência é, portanto, uma perversão de si mesma, a menos que tenha como fim último, melhorar a humanidade." (Nikola Tesla)

## RESUMO

Segundo o relatório EU Market Outlook for Solar Power 2022-2026, da SolarPower Europe, a Europa instalou 41,4 GW de nova capacidade fotovoltaica em 2022, um crescimento de 47 % em relação ao ano anterior (SOLARPOWER EUROPE, 2022). Assim como na Europa o Brasil possui um enorme potencial para produção de energia fotovoltaica. Neste trabalho foi desenvolvido uma bancada didática para que várias grandezas relacionadas a energia fotovoltaica sejam analisadas, como: tensão, corrente gerada e carga da bateria. O material de apoio produzido poderá ser utilizado em diversas disciplinas ministradas nos Laboratórios do Curso de Bacharelado em Engenharia Elétrica da Universidade Estadual do Piauí, para ilustrar melhor o funcionamento desse tipo de energia, bem como no desenvolvimento de outras pesquisas. Sendo possível deslocar o protótipo desenvolvido para demonstrações em escolas, feiras de ciência etc. a fim divulgar esta tecnologia.

Palavras-chave: Bancada Didática, Sistema Fotovoltaico, Sistema off-grid

## ABSTRACT

According to the EU Market Outlook for Solar Power 2022–2026 report by SolarPower Europe, Europe installed 41.4 GW of new photovoltaic capacity in 2022, representing a 47% growth compared to the previous year (SOLARPOWER EUROPE, 2022). Similar to Europe, Brazil has enormous potential for photovoltaic energy generation. In this work, a didactic bench was developed to analyze several parameters related to photovoltaic energy, such as voltage, generated current, and battery charge. The supporting material produced can be used in various courses offered in the laboratories of the Bachelor's Degree in Electrical Engineering at the State University of Piauí, to better illustrate the operation of this type of energy system, as well as to support further research development. The developed prototype can also be transported for demonstrations in schools, science fairs, and other events in order to promote this technology.

Keywords: Didactic Bench; Photovoltaic System; Off-Grid System.

## LISTA DE FIGURAS

|                                                                                                                           |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 4.1 – Estruturas moleculares dos semicondutores .....                                                              | 18 |
| Figura 4.2 – Estrutura de montagem de um módulo fotovoltaico .....                                                        | 19 |
| Figura 4.3 – ECP 3024 Controlador de Carga PWM .....                                                                      | 21 |
| Figura 4.4 – Controlador PWM .....                                                                                        | 21 |
| Figura 4.5 – Operação do módulo com o controlador MPPT .....                                                              | 22 |
| Figura 4.6 – Esquema eletroquímico de uma célula descarregando .....                                                      | 25 |
| Figura 4.7 – Potência específica em função da energia específica .....                                                    | 27 |
| Figura 4.8 – Desenho esquemático de uma bateria chumbo-ácido .....                                                        | 29 |
| Figura 4.9 – Desgaste de uma bateria chumbo-ácido em função da profundidade de descarga .....                             | 30 |
| Figura 4.10 – Desgaste de uma bateria chumbo-ácido em função da temperatura .....                                         | 30 |
| Figura 4.11 – Esquema dos processos eletroquímicos que ocorrem na bateria íon-lítio .....                                 | 31 |
| Figura 4.12 – Porcentagem de vida útil versus temperatura de operação de uma bateria de chumbo-ácido .....                | 33 |
| Figura 4.13 – Modos de operação ideais em um regime de carga .....                                                        | 35 |
| Figura 4.14 – Influência de diferentes DoDs na vida útil das baterias de chumbo-ácido .....                               | 37 |
| Figura 4.15 – Capacidade total usada em diferentes atividades para um período de um mês .....                             | 39 |
| Figura 4.16 – Comportamento da tensão elétrica de uma bateria de chumbo-ácido de 12 V na descarga .....                   | 40 |
| Figura 4.17 – Comportamento da tensão elétrica de uma bateria de íon-lítio de 12,8 V nos ciclos de carga e descarga ..... | 41 |
| Figura 5.1 – Painel solar fotovoltaico Sinosolar SA30-36P (30 Wp) .....                                                   | 45 |
| Figura 5.2 – ECP 3024 Controlador de Carga PWM .....                                                                      | 46 |
| Figura 5.3 – Especificações técnicas do controlador de carga PWM ECP 3024 .....                                           | 47 |
| Figura 5.4 – Bateria Heliar 60 Ah HGR60DD/HGR60DE .....                                                                   | 49 |
| Figura 5.5 – Esquema de ligação das células no pack de baterias íon-lítio .....                                           | 51 |
| Figura 5.6 – Pack de bateria íon-lítio BAP Energy 18650 .....                                                             | 51 |
| Figura 5.7 – Inversor off-grid Jay Energy 12 Vcc/127 Vca (600 W) .....                                                    | 54 |
| Figura 5.8 – Disjuntor CC LETOP bipolar 63 A .....                                                                        | 55 |
| Figura 5.9 – Lâmpada Avant bivolt branca (14 W) .....                                                                     | 55 |
| Figura 5.10 – Protótipo montado .....                                                                                     | 56 |
| Figura 5.11 – Controlador de carga PWM ECP 3024 em funcionamento .....                                                    | 57 |
| Figura 5.12 – Esquema de montagem do sistema .....                                                                        | 58 |

## **LISTA DE TABELAS**

|                                                                                               |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabela 5.1 – Especificações elétricas do pack de bateria íon-lítio BAP Energy 18650 ....      | 51 |
| Tabela 5.2 – Resultados do ensaio de funcionamento em regime nominal .....                    | 60 |
| Tabela 5.3 – Resultados do ensaio de capacidade parcial .....                                 | 60 |
| Tabela 5.4 – Resultados do ensaio de proteções elétricas e segurança operacional .....        | 61 |
| Tabela 5.5 – Resultados do ensaio de continuidade de serviço e estabilidade operacional ..... | 62 |

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

- AC** – Corrente Alternada  
**Ah** – Ampère-hora  
**ANEEL** – Agência Nacional de Energia Elétrica  
**BMS** – Battery Management System (Sistema de Gerenciamento de Baterias)  
**CA** – Corrente Alternada  
**CC** – Corrente Contínua  
**DoD** – Depth of Discharge (Profundidade de Descarga)  
**ECP** – Controlador de Carga PWM Intelbras  
**EPI** – Equipamento de Proteção Individual  
**GW** – Gigawatt  
**HFE** – Teste de transistor  
**HSP** – Horas de Sol Pleno  
**IEA** – International Energy Agency  
**Imp** – Corrente de máxima potência  
**Isc** – Corrente de curto-círcito  
**LiCoO<sub>2</sub>** – Óxido de Lítio e Cobalto  
**LiFePO<sub>4</sub>** – Lítio Ferro-Fosfato  
**MPPT** – Maximum Power Point Tracking  
**NBR** – Norma Brasileira  
**Pb** – Chumbo  
**PbSO<sub>4</sub>** – Sulfato de Chumbo  
**PWM** – Pulse Width Modulation  
**SOC** – State of Charge (Estado de Carga)  
**VOC** – Tensão de circuito aberto  
**Vmp** – Tensão de máxima potência  
**VRLA** – Valve Regulated Lead Acid  
**Wh** – Watt-hora  
**Wp** – Watt-pico

# Sumário

|                                                                            |           |
|----------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>1. INTRODUÇÃO .....</b>                                                 | <b>13</b> |
| <b>2. JUSTIFICATIVA.....</b>                                               | <b>15</b> |
| <b>3. OBJETIVOS .....</b>                                                  | <b>16</b> |
| 3.1 GERAL.....                                                             | 16        |
| 3.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS.....                                             | 16        |
| <b>4. REFERENCIAL TEÓRICO .....</b>                                        | <b>17</b> |
| 4.1 ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA .....                                       | 17        |
| 4.1.2 MÓDULO FOTOVOLTAICO .....                                            | 18        |
| 4.2 CONTROLADOR DE CARGA.....                                              | 20        |
| 4.2.1 PRINCIPAIS TIPOS DE CONTROLADOR DE CARGA .....                       | 21        |
| 4.2.2 CONTROLADOR ELETRÔNICO COM PWM.....                                  | 22        |
| 4.2.3 CONTROLADOR MPPT.....                                                | 22        |
| 4.3 INVERSOR .....                                                         | 23        |
| 4.4 BATERIAS.....                                                          | 24        |
| 4.4.1 O QUE É UMA BATERIA .....                                            | 24        |
| 4.4.2 TIPOS DE BATERIAS .....                                              | 26        |
| 4.4.3 BATERIAS CHUMBO-ÁCIDO .....                                          | 27        |
| 4.4.4 BATERIAS DE ÍON-LÍTIO.....                                           | 31        |
| 4.4.5 TEMPERATURA DE OPERAÇÃO .....                                        | 34        |
| 4.4.6 REGIME DE CARGA E DESCARGA.....                                      | 35        |
| 4.4.7 NÚMERO DE CICLOS .....                                               | 38        |
| 4.5 CAPACIDADE ENERGÉTICA DAS BATERIAS .....                               | 40        |
| 4.5.1 PRINCIPAIS PARÂMETROS .....                                          | 41        |
| 4.6 SEGURANÇA NO USO DE ACUMULADORES.....                                  | 44        |
| <b>5 METODOLOGIA ADOTADA.....</b>                                          | <b>47</b> |
| 5.1 SELEÇÃO DOS COMPONENTES DO SISTEMA .....                               | 47        |
| 5.1.2 PAINEL SOLAR 30 W .....                                              | 48        |
| 5.1.3 ECP 3024 CONTROLADOR DE CARGA PWM .....                              | 48        |
| 5.1.4 BATERIA HELIAR 60AH – HGR60DD/ HGR60DE – ORIGINAL DE MONTADORA ..... | 51        |

|           |                                                                      |           |
|-----------|----------------------------------------------------------------------|-----------|
| 5.1.5     | PACK DE BATERIA ÍON-LÍTIO .....                                      | 53        |
| 5.1.6     | CABOS CONDUTORES DE ENERGIA .....                                    | 55        |
| 5.1.7     | INVERSOR .....                                                       | 56        |
| 5.1.8     | DISJUNTOR CC.....                                                    | 57        |
| 5.1.9     | CARGA (LÂMPADAS) .....                                               | 58        |
| 5.2       | MONTAGEM E FUNCIONAMENTO DO SISTEMA .....                            | 59        |
| 5.3       | TESTE DAS BATERIAS E OPERAÇÃO DO SISTEMA .....                       | 62        |
| 5.3.1     | ENSAIOS.....                                                         | 62        |
| 5.3.1.1   | ENSAIO DE FUNCIONAMENTO EM REGIME NOMINAL .....                      | 62        |
| 5.3.1.2   | ENSAIO DE CAPACIDADE PARCIAL .....                                   | 63        |
| 5.3.1.3   | ENSAIO DE PROTEÇÕES ELÉTRICAS E SEGURANÇA OPERACIONAL .....          | 63        |
| 5.3.1.4   | ENSAIO DE CONTINUIDADE DE SERVIÇO E ESTABILIDADE<br>OPERACIONAL..... | 64        |
| <b>6.</b> | <b>CONCLUSÃO .....</b>                                               | <b>66</b> |
|           | <b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>                               | <b>68</b> |

## 1. INTRODUÇÃO

O avanço tecnológico aliado à crescente preocupação ambiental tem impulsionado a busca por fontes de energia renováveis que reduzam a dependência dos combustíveis fósseis e minimizem os impactos ambientais. Dentre as alternativas disponíveis, a energia solar fotovoltaica tem se destacado por sua abundância, versatilidade e pelo fato de ser uma fonte limpa, renovável e de baixo impacto ambiental (CRESESB, 2014).

O Brasil, por sua localização geográfica privilegiada, apresenta elevado potencial para a geração de energia solar, com índices de radiação superiores à média mundial, o que favorece a difusão e a adoção desse recurso energético em diferentes escalas de aplicação (PEREIRA et al., 2017).

Nos últimos anos, o setor fotovoltaico brasileiro tem registrado um crescimento expressivo. De acordo com a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL, 2020), a geração distribuída por sistemas solares já representa uma das principais formas de expansão da matriz elétrica nacional.

Tal expansão reforça a relevância da energia solar como instrumento de diversificação da matriz energética, de promoção da sustentabilidade e de redução das emissões de gases de efeito estufa (GOLDEMBERG; LUCON, 2007).

Apesar de suas vantagens, a energia solar apresenta a limitação da intermitência, uma vez que depende diretamente da radiação solar, sujeita a variações climáticas e ao ciclo dia-noite. Essa característica impõe desafios à confiabilidade do fornecimento energético e evidencia a necessidade de sistemas de armazenamento que possam suprir a demanda nos momentos em que a geração não é suficiente (PEREIRA et al., 2017; IEA, 2020). Nesse sentido, a adoção de sistemas de armazenamento de energia é condição essencial para aumentar a segurança operacional e garantir o pleno aproveitamento da geração fotovoltaica.

As baterias desempenham papel estratégico nesse cenário, permitindo acumular a energia excedente produzida durante períodos de maior insolação para posterior utilização, seja em horários noturnos, em dias nublados ou em situações de pico de demanda. Entre as diversas tecnologias de armazenamento disponíveis, destacam-se duas categorias principais: as baterias de chumbo-ácido e as baterias de íons de lítio.

As baterias de chumbo-ácido são as mais tradicionais e ainda amplamente utilizadas

devido ao seu baixo custo e à maturidade tecnológica. Entretanto, apresentam limitações relacionadas ao menor número de ciclos de carga e descarga, elevada taxa de autodescarga e impacto ambiental devido ao uso do chumbo (RAND et al., 2004).

Já as baterias de íons de lítio destacam-se pela elevada densidade energética, maior vida útil e eficiência superior, sendo amplamente aplicadas em sistemas portáteis, veículos elétricos e também em sistemas estacionários de energia (NAKAMURA; YAMAMOTO, 2019).

Nesse contexto, a criação de uma bancada experimental voltada ao estudo dessas tecnologias, integrada a um sistema de suprimento energético fotovoltaico, constitui uma iniciativa de grande relevância acadêmica e tecnológica. Essa bancada permite simular condições reais de operação, realizar medições práticas de desempenho, identificar vantagens e limitações de cada tecnologia e, com isso, gerar informações que podem apoiar decisões em projetos de geração distribuída, micro redes e sistemas isolados.

Além da contribuição técnica, iniciativas como esta fortalecem a formação de profissionais capacitados para lidar com os desafios da transição energética, ampliam o espaço de pesquisa aplicada em instituições de ensino e colaboram para a disseminação de soluções inovadoras e sustentáveis no setor elétrico (GOLDEMBERG; LUCON, 2007; IEA, 2020).

Assim, este Trabalho tem como objetivo desenvolver e analisar uma bancada de estudo de armazenamento de energia, contemplando as tecnologias de baterias chumbo-ácido e íons de lítio alimentadas por energia solar fotovoltaica. Busca-se, além de comparar o desempenho e as limitações de cada tecnologia, contribuir para a formação acadêmica, fomentar a pesquisa científica e difundir soluções mais eficientes e sustentáveis no campo das energias renováveis.

## 2. JUSTIFICATIVA

O crescente avanço tecnológico e a necessidade de diversificação da matriz energética mundial têm impulsionado o desenvolvimento de sistemas baseados em fontes renováveis de energia (IEA, 2023). Dentre essas fontes, a energia solar fotovoltaica destaca-se por sua ampla disponibilidade, sustentabilidade e pela capacidade de reduzir a dependência dos combustíveis fósseis (TIEPOLO et al., 2018).

No contexto brasileiro, o elevado potencial de radiação solar representa uma vantagem competitiva significativa, tornando a energia fotovoltaica uma alternativa estratégica para atender à crescente demanda energética com menor impacto ambiental (PEREIRA et al., 2017; ANEEL, 2022).

Entretanto, a característica intermitente da geração solar ainda constitui um desafio técnico relevante, uma vez que a produção de energia é diretamente influenciada por fatores climáticos e pelo ciclo diário de insolação (CRESESB, 2014). Essa limitação reforça a importância dos sistemas de armazenamento de energia, que permitem o aproveitamento contínuo da energia gerada, garantindo maior estabilidade, confiabilidade e eficiência operacional (NREL, 2020).

Nesse cenário, o estudo e a comparação de diferentes tecnologias de armazenamento, como as baterias de chumbo-ácido e íons de lítio, tornam-se essenciais para compreender suas características, vantagens e limitações em aplicações fotovoltaicas (LINDEN; REDDY, 2011).

A criação de uma bancada experimental de armazenamento de energia possibilita a análise prática e o monitoramento de parâmetros reais de desempenho, como tensão, corrente, estado de carga e profundidade de descarga, oferecendo dados que subsidiam decisões técnicas e econômicas em projetos de microgeração distribuída e sistemas isolados (IEC, 2013; CANAL SOLAR, 2023).

