

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ**

**EDUARDO AUGUSTO PELOSATO**

**MAURÍCIO ROLIM DE GODOI**

**DIMENSIONAMENTO DE UM SISTEMA DE ARMAZENAMENTO COM BATERIAS  
DE LÍTIO PARA GERAÇÃO SOLAR FOTOVOLTAICA RESIDENCIAL**

**PONTA GROSSA**

**2026**

**EDUARDO AUGUSTO PELOSATO  
MAURÍCIO ROLIM DE GODOI**

**DIMENSIONAMENTO DE UM SISTEMA DE ARMAZENAMENTO COM BATERIAS  
DE LÍTIO PARA GERAÇÃO SOLAR FOTOVOLTAICA RESIDENCIAL**

**Sizing of Lithium-Ion Battery Energy Storage System for Residential Solar PV  
Generation**

Trabalho de conclusão de curso de graduação  
apresentado como requisito para obtenção do título  
de Bacharel em Engenharia Elétrica da Universidade  
Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).  
Orientador(a): Prof. Dr. Carlos Henrique Illa Font

**PONTA GROSSA  
2026**



[4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/)

Esta licença permite download e compartilhamento do trabalho desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es), sem a possibilidade de alterá-lo ou utilizá-lo para fins comerciais. Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.

**EDUARDO AUGUSTO PELOSATO**  
**MAURÍCIO ROLIM DE GODOI**

**DIMENSIONAMENTO DE UM SISTEMA DE ARMAZENAMENTO COM BATERIAS  
DE LÍTIO PARA GERAÇÃO SOLAR FOTOVOLTAICA RESIDENCIAL**

Trabalho de conclusão de curso de graduação  
apresentado como requisito para obtenção do título  
de Bacharel em Engenharia Elétrica da Universidade  
Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Data de aprovação: 25/junho/2026

---

Carlos Henrique Illa Font  
Doutorado  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

---

Marcio Mendes Casaro  
Doutorado  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

---

Murilo Oliveira Leme  
Doutorado  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

**PONTA GROSSA**  
**2026**

“A fé é o começo de toda grande realização.”  
Napoleon Hill

## **AGRADECIMENTOS**

A conclusão desta etapa não é um mérito individual, mas o resultado de uma caminhada sustentada pela presença de pessoas que foram nosso alicerce. A todos que dividiram o peso e a leveza desses anos, o nosso mais sincero muito obrigado.

Ao Professor Dr. Carlos Henrique Illa Font, pela orientação cuidadosa, pela disponibilidade e pelo conhecimento compartilhado ao longo do desenvolvimento deste trabalho. Sua dedicação foi fundamental para que chegássemos até aqui.

À nossas famílias, pelo suporte incondicional em todos os momentos desta caminhada. Nos períodos de maior dificuldade, foram elas que nos deram forças para seguir em frente. A compreensão, o carinho e a paciência de cada um foram pilares essenciais para que esta etapa fosse concluída.

Aos nossos colegas de faculdade, que compartilharam conosco essa jornada. Obrigado por agregar neste processo trazendo inúmeras vivências, as quais tornaram esta caminhada muito mais leve.

Aos nossos amigos, os quais sempre foram motivos de alegria, risadas e parceria. Os nossos mais sinceros agradecimentos.

Enfim, a todos que, de alguma forma, contribuíram para a realização deste trabalho, nosso muito obrigado.

## RESUMO

PELOSATO, E. A; GODOI. M. R; Dimensionamento de um sistema de armazenamento com baterias de lítio para geração solar fotovoltaica residencial. 2026. 92 f. Trabalho de conclusão de curso (Graduação) – Engenharia Elétrica. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Ponta Grossa, Paraná, 2026.

O presente trabalho propõe o estudo e o dimensionamento de um sistema de armazenamento de energia utilizando baterias, aplicado a um sistema de geração fotovoltaica. Para isso, é apresentada uma metodologia de projeto para o banco de baterias com base na tecnologia de íons de lítio, considerando as principais variáveis de dimensionamento e analisando sua influência na quantidade total de baterias necessárias, bem como nos aspectos estruturais de sua instalação como peso e volume. O dimensionamento foi realizado com o objetivo de atender à demanda energética de uma residência com consumo médio previamente estabelecido. Os parâmetros adotados, bem como as projeções obtidas, foram fundamentados em modelos reais de baterias de lítio disponíveis no mercado, incluindo os modelos SBW CB050 e CB100 W00, da *WEG*, e o modelo AXE 5.0L *Modular Battery*, da *Growatt*. Por fim, os resultados obtidos permitem avaliar o comportamento do sistema proposto, contribuindo para a análise da viabilidade técnica da utilização de bancos de baterias em sistemas fotovoltaicos de pequeno porte.

Palavras-chave: banco de baterias; armazenamento de energia; sistema fotovoltaico; dimensionamento de sistema.

## ABSTRACT

PELOSATO, E. A; GODOI. M. R; **Sizing of Lithium-Ion Battery Energy Storage System for Residential Solar PV Generation**. 2026. 92 f. Final course work (Bachelor's degree in Electrical Engineering). Technology Federal University of Paraná, Ponta Grossa, Paraná, 2021.

This work proposes the study and sizing of an energy storage system using batteries, applied to a photovoltaic power generation system. A design methodology for the battery bank is presented based on lithium-ion technology, considering the main sizing variables and analyzing their influence on the total number of batteries required, as well as on the structural aspects of their installation as of weight and volume. The sizing was carried out with the objective of supplying the energy demand of a residential unit with a previously established average consumption. The adopted parameters, as well as the obtained projections, were based on real lithium-ion battery models available on the market, including the SBW CB050 and CB100 W00 models from WEG, and the AXE 5.0L Modular Battery from Growatt. Finally, the results obtained allow the evaluation of the behavior of the proposed system, contributing to the analysis of the technical feasibility of using battery banks in small-scale photovoltaic systems.

Keywords: Battery bank; Energy storage; Photovoltaic systems; Lithium-ion batteries; System sizing.

## LISTA DE GRÁFICOS

|                                                                                            |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Gráfico 1 - Capacidade e projeção de armazenamento com baterias em países da Europa.....   | 16 |
| Gráfico 2 - Custo de baterias ao decorrer dos últimos anos.....                            | 17 |
| Gráfico 3 - Capacidade instalada de geração solar fotovoltaica distribuída no Brasil.....  | 21 |
| Gráfico 4 - Perfil horário de geração fotovoltaica e consumo energético em residência..... | 22 |
| Gráfico 5 - Curva apresentando o comportamento do número de módulos AXE 5.0L.....          | 53 |
| Gráfico 6 - Curva apresentando o comportamento do volume da instalação.....                | 54 |
| Gráfico 7 - Curva apresentando o comportamento do peso da instalação.....                  | 54 |
| Gráfico 8 - Curva apresentando o comportamento da corrente máxima da instalação.....       | 55 |
| Gráfico 9 - Curva apresentando o comportamento da quantidade de módulos.....               | 57 |
| Gráfico 10 - Curva apresentando o comportamento do volume total da instalação.....         | 58 |
| Gráfico 11 - Curva apresentando o comportamento do peso total da instalação.....           | 58 |
| Gráfico 12 - Curva apresentando o comportamento da corrente máxima da instalação.....      | 59 |
| Gráfico 13 - Curva apresentando o comportamento do número de módulos da instalação.....    | 61 |
| Gráfico 14 - Curva apresentando o comportamento do peso total da instalação.....           | 62 |
| Gráfico 15 - Curva apresentando o comportamento do volume total da instalação.....         | 62 |

|                                                                                       |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Gráfico 16 - Curva apresentando o comportamento da corrente máxima da instalação..... | 63 |
|---------------------------------------------------------------------------------------|----|

## LISTA DE TABELAS

|                                                                                                  |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabela 1 — Especificações técnicas da bateria AXE 5.0L Growatt.....                              | 37 |
| Tabela 2 — Especificações técnicas da bateria SBW CB050 W00 WEG.....                             | 39 |
| Tabela 3 — Especificações técnicas da bateria SBW CB100 W00 WEG.....                             | 41 |
| Tabela 4 — Resultados do dimensionamento estático — AXE 5.0L Growatt (51,2V).....                | 46 |
| Tabela 5 — Resultados do dimensionamento estático — SBW CB050 W00 WEG (192 V).....               | 48 |
| Tabela 6 — Resultados do dimensionamento estático — SBW CB100 W00 WEG (384 V).....               | 50 |
| Tabela 7 — Número de módulos necessários em função de Nd e DoD — AXE 5.0L Growatt (51,2 V).....  | 51 |
| Tabela 8 — Volume Total da Instalação em função de Nd e DoD — AXE 5.0L Growatt (51,2 V).....     | 52 |
| Tabela 9 — Peso Total da Instalação em função de Nd e DoD — AXE 5.0L Growatt (51,2 V).....       | 52 |
| Tabela 10 — Corrente máxima da Instalação em função de Nd e DoD — AXE 5.0L Growatt (51,2 V)..... | 53 |
| Tabela 11 — Número de unidades necessárias em função de Nd e DoD — SBW CB050 W00 WEG.....        | 55 |
| Tabela 12 — Volume total em função de Nd e DoD — SBW CB050 W00 WEG.....                          | 56 |
| Tabela 13 — Peso total em função de Nd e DoD — SBW CB050 W00 WEG.....                            | 56 |
| Tabela 14 — Corrente máxima em função de Nd e DoD — SBW CB050 W00 WEG .....                      | 57 |
| Tabela 15 — Número de unidades necessárias em função de Nd e DoD — SBW CB100 W00 WEG.....        | 59 |
| Tabela 16 — Volume total em função de Nd e DoD — SBW CB100 W00 WEG.....                          | 60 |
| Tabela 17 — Peso total em função de Nd e DoD — SBW CB100 W00 WEG.....                            | 60 |
| Tabela 18 — Corrente máxima em função de Nd e DoD — SBW CB100 W00 WEG.....                       | 61 |
| Tabela 19 — Comparação dos resultados do dimensionamento estático.....                           | 64 |

|                                                                           |    |
|---------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabela 20 — Comparação de viabilidade técnica na análise paramétrica..... | 65 |
|---------------------------------------------------------------------------|----|

## LISTA DE FIGURAS

|                                                                                              |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 1 — Esquema simplificado de um sistema fotovoltaico com banco de baterias (BESS)..... | 25 |
|----------------------------------------------------------------------------------------------|----|

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

|       |                                                      |
|-------|------------------------------------------------------|
| ABNT  | Associação Brasileira de Normas Técnicas             |
| ANEEL | Agência Nacional de Energia Elétrica                 |
| BESS  | Battery Energy Storage System                        |
| BMS   | Battery Management System                            |
| BNDES | Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social |
| COPEL | Companhia Paranaense de Energia                      |
| DoD   | Depth of Discharge                                   |
| EPE   | Empresa de Pesquisa Energética                       |
| IEA   | International Energy Agency                          |
| IBGE  | Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística      |
| LKC   | Leis de Kirchhoff                                    |
| NBR   | Normas Brasileiras                                   |
| Nd    | Número de dias                                       |
| SoC   | State of Charge                                      |
| UTFPR | Universidade Tecnológica Federal do Paraná           |

## LISTA DE SÍMBOLOS

|                |                     |
|----------------|---------------------|
| A              | Ampère              |
| Ah             | Ampère-hora         |
| GW             | Gigawatt            |
| kW             | Quilowatt           |
| kg             | Quilograma          |
| kWh            | Quilowatt-hora      |
| LiFePO         | Lítio-Ferro-Fosfato |
| m <sup>3</sup> | Metro-cúbico        |
| Nd             | Número de dias      |
| P              | Potência total      |
| T              | Temperatura         |
| V              | Volume              |
| V              | Volts               |

.

## SUMÁRIO

|            |                                                                |           |
|------------|----------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>1</b>   | <b>INTRODUÇÃO</b>                                              | <b>13</b> |
| <b>1.1</b> | <b>Delimitação do tema</b>                                     | <b>14</b> |
| <b>1.2</b> | <b>Problema</b>                                                | <b>14</b> |
| <b>1.3</b> | <b>Relevância do tema</b>                                      | <b>15</b> |
| <b>1.4</b> | <b>Objetivo Geral e Específicos</b>                            | <b>17</b> |
| 1.4.1      | Objetivos específicos                                          | 17        |
| <b>1.5</b> | <b>Metodologia</b>                                             | <b>18</b> |
| <b>2</b>   | <b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b>                                   | <b>19</b> |
| <b>2.1</b> | <b>Geração distribuída</b>                                     | <b>19</b> |
| <b>2.2</b> | <b>Geração fotovoltaica</b>                                    | <b>20</b> |
| <b>2.3</b> | <b>Baterias de íons lítio</b>                                  | <b>22</b> |
| 2.3.1      | Vantagens técnicas                                             | 23        |
| 2.3.2      | Desempenho térmico                                             | 23        |
| 2.3.3      | Sistema de Gerenciamento (BMS)                                 | 24        |
| <b>2.4</b> | <b>Sistema de Armazenamento de Energia com Baterias (BESS)</b> | <b>24</b> |
| 2.4.1      | Aplicações dos Sistemas BESS                                   | 26        |
| 2.4.2      | Integração entre Sistemas Fotovoltaicos e BESS                 | 26        |
| 2.4.3      | Suavização de Potência e Qualidade de Energia                  | 27        |
| 2.4.4      | Critérios Técnicos de Dimensionamento                          | 27        |
| 2.4.5      | Relação com o Tema do Trabalho                                 | 28        |
| <b>2.5</b> | <b>Consumo Médio Residencial</b>                               | <b>28</b> |
| <b>2.6</b> | <b>Correntes em Sistemas de Armazenamento por Baterias</b>     | <b>29</b> |