Além do aspecto técnico, este trabalho se justifica pela sua relevância acadêmica e social, ao proporcionar um ambiente de aprendizado prático, incentivar a pesquisa aplicada e contribuir para a formação de profissionais capacitados a atuar em um setor em constante expansão, alinhado às diretrizes regulatórias e normativas nacionais (ABNT, 2019; ANEEL, 2012).

Dessa forma, a proposta deste estudo visa não apenas o avanço do conhecimento científico e tecnológico, mas também o fortalecimento do compromisso com a sustentabilidade e com a transição energética no Brasil.

### 3. OBJETIVOS

#### 3.1 GERAL

O estabelecimento de objetivos claros é fundamental para orientar o desenvolvimento de qualquer pesquisa científica, permitindo definir os limites do estudo, a metodologia a ser utilizada e os resultados esperados. No contexto do presente trabalho, os objetivos são direcionados ao desenvolvimento de uma bancada experimental de armazenamento de energia, utilizando diferentes tecnologias de baterias integradas a um sistema fotovoltaico. Essa abordagem permite analisar de forma prática e comparativa o desempenho das baterias em condições reais de operação, contribuindo para a otimização de sistemas de geração distribuída e micro redes elétricas.

#### 3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Para o alcance do objetivo geral, foram estabelecidos os seguintes objetivos específicos:

- Projetar e implementar a bancada experimental:  
integrando o sistema fotovoltaico às diferentes tecnologias de baterias, de forma a permitir a realização de medições práticas;
- Avaliar o desempenho das baterias:  
considerar parâmetros como eficiência, capacidade de armazenamento, número de ciclos de carga e descarga e vida útil;
- Contribuir para a formação acadêmica e científica:  
promovendo o desenvolvimento de competências em energias renováveis e oferecendo subsídios para futuras pesquisas na área de armazenamento de energia elétrica.

A definição desses objetivos permite que o estudo seja conduzido de forma sistemática, garantindo que os resultados obtidos sejam consistentes, replicáveis e aplicáveis a diferentes contextos práticos. Além disso, os objetivos estabelecem um parâmetro claro de avaliação do sucesso da pesquisa, tanto no aspecto técnico quanto no educacional e científico, reforçando a importância do trabalho para o avanço da área de energias renováveis no Brasil.

## 4. REFERENCIAL TEÓRICO

### 4.1 ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA

O funcionamento das células solares se baseia no efeito fotovoltaico que foi observado pela primeira vez em 1839, por Edmond Becquerel. Ele verificou que placas metálicas, de platina ou prata, mergulhadas num eletrólito, produziam uma pequena diferença de potencial quando expostas à luz.

O avanço dessa tecnologia dependeu de desenvolvimentos no campo científico e, principalmente, da explicação do efeito fotoelétrico por Albert Einstein em 1905 (VALLERA; BRITO, 2006).

A energia que uma onda pode transmitir, está associada à sua frequência. A equação 1 é conhecida como equação de Planck-Einstein, que mostra a relação entre a frequência e energia de uma onda eletromagnética (VILLALVA, 2015).

$$E = h \times f \quad (1)$$

Onde,

$E$  = Energia da onda (expressa em joules[J] ou elétron-volt[eV])

$f$  = Frequência expressa em Hertz [Hz].

$h$  = Constante de Planck, que vale aproximadamente  $6,636 \cdot 10^{-34}$ [J.s].

O efeito fotovoltaico se dá em materiais semicondutores, que conduzem eletricidade de forma mais eficiente do que os materiais isolantes e menos do que os condutores. Eles se caracterizam pela presença de uma faixa de valência e de outra totalmente vazia. Entre essas duas faixas se encontra a faixa proibida ou hiato energético. A largura dessa faixa determina se o material é semicondutor ou não.

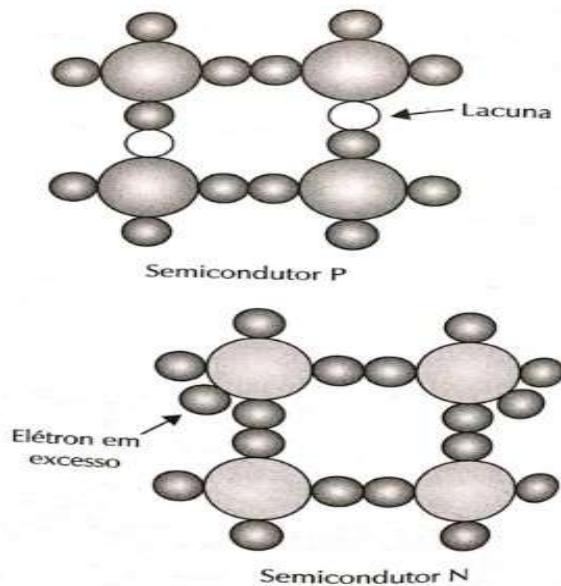
Para materiais semicondutores, essa faixa é de 1 eV (BRAGA, 2008). A energia solar chega por meio de fótons, que é um quantum da radiação eletromagnética, se a energia contida nessa partícula for superior a esse hiato energético (gap), o material pode excitar elétrons da

faixa de valência para a faixa de condução.

As camadas semicondutoras da célula podem ser fabricadas com vários materiais diferentes, sendo o mais comum o silício. Cerca de 95% de todas as células fotovoltaicas fabricadas no mundo são de silício (VILLALVA, 2015).

Uma célula fotovoltaica, consiste na junção de duas camadas de material semicondutor, uma do tipo P e outra do tipo N. Quando é dopado com Boro, carregado positivamente, o silício do tipo P apresenta uma falta de um elétron denominado tipo P e outra camada de material semicondutor carregado negativamente, chamado tipo N, com excesso de elétrons, dopada com fósforo.

Figura 4.1 – Estruturas moleculares dos semicondutores



Fonte: (VILLALVA, 2015)

#### 4.1.2 MÓDULO FOTOVOLTAICO

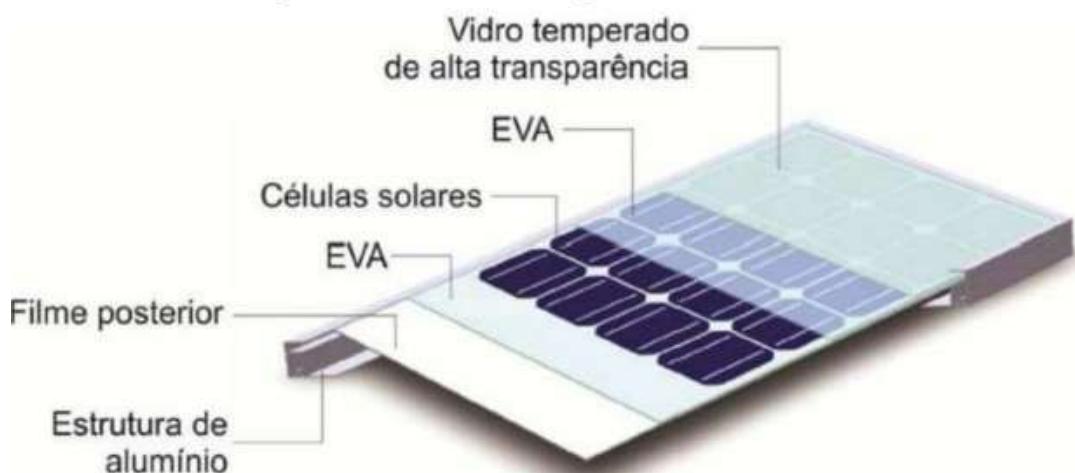
A geração de eletricidade por meio de células fotovoltaicas depende de materiais semicondutores capazes de produzir o efeito fotovoltaico. Quando agrupadas e encapsuladas, essas células formam o módulo fotovoltaico, a unidade comercial essencial para sistemas de

energia solar. O arranjo das células, seja em série ou paralelo, varia conforme a tensão e a corrente determinadas pelo fabricante.

No mercado, os módulos mais comuns possuem 60 células conectadas em série e geralmente há uma garantia de dez anos contra defeitos de fabricação e uma durabilidade mínima de 80% do rendimento ao longo de 25 anos.

A Figura 4.2 ilustra os componentes de um módulo fotovoltaico composto por células de silício cristalino.

Figura 4.2. Estrutura de montagem de um módulo fotovoltaico.



(Fonte: Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaico, 2014)

Abaixo as principais propriedades elétricas que caracterizam as células e módulos fotovoltaicos, também demonstradas na Figura 4.2.

- Tensão do circuito aberto (Voc): é a máxima tensão que uma célula fotovoltaica pode produzir, representa a tensão entre os terminais de uma célula fotovoltaica quando não há corrente elétrica circulando.
- Corrente de curto-círculo (Isc): é a máxima corrente que se pode obter e é medida quando a tensão entre os terminais da célula é nula.
- Tensão de máxima potência (Vmp): é a tensão referente ao ponto de máxima geração de energia do painel.
- Corrente de máxima potência (Imp): é a corrente referente ao ponto de máxima

geração de energia do painel.

- Potência Nominal (P<sub>mp</sub>): é o valor de máxima potência que o módulo fotovoltaico pode fornecer em condições padrão de ensaio. É o produto entre a tensão de máxima potência (V<sub>mp</sub>) e a corrente de máxima potência (I<sub>mp</sub>).
- Eficiência (h): É a razão entre a potência elétrica gerada e a potência de energia solar incidente sobre o módulo.

## 4.2 CONTROLADOR DE CARGA

Os sistemas fotovoltaicos que utilizam baterias necessitam, obrigatoriamente, do emprego de um controlador de carga. Esse dispositivo realiza a correta interface entre os módulos fotovoltaicos e o banco de baterias, regulando a tensão e a corrente elétrica para evitar tanto a sobrecarga quanto a descarga profunda dos acumuladores, fatores que reduzem significativamente sua vida útil (CANAL SOLAR, 2023).

Em situações de elevada insolação e baixa demanda de consumo, a bateria tende a atingir níveis de tensão acima do recomendado, o que poderia comprometer sua durabilidade. Nesses casos, o controlador de carga atua reduzindo ou interrompendo a corrente proveniente dos módulos, protegendo o sistema.

Da mesma forma, em períodos de baixa geração ou alta demanda, o dispositivo evita a descarga completa da bateria, desligando-a quando a tensão atinge valores críticos (NEOSOLAR, 2024).

Assim, é imprescindível que os componentes do sistema sejam conectados ao controlador de carga, sendo incorreto o acoplamento direto do módulo fotovoltaico à bateria, pois isso comprometeria a segurança e a eficiência do sistema.

Figura 4.3– ECP 3024 Controlador de Carga PWM



Fonte: ([www.intelbras.com.br](http://www.intelbras.com.br))

#### 4.2.1 PRINCIPAIS TIPOS DE CONTROLADOR DE CARGA

O mercado de sistemas fotovoltaicos dispõe de diferentes tipos de controladores de carga, que variam quanto às funções, tecnologia empregada e custo. Entre os modelos mais utilizados destacam-se os controladores do tipo PWM (Pulse Width Modulation) e MPPT (Maximum Power Point Tracking), cuja escolha deve considerar as necessidades do projeto e as especificações técnicas do sistema.

De modo geral, os controladores de carga apresentam características essenciais para garantir a segurança e a eficiência do sistema, tais como:

- Chaveamento eletrônico, responsável pelo controle da transferência de energia entre os módulos e as baterias;
- Proteção contra inversão de polaridade, prevenindo danos aos componentes em casos de ligações incorretas;
- Desconexão automática da carga, recurso que protege a bateria contra descargas

profundas ou uso excessivo.

Essas funções são fundamentais para prolongar a vida útil dos acumuladores e assegurar o desempenho confiável do sistema fotovoltaico.

#### 4.2.2 CONTROLADOR ELETRÔNICO COM PWM

Os controladores usam a tecnologia PWM, existem transistores e um circuito de controle que fazem o gerenciamento preciso da corrente que é enviada para a bateria, respeitando o perfil de carga em três estágios: carga pesada, absorção e flutuação.

A Figura 4.4, mostra o esquema simplificado de controlador PWM.

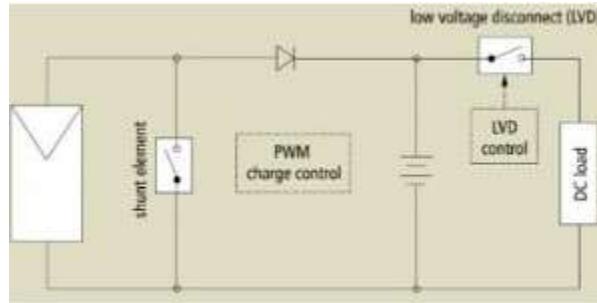


Figura 4.4– Controlador PWM

Fonte: (MOREIRA, 2016)

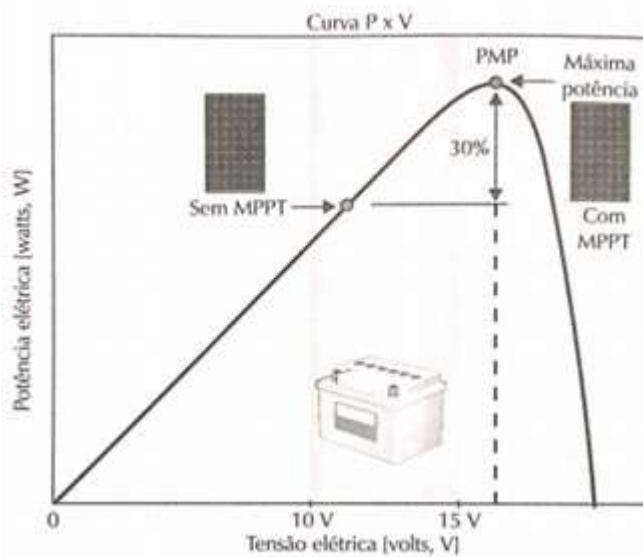
#### 4.2.3 CONTROLADOR MPPT

O controlador MPPT (Maximum Power Point Tracking) garante que o valor máximo de potência é extraído dos módulos fotovoltaicos (SINGH, 2013). O sistema realiza uma varredura na curva I x V do sistema de geração e determina a tensão de operação ótima, em que o sistema vai operar em máxima potência. Segundo Villalva 2015, os controladores MPPT sejam mais caros, acabam sendo vantajosos, pois permitem um ganho de 30% na produção de energia.

Os outros controladores operam com valores de tensão próximos aos da bateria, ou seja,

entre 10V e 15V,

Figura 4.5– Operação do módulo com o controlador MPPT



Fonte: (VILLALVA, 2015)

### 4.3 INVERSOR

A maior parte dos eletrodomésticos conhecidos é construída para trabalhar com a rede elétrica de tensão alternadas disponíveis nas residências, tensão de 127V ou 220V, por exemplo, e frequência de 60 Hertz (VILLALVA, 2015).

Os módulos fotovoltaicos geram tensão continua (tensão CC) e para realizar a conversão em tensão alternada (tensão CA) são utilizados inversores, que além de transformar o sinal saída em uma onda senoidal ou quadrada, elevam a tensão para os valores residenciais

Atualmente, existem três tipos de inversores utilizados em sistemas autônomos: inversor de onda quadrada, de onda senoidal modificada e de onda senoidal pura. Segundo Villalva 2015, “as ondas semi quadradas possuem menos distorção harmônica do que as ondas totalmente quadradas, porém, ambas são muito distorcidas quando comparadas com uma senoidal pura”. Assim, esses tipos de inversores são indicados para aparelhos que não sejam sensíveis aos ruídos, como eletrodomésticos e lâmpadas.

Já em processos que dependem da qualidade do sinal, são utilizados os inversores de onda senoidal pura, sendo que esses possuem um valor agregado maior, por serem mais complexos.

## 4.4 BATERIAS

### 4.4.1 O QUE É UMA BATERIA

Os primeiros registros de baterias datam de meados de 1750, na Europa, embora os dispositivos daquela época fossem grandes e pouco portáteis. Somente em 1896 surgiu a primeira bateria com dimensões padronizadas: a célula seca Columbia, composta por zinco e carbono.

Com o aumento da produção, o design das baterias evoluiu para o formato cilíndrico, o que permitiu o desenvolvimento de modelos menores, como a célula AA, introduzida no mercado em 1907 (BENTO, 2022).

De forma simplificada, uma bateria pode ser definida como um dispositivo capaz de converter energia química em energia elétrica por meio de reações eletroquímicas de oxidação e redução. Durante esse processo, os elétrons liberados na oxidação são transferidos para outra substância que sofre redução, completando o circuito elétrico (MICHELINI, 2017).

O termo “bateria”, comumente utilizado, refere-se na verdade a um conjunto de células eletroquímicas conectadas entre si. Cada célula constitui a unidade fundamental de uma bateria e é formada basicamente por três componentes: o ânodo, o cátodo e o eletrólito (LINDEN; REDDY, 2001).

O ânodo, também chamado de eletrodo negativo, tem a função de fornecer elétrons ao circuito externo e, normalmente, é composto por um metal que sofre oxidação durante a reação eletroquímica. O cátodo, por sua vez, é o eletrodo positivo responsável por receber os elétrons provenientes do circuito, sendo o local onde ocorrem as reações de redução.