|            |                                                                       |           |
|------------|-----------------------------------------------------------------------|-----------|
| 2.6.1      | Associação de Baterias em Paralelo e a Lei de Kirchhoff das Correntes | 29        |
| 2.6.2      | Corrente Média Real de Operação                                       | 30        |
| 2.6.3      | Impacto das Correntes no Dimensionamento Elétrico                     | 30        |
| <b>3</b>   | <b>METODOLOGIA E EQUACIONAMENTO</b>                                   | <b>32</b> |
| <b>3.1</b> | <b>Definição dos Parâmetros do Sistema</b>                            | <b>32</b> |
| 3.1.1      | Definição do Consumo Médio Residencial                                | 32        |
| 3.1.2      | Número de Dias de Autonomia                                           | 34        |
| 3.1.3      | Profundidade de Descarga (DOD)                                        | 34        |
| 3.1.4      | Fator de Segurança                                                    | 35        |
| <b>3.2</b> | <b>Caracterização das Baterias</b>                                    | <b>36</b> |
| 3.2.1      | Bateria AXE 5.0L Modular Battery Growatt - 51,2V                      | 36        |
| 3.2.2      | Bateria SBW CB050 W00 WEG — 192 V                                     | 37        |
| 3.2.3      | Bateria SBW CB100 W00 WEG — 384 V                                     | 40        |
| <b>3.3</b> | <b>Equacionamento do dimensionamento</b>                              | <b>42</b> |
| 3.3.1      | Capacidade Ideal do Banco                                             | 42        |
| 3.3.2      | Capacidade Real do Banco                                              | 42        |
| 3.3.3      | Número de Baterias, Peso e Volume Total                               | 42        |
| 3.3.4      | Correntes de Operação do Banco                                        | 43        |
| 3.3.4.1    | Corrente Máxima do Banco                                              | 43        |
| 3.3.4.2    | Corrente Média Real de Operação                                       | 44        |
| <b>4</b>   | <b>RESULTADOS E DISCUSSÕES</b>                                        | <b>45</b> |
| <b>4.1</b> | <b>Dimensionamento Estático</b>                                       | <b>45</b> |
| 4.1.1      | Banco de 51,2 V — AXE 5.0L Growatt                                    | 45        |
| 4.1.2      | Banco de 192 V — SBW CB050 W00 WEG                                    | 47        |

|            |                                                         |           |
|------------|---------------------------------------------------------|-----------|
| 4.1.3      | Banco de 384 V — SBW CB100 W00 WEG                      | 49        |
| <b>4.2</b> | <b>Análise Paramétrica</b>                              | <b>50</b> |
| 4.2.1      | Banco de 51,2 V — AXE 5.0L Growatt                      | 51        |
| 4.2.2      | Banco de 192 V — SBW CB050 W00 WEG                      | 55        |
| 4.2.3      | Banco de 384 V — SBW CB100 W00 WEG                      | 59        |
| <b>4.3</b> | <b>Análise Comparativa entre as três baterias</b>       | <b>63</b> |
| 4.3.1      | Dimensionamento Estático - Comparação                   | 63        |
| 4.3.2      | Viabilidade Técnica na Análise Paramétrica — Comparação | 64        |
| 4.3.3      | Discussões Sobre os Resultados                          | 65        |
| <b>5</b>   | <b>CONCLUSÃO</b>                                        | <b>67</b> |
|            | <b>REFERÊNCIAS</b>                                      | <b>69</b> |
|            | <b>APÊNDICE A</b>                                       | <b>72</b> |
|            | <b>APÊNDICE B</b>                                       | <b>82</b> |
|            | <b>APÊNDICE C</b>                                       | <b>90</b> |

## 1. INTRODUÇÃO

A ideia de geração de energia elétrica a partir do sol já existe desde o século XX, mas foi em 2012 que a ANEEL regulamentou as normas para a micro e minigeração. Conhecida por geração distribuída, trouxe consigo a oportunidade para que cada um pudesse gerar sua própria energia, desenvolvendo assim mais autonomia em relação à rede, tanto para situações de falta de energia quanto para redução do custo da tarifa (EPE, 2025). Com isso, vem se tornando cada vez mais comum encontrar instalações de módulos fotovoltaicos.

A alta demanda de energia, aliada à busca por fontes renováveis vem tornando a geração fotovoltaica cada vez mais atraente para os dias atuais. De acordo com o BNDES, de 2010 à 2023, a capacidade instalada cresceu de 40 GW para 1400 GW, o que representa um aumento de 35 vezes. Esse crescimento decorreu da redução dos custos de instalação, dos avanços tecnológicos e do desenvolvimento de políticas de incentivo ao setor. Em 2024, o Brasil produziu 52 GW de energia fotovoltaica, consolidando essa fonte como a segunda maior da matriz elétrica nacional, com participação de aproximadamente 20% no cenário energético do país.

Diante disso, alguns sistemas de geração fotovoltaica são considerados na elaboração de um projeto, dentre os quais se destacam o *on-grid*, o *off-grid* e o híbrido. O sistema *on-grid* caracteriza-se pela conexão do sistema de geração com a rede da concessionária, de modo que a energia gerada pelos módulos fotovoltaicos é utilizada, enquanto o excedente é realocado na rede elétrica.

Já nos sistemas *off-grid* e híbrido, verifica-se a utilização de um sistema de armazenamento com baterias, possibilitando ao usuário gerar energia, armazená-la para utilização posterior e utilizá-la como *backup* em eventuais interrupções no abastecimento elétrico. Além disso, o armazenamento permite a redução da tarifa por meio da utilização da energia nos horários de ponta, sendo ainda possível injetar parte do excedente na rede elétrica.