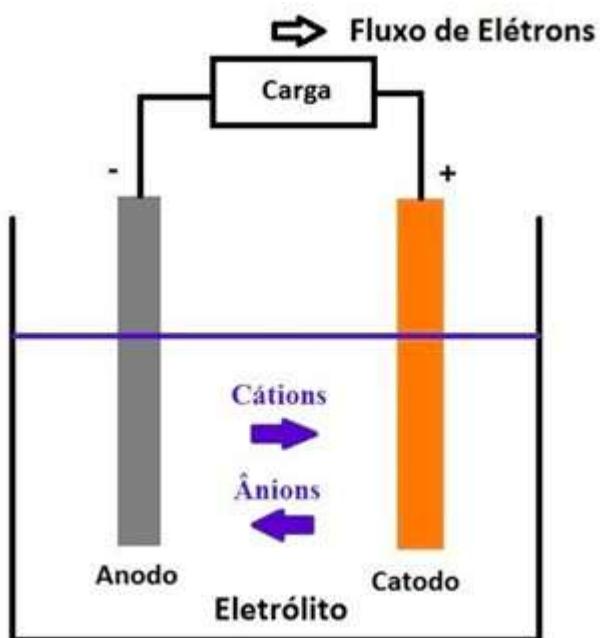
O eletrólito atua como meio condutor iônico, permitindo a movimentação de íons entre os eletrodos, sem conduzir elétrons, o que evita a autodescarga das células (MICHELINI, 2017).

A escolha dos materiais que compõem o ânodo e o cátodo é fundamental para o desempenho da bateria. Os melhores materiais são aqueles que apresentam baixa densidade, alta tensão e grande capacidade de armazenamento de energia.

Entretanto, nem sempre essas combinações são viáveis, pois podem apresentar limitações como reações indesejadas com outros componentes, custos elevados ou perdas de eficiência (LINDEN; REDDY, 2001).

A Figura 4.6 apresenta um modelo esquemático de uma célula eletroquímica em processo de descarga, ilustrando o fluxo de elétrons do ânodo para o cátodo, representando a conversão de energia química em elétrica.

Figura 4.6– Esquema eletroquímico de uma célula descarregando.



Fonte: MICHELINI (2017, p.16)

Durante o processo de recarga de uma célula recarregável, ocorre a inversão do fluxo da corrente elétrica, o que provoca a oxidação no eletrodo positivo e a redução no eletrodo negativo. Nesse momento, o ânodo passa a atuar como eletrodo positivo e o cátodo torna-se o eletrodo negativo (ATAIDE, 2018).

As baterias podem ser classificadas de diferentes formas, sendo as principais categorias as baterias primárias e baterias secundárias.

Neste trabalho, serão abordadas as células secundárias, devido à sua capacidade de recarga e relevância para aplicações fotovoltaicas.

As baterias primárias, também conhecidas popularmente como pilhas, não podem ser recarregadas após o uso. Isso ocorre porque suas reações eletroquímicas são irreversíveis, ou seja, os reagentes químicos são totalmente transformados em produtos durante o processo de descarga, impossibilitando o retorno à condição inicial (ATAIDE, 2018). Entre suas principais

vantagens estão a longa vida útil, a alta densidade de energia e a facilidade de utilização.

Já as baterias secundárias são dispositivos recarregáveis, amplamente empregadas em sistemas automotivos, aeronáuticos, equipamentos eletrônicos portáteis e veículos elétricos ou híbridos. Após a descarga, essas baterias podem retornar ao seu estado original quando submetidas à passagem de corrente elétrica no sentido inverso ao da descarga. São também conhecidas como baterias de armazenamento ou acumuladores, devido à capacidade de armazenar e liberar energia elétrica de forma controlada.

Essas baterias apresentam como principais características a alta densidade de potência, elevada taxa de descarga, curva de descarga estável e bom desempenho em baixas temperaturas, o que as torna ideais para aplicações que exigem confiabilidade e eficiência (LINDEN; REDDY, 2001).

#### 4.4.2 TIPOS DE BATERIAS

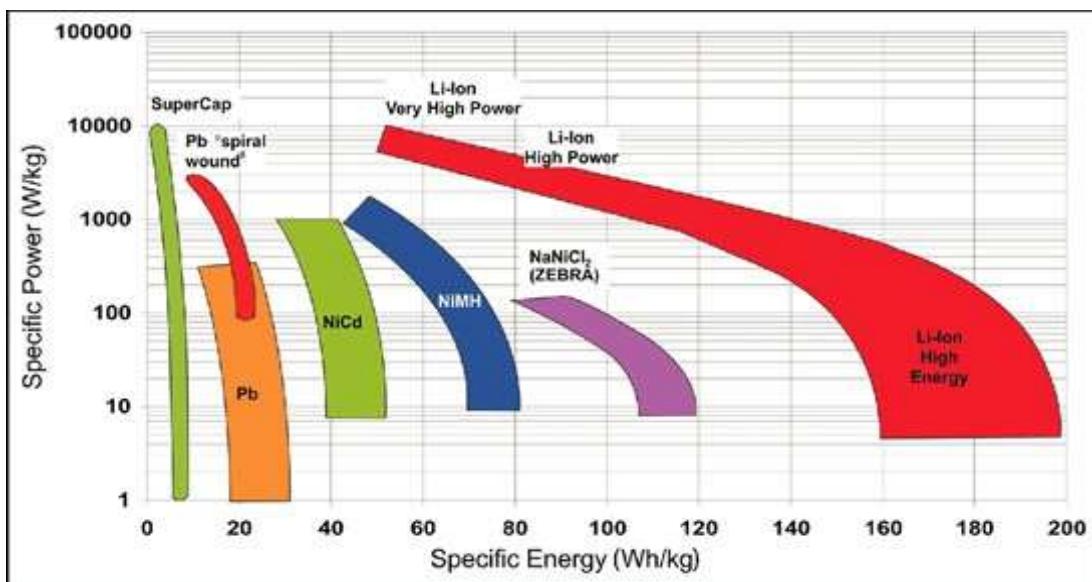
As baterias constituem um elemento essencial na sociedade moderna, fornecendo energia portátil para uma ampla variedade de aplicações — desde pequenos dispositivos, como relógios e equipamentos eletrônicos portáteis, até sistemas complexos, como veículos elétricos e sistemas de armazenamento de energia. Diante dessa relevância, o aperfeiçoamento e a evolução das tecnologias de armazenamento tornaram-se constantes, buscando aprimorar o desempenho, a eficiência e a sustentabilidade desses dispositivos.

As baterias apresentam diferentes formatos, tamanhos e composições químicas, que variam conforme o tipo de aplicação e os materiais empregados em sua fabricação. A classificação dos tipos de baterias está, portanto, diretamente relacionada à sua constituição química, a qual determina características específicas de método de carga, capacidade de descarga, densidade de energia e retenção de carga (POSSA; PASSOLD, 2006).

A Figura 4.7 ilustra a relação entre a potência específica e a energia específica dos principais materiais utilizados na fabricação de baterias, evidenciando as possibilidades de desenvolvimento de dispositivos com maior densidade de energia

por unidade de massa, característica essencial para o avanço das tecnologias de armazenamento.

Figura 4.7– Potência específica em função da energia específica.



Fonte: FULTON et al.(2009)

De acordo com Bento (2022), os diversos tipos de baterias disponíveis no mercado apresentam características específicas que as tornam adequadas para diferentes finalidades.

Em aplicações que exigem alta densidade de energia em curto intervalo de tempo, como dispositivos portáteis e veículos elétricos, as baterias de íon-lítio se destacam por seu elevado desempenho e eficiência.

Por outro lado, em sistemas que necessitam de fornecimento contínuo de energia por longos períodos, as baterias de chumbo-ácido são as mais indicadas, devido à sua confiabilidade, durabilidade e custo relativamente reduzido.

#### 4.4.3 BATERIAS CHUMBO-ÁCIDO

As baterias de chumbo-ácido são classificadas como baterias secundárias, ou seja, dispositivos eletroquímicos cujos reagentes podem ser reconvertidos em seus estados originais por meio da passagem de uma corrente elétrica reversa. Essa característica permite que essas baterias sejam recarregadas diversas vezes, conferindo-lhes um maior ciclo de vida útil em comparação às baterias primárias (COELHO, 2017).

Durante o processo de descarga, ocorre uma reação exotérmica que libera energia

elétrica. Em determinadas condições, no entanto, podem ocorrer reações endotérmicas, quando uma fonte de energia externa inverte o sentido da reação, restaurando os reagentes originais. Esse comportamento é fundamental para o funcionamento das baterias recarregáveis, nas quais a energia elétrica é convertida novamente em energia química (COELHO, 2017).

A geração de corrente elétrica em uma bateria decorre da diferença de potencial elétrico entre os eletrodos, que provoca a movimentação de elétrons de níveis de energia mais elevados para níveis mais baixos. A energia liberada nesse processo é convertida em eletricidade. Todos esses fenômenos ocorrem no interior das células eletroquímicas, compostas por eletrodos e eletrólitos, onde se realizam as reações de oxidação e redução.

Nas células galvânicas de chumbo-ácido, a energia química resultante das reações redox é transformada em energia elétrica. Os eletrodos são os locais onde essas reações ocorrem: a oxidação se dá no ânodo e a redução no cátodo (COELHO, 2017).

Durante a descarga, o dióxido de chumbo ( $PbO_2$ ) presente na placa positiva reage formando sulfato de chumbo ( $PbSO_4$ ), enquanto o chumbo metálico ( $Pb$ ) da placa negativa também é convertido em  $PbSO_4$ . A reação global é uma reação de duplo sulfato, que não requer o uso de ponte salina, pois ambos os reagentes e produtos são sólidos, o que resulta em baixa resistência interna e altas correntes elétricas, ideais para aplicações automotivas e de energia (COELHO, 2017).

As baterias de 12 V mais comuns são compostas por seis células ligadas em série, cada uma com tensão aproximada de 2 V. Cada célula contém duas placas de chumbo, sendo o ânodo formado por chumbo esponjoso e o cátodo por dióxido de chumbo ( $PbO_2$ ), ambos imersos em uma solução eletrolítica de ácido sulfúrico diluído em água. Separadores de fibra de vidro são inseridos entre as placas para evitar curtos-circuitos, garantindo segurança e estabilidade operacional (BASTOS, 2013).

Figura 4.8 - Desenho esquemático de uma bateria chumbo/ácido.



Fonte: UTFPR, 2021.

Durante o processo de descarga, as placas da bateria de chumbo-ácido tornam-se quimicamente semelhantes, o que resulta no enfraquecimento do eletrólito o ácido sulfúrico e na redução gradual da tensão elétrica. À medida que a descarga avança, a diferença de potencial entre os terminais diminui até atingir um ponto em que a bateria não é mais capaz de fornecer energia útil.

A recarga da bateria ocorre pela aplicação de uma corrente elétrica reversa, a qual restaura a diferença química entre as placas. Esse processo reverte as reações químicas de descarga, regenerando o chumbo metálico (Pb) no ânodo e o dióxido de chumbo (PbO<sub>2</sub>) no cátodo, restabelecendo a concentração original do ácido sulfúrico e tornando a bateria novamente apta a fornecer energia elétrica (BASTOS, 2013).

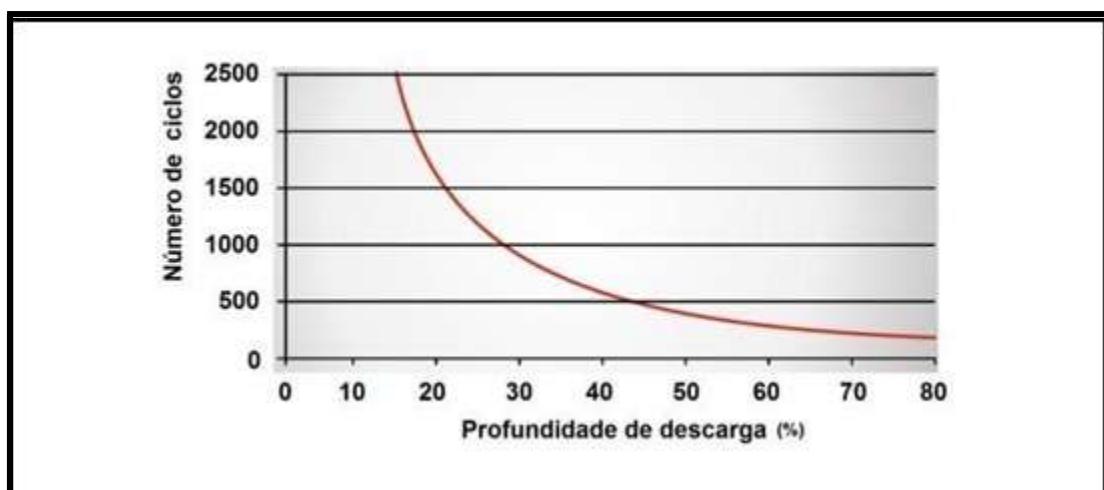
Esse comportamento de alternância entre descarga e recarga é denominado capacidade cíclica da bateria. Apesar dessa capacidade de regeneração, as baterias de chumbo-ácido possuem vida útil limitada, variando entre 2 e 5 anos, devido ao desgaste natural dos materiais e às transformações químicas recorrentes durante os ciclos de carga e descarga (BASTOS, 2013).

Os principais parâmetros de desempenho dessas baterias dependem de fatores como o número de ciclos de recarga, a profundidade de descarga (DoD) e a temperatura de operação.

Em geral, quanto maior a profundidade de descarga, menor será a quantidade de ciclos que a bateria suporta antes de perder sua capacidade útil (NATARAJ et al., 2015).

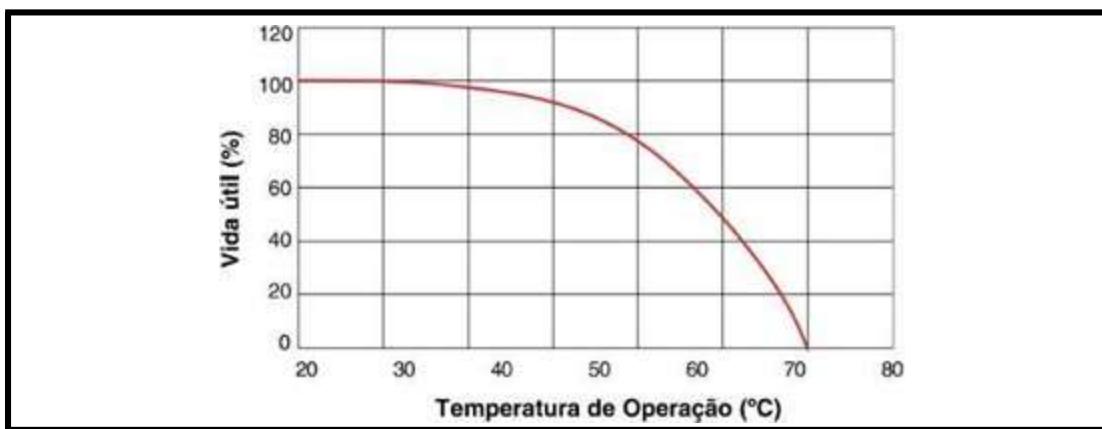
Outro aspecto relevante é o impacto da temperatura elevada, que acelera as reações químicas internas e promove a degradação dos materiais ativos, reduzindo significativamente a vida útil do acumulador. Portanto, a operação ideal dessas baterias deve ocorrer em faixas de temperatura controladas, assegurando maior eficiência e durabilidade (MOURA, 2011).

Figura 4.9 - Desgaste de uma bateria chumbo-ácido em função da profundidade.



Fonte: MOURA, 2011.

Figura 4.10 - Desgaste de uma bateria chumbo-ácido em função da temperatura.



Fonte: Tudor (2017).

#### 4.4.4 BATERIAS DE ÍON-LÍTIO

O lítio é um metal extremamente leve e apresenta alto potencial eletroquímico, sendo um dos elementos com maior densidade energética entre os metais. Essas características o tornam altamente atrativo para utilização em sistemas de armazenamento de energia, especialmente aqueles que exigem elevadas densidades de potência e energia (MEADOWS, 2012).

A primeira bateria recarregável de lítio metálico foi desenvolvida em 1980, utilizando o próprio lítio como ânodo. No entanto, essa configuração apresentou problemas de segurança, uma vez que o lítio metálico é altamente reativo, podendo provocar reações violentas e até explosões. Para contornar esse problema, pesquisadores propuseram o uso do lítio em sua forma iônica, substituindo o ânodo metálico por grafite, enquanto o lítio permaneceu como componente do cátodo (ROSOLEM, 2012).

Em 1991, a empresa Sony introduziu comercialmente a primeira bateria de íon-lítio recarregável, com uma arquitetura baseada em ânodo de grafite (C) e cátodo de cobaltato de lítio ( $\text{LiCoO}_2$ ). Esse desenvolvimento representou um marco na tecnologia de armazenamento de energia, tornando-se a base para uma ampla gama de aplicações portáteis e estacionárias (STEWART, 2012).

As baterias de íon-lítio distinguem-se por oferecer elevada densidade de energia e potência por unidade de massa, resultado direto do baixo peso atômico do lítio e do seu alto potencial de redução. Em termos comparativos, sua energia específica pode ser até quatro vezes superior à das baterias de chumbo-ácido, o que explica sua ampla adoção em dispositivos eletrônicos, veículos elétricos e sistemas de armazenamento de energia renovável (GARCHE, 2010).

Durante o processo de descarga, ocorre a oxidação do ânodo de grafite, liberando íons de lítio ( $\text{Li}^+$ ), que migram através do eletrólito em direção ao cátodo, enquanto os elétrons fluem pelo circuito externo, gerando corrente elétrica. No processo inverso de carga, os íons de lítio retornam do cátodo ao ânodo, restaurando o estado químico inicial e permitindo a reutilização do sistema. Esse movimento reversível de íons é o princípio que garante o funcionamento

cíclico das baterias de íon-lítio.

O lítio é um metal extremamente leve e apresenta alto potencial eletroquímico, sendo um dos elementos com maior densidade energética entre os metais. Essas características o tornam altamente atrativo para utilização em sistemas de armazenamento de energia, especialmente aqueles que exigem elevadas densidades de potência e energia (MEADOWS, 2012).

A primeira bateria recarregável de lítio metálico foi desenvolvida em 1980, utilizando o próprio lítio como ânodo. No entanto, essa configuração apresentou problemas de segurança, uma vez que o lítio metálico é altamente reativo, podendo provocar reações violentas e até explosões. Para contornar esse problema, pesquisadores propuseram o uso do lítio em sua forma iônica, substituindo o ânodo metálico por grafite, enquanto o lítio permaneceu como componente do cátodo (ROSOLEM, 2012).

Em 1991, a empresa Sony introduziu comercialmente a primeira bateria de íon-lítio recarregável, com uma arquitetura baseada em ânodo de grafite (C) e cátodo de cobaltato de lítio ( $\text{LiCoO}_2$ ). Esse desenvolvimento representou um marco na tecnologia de armazenamento de energia, tornando-se a base para uma ampla gama de aplicações portáteis e estacionárias (STEWART, 2012).

As baterias de íon-lítio distinguem-se por oferecer elevada densidade de energia e potência por unidade de massa, resultado direto do baixo peso atômico do lítio e do seu alto potencial de redução. Em termos comparativos, sua energia específica pode ser até quatro vezes superior à das baterias de chumbo-ácido, o que explica sua ampla adoção em dispositivos eletrônicos, veículos elétricos e sistemas de armazenamento de energia renovável (GARCHE, 2010).

Durante o processo de descarga, ocorre a oxidação do ânodo de grafite, liberando íons de lítio ( $\text{Li}^+$ ), que migram através do eletrólito em direção ao cátodo, enquanto os elétrons fluem pelo circuito externo, gerando corrente elétrica. No processo inverso de carga, os íons de lítio retornam do cátodo ao ânodo, restaurando o estado químico inicial e permitindo a reutilização do sistema. Esse movimento reversível de íons é o princípio que garante o funcionamento cíclico das baterias de íon-lítio.

A Equação 2 mostra as reações químicas básicas ocorridas durante a carga e a descarga das baterias de íon-lítio.

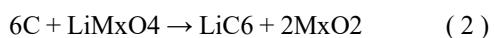
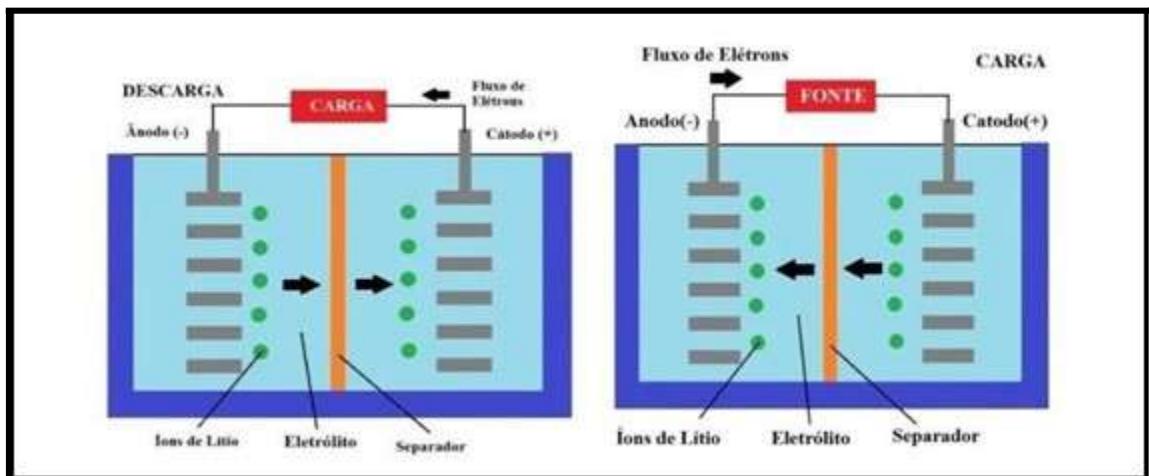


Figura 4.11 - Esquema dos processos eletroquímicos que ocorrem na bateria íon-lítio, descarga e carga.



Fonte: TURNER, 2020.

As baterias de íon-lítio destacam-se por apresentarem tensão nominal em torno de 4 VDC e densidade energética variando entre 100 Wh/kg e 150 Wh/kg, valores significativamente superiores aos observados em outras tecnologias de armazenamento.

O eletrodo negativo é, em geral, composto por grafite, enquanto o eletrodo positivo utiliza óxidos metálicos de lítio, tais como  $\text{LiMO}_2$ ,  $\text{LiCoO}_2$  e  $\text{LiFePO}_4$ . O eletrólito consiste em um sal de lítio ( $\text{LiPF}_6$ ) dissolvido em solventes orgânicos, absorvido em um separador microporoso, o que garante a condução iônica e impede o contato direto entre os eletrodos.

Entre as principais vantagens das baterias de íon-lítio, destacam-se a alta tensão operacional, a elevada energia específica e o grande número de ciclos de carga e descarga. Em comparação às baterias de chumbo-ácido, que possuem tensão média de aproximadamente 2 VDC, as baterias de íon-lítio operam entre 3 VDC e 4 VDC, além de apresentarem energia específica até quatro vezes maior. Ademais, possuem vida útil superior, suportando centenas ou milhares de ciclos, com mínima perda de desempenho ao longo do tempo.

Os sistemas de armazenamento de energia baseados em baterias constituem uma das principais alternativas para equilibrar a oferta e a demanda energética, especialmente em fontes renováveis intermitentes, como solar, eólica e mareomotriz. Tais sistemas permitem armazenar o excedente de energia produzido em períodos de alta geração e disponibilizá-lo em

momentos de maior consumo, contribuindo para a estabilidade e eficiência das redes elétricas.

Nesse contexto, as baterias de íon-lítio são amplamente preferidas devido à sua alta densidade de energia, capacidade de recarga rápida e eficiência energética, possibilitando ciclos de carga e descarga frequentes com baixo desgaste. Além disso, o custo de produção dessas baterias vem apresentando reduções progressivas, favorecendo sua aplicação em sistemas de armazenamento de energia renovável e em tecnologias de mobilidade elétrica (TURNER, 2020).

#### 4.4.5 TEMPERATURA DE OPERAÇÃO

A temperatura de operação, tanto interna quanto externa, exerce influência direta sobre o desempenho, eficiência e capacidade das baterias. Temperaturas elevadas podem ocasionar envelhecimento prematuro, redução da vida útil e, em casos extremos, explosões ou danos irreversíveis aos equipamentos. Quando a bateria apresenta superaquecimento constante durante o funcionamento, isso pode indicar sobrecarga no circuito ou defeito interno no dispositivo (TURNER, 2020).

Segundo Groiß (2021), as baterias são fortemente influenciadas pela temperatura ambiente na qual operam. Em geral, são projetadas para apresentar melhor desempenho entre 20 °C e 25 °C, embora essa faixa possa variar conforme a composição química da célula. Estudos indicam que há faixas ótimas de temperatura específicas para cada tipo de bateria, definidas experimentalmente (PESARAN; SANTHANAGOPALAN; KIM, 2013).

Nas baterias secundárias, que possuem a capacidade de recarga cíclica, a temperatura exerce papel fundamental sobre a potência, a capacidade energética disponível e a vida útil. Tanto temperaturas abaixo quanto acima dos limites ideais de operação podem causar degradação dos materiais ativos e perda de eficiência ao longo do tempo (GROIß, 2021).

De acordo com a Blue Box Batteries (2015), e com base na equação de Arrhenius, o aumento de 10 °C na temperatura de operação das baterias secundárias de chumbo-ácido pode reduzir pela metade sua vida útil. Além disso,

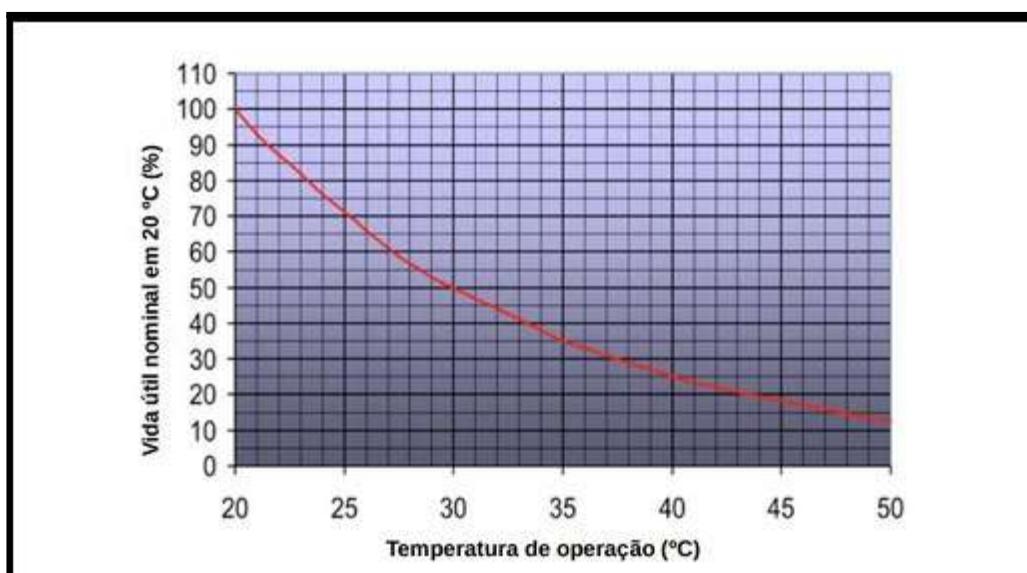
conforme observado por Groiß (2021), o aquecimento excessivo também impacta negativamente a capacidade efetiva de armazenamento, reduzindo o desempenho global do sistema.

Cabe ressaltar que a equação de Arrhenius é aplicável de forma mais precisa a baterias

que operam dentro da faixa ideal entre 15 °C e 40 °C. Fora desses limites, o comportamento químico e eletrolítico tende a se desviar das condições ideais, resultando em variações significativas de desempenho e durabilidade (BLUE BOX BATTERIES, 2015).

A Figura 4.12 ilustra a relação entre a temperatura de operação e a vida útil de uma bateria de chumbo-ácido, com base na equação de Arrhenius, demonstrando que a temperatura ideal de operação situa-se em torno de 20 °C.

Figura 4.12 -Porcentagem de vida útil vs. temperatura de operação de uma bateria de chumbo-ácido.



Fonte: BLUE BOX BATTERIES, 2015.

Em se tratando das baterias secundárias de íon-lítio, Ma et al. (2018) afirmam que, a temperaturas abaixo de 0 °C, o desempenho dos componentes diminui drasticamente, como também aponta o estudo realizado por Nagasubramanian (2001), cujos resultados demonstraram que a potência e a capacidade destas baterias tiveram seus valores reduzidos quando submetidas a -40 °C.

#### 4.4.6 REGIME DE CARGA E DESCARGA

As baterias recarregáveis apresentam um parâmetro fundamental conhecido como Estado de Carga (*State of Charge – SOC*), definido como a relação entre a energia total utilizada e a capacidade total disponível no sistema. Quando o valor de SOC atinge 100%, significa que

a bateria está totalmente carregada; de forma análoga, um SOC de 0% indica que a bateria encontra-se completamente descarregada, representando, assim, quantitativamente, o nível de carga remanescente.

No caso das baterias de chumbo-ácido, conforme Wong et al. (2008), a adoção de um regime de carga adequado, com compensação térmica apropriada, é essencial para maximizar a vida útil do equipamento. Os autores ressaltam que manter a bateria próxima de 100% do SOC é importante para evitar a sulfatação, fenômeno químico que reduz significativamente a capacidade de armazenamento e o desempenho do sistema ao longo do tempo.

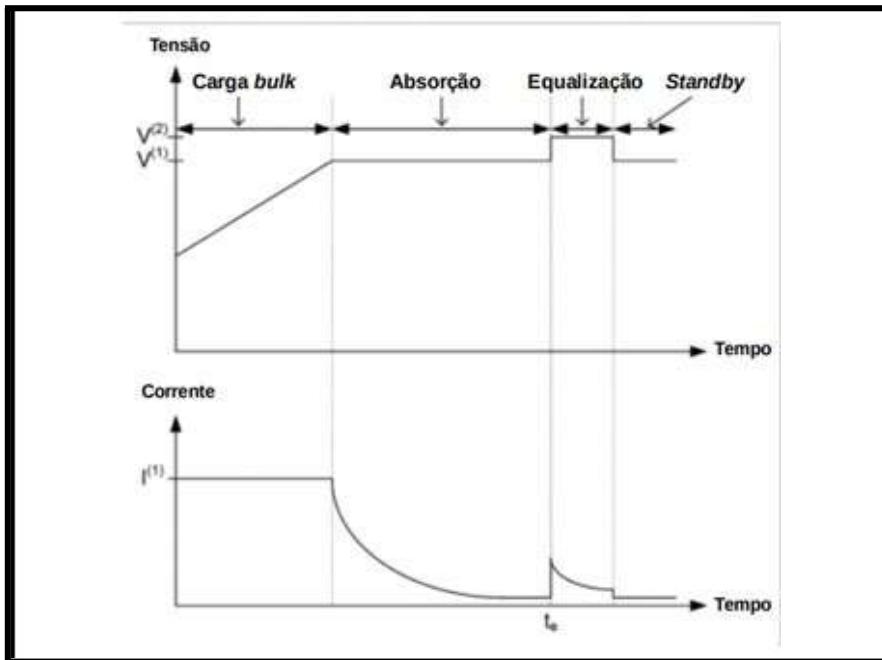
Em relação às baterias de íon-lítio, Zhang et al. (2017) destacam que diversas pesquisas têm sido desenvolvidas com o objetivo de determinar regimes de carga otimizados, visando preservar a capacidade e a longevidade dessas células. Tais estudos buscam, principalmente, minimizar o estresse térmico e controlar a variação de temperatura interna, fatores determinantes para o desempenho e a segurança do sistema de armazenamento.

De modo geral, o regime de carga de uma bateria pode ser dividido em quatro estágios principais:

- Modo Bulk (Carga Rápida): fase inicial em que a corrente é constante e a tensão aumenta progressivamente até atingir o limite máximo de carga;
- Modo de Absorção: etapa em que a tensão é mantida constante, reduzindo gradualmente a corrente até a saturação da bateria;
- Modo de Equalização: utilizado periodicamente para balancear as células e corrigir pequenas variações de tensão entre os elementos;
- Modo Standby (Flutuação): fase de manutenção em que a bateria permanece totalmente carregada, recebendo pequenas correntes para compensar perdas naturais de energia.

Esses modos de carga e descarga são representados esquematicamente na Figura 4.13, a qual ilustra a variação dos parâmetros elétricos ao longo do processo, evidenciando as transições entre as diferentes fases operacionais da bateria.

Figura 4.13 - Modos de operação ideais em um regime de carga.



(WONG,et al 2008).

Conforme ilustrado na Figura 4.13, o modo bulk caracteriza-se por ser a etapa inicial de carga, na qual uma corrente elevada é fornecida à bateria. Nessa fase, o carregador mantém o fornecimento de corrente constante até que a tensão de carga atinja o valor de regulação, representado no gráfico superior como  $V(1)$ .

Na sequência, ocorre o modo de absorção, em que a bateria continua sendo carregada sob tensão constante (também correspondente a  $V(1)$ ), porém a corrente diminui gradualmente de forma exponencial. Esse comportamento visa reduzir processos indesejáveis, como a corrosão dos eletrodos e a liberação excessiva de hidrogênio.

O modo de equalização tem como objetivo realizar uma sobrecarga controlada, aplicando uma tensão de regulação superior ( $V(2)$ ) por um período mais curto. Essa etapa é essencial para uniformizar a carga entre as células, equilibrando pequenas variações internas.

Por fim, o modo standby, também conhecido como flutuação, mantém a bateria em elevado estado de carga (SoC), aplicando uma sobrecarga contínua e controlada para compensar a autodescarga natural do sistema (WONG et al., 2008).