A utilização de sistemas de armazenamento de energia com baterias ainda apresenta custo mais elevado e maior nível de complexidade, uma vez que, para

atender à demanda da instalação, o banco de baterias deve possuir capacidade robusta de armazenamento, bem como elevada capacidade de carga e descarga.

Ao optar pelo sistema de armazenamento com baterias de íon-lítio, é possível atender de forma mais eficiente às demandas da instalação quando comparadas aos bancos com baterias de chumbo-ácido. Isso ocorre porque o uso de baterias de lítio, material leve e com alta densidade energética, atende a instalações de alta potência demandada, podendo entregar até 4x mais energia do que a bateria de chumbo-ácido (Garche, 2010).

Além disso, as baterias de lítio apresentam a vantagem de operar com níveis de tensão mais elevados, reduzindo a temperatura de operação do sistema de armazenamento, proporcionando maior número de ciclos com elevado valor de energia agregado e desempenho mais eficiente nos processos de carga e descarga do sistema.

Portanto, o esclarecimento que este trabalho deve realizar é facilitar o entendimento de como é feito e o que deve ser levado em conta na hora de escolher um sistema de armazenamento de energia em baterias. Diversos modelos de baterias das mais diversas tensões serão abordadas, buscando atender a média de potência demandada em uma instalação residencial no estado do Paraná.

### **1.1 Delimitação do tema**

O projeto busca demonstrar uma metodologia de dimensionamento de um banco de baterias, e o que deve ser levado em consideração no momento da escolha dos componentes.

Portanto, foi utilizado o valor da demanda energética mensal média na casa do brasileiro de acordo com a COPEL. Com isso, baterias de íon-lítio de diferentes tensões, dimensões, capacidades de carga e com variações na profundidade de carga foram consideradas para a realização deste estudo.

### **1.2 Problema**

Devido ao crescimento da geração distribuída no Brasil a limitação do sistema de energia atual tem se mostrado vulnerável. Como a maioria dos sistemas são projetados para injetar o excedente de energia na rede, e há momentos em que a irradiação solar é alta e a injeção de energia também, a rede acaba

sobrecarregando, ainda mais quando se trata de locais com baixo consumo de energia. Com isso, as concessionárias nem sempre tem onde alocar toda essa energia, sabendo que a demanda daquele instante já está atendida.

Além disso, a esse cenário é somada a cobrança progressiva do Fio B, instituída pela 14.300/2022, a qual reduz gradualmente o retorno financeiro obtido apenas pela injeção do excedente de energia. Portanto, ao invés de enfrentar situações cada vez menos vantajosas com o excedente injetado, a possibilidade de reter esse excedente surge como uma solução.

Vale ressaltar também que, por se tratar de um conceito relativamente novo, o público em geral ainda carece de conhecimento sobre o tema. Essa falta de familiaridade gera desconfiança, fazendo com que muitos consumidores se sintam inseguros em adotar a instalação do sistema em suas casas.

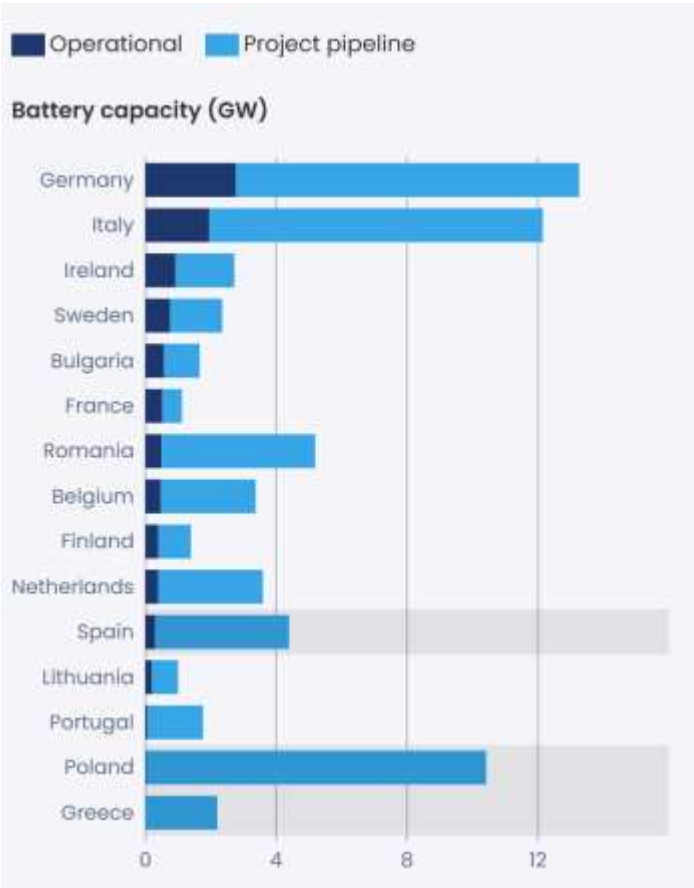
Apesar desses desafios, o estudo de dimensionamento de um banco de baterias mostra-se fundamental para a desmistificação do tema. A pesquisa busca dar visibilidade ao assunto, evidenciando que a proposta é uma solução viável e passível de implementação na residência de qualquer consumidor.

### **1.3 Relevância do tema**

Embora o tema da geração fotovoltaica venha sendo muito debatido no Brasil nos últimos anos, as formas de armazenar essa energia geralmente ainda ficam de fora da discussão. Além disso, o fato de o assunto ser comum entre os profissionais da área não o torna uma pauta amplamente comentada no meio acadêmico, e muito menos pela população em geral.

Contudo, essa já é uma realidade em países europeus, o que vem impulsionando a implementação de baterias para o armazenamento de energia. De acordo com a European Electricity Review 2026, a capacidade instalada ultrapassou a marca de 10 GW em 2025, mais que o dobro dos 4 GW registrados em 2023. A Alemanha e a Polônia lideram esses projetos e, caso todos os que estão em andamento sejam finalizados, a capacidade de armazenamento excederá os 40 GW.