Complementarmente, a Profundidade de Descarga (*Depth of Discharge – DoD*) representa a proporção de energia efetivamente retirada da bateria em relação à sua capacidade

total. O DoD é o inverso do SoC, podendo ser expresso em ampère-hora (Ah) ou em percentual. Esse parâmetro possui relação direta com a vida útil da bateria, conforme demonstrado por Rolls Battery Engineering (2014), uma vez que descargas mais profundas tendem a reduzir o número total de ciclos de operação.

A descarga de uma bateria é geralmente avaliada por meio de ensaios controlados, utilizando-se um banco de carga microcontrolado de corrente contínua. Esse procedimento tem como finalidade principal medir a capacidade real do componente e monitorar variáveis elétricas durante o teste, como tempo de descarga, corrente e tensão mínima (Vmin).

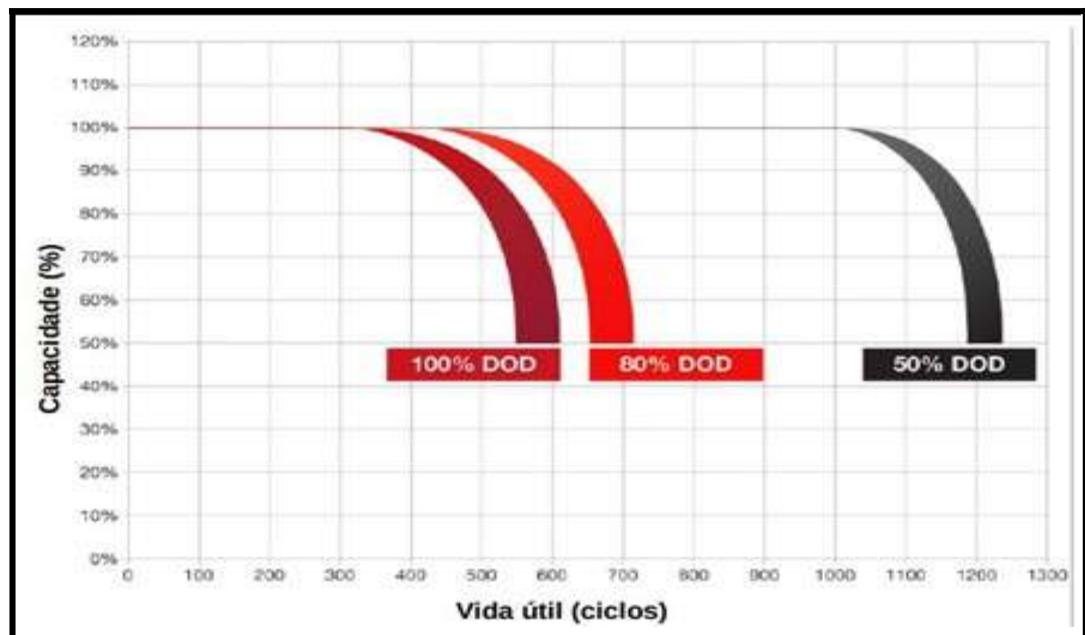
Diversas metodologias vêm sendo propostas para a determinação de regimes de descarga otimizados em baterias recarregáveis. Entre elas, Djordjevic e Karanovic (2015) sugerem um modelo matemático tridimensional, denominado *Calculated Discharge Curve Model* (CDCM), o qual considera o volume total de energia como a soma entre a energia armazenada e as perdas associadas ao processo. Esse método pode ser aplicado tanto a células individuais quanto a conjuntos multicelulares, abrangendo sistemas físico-químicos, termodinâmicos e eletroquímicos, e permitindo análises sob modos de descarga contínuos ou intermitentes.

#### 4.4.7 NÚMERO DE CICLOS

Como já mencionado, o DoD indica o quantitativo do que já foi descarregado da bateria relativo à sua capacidade total. Segundo Garcia (2020), quanto maior a profundidade de descarga, menor é o número de ciclos desses componentes. O autor complementa que a vida útil das baterias pode ser definida como o número de ciclos, a 100% do DoD, que uma célula pode operar até que sua capacidade baixe a 80% da inicial e comece a ter perdas significativas no seu desempenho.

Em se tratando das baterias de chumbo-ácido, dependendo da aplicação para a qual foram projetadas, podem durar cerca de 550 ciclos completos de carga-descarga. Quando aplicadas a carros elétricos, como carros de golfe, por exemplo, tal número equivaleria a cerca de 2 anos de utilização. Entretanto, devido à relação com a profundidade de descarga, se um desses componentes for descarregado a 50% do seu DoD, diariamente, ela durará cerca de duas vezes mais se fosse submetida a ciclos de 36 80%. (NORTHERN et all,2021). Tal relação está ilustrada no gráfico da Figura 4.14:

Figura 4.14 - Influência de diferentes DoDs na vida útil das baterias de chumbo-ácido.



Fonte: ROLLS BATTERY ENGINEERING, 2021.

Já as baterias de íon-lítio possuem, comumente, uma vida útil de 500 a 1000 ciclos, no entanto, a depender da aplicação e da quantidade de energia necessária, é possível expandir esses números, modificando a porcentagem da profundidade de descarga. Existe uma relação logarítmica entre o DoD e a vida útil do componente, sendo que o número de ciclos aumenta exponencialmente quando a profundidade de descarga diminui.

Dessa forma, uma bateria de íon-lítio terá cerca de 500 ciclos a 100% do DoD, e 2050 ciclos a 30% do DoD. (GARCIA, 2020). De acordo com a (Northern et al, 2021) o valor mais apropriado para uso diário desses componentes é de 50% do DoD, não significando não ser possível ultrapassar tal quantidade esporadicamente, mas que ao projetar um sistema cujas cargas sejam conhecidas, a média de 50% da Profundidade de Carga mostrará ser o fator de melhor relação entre armazenamento e custo.

## 4.5 CAPACIDADE ENERGÉTICA DAS BATERIAS

A capacidade energética de uma bateria corresponde à quantidade total de carga elétrica que pode ser armazenada e posteriormente disponibilizada pelo componente, sendo usualmente expressa em ampère-hora (Ah) ou miliampère-hora (mAh). Esse parâmetro é determinado pela massa do material ativo presente na bateria e representa a quantidade máxima de energia que pode ser fornecida sob as condições estabelecidas de projeto. Contudo, essa capacidade pode variar entre o valor nominal e o real, em função das condições de descarga e operação (FARAHANI, 2008).

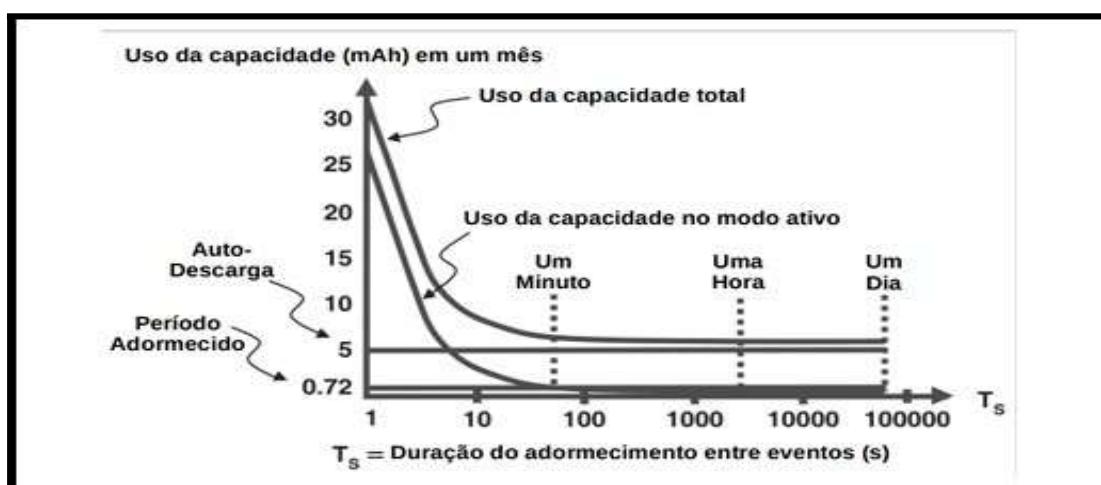
Segundo Farahani (2008), quando o processo de descarga segue as especificações recomendadas pelo fabricante, a bateria tende a fornecer sua capacidade nominal prevista. No entanto, desvios nas condições de descarga — como variações de corrente ou temperatura — podem causar discrepâncias, tornando a relação entre capacidade e desempenho não linear. Dessa forma, a capacidade efetiva é influenciada por fatores como idade da bateria, regime de carga e descarga, e temperatura de operação.

Além disso, a taxa de descarga tem influência direta na quantidade de energia extraída. Descargas rápidas, nas quais há elevada drenagem de corrente, resultam em menor energia utilizável. Por outro lado, quando a descarga ocorre de forma mais lenta, a energia total disponível tende a ser maior, elevando a capacidade efetiva do componente.

De acordo com Farahani (2008), uma forma simplificada de estimar a vida útil de uma bateria consiste em dividir a sua capacidade atual pela quantidade total de energia consumida durante o processo de autodescarga. Com o passar do tempo, ocorre a perda gradual dessa capacidade, mesmo quando a bateria não está em uso, devido a reações internas espontâneas. Essa perda, denominada taxa de autodescarga, é geralmente expressa pelos fabricantes em percentual de perda por mês.

A Figura 4.15 contém um gráfico que relaciona o ciclo de trabalho de uma bateria típica ao uso de sua capacidade em um mês:

Figura 4.15 - Capacidade total usada em diferentes atividades para um período de um mês.



Fonte: FARAHANI, 2008.

Existem cálculos para a determinação da capacidade ideal de uma bateria, mas, de maneira simplificada, como a função principal desses componentes é armazenar energia, uma maneira de determinar a capacidade energética de uma bateria é multiplicar a sua capacidade em Ah por sua tensão nominal.

#### 4.5.1 PRINCIPAIS PARÂMETROS

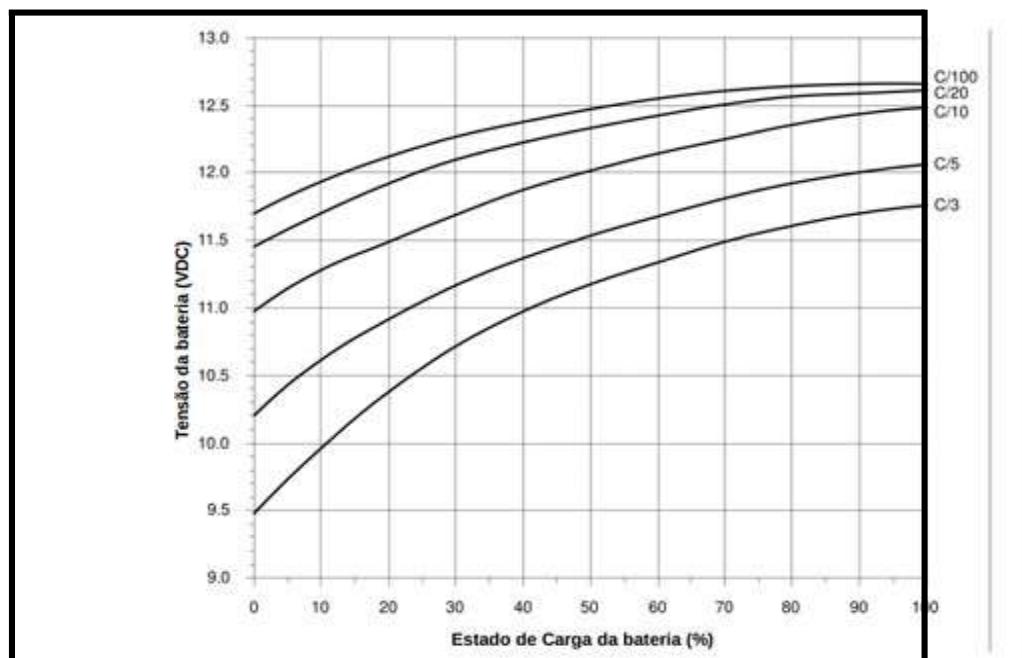
A tensão elétrica é uma das principais características de uma bateria e resulta diretamente das reações químicas que ocorrem em seu interior, bem como da concentração dos reagentes e do grau de polarização dos elétrodos. No caso das baterias de chumbo-ácido, cada célula apresenta uma tensão nominal de aproximadamente 2 V, valor obtido sob condições de equilíbrio eletroquímico. É importante destacar que a tensão de circuito aberto, medida diretamente nos terminais da bateria, constitui uma aproximação da tensão nominal (ENERTEC, 2008).

Segundo Perez (1993), toda célula eletroquímica apresenta uma resistência interna que influencia diretamente o comportamento da tensão durante os processos de carga e descarga. Ainda de acordo com o autor, a tensão da bateria aumenta durante o carregamento, sendo esse aumento proporcional à corrente de carga aplicada. Assim, quanto maior a corrente, maior o incremento de tensão observado.

De forma análoga, durante a descarga, ocorre o decaimento da tensão em função da corrente drenada. Correntes de descarga mais elevadas provocam uma queda de tensão mais acentuada, fenômeno presente em todos os tipos de baterias eletroquímicas. Esse comportamento caracteriza a relação inversa entre tensão e corrente de descarga, demonstrando a influência da resistência interna sobre o desempenho energético do componente (PEREZ, 1993).

Esse comportamento, acima descrito, pode ser observado na Figura 4.16:

Figura 4.16 - Comportamento da tensão elétrica de uma bateria de chumbo ácido de 12V na descarga.

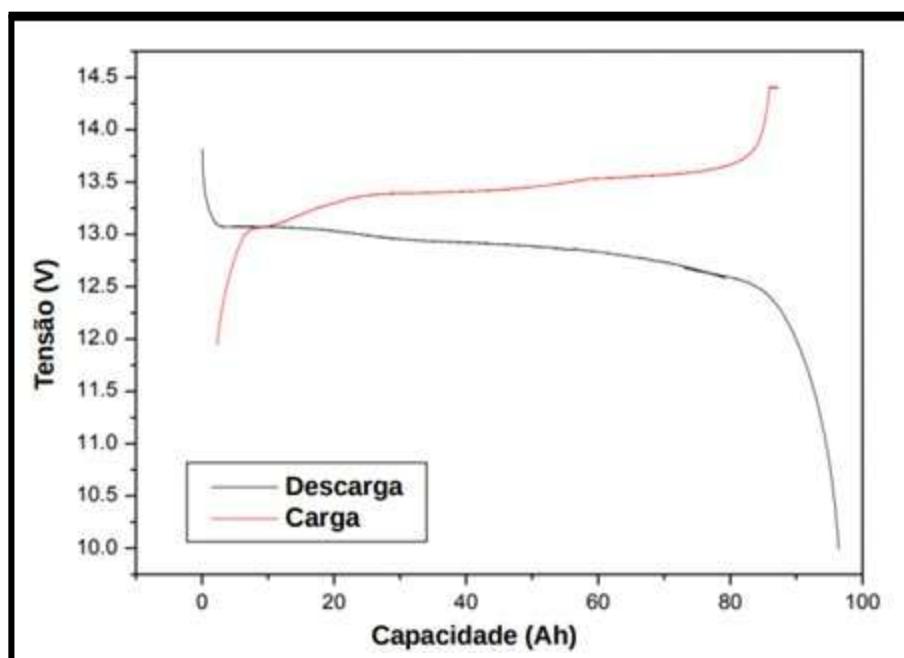


Fonte: PEREZ, 1993

De acordo com a figura 4.17, o gráfico representa a razão da corrente durante o 39 ciclo de descarga ou carga (PEREZ, 1993). Em valores de C/X, quanto menor o valor de X, maior a

corrente de descarga, respeitando os valores de corrente em relação a tensão. Como exemplo podemos trazer do próprio gráfico: em C/3 a bateria atinge seu estado de carga 0% em 9,5 V e em C/100 a bateria atinge seu estado de carga 0% em 11,7 V. De maneira análoga, como supracitado, um comportamento semelhante pode ser observado nas baterias de íon-lítio, como ilustrado no gráfico da Figura 4.17.

Figura. 4.17 - Comportamento da tensão elétrica de uma bateria de íon-lítio de 12,8 V nos ciclos de carga e descarga.



Fonte: ELECTRIC CAR PARTS COMPANY.

Perez (1993) relata que se as tensões elétricas das baterias são relacionadas ao seu SoC, então sua variação deve ser compensada, considerando o movimento da corrente, fator que deve ser mantido em mente no projeto de carregadores e sistemas retroalimentados. Além disso, segundo a Enertec (2008), a manutenção da tensão especificada pela fabricante durante o ciclo de carga é um dos fatores essenciais para uma vida útil prolongada.

No caso das baterias de chumbo-ácido, valores altos acarretarão em uma geração acelerada de corrosão da placa e, se forem valores baixos, poderá causar sulfatação o que gera danos à capacidade e redução da vida útil.