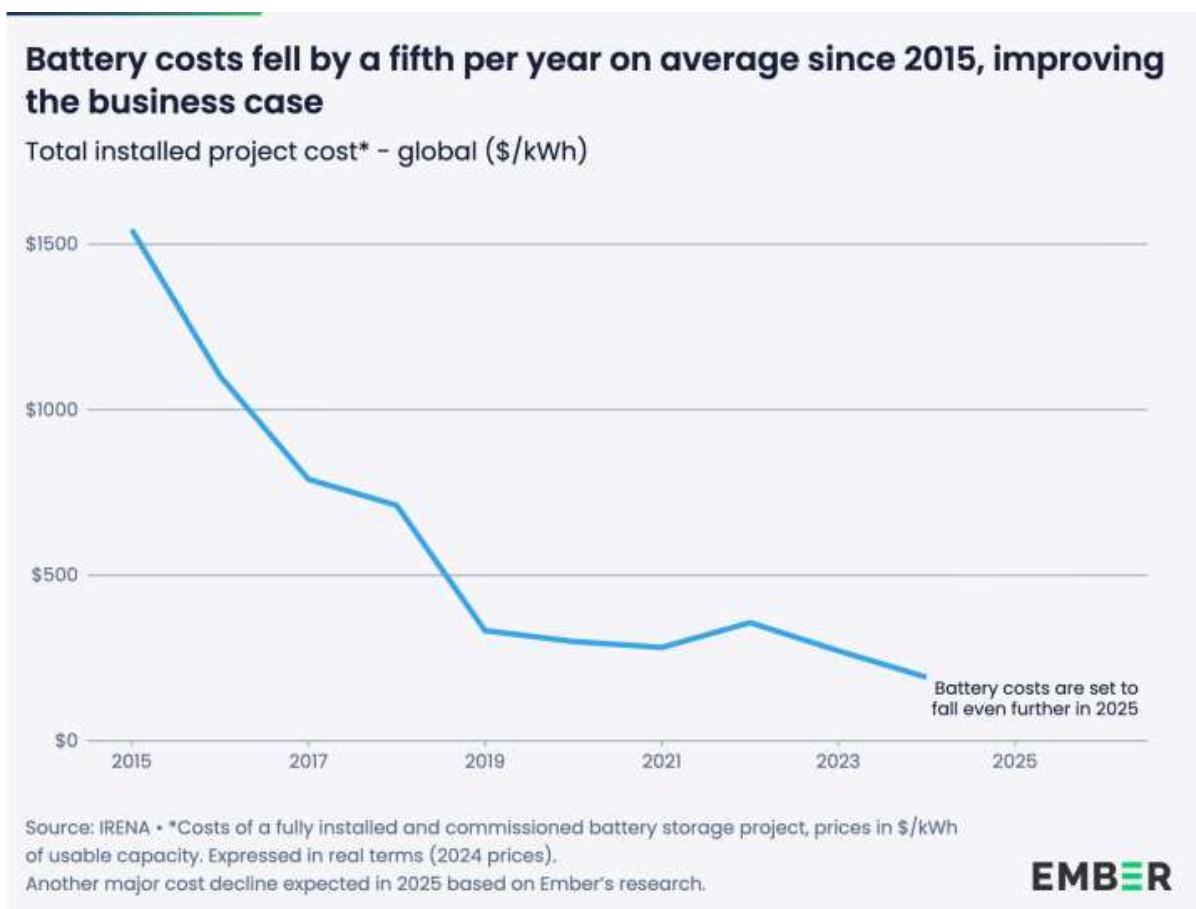
**Gráfico 1 – Capacidade e projeção de armazenamento com baterias em países da Europa.**



**Fonte: European Electricity Review 2026.**

Vale ressaltar que um dos principais impulsionadores desse cenário é a queda no preço das baterias, visto que os custos dos sistemas de armazenamento vêm diminuindo cerca de 20% ao ano. Essa tendência pode ser observada na Gráfico 2, retirada da European Electricity Review 2026, que retrata a redução nos preços desses sistemas ao longo da última década.

**Gráfico 2 – Custo de baterias ao decorrer dos últimos anos.**



Fonte: European Electricity Review 2026.

#### 1.4 Objetivo geral e específico

Desenvolver uma metodologia de projeto de um sistema de armazenamento de energia por baterias (BESS), priorizando a análise comparativa entre diferentes modelos e esclarecendo o impacto da tensão e da corrente no dimensionamento do banco de baterias. O projeto terá como parâmetros de estudo principais a profundidade de descarga e o tempo de autonomia.

##### 1.4.1 Objetivos específicos

Para que seja possível chegar aos resultados esperados, alguns objetivos específicos devem ser alcançados.

- 1) Levantar o perfil de consumo de energia elétrica de uma unidade consumidora residencial.
- 2) Definir as principais variáveis técnicas com um dimensionamento, levando em consideração o valor de sua tensão, corrente, peso e volume.
- 3) Analisar a disponibilidade comercial e dimensionar o banco de baterias dos modelos propostos, buscando atender a demanda residencial.
- 4) Atribuir valores de DoD para que seja determinado o número de unidades de baterias para singularidade de alguns cenários.
- 5) Por fim, analisar os resultados obtidos, buscando esclarecer as especificações de cada banco.

### **1.5 Metodologia**

Para este trabalho, foram definidos três modelos de baterias, todas buscando atender a mesma demanda, porém, cada uma tendo seus parâmetros individuais. Para isso, utilizou-se o software MATLAB para o equacionamento das características de cada bateria.

A metodologia presente aplicada buscou:

1. Obter um valor médio de demanda em uma residência a partir de dados validados.
2. Definir modelos de baterias comerciais para definir o dimensionamento do banco.
3. Definir uma metodologia de projeto para o sistema de armazenamento com baterias.
4. Definir a profundidade de descarga e o tempo de autonomia como variáveis de projeto.
5. Verificar graficamente o impacto das variáveis de projeto no dimensionamentos do sistema de armazenamento com o uso de baterias comerciais

## **2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

Este capítulo tem como objetivo apresentar os temas abordados no trabalho, de modo a fundamentar teoricamente a pesquisa, consolidar as referências utilizadas e proporcionar maior coesão, clareza e fluidez ao desenvolvimento do estudo.

### **2.1 Geração distribuída**

A geração distribuída consiste na produção de energia elétrica próxima ao local de consumo, por meio de unidades geradoras conectadas diretamente à rede de distribuição ou instaladas na própria unidade consumidora. De acordo com a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), a micro e minigeração distribuída caracteriza-se pela geração realizada pelos próprios consumidores, com possibilidade de compensação da energia excedente injetada na rede elétrica (ANEEL, 2022).

Diferentemente do modelo tradicional de geração centralizada — no qual grandes usinas produzem energia em locais distantes dos centros consumidores, dependendo de extensos sistemas de transmissão e distribuição —, a geração distribuída adota uma estrutura descentralizada, promovendo maior proximidade entre os pontos de geração e de consumo. Essa configuração favorece a redução de perdas elétricas, o aumento da eficiência energética e a postergação de investimentos na expansão da infraestrutura da rede elétrica (EPE, 2025).