#### 4.5.2 TAXA C

A taxa C pode ser definida como a medida da velocidade de carregamento e descarregamento de uma bateria em relação à sua capacidade máxima. É a uma relação a capacidade de bateria e seu processo de carga e descarga. A letra C indica a capacidade de uma bateria. Quando uma bateria está sendo descarregada com uma corrente nominal de 1C, significa que a mesma está sendo descarregada com sua corrente nominal. Por exemplo, uma bateria com capacidade de 1800mAh e taxa C de 1C, significa uma corrente de 1800mA de descarga. A Tabela 4.1, a capacidade de energia e carga durante experimento o carregamento e descarregamento para diferentes taxas C.

Tabela 4.1 – Avaliação experimental de uma célula NMC tipo 3,0Ah 18650.

| <b>Taxa C</b> | <b>Eficiência</b> | <b>Eficiência Carregamento</b> | <b>Eficiência Descarregamento</b> |
|---------------|-------------------|--------------------------------|-----------------------------------|
| 0.2           | 86%               | 93%                            | 92%                               |
| 0.4           | 82%               | 92%                            | 90%                               |
| 0.6           | 81%               | 91%                            | 89%                               |
| 0.8           | 77%               | 90%                            | 86%                               |
| 1.0           | 75%               | 89%                            | 85%                               |
| 1.2           | 73%               | 89%                            | 83%                               |

Fonte: Adaptado de (BOBANAC; BAŠI' C; PANDŽI' C, 2021)

#### 4.6 SEGURANÇA NO USO DE ACUMULADORES

Os requisitos de segurança devem ser criteriosamente observados durante qualquer procedimento de manutenção em baterias e sistemas de armazenamento de energia. Essas atividades devem ser realizadas exclusivamente por profissionais qualificados, devidamente equipados com equipamentos de proteção individual (EPIs) e em conformidade com a legislação vigente e com as normas técnicas aplicáveis, especialmente a NBR 5410, além das instruções específicas do fabricante.

De acordo com Tudor (2017), algumas orientações essenciais devem ser seguidas durante a manutenção de acumuladores:

- Atentar-se para o risco de choque elétrico, evitando o contato direto com partes energizadas.
- Evitar o uso de adornos metálicos, como anéis, pulseiras, relógios e correntes, que possam causar curto-circuito acidental.
- Proibir o uso de cigarros, dispositivos que gerem faíscas ou chamas abertas nas proximidades da bateria, devido ao risco de explosão de gases.
- Garantir que os cabos e condutores utilizados em ensaios ou testes possuam isolamento e capacidade de corrente adequados, além de comprimento suficiente para evitar centelhamentos próximos aos terminais da bateria.
- As ferramentas e equipamentos metálicos devem possuir isolamento elétrico apropriado para prevenir contatos acidentais.
- Manter a sala de baterias livre de materiais inflamáveis ou objetos desnecessários, assegurando também a desobstrução das rotas de fuga.
- Evitar o posicionamento de ferramentas ou objetos sobre os elementos ou monoblocos das baterias, prevenindo curto-circuitos acidentais.
- Descarregar a energia estática corporal antes de acessar a sala de baterias, tocando previamente um ponto de aterramento.

A NBR 5410 estabelece as condições e requisitos de segurança para instalações elétricas de baixa tensão, abrangendo sistemas de até 1000 V em corrente alternada e 1500 V em corrente contínua, com frequência máxima de 400 Hz. Essa norma aplica-se a instalações elétricas residenciais, comerciais, industriais e agropecuárias, assegurando o funcionamento seguro dos sistemas e a integridade dos usuários (TUDOR, 2017).

#### 4.7 PRINCIPAIS NORMAS E PORTARIAS DO INMETRO APLICÁVEIS A BATERIAS.

O Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia (INMETRO) é o órgão responsável por estabelecer requisitos técnicos, metrológicos e de segurança para produtos comercializados no Brasil. No caso das baterias, o INMETRO atua por meio de Programas de Avaliação da Conformidade (PAC), que visam assegurar que esses dispositivos atendam a critérios mínimos de desempenho, segurança elétrica, confiabilidade e informação ao

consumidor.

A certificação pode ser obrigatória ou voluntária, dependendo da aplicação da bateria (automotiva, estacionária, portátil ou industrial), e normalmente é realizada por Organismos de Certificação de Produto (OCP) acreditados pelo próprio INMETRO.

No contexto de uma bancada didática de armazenamento de energia, a utilização de baterias certificadas pelo INMETRO garante que os ensaios experimentais sejam realizados com dispositivos que atendem a padrões mínimos de segurança e desempenho, reduzindo riscos operacionais e assegurando a confiabilidade dos dados coletados. Além disso, a observância das normas nacionais aproxima o estudo acadêmico das exigências técnicas do mercado e das aplicações reais em sistemas fotovoltaicos.

Para baterias chumbo-ácido, especialmente as automotivas e estacionárias, destaca-se: Portaria INMETRO nº 299/2012 estabelece os Requisitos de Avaliação da Conformidade (RAC) para baterias chumbo-ácido utilizadas em veículos automotores. Abrange: requisitos construtivos, desempenho elétrico, segurança, rotulagem e identificação.

Portaria INMETRO nº 144/2015 define o Regulamento Técnico da Qualidade (RTQ) para baterias recarregáveis, incluindo critérios mínimos de eficiência e segurança.

Para baterias de íons de lítio, o INMETRO adota normas técnicas internacionais (principalmente IEC), incorporadas ao processo de certificação nacional:

- IEC 62619 – Segurança para baterias de lítio industriais
- IEC 62133 – Segurança para baterias portáteis
- IEC 61427 – Baterias para sistemas de energia renovável

Essas normas são utilizadas como base técnica nos ensaios exigidos pelos OCPs acreditados.

## 5. METODOLOGIA ADOTADA

### 5.1 SELEÇÃO DOS COMPONENTES DO SISTEMA

Os componentes do sistema foram selecionados com o objetivo de possibilitar ao usuário total interação com a bancada experimental, permitindo a visualização prática e didática das principais tecnologias empregadas em projetos de armazenamento de energia elétrica com suprimento fotovoltaico.

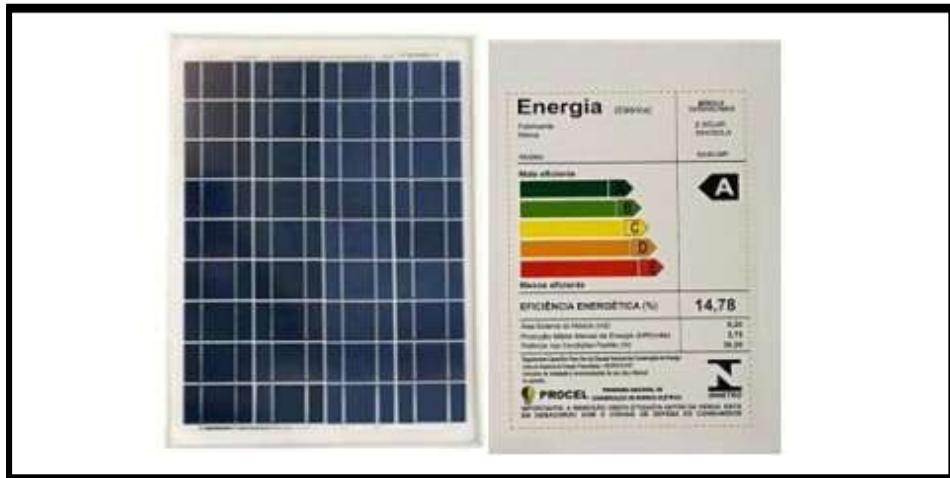
A escolha dos equipamentos considerou critérios técnicos e pedagógicos, tais como compatibilidade elétrica entre os dispositivos, segurança operacional, disponibilidade no mercado, custo-benefício e representatividade das soluções normalmente aplicadas em sistemas fotovoltaicos isolados (off-grid).

Buscou-se, ainda, selecionar componentes que possibilitessem a realização de ensaios experimentais de carga e descarga, medições de grandezas elétricas e comparação entre diferentes tecnologias de baterias, de forma a reproduzir, em escala reduzida, o funcionamento de um sistema real de armazenamento energético.

Dessa maneira, os componentes descritos nas subseções a seguir foram definidos como os mais adequados para a composição da bancada experimental proposta, atendendo aos objetivos didáticos e científicos deste trabalho.

### 5.1.2 PAINEL SOLAR 30 W

Figura 5.1. Painel solar fotovoltaico Sinosolar SA30-36P (30Wp).



Fonte: Mais Solar.

Este painel, de pequeno porte, é bastante utilizado nos setores comercial e industrial para aplicações de baixo consumo de energia. Dentre as aplicações mais utilizadas, podemos destacar os sistemas de monitoramento meteorológicos urbanos e rurais, controle de tráfego em rodovias, segurança, iluminação e eletrificação rural. A opção da tecnologia de energia solar fotovoltaica para fornecer energia elétrica é uma alternativa amigável ao meio ambiente, economizando investimentos em comparação a configuração de rede elétrica de longa distância, além de ter menores gastos de operação e manutenção do sistema. Sua modularidade e pouca quantidade de peças móveis permitem instalação rápida em curtos prazos, sem a necessidade de grandes áreas físicas.

No sistema montado, as placas foram utilizadas para carregar as baterias.

### 5.1.3 ECP 3024 CONTROLADOR DE CARGA PWM

O controlador de carga é o dispositivo responsável por gerenciar e regular o processo de carga e descarga do banco de baterias, sendo instalado entre o módulo fotovoltaico e os acumuladores. Sua principal função é controlar os níveis de tensão e corrente fornecidos às baterias, evitando condições de sobrecarga e descarga profunda, que podem comprometer o desempenho e reduzir significativamente a vida útil dos acumuladores. Além disso, o

controlador protege o sistema contra falhas elétricas, contribuindo para a segurança e confiabilidade da bancada experimental.

A escolha do controlador de carga PWM modelo ECP 3024, da Intelbras, justifica-se por sua ampla utilização em sistemas fotovoltaicos de pequeno e médio porte, especialmente em aplicações didáticas e off-grid. O equipamento apresenta compatibilidade elétrica com sistemas de 12 V e 24 V, corrente nominal adequada à potência do módulo fotovoltaico utilizado e recursos de proteção integrados, como proteção contra curto-círcito, sobrecarga, inversão de polaridade e descarga excessiva das baterias.

Outro fator determinante para a seleção deste controlador foi a sua simplicidade de operação e interface intuitiva, características que facilitam a compreensão dos princípios de funcionamento do controle de carga por estudantes e usuários em ambiente acadêmico. Adicionalmente, o controlador dispõe de saída dedicada para alimentação direta de cargas em corrente contínua (CC), bem como saída USB de 5 Vcc, permitindo a conexão de diferentes tipos de cargas e ampliando as possibilidades de experimentação e análise do comportamento do sistema.

Dessa forma, o controlador ECP 3024 mostrou-se adequado para a composição da bancada proposta, atendendo simultaneamente aos requisitos técnicos, de segurança e didáticos estabelecidos neste trabalho.

Figura 5.2 – ECP 3024 Controlador de Carga PWM



Fonte: ([www.intelbras.com.br](http://www.intelbras.com.br))

Figura 5.3– Especificação Técnicas ECP 3024 Controlador de Carga PWM

|                                                 |                                                                 |                                                 |                                                |                                                |
|-------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------|------------------------------------------------|------------------------------------------------|
| Modelo                                          | ECP 3024                                                        |                                                 |                                                |                                                |
| Certificação do INMETRO                         | 007859/2019                                                     |                                                 |                                                |                                                |
| Potência nominal                                | 360 W (sistema 12 V); 720 W (sistema 24 V)                      |                                                 |                                                |                                                |
| Máxima tensão de entrada do painel fotovoltaico | < 25 V (sistema 12 V); < 55 V (sistema 24 V)                    |                                                 |                                                |                                                |
| Máxima corrente de carregamento de bateria      | 30 A                                                            |                                                 |                                                |                                                |
| Máxima corrente na saída de carga               | 30 A                                                            |                                                 |                                                |                                                |
| Saída de carga                                  | Não estabilizada, segue a tensão de carga / descarga da bateria |                                                 |                                                |                                                |
| Tensão do Sistema (Bateria)                     | Reconhecimento automático 12 V / 24 V                           |                                                 |                                                |                                                |
| Tipo de bateria (estacionária)                  | Bateria Chumbo ácido Flooded (inundada)                         | Bateria Chumbo ácido selada (padrão de fábrica) | Bateria de chumbo ácido gel                    | Bateria de lítio                               |
|                                                 | FLD                                                             | SLD                                             | Gel                                            | Li                                             |
| Proteção contra sobretensão                     | 16 V (sistema 12 V); 32 V (sistema 24 V)                        |                                                 |                                                |                                                |
| Tensão de carregamento de equalização           | 14,8 V (sistema 12 V)<br>29,6 V (sistema 24 V)                  | 14,6 V (sistema 12 V)<br>29,2 V (sistema 24 V)  | -                                              | -                                              |
| Tensão de carregamento rápido (Boost)           | 14,6 V (sistema 12 V)<br>29,2 V (sistema 24 V)                  | 14,4 V (sistema 12 V)<br>28,8 V (sistema 24 V)  | 14,2 V (sistema 12 V)<br>28,4 V (sistema 24 V) | 14,4 V (sistema 12 V)<br>28,8 V (sistema 24 V) |
| Tensão de carregamento de flutuação (Float)     | 13,8 V (sistema 12 V)<br>27,6 V (sistema 24 V)                  | 13,8 V (sistema 12 V)<br>27,6 V (sistema 24 V)  | 13,8 V (sistema 12 V)<br>27,6 V (sistema 24 V) | -                                              |
| Tensão de retorno de carregamento (Boost)       | 13,2 V (sistema 12 V); 26,4 V (sistema 24 V)                    |                                                 |                                                |                                                |
| Tensão de recuperação da saída de carga         | Ajustável, 12,5 V (sistema 12 V); 25 V (sistema 24 V)           |                                                 |                                                |                                                |
| Tensão de corte saída de sobredescarga          | Ajustável, 11 V (sistema 12 V); 22 V (sistema 24 V)             |                                                 |                                                |                                                |

Fonte: ([www.intelbras.com.br](http://www.intelbras.com.br))

### 5.1.4 BATERIA HELIAR 60AH – HGR60DD/ HGR60DE – ORIGINAL DE MONTADORA

A bateria Heliar 60 Ah (modelos HGR60DD/HGR60DE) foi selecionada para compor a bancada experimental devido à sua disponibilidade, confiabilidade e características técnicas adequadas para estudos didáticos de sistemas de armazenamento de energia em aplicações fotovoltaicas. Trata-se de uma bateria chumbo-ácido selada, com tensão nominal de 12 V, capacidade de 60 Ah, indicador de estado de carga e tecnologia PowerFrame que proporciona maior resistência e durabilidade em operações de ciclo repetitivo, facilitando a aquisição de dados experimentais representativos de sistemas reais de armazenamento.

Além disso, sua conformidade com requisitos de certificação nacional (INMETRO) e

sua ampla presença no mercado automotivo brasileiro tornam-na um componente acessível e didaticamente relevante para experimentos de carga/descarga, monitoramento de desempenho e comparações com outras tecnologias de baterias.

Essa bateria possui as seguintes características principais:

- Tensão nominal de 12 V e capacidade de 60 Ah (C20), o que indica a capacidade de fornecer 60 ampères durante 20 h.
- Selagem completa que reduz a manutenção e evita vazamentos do eletrólito.
- Indicador de carga (“charge eye”), que permite uma leitura visual rápida do estado de carga da bateria.
- Tecnologia de grade PowerFrame, que proporciona maior resistência mecânica e melhor desempenho frente à corrosão.
- Teste de corrente de partida a frio (CCA) elevado (em torno de 440 A), que atesta boa capacidade de fornecer corrente em condições exigentes, importante para aplicações com cargas variáveis.
- Dimensões compactas (aproximadamente  $244 \times 175 \times 175$  mm) e peso em torno de 13 kg, compatíveis com instalações práticas.

Esses atributos fazem dessa bateria uma solução robusta e amplamente disponível no mercado brasileiro, com rede de assistência técnica extensa e homologação pelo INMETRO, o que facilita aquisição, manutenção e substituição.

Figura 5.4 – HELIAR 60AH – HGR60DD/ HGR60DE



Fonte: ([www.Heliar.com.br](http://www.Heliar.com.br))

### 5.1.5 PACK DE BATERIA ÍON-LÍTIO

O sistema de armazenamento por baterias de íon-lítio desenvolvido para a bancada experimental é composto por células individuais do tipo 18650, cada uma com tensão nominal de 4,1 V e capacidade de 2600 mAh. As células foram organizadas em um arranjo misto de associação em série e em paralelo, de modo a atender aos requisitos de tensão e capacidade necessários para a operação do sistema fotovoltaico proposto.