No Brasil, a expansão da geração distribuída ganhou impulso significativo a partir da publicação da Resolução Normativa nº 482/2012 da ANEEL, posteriormente revisada pela Resolução Normativa nº 687/2015. Essas regulamentações estabeleceram as condições gerais para o acesso de micro e minigeradores ao sistema elétrico e instituíram o sistema de compensação de energia elétrica.

Em seguida, a Lei nº 14.300, de 6 de janeiro de 2022 — denominada Marco Legal da Microgeração e Minigeração Distribuída —, consolidou o ambiente regulatório do setor, definindo diretrizes permanentes para conexão, compensação energética, transição tarifária e segurança jurídica aos consumidores-geradores (BRASIL, 2022).

A consolidação desse marco regulatório impulsionou especialmente a expansão dos sistemas fotovoltaicos residenciais e comerciais, tornando a fonte solar a protagonista do crescimento desse segmento no país.

## **2.2 Geração Fotovoltaica**

Entre as diversas fontes aplicáveis à geração distribuída, a energia solar fotovoltaica tornou-se predominante no cenário nacional, impulsionada pela elevada incidência solar em grande parte do território brasileiro, pela redução gradual dos custos dos equipamentos e pela relativa simplicidade de instalação e manutenção. A geração fotovoltaica consiste na conversão direta da radiação solar em energia elétrica por meio do efeito fotovoltaico — fenômeno físico observado em materiais semicondutores, principalmente o silício. Quando expostos à luz solar, esses materiais liberam elétrons, gerando corrente elétrica contínua que, posteriormente, pode ser convertida em corrente alternada por meio de inversores eletrônicos (VILLALVA; GAZOLI, 2012).

Os sistemas fotovoltaicos são normalmente compostos por módulos solares, inversores, estruturas de fixação, dispositivos de proteção elétrica e, em determinadas aplicações, sistemas de armazenamento de energia por baterias. Quanto ao modo de operação, esses sistemas podem ser classificados em três configurações: conectados à rede elétrica (*on-grid*), isolados (*off-grid*) ou híbridos, combinando as duas modalidades anteriores.

Segundo dados da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL, 2026), o Brasil superou a marca de 46 GW de capacidade instalada em geração solar distribuída, evidenciando a consolidação dessa tecnologia no setor elétrico nacional. Esse expressivo crescimento reforça a importância estratégica da fonte solar para a expansão sustentável da matriz elétrica brasileira. O Gráfico 3 evidencia os dados relacionados à potência instalada da geração fotovoltaica.

**Gráfico 3 – Capacidade instalada de geração solar fotovoltaica distribuída no Brasil.**

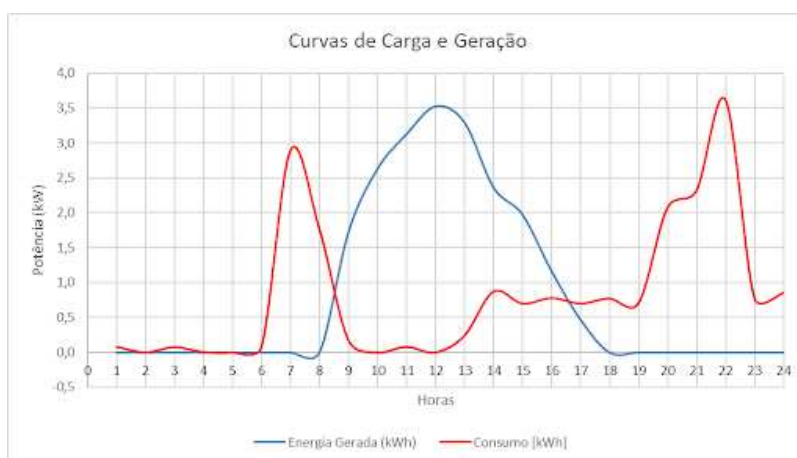
| FONTE DE GERAÇÃO |                  |                  |                      |
|------------------|------------------|------------------|----------------------|
| COMBUSTÍVEL      | QTD GD           | UCs REC CRÉDITOS | POT INSTALADA (kW)   |
| Radiação solar   | 4.198.464        | 7.433.704        | 46.566.007,62        |
| <b>Total</b>     | <b>4.198.464</b> | <b>7.433.704</b> | <b>46.566.007,62</b> |

**Fonte: Adaptado de Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL, 2026).**

Além dos benefícios econômicos decorrentes da redução do consumo faturado junto à rede elétrica, os sistemas fotovoltaicos apresentam relevantes vantagens ambientais, entre as quais se destacam a ausência de emissões diretas de gases poluentes durante a operação, a baixa necessidade de manutenção e o aproveitamento de uma fonte energética renovável e abundante (IEA, 2024).

No entanto, a geração distribuída baseada exclusivamente em sistemas fotovoltaicos apresenta limitações inerentes à intermitência da fonte solar, uma vez que a produção de energia depende diretamente da disponibilidade de radiação ao longo do dia e das condições climáticas locais. Em períodos noturnos ou de baixa insolação, a geração é reduzida ou inexistente, tornando necessário o recurso à rede elétrica convencional ou a sistemas complementares de armazenamento. Conforme apontam Villalva e Gazoli (2012), a variabilidade natural da radiação solar constitui um dos principais fatores limitantes da geração fotovoltaica isolada. Um perfil horário exemplificado na Gráfico 4 mostra a disparidade de geração e consumo em diferentes horários.

**Gráfico 4 – Perfil horário de geração fotovoltaica e consumo energético em residência.**



**Fonte: Adaptado de Canal Solar (s.d.).**

Nesse contexto, a integração entre sistemas fotovoltaicos e sistemas de armazenamento por baterias emerge como uma alternativa técnica de grande relevância, possibilitando maior aproveitamento da energia gerada, ampliação da autonomia energética e redução da dependência da rede concessionária — aspectos centrais que motivam o presente trabalho.

### **2.3 Baterias de Íons de Lítio**

Entre as diferentes tecnologias empregadas em sistemas de armazenamento de energia, as baterias de íons de lítio vêm se consolidando como a principal alternativa para aplicações estacionárias modernas. Sua ampla adoção decorre da combinação entre elevado desempenho técnico, redução progressiva de custos e compatibilidade com sistemas de geração renovável, especialmente instalações fotovoltaicas residenciais e comerciais (IEA, 2024).

As baterias de íons de lítio operam a partir do deslocamento reversível de íons entre os eletrodos positivo e negativo, permitindo sucessivos ciclos de carregamento e descarga com elevada eficiência energética. Em comparação com tecnologias convencionais, como baterias chumbo-ácido, apresentam características superiores em densidade energética, vida útil e desempenho operacional (LINDEN; REDDY, 2011).

### 2.3.1 Vantagens técnicas

Dentre os principais atributos das baterias de íons de lítio aplicadas a sistemas fotovoltaicos, destacam-se:

- Elevada densidade energética, permitindo maior capacidade em menor volume físico;
- Maior vida útil em número de ciclos;
- Alta eficiência de carga e descarga;
- Menor taxa de autodescarga;
- Reduzida necessidade de manutenção;
- Melhor desempenho em descargas profundas;
- Menor massa total para a mesma capacidade armazenada.

Essas características tornam essa tecnologia particularmente atrativa em aplicações residenciais, nas quais espaço físico, confiabilidade e durabilidade são fatores relevantes.

### 2.3.2 Desempenho térmico

Outro aspecto relevante das baterias de íons de lítio está relacionado ao seu desempenho térmico. Embora a temperatura de operação influencie o rendimento e a degradação de qualquer sistema eletroquímico, baterias de lítio normalmente apresentam menor sensibilidade térmica quando comparadas a tecnologias convencionais, como baterias chumbo-ácido, especialmente em faixas moderadas de temperatura ambiente. Isso reduz impactos diretos no dimensionamento do sistema em aplicações residenciais usuais, nas quais as condições térmicas tendem a permanecer dentro de limites operacionais aceitáveis.

Segundo Pesaran, Santhanagopalan e Kim (2013), baterias de íons de lítio mantêm desempenho satisfatório em ampla faixa térmica, sendo os principais efeitos observados em condições extremas de calor ou frio, situações que podem exigir estratégias adicionais de gerenciamento térmico. Dessa forma, em aplicações estacionárias de pequeno porte, a temperatura tende a representar fator secundário de dimensionamento quando comparada a parâmetros como demanda energética, profundidade de descarga e número de ciclos.

### 2.3.3 Sistema de Gerenciamento (BMS)

Em baterias de íons de lítio, a utilização de sistemas de gerenciamento de baterias (*Battery Management System* – BMS) é indispensável para garantir segurança, confiabilidade e desempenho operacional. O BMS realiza o monitoramento contínuo de tensão, corrente e temperatura, além do balanceamento entre células e da proteção contra condições anormais de operação, como sobrecarga e descarga excessiva (LINDEN; REDDY, 2011).

### 2.4 Sistema de Armazenamento de Energia com Baterias (BESS)

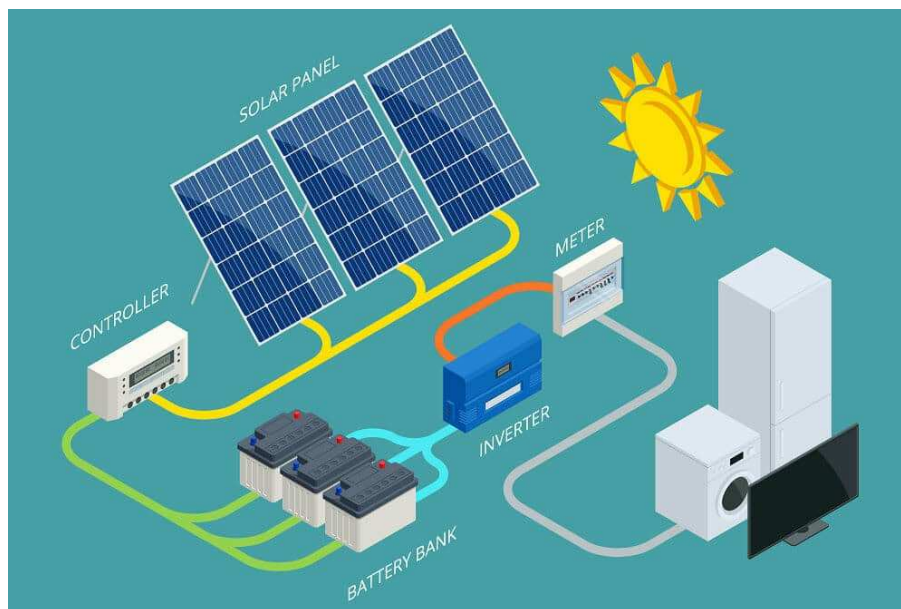
Nesse contexto, insere-se o tema deste trabalho: o dimensionamento de bancos de baterias aplicados a sistemas fotovoltaicos de pequeno porte. A associação entre geração distribuída e armazenamento de energia permite ampliar a autonomia do consumidor, elevar o aproveitamento da energia gerada localmente e reduzir a dependência da rede da concessionária. Além disso, o uso de baterias contribui para maior confiabilidade do sistema, especialmente em aplicações residenciais que demandam continuidade de fornecimento em horários sem geração solar.

Portanto, o avanço da geração distribuída não depende apenas da expansão dos sistemas fotovoltaicos, mas também do desenvolvimento de soluções eficientes de armazenamento energético. Nesse cenário, o correto dimensionamento de bancos de baterias torna-se etapa fundamental para garantir desempenho técnico, viabilidade econômica e segurança operacional do sistema proposto neste estudo.

Os Sistemas de Armazenamento de Energia com Baterias, internacionalmente conhecidos como *Battery Energy Storage Systems* (BESS), consistem em conjuntos integrados de baterias associados a conversores eletrônicos de potência, sistemas de proteção, monitoramento e controle, destinados ao armazenamento temporário de energia elétrica para posterior utilização. Nas últimas décadas, os sistemas BESS passaram a ocupar posição estratégica no setor elétrico, especialmente em razão do crescimento da participação de fontes renováveis intermitentes, como a geração solar fotovoltaica e a eólica (IRENA, 2017).

A Figura 1 ilustra um esquema simplificado de um BESS.

**Figura 1 – Esquema simplificado de um sistema fotovoltaico com banco de baterias (BESS).**



**Fonte: Adaptado de DEYE (2023).**

O princípio de funcionamento de baterias eletroquímicas baseia-se na conversão de energia elétrica em energia química durante o processo de carregamento e na reconversão dessa energia química em energia elétrica durante a descarga, por meio de reações eletroquímicas reversíveis (LINDEN; REDDY, 2011). Em sistemas BESS, essa característica permite armazenar energia em períodos de maior disponibilidade e utilizá-la posteriormente conforme a demanda da carga ou as necessidades operacionais do sistema elétrico (LUO et al., 2015).

De forma geral, um sistema BESS é composto pelos seguintes elementos principais:

- Banco de baterias;
- Inversor/carregador bidirecional;
- Sistema de gerenciamento de baterias (*Battery Management System* – BMS);
- Dispositivos de proteção elétrica;
- Sistema de supervisão e monitoramento.

A integração adequada desses subsistemas é fundamental para garantir desempenho energético, segurança operacional e maior vida útil do sistema (LUO et al., 2015).

#### 2.4.1 Aplicações dos Sistemas BESS

Os sistemas BESS apresentam ampla aplicabilidade tanto em redes elétricas de grande porte quanto em instalações de pequeno porte. Em aplicações residenciais e comerciais associadas à geração fotovoltaica, destacam-se as seguintes funções:

- 1) Armazenamento do excedente de geração solar durante o dia;
- 2) Fornecimento de energia no período noturno;
- 3) Redução do consumo em horários de ponta tarifária;
- 4) Continuidade de fornecimento em falhas de rede elétrica (*backup*);
- 5) Aumento do autoconsumo da energia gerada localmente.

Além disso, em redes elétricas modernas, os sistemas BESS também podem atuar em serviços ancilares, como controle de frequência, regulação de tensão, reserva operacional e suporte à estabilidade do sistema (IEA, 2024).

#### 2.4.2 Integração entre Sistemas Fotovoltaicos e BESS

A associação entre geração fotovoltaica e sistemas BESS tornou-se uma das principais alternativas para elevar a flexibilidade energética das instalações modernas. Como a produção fotovoltaica depende diretamente da disponibilidade de irradiância solar, a energia gerada nem sempre coincide com o perfil de consumo da unidade consumidora.

Nesse contexto, o armazenamento em baterias permite conservar o excedente energético produzido em períodos favoráveis e disponibilizá-lo em momentos de baixa geração ou maior demanda. Tal estratégia aumenta o aproveitamento da energia produzida localmente, reduz a importação de energia da rede e pode elevar os índices de autossuficiência energética (ANDRÉ, 2022).

Além disso, estudos aplicados em sistemas residenciais demonstram que a integração entre sistemas solares e BESS contribui para maior confiabilidade e

resiliência energética, especialmente em cenários de falhas da rede concessionária ou operação em modo ilhado (METWALLY et al., 2019).

#### 2.4.3 Suavização de Potência e Qualidade de Energia

Em sistemas conectados à rede elétrica, variações rápidas na geração fotovoltaica provocadas por alterações climáticas podem causar oscilações abruptas na potência injetada, impactando a operação da rede.

Os sistemas BESS podem atuar como elemento compensador dessas variações, absorvendo ou fornecendo potência em curtos intervalos de tempo. Esse processo, conhecido como *power smoothing*, contribui para limitar rampas de potência, melhorar o perfil de tensão e auxiliar na estabilidade de frequência do sistema elétrico (SELVARASU et al., 2024).

À medida que aumenta a participação de fontes renováveis intermitentes na matriz energética, essa aplicação torna-se progressivamente mais relevante.

#### 2.4.4 Critérios Técnicos de Dimensionamento

O dimensionamento adequado de um sistema BESS depende da análise simultânea de variáveis técnicas, operacionais e econômicas. Entre os principais parâmetros considerados, destacam-se:

- Consumo energético diário da carga;
- Autonomia desejada;
- Potência máxima demandada;
- Profundidade máxima de descarga (*Depth of Discharge* – DoD);
- Eficiência global do sistema;
- Número de ciclos de operação;
- Vida útil esperada;
- Temperatura de operação;
- Espaço físico disponível;
- Investimento inicial e custo por kWh armazenado.

O superdimensionamento do sistema eleva desnecessariamente os custos do projeto, enquanto o subdimensionamento pode comprometer a autonomia e a

confiabilidade operacional. Dessa forma, o processo de projeto deve buscar equilíbrio entre desempenho técnico e viabilidade econômica (ANDRÉ, 2022; IEA, 2024).

#### 2.4.5 Relação com o Tema do Trabalho

No presente estudo, os sistemas BESS representam o elemento central para viabilizar o armazenamento da energia gerada por sistemas fotovoltaicos de pequeno porte. O correto dimensionamento do banco de baterias influencia diretamente a quantidade de módulos necessários, a autonomia energética obtida, o espaço estrutural requerido e o custo final da solução proposta.

Dessa forma, compreender os fundamentos técnicos e operacionais dos sistemas BESS constitui etapa essencial para o desenvolvimento da metodologia de dimensionamento apresentada neste trabalho.

### 2.5 Consumo Médio Residencial

A determinação do consumo médio residencial representa etapa inicial essencial no dimensionamento de sistemas fotovoltaicos com armazenamento por baterias, uma vez que a demanda energética da unidade consumidora influencia diretamente a capacidade necessária do banco de baterias, a autonomia desejada e a viabilidade técnica do projeto.

Como referência para este estudo, podem ser utilizados dados divulgados por concessionárias de energia elétrica. Segundo a Companhia Paranaense de Energia (COPEL), a média de consumo de energia elétrica por residência no primeiro trimestre de 2025 foi de 217 kWh por mês. Tal indicador representa parâmetro relevante para estimativas energéticas aplicadas ao contexto residencial no estado do Paraná.

Dessa forma, o valor médio de 217 kWh mensais pode ser adotado como base inicial para análises de dimensionamento, auxiliando na definição da capacidade de armazenamento, autonomia operacional e quantidade de módulos de baterias necessários ao sistema proposto.

## 2.6 Correntes em Sistemas de Armazenamento por Baterias

A análise das correntes de operação em sistemas de armazenamento por baterias constitui etapa fundamental para o dimensionamento elétrico seguro e eficiente de uma instalação fotovoltaica com *BESS*. As correntes determinam diretamente a especificação dos condutores, dispositivos de proteção e demais componentes elétricos do sistema, sendo sua correta determinação indispensável para garantir a integridade e a confiabilidade da instalação (ABNT NBR 16690, 2019).

### 2.6.1 Associação de Baterias em Paralelo e a Lei de Kirchhoff das Correntes

Em sistemas de armazenamento de energia, é comum a necessidade de conectar múltiplas unidades de bateria em paralelo para atingir a capacidade total de armazenamento requerida pelo projeto. Nessa configuração, os terminais positivos de todas as unidades são interligados entre si, e o mesmo ocorre com os terminais negativos, de modo que a tensão do banco permanece igual à tensão nominal de cada unidade individual, enquanto a capacidade total em ampère-hora é somada (BOYLESTAD, 2012).

O comportamento elétrico dessa configuração é regido pela Lei de *Kirchhoff* das Correntes (LKC