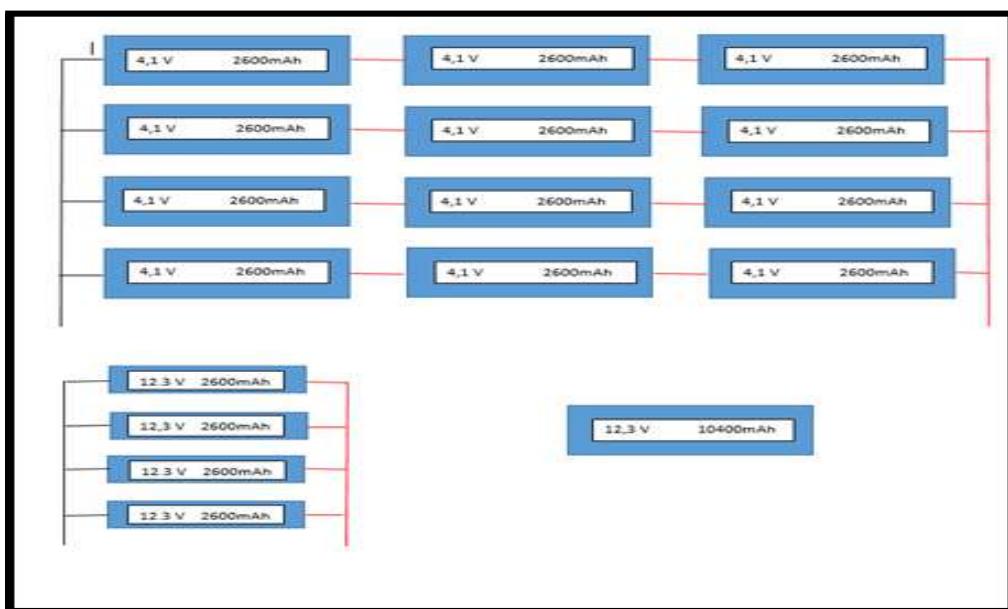
Inicialmente, as células foram conectadas em série, formando conjuntos com tensão total aproximada de 12,3 V, obtida a partir da soma das tensões individuais das células. Posteriormente, esses conjuntos foram associados em paralelo, resultando no aumento da capacidade total do pack, sem alteração da tensão nominal do sistema.

O arranjo final do pack apresenta tensão nominal de 12,3 V e capacidade total de 10.400 mAh, valor alcançado por meio da associação em paralelo de quatro conjuntos de células, cada um com capacidade individual de 2600 mAh. Essa configuração permite maior autonomia energética, além de possibilitar a realização de ensaios de carga e descarga em condições semelhantes às encontradas em sistemas reais de armazenamento de energia.

A escolha desse tipo de arranjo proporciona vantagens como maior densidade energética, redução de volume e peso em comparação às baterias de chumbo-ácido, além de permitir o estudo do comportamento elétrico das baterias de íon-lítio sob diferentes regimes de operação. O pack foi projetado para operar em sistemas de corrente contínua (CC), sendo compatível com controladores de carga e cargas utilizadas na bancada experimental.

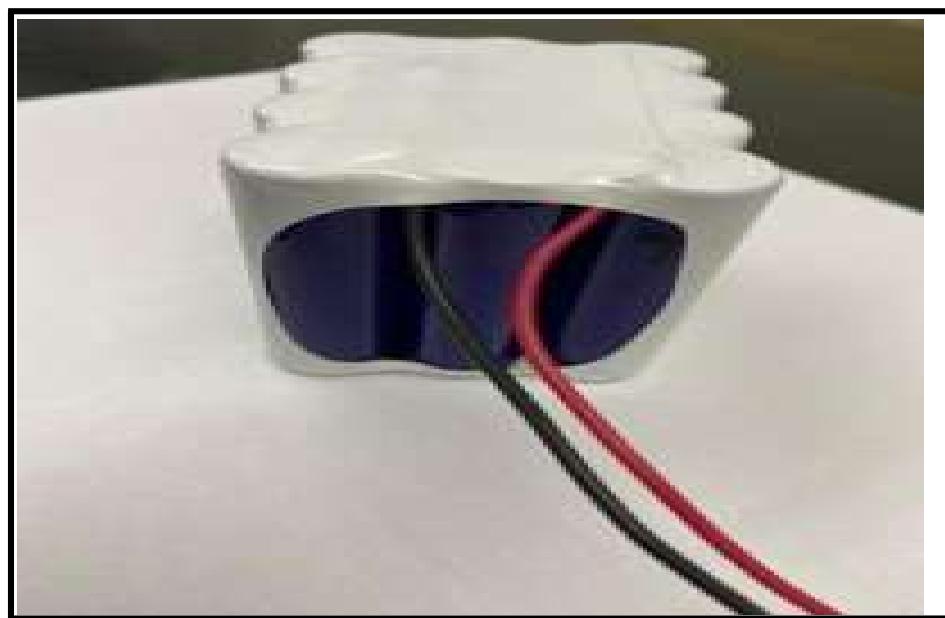
Para garantir a segurança do sistema, recomenda-se a utilização de circuito de proteção (BMS – Battery Management System), responsável pelo balanceamento das células, proteção contra sobrecarga, descarga profunda, curto-circuito e sobretemperatura, assegurando a integridade do conjunto e a confiabilidade dos ensaios realizados.

Figura 5.5 - Esquema de ligação das células no pack de baterias íon-lítio.



Fonte: autoria própria.

Figura 5.6. Pack de Bateria íon-lítio BAP Energy 18650.



Fonte: autoria própria

Tabela 5.1 *Resumo das especificações elétricas Pack de Bateria ion-lítio BAP Energy 18650*

| Parâmetro                          | Valor                    |
|------------------------------------|--------------------------|
| <i>Tipo de bateria</i>             | <i>Ion-lítio (18650)</i> |
| <i>Tensão nominal por célula</i>   | <i>4,1 V</i>             |
| <i>Capacidade por célula</i>       | <i>2600 mAh</i>          |
| <i>Configuração do pack</i>        | <i>Série + Paralelo</i>  |
| <i>Tensão nominal do pack</i>      | <i>12,3 V</i>            |
| <i>Capacidade total do pack</i>    | <i>10.400 mAh</i>        |
| <i>Energia armazenada (aprox.)</i> | <i>≈ 128 Wh</i>          |

Fonte: arquivo próprio

### 5.1.6 CABOS CONDUTORES DE ENERGIA

Cabos condutores de energia são utilizados para transmitir a corrente elétrica para toda a casa, a partir da entrada principal. Eles apresentam diversas bitolas, com diferentes cores que servem para identificar tensões padronizadas (AC: fase, neutro, terra; e DC: positiva e negativa). Os projetos de condutores de rede elétrica devem obedecer à Norma NBR 5410.

No caso do sistema montado neste trabalho, foram utilizados fios condutores nas cores preto (negativo) e vermelho (positivo). O dimensionamento de um condutor deve ser precedido de uma análise detalhada das condições de sua instalação e da carga a ser suprida. Um condutor mal dimensionado, além de implicar em operação inadequada da carga, representa um elevado risco de incêndio no local.

### 5.1.7 INVERSOR

O inversor de corrente contínua (CC) para corrente alternada (CA) é um equipamento eletrônico responsável por converter a energia elétrica proveniente de fontes em corrente contínua, como baterias e sistemas fotovoltaicos, em corrente alternada, padrão utilizado pela maioria dos equipamentos elétricos convencionais. Sua aplicação é fundamental em sistemas fotovoltaicos isolados (off-grid), nos quais não há conexão com a rede elétrica convencional.

Para a composição da bancada experimental, foi selecionado o Inversor Off-Grid Jay Energy, com tensão de entrada de 12 Vcc, tensão de saída de 127 Vca e potência nominal de 600 W. A escolha deste modelo justifica-se, primeiramente, por sua compatibilidade elétrica com o banco de baterias de 12 V utilizado no sistema, permitindo a integração direta sem a necessidade de conversores adicionais.

Outro fator determinante para a seleção do inversor foi sua potência nominal adequada à proposta da bancada, possibilitando a alimentação de diferentes tipos de cargas, como dispositivos eletrônicos de pequeno porte, cargas resistivas e motores de baixa potência, sem sobrecarregar o sistema. Essa característica é essencial para a realização de ensaios experimentais e análises do comportamento do sistema de armazenamento sob diferentes condições de carga.

Adicionalmente, o inversor apresenta características construtivas e de proteção compatíveis com aplicações didáticas, como proteção contra curto-circuito, sobrecarga, subtensão e sobretemperatura, garantindo maior segurança durante a operação e execução dos testes. O modelo off-grid foi escolhido por representar fielmente as condições de funcionamento de sistemas isolados de geração fotovoltaica, amplamente utilizados em regiões remotas ou sem acesso à rede elétrica.

Dessa forma, o inversor Jay Energy de 600 W mostrou-se adequado para a bancada experimental proposta, atendendo aos requisitos técnicos, operacionais e pedagógicos estabelecidos neste trabalho, além de contribuir para a compreensão prática do processo de conversão de energia em sistemas fotovoltaicos com armazenamento.

Figura 5.7 - Inversor Off Grid Jay Energy 12Vcc/127Vca (600W)



Fonte: autoria própria.

*Principais especificações :*

- Potência contínua de 600 W.
- Tensão de entrada: 12 V CC (banco de baterias em 12 V) Tensão de saída: 127 V CA, frequência de 60 Hz
- Tipo de onda: Onda modificada.
- Eficiência:  $\geq 90\%$ .
- Proteções integradas: curto-círcuito, sobrecarga, superaquecimento, subtensão, sobretensão, inversão de polaridade.

### 5.1.8 DISJUNTOR CC

Os disjuntores são dispositivos eletromecânicos de segurança que desarmam a rede elétrica de determinado circuito em caso de sobrecarga e de curto-círcuito. Além de manter a integridade da isolação, garantindo a vida útil dos condutores, o disjuntor proporciona um funcionamento adequado da instalação e dos equipamentos a ela conectados.

Por isso, são instalados no quadro de distribuição em número compatível com os circuitos e dimensionados conforme a potência de cada equipamento, número de lâmpadas e tomadas de cada circuito. No sistema montado, o disjuntor foi instalado entre a placa solar e o controlador como dispositivo de interrupção da corrente elétrica, tipo liga/desliga, para que se controlasse o período de carregamento das baterias, ao longo dos testes.

Figura 5.8 - Disjuntor CC LETOP Bipolar/ 63A.



Fonte: [www.LETOP.com.br](http://www.LETOP.com.br)

### 5.1.9 CARGA (LÂMPADAS)

Figura 5.9 - Lâmpada Avant bivolt (14W), branca.



Fonte: [www.Mercadolivre.com.br](http://www.Mercadolivre.com.br)

Foram compradas 3 lâmpadas e seus consumos de corrente foram medidos, selecionando-se as 2 com consumo mais próximo, dentro da faixa de 0,11 A +/- 0,7 A, totalizando 0,8 A de consumo médio.

## 5.2 MONTAGEM E FUNCIONAMENTO DO SISTEMA

Com base nos materiais anteriormente descritos, foi montado o sistema de testes ilustrado na Figura 5.10, destinado à realização dos ensaios de descarga das baterias em estudo. Para simular uma condição de carga elétrica controlada e representativa, foram utilizadas lâmpadas LED 14W, as quais atuaram como carga durante o processo de descarga dos acumuladores.

A utilização de lâmpadas LED como carga justifica-se por sua estabilidade de consumo, facilidade de controle e segurança operacional, permitindo a obtenção de resultados consistentes ao longo dos ensaios. Durante os testes, as lâmpadas permaneceram continuamente alimentadas pelo sistema, possibilitando a análise do comportamento elétrico das baterias sob descarga constante, bem como a medição de parâmetros como tensão, corrente e tempo de operação.

Esse arranjo experimental permitiu a realização de um teste comparativo entre as diferentes tecnologias de baterias, assegurando que ambas fossem submetidas às mesmas condições de carga, o que contribui para a confiabilidade dos resultados obtidos. Dessa forma, o sistema de testes adotado mostrou-se adequado para a avaliação do desempenho das baterias no contexto da bancada experimental proposta.

Figura 5.10 – Protótipo montado



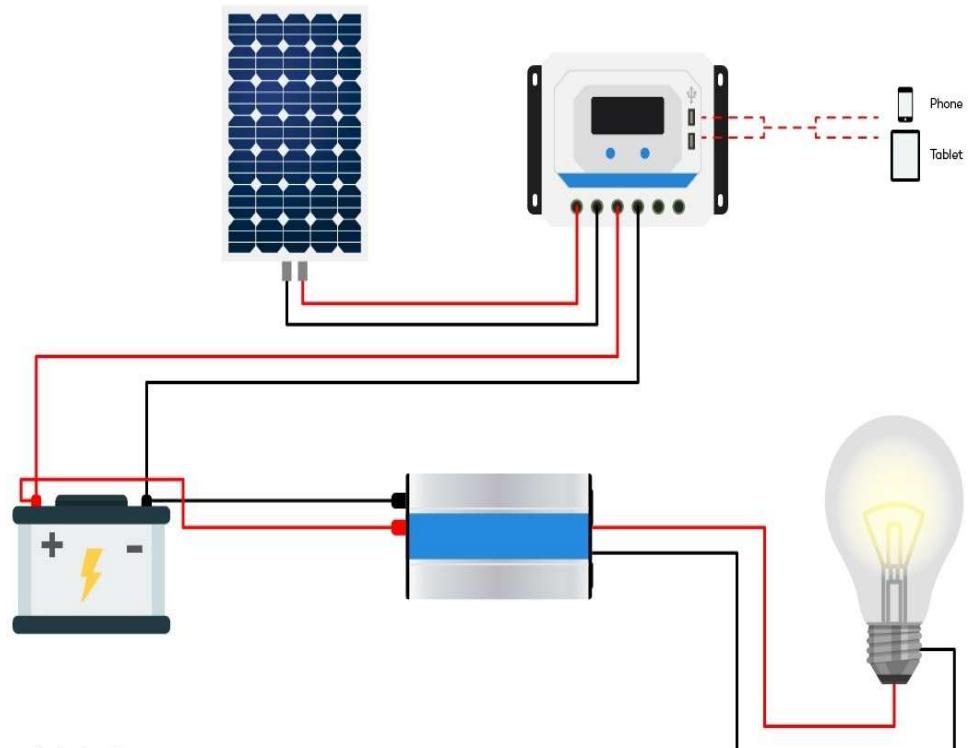
Fonte: arquivo próprio

Figura 5.11 – ECP 3024 Controlador de Carga PWM em funcionamento



Fonte: arquivo próprio

Figura 5.12 – Esquema de montagem do Sistema



imagens meramente ilustrativas

Fonte: ([Neosolar.com.br](http://Neosolar.com.br)) 2025

## 5.3 TESTE DAS BATERIAS E OPERAÇÃO DO SISTEMA

### 5.3.1 ENSAIOS

Os ensaios realizados nesta bancada experimental foram definidos com base nos procedimentos de avaliação de desempenho e segurança adotados pelo INMETRO, bem como em normas técnicas da ABNT e IEC. Ressalta-se que os testes foram conduzidos em caráter acadêmico e comparativo, não possuindo finalidade de certificação, mas permitindo a análise funcional e energética das baterias chumbo-ácido e íon-lítio em sistemas fotovoltaicos isolados.

Foi realizado um teste nas baterias utilizando o controlador de carga PWM modelo ECP 3024 da Intelbras, com o objetivo de analisar o comportamento de duas tecnologias de baterias uma bateria chumbo-ácido 12 V e um pack de baterias de íon-lítio 12 V em condições idênticas de operação.

O experimento foi conduzido a partir da alimentação solar proveniente de um módulo fotovoltaico, conectado ao controlador de carga, que por sua vez gerenciou o processo de carga e descarga de cada bateria individualmente.

Durante o ensaio, foram observados e registrados, através do visor digital do controlador ECP 3024, os valores de tensão (V) e corrente (A) tanto no processo de carga quanto de descarga das baterias.

#### 5.3.1.1 ENSAIO DE FUNCIONAMENTO EM REGIME NOMINAL

Inspirado no ensaio de desempenho operacional – INMETRO / IEC 61427  
Condições

- Potência da carga: 14 W (CA)
- Inversor CC-CA ( $\eta = 85\%$ )
- Tempo: 2 h

TABELA 5.2: RESULTADOS ENSAIO DE FUNCIONAMENTO EM REGIME NOMINAL

| Bateria      | Tensão inicial (V) | Tensão final (V) | Funcionamento |
|--------------|--------------------|------------------|---------------|
| Chumbo-ácido | 12,7               | 12,3             | Estável       |
| Íon-lítio    | 12,9               | 12,7             | Estável       |

Fonte: Arquivo Pessoal

Atende ao critério INMETRO: operação contínua sem falhas.

### 5.3.1.2 ENSAIO DE CAPACIDADE PARCIAL

Inspirado em ensaio de capacidade – ABNT NBR 15940 / IEC 61960

Energia no lado CC: 33 Wh

TABELA 5.3: RESULTADOS ENSAIO DE CAPACIDADE PARCIAL

| Bateria      | Energia fornecida (Wh) | Ah consumidos | DoD (%) |
|--------------|------------------------|---------------|---------|
| Chumbo-ácido | 33,1                   | 2,76          | 4,6     |
| Íon-lítio    | 33,0                   | 2,68          | 4,4     |

Fonte: Arquivo Próprio

Critério atendido: capacidade suficiente para carga nominal.

### 5.3.1.3 ENSAIO DE PROTEÇÕES ELÉTRICAS E SEGURANÇA OPERACIONAL

Inspirado em diretrizes INMETRO, IEC 62109 e IEC 62619 Verificar a atuação dos sistemas de proteção elétrica associados às baterias durante a alimentação de uma carga em corrente alternada, garantindo segurança operacional, integridade dos componentes e continuidade do fornecimento de energia.

Condições do ensaio:

- Carga: lâmpada CA 14 W
- Inversor: 12 Vcc → 127 Vca

- Rendimento médio do inversor: 85%
- Tempo total: 2 h
- Sistema de proteção:
  - Chumbo-ácido: controlador de carga PWM + inversor
  - Íon-lítio: BMS integrado + inversor

Tabela 5.4 : ENSAIO DE PROTEÇÕES ELÉTRICAS E SEGURANÇA OPERACIONAL

| Critério                          | Chumbo-ácido   | Íon-lítio      |
|-----------------------------------|----------------|----------------|
| Tensão mínima registrada          | 12,3 V         | 12,7 V         |
| Pico de corrente CC               | 1,6 A          | 1,5 A          |
| Atuação de proteção por subtensão | Não necessária | Não necessária |
| Atuação de proteção térmica       | Não            | Não            |
| Aquecimento observado             | Baixo          | Moderado       |

Fonte: Arquivo próprio

Critério atendido: Nenhum sistema apresentou atuações indevidas de proteção

#### 5.3.1.4 ENSAIO DE CONTINUIDADE DE SERVIÇO E ESTABILIDADE OPERACIONAL

Inspirado nos critérios funcionais INMETRO e IEC 61427

Condições do ensaio

- Carga: lâmpada CA 14 W
- Inversor CC-CA
- Tempo total: 2 h
- Operação contínua, sem intervenções externas

Procedimentos executados

a) Monitoramento da carga CA

- Observação visual da lâmpada durante todo o ensaio

- Verificação de cintilação (flicker) ou apagamentos momentâneos
- b) Monitoramento da tensão CA
- Medição pontual da tensão na saída do inversor
  - Verificação de estabilidade dentro da faixa nominal ( $127\text{ V} \pm 10\%$ )
- c) Monitoramento da operação do inversor
- Avaliação de:
    - Ruídos anormais
    - Desarmes
    - Oscilações de frequência

TABELA 5.5: RESULTADOS ENSAIO DE CONTINUIDADE DE SERVIÇO E ESTABILIDADE OPERACIONAL

| Parâmetro avaliado           | Chumbo-ácido  | Íon-lítio |
|------------------------------|---------------|-----------|
| Continuidade da carga        | Contínua      | Contínua  |
| Oscilação visível da lâmpada | Leve no final | Nenhuma   |
| Tensão CA média              | 123 V         | 125 V     |
| Variação de tensão CA        | $\pm 6\%$     | $\pm 3\%$ |
| Desarme do inversor          | Não           | Não       |

Fonte: Arquivo próprio

Critério atendido: As duas baterias não apresentaram nenhuma anormalidade

## 6. CONCLUSÃO

O desenvolvimento da bancada experimental de armazenamento de energia, integrada a um sistema fotovoltaico off-grid, constituiu um elemento fundamental para a análise prática e comparativa do comportamento de diferentes tecnologias de baterias aplicadas à conversão e ao armazenamento de energia elétrica. A concepção da bancada levou em consideração critérios técnicos de segurança, confiabilidade e simplicidade operacional, permitindo a execução de ensaios representativos das condições reais de funcionamento de sistemas fotovoltaicos de pequena potência, conforme recomendações normativas da ABNT, da IEC e diretrizes do INMETRO.

Os ensaios experimentais realizados possibilitaram a avaliação do desempenho elétrico das baterias chumbo-ácido e íon-lítio em condições controladas de carga e descarga. A utilização de uma carga em corrente alternada, representada por uma lâmpada de 14 W, operando por um período contínuo de 2 horas, permitiu observar o comportamento dinâmico do sistema, bem como a atuação do inversor e do controlador de carga na regulação da tensão e da corrente. Mesmo em um intervalo de tempo relativamente curto, foi possível identificar diferenças relevantes entre as tecnologias analisadas, principalmente no que se refere à estabilidade de tensão, eficiência energética e resposta à profundidade de descarga.

A bateria de íon-lítio apresentou desempenho superior em termos de estabilidade operacional, mantendo níveis de tensão mais constantes ao longo do ensaio e apresentando menor perda de rendimento energético. Esse comportamento está associado às características eletroquímicas intrínsecas dessa tecnologia, bem como à presença de sistemas de gerenciamento de bateria (BMS), que contribuem para a proteção contra sobrecarga, descarga profunda e desequilíbrio entre células. Em contrapartida, a bateria chumbo-ácido demonstrou maior sensibilidade às variações de carga e ao regime de descarga, evidenciando quedas de tensão mais acentuadas, o que reforça a necessidade de um controle rigoroso da profundidade de descarga para preservar sua vida útil.

O ensaio de operação segura em baixo DoD revelou-se particularmente importante, uma vez que esse regime de funcionamento é amplamente recomendado por normas técnicas e pela literatura especializada como estratégia para prolongar a durabilidade dos acumuladores eletroquímicos. Os resultados indicaram que a operação em baixos níveis de descarga contribui

para a redução do estresse eletroquímico, minimizando processos de degradação e aquecimento excessivo. Nesse contexto, ambas as tecnologias apresentaram comportamento seguro, contudo a bateria de íon-lítio demonstrou maior robustez, previsibilidade e menor impacto térmico, aspectos que favorecem sua aplicação em sistemas que demandam maior confiabilidade e menor necessidade de manutenção.

Além dos aspectos diretamente relacionados às baterias, os ensaios evidenciaram a importância dos dispositivos auxiliares do sistema, como o controlador de carga e o inversor. Esses equipamentos desempenharam papel essencial na proteção do conjunto, assegurando o funcionamento dentro dos limites elétricos estabelecidos pelas normas técnicas e prevenindo condições operacionais adversas. A bancada permitiu verificar, de forma prática, a interação entre os diferentes componentes do sistema fotovoltaico, reforçando a relevância de um dimensionamento adequado e da compatibilidade entre os dispositivos utilizados.

De modo geral, a bancada experimental desenvolvida mostrou-se eficiente como ferramenta didática e de pesquisa aplicada, possibilitando a reprodução de ensaios inspirados em procedimentos recomendados pelo INMETRO, ainda que em escala reduzida e com finalidade acadêmica. Os resultados obtidos corroboram a literatura técnica ao evidenciar que a escolha da tecnologia de armazenamento deve considerar não apenas o custo inicial, mas também fatores como eficiência, vida útil, regime de operação e requisitos de segurança. Assim, a análise comparativa realizada contribui para a compreensão das vantagens e limitações de cada tecnologia no contexto de sistemas fotovoltaicos off-grid.

Por fim, conclui-se que o trabalho alcançou seus objetivos ao desenvolver e validar uma bancada experimental funcional para o estudo de sistemas de armazenamento de energia. Como perspectivas futuras, recomenda-se a ampliação dos ensaios para períodos de maior duração, a aplicação de diferentes perfis de carga, a análise de ciclos completos de carga e descarga e a integração de sistemas avançados de monitoramento e gerenciamento. Essas melhorias podem fornecer dados ainda mais robustos, contribuindo para o avanço do conhecimento técnico-científico na área de armazenamento de energia e para o aprimoramento de soluções sustentáveis baseadas em fontes renováveis.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15940: Baterias chumbo-ácido estacionárias – Requisitos e métodos de ensaio.** Rio de Janeiro: ABNT, 2012.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16149: Sistemas fotovoltaicos conectados à rede – Características da interface de conexão.** Rio de Janeiro: ABNT, 2013.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR IEC 62109-1: Segurança de conversores de potência para uso em sistemas fotovoltaicos – Parte 1: Requisitos gerais.** Rio de Janeiro: ABNT, 2013.

ANEEL – AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Atlas de energia elétrica do Brasil.** 3. ed. Brasília: ANEEL, 2020. Disponível em: <https://www.gov.br/aneel/pt-br/assuntos/dados-e-indicadores/atlas-de-energia-eletrica>. Acesso em: 3 set. 2025.

ATAIDE, M. **Eletroquímica aplicada às baterias: fundamentos e funcionamento.** Belo Horizonte: Editora UFMG, 2018.

BASTOS, C. **Eletroquímica aplicada: fundamentos e práticas de sistemas de energia.** Rio de Janeiro: LTC, 2013.

BENTO, F. **Fundamentos de sistemas de armazenamento de energia: baterias e aplicações.** São Paulo: Érica, 2022.

BLUE BOX BATTERIES. **Temperature and Battery Life – Understanding the Arrhenius Equation.** Southampton: Blue Box Batteries Ltd., 2015.

BRAGA, R. A. **Semicondutores e dispositivos eletrônicos: fundamentos e aplicações.** Rio de Janeiro: LTC, 2008.

CANAL SOLAR. **Controlador de carga: o que é, como funciona e quais os tipos.** Canal Solar, 2023. Disponível em: <https://canalsolar.com.br/controlador-de-carga/>. Acesso em: 21 set. 2025.

CHEN, Z. et al. High-performance LiFePO<sub>4</sub> cathode material for lithium-ion batteries. **Electrochimica Acta**, v. 54, n. 19, p. 4198–4202, 2009. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2008.11.023>.

COELHO, J. A. **Princípios de eletroquímica e armazenamento de energia.** São Paulo: Érica, 2017.

CRESESB – CENTRO DE REFERÊNCIA PARA ENERGIA SOLAR E EÓLICA SÉRGIO DE SALVO BRITO. **Energia solar fotovoltaica: fundamentos e aplicações.** Rio de Janeiro: CEPEL, 2014. Disponível em: <http://www.cresesb.cepel.br/publicacoes/download/NT-Fotovoltaica.pdf>. Acesso em: 3 set. 2025.

DJORDJEVIC, S.; KARANOVIC, D. A three-dimensional model for calculated discharge curve of rechargeable batteries. **Journal of Electrochemical Energy Conversion and Storage**, v. 12, n. 4, p. 1–10, 2015.

FARAHANI, H. **Battery Technology Handbook.** New York: McGraw-Hill, 2008.

GARCHE, J. **Electrochemical power sources: batteries, fuel cells, and supercapacitors.** Amsterdam: Elsevier, 2010.

GARCIA, L. F. **Estudo da degradação e envelhecimento de baterias de íon-lítio e chumbo-ácido.** São Paulo: Universidade de São Paulo, 2020.

GHAFOOR, A.; MUNIR, K. Design and implementation of off-grid photovoltaic system: a review. **International Journal of Energy Research**, v. 39, n. 8, p. 1020–1034, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1002/er.3345>.

GOLDEMBERG, J.; LUCON, O. **Energia, meio ambiente e desenvolvimento.** 3. ed. São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo, 2007.

IEA – INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **Renewables 2020: analysis and forecast to 2025.** Paris: IEA, 2020. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/renewables-2020>. Acesso em: 3 set. 2025.

IEC – INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. **IEC 61427-1: Secondary cells and batteries for renewable energy storage – Part 1: Off-grid applications.** Geneva: IEC, 2013.

IEC – INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. **IEC 61427-2: Secondary cells and batteries for renewable energy storage – Part 2: On-grid applications.** Geneva: IEC, 2015.

IEC – INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. **IEC 61960-3: Secondary lithium cells and batteries for portable applications.** Geneva: IEC, 2017.

IEC – INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. **IEC 62619: Secondary lithium cells and batteries for industrial applications – Safety requirements.** Geneva: IEC, 2017.

IEC – INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. **IEC 62620: Secondary lithium cells and batteries for industrial applications – Performance requirements.** Geneva: IEC, 2014.

INMETRO – INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA, QUALIDADE E TECNOLOGIA. **Diretrizes para ensaios de desempenho e segurança em sistemas elétricos de baixa tensão.** Rio de Janeiro: INMETRO, 2021.

INMETRO – INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA, QUALIDADE E TECNOLOGIA. **Requisitos de segurança para sistemas de armazenamento de energia elétrica.** Rio de Janeiro: INMETRO, 2022.

INMETRO – INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA, QUALIDADE E TECNOLOGIA. **Avaliação da conformidade de sistemas e equipamentos elétricos.** Rio de Janeiro: INMETRO, 2023.

INTELBRAS. **Controlador de carga PWM off-grid ECP 3024**. São Paulo: Intelbras, [s.d.]. Disponível em: <https://www.intelbras.com/pt-br/controlador-de-carga-pwm-off-grid-ecp-3024>. Acesso em: 1 nov. 2025.

JASPER, F. B. et al. Full life cycle assessment of an industrial lead–acid battery based on primary data. **Energy Advances**, v. 4, p. 910–929, 2025.

LINDEN, D.; REDDY, T. B. **Handbook of batteries**. 3. ed. New York: McGraw-Hill, 2001.

MAKOLA, C. S.; LE ROUX, P. F.; JORDAAN, J. A. Comparative analysis of lithium-ion and lead–acid as electrical energy storage systems in a grid-tied microgrid application. **Applied Sciences**, v. 13, n. 5, p. 3137, 2023.

MEADOWS, D. **Advanced lithium systems for energy storage**. New York: Springer, 2012.

MICHELINI, L. **Fundamentos de eletroquímica e aplicações em sistemas de armazenamento de energia**. Rio de Janeiro: LTC, 2017.

MOURA, H. **Manutenção e desempenho de baterias chumbo-ácido automotivas**. Recife: Editora Universitária, 2011.

NAKAMURA, T.; YAMAMOTO, K. Lithium-ion battery technologies for renewable energy storage. **Journal of Power Sources**, v. 435, p. 226–240, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2019.226240>.

NATARAJ, S. et al. Performance analysis of lead-acid batteries under variable temperature and depth of discharge conditions. **Journal of Power Sources**, v. 280, p. 140–148, 2015.

NEOSOLAR. **Controlador de carga solar: funções e aplicações**. NeoSolar Energia, 2024. Disponível em: <https://www.neosolar.com.br/aprenda/saiba-mais/controlador-de-carga-solar>. Acesso em: 21 set. 2025.

NORTHERN ARIZONA WIND & SUN. **Battery life and depth of discharge**. Flagstaff: Northern Arizona Wind & Sun Technical Papers, 2021. Disponível em: <https://www.solar-electric.com/>. Acesso em: 13 nov. 2025.

PEREIRA, E. B. et al. **Atlas brasileiro de energia solar**. 2. ed. São José dos Campos: INPE, 2017. Disponível em: [http://www.inpe.br/atlas\\_energia\\_solar/](http://www.inpe.br/atlas_energia_solar/). Acesso em: 3 set. 2025.

PINHO, R. S.; GALDINO, M. **Manual de engenharia para sistemas fotovoltaicos**. Rio de Janeiro: CEPEL/CRESESB, 2014.

POSSA, M. V.; PASSOLD, A. J. **Baterias e acumuladores: fundamentos e aplicações**. Porto Alegre: Editora da UFRGS, 2006.

RAND, D. A. J. et al. **Valve-regulated lead-acid batteries**. Amsterdam: Elsevier, 2004.

ROLLS BATTERY ENGINEERING. **Battery technical manual**. Springhill: Rolls Battery Engineering, 2014.

ROSOLEM, J. **Estudo do comportamento eletroquímico das baterias de íon-lítio**. São Paulo: Universidade de São Paulo, 2012.

SOLARPOWER EUROPE. **EU market outlook for solar power 2022–2026**. Brussels: SolarPower Europe, 2022. Disponível em:  
<https://www.solarpowereurope.org/insights/market-outlook-for-solar-power-2022-2026>. Acesso em: 10 set. 2025.

STEWART, K. The development of lithium-ion battery technology. **Journal of Power Sources**, v. 210, p. 90–100, 2012.

TOWNSEND, A.; GOUWS, R. A comparative review of lead-acid, lithium-ion and ultra-capacitor technologies and their degradation mechanisms. **Energies**, v. 15, n. 13, p. 4930, 2022.

TURNER, J. **Energy storage technologies and applications**. Oxford: Elsevier, 2020.

TUDOR. **Manual técnico de baterias estacionárias**. São Paulo: Tudor, 2017.

VALLÉRA, F. C.; BRITO, L. G. **Energia solar: fundamentos, tecnologias e aplicações**. São Paulo: Editora Érica, 2006.

VILLALVA, M. G.; RAZO, J. R.; GUERRERO, J. A. **Modeling and control of photovoltaic generation systems**. São Paulo: Springer, 2015.

WONG, C. H. et al. Lead–acid battery charging system with temperature compensation. **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, v. 55, n. 2, p. 685–693, 2008.

ZHANG, S. S.; XU, K.; JOW, T. R. Study of the charging regime and thermal behavior of lithium-ion batteries. **Journal of Power Sources**, v. 354, p. 163–170, 2017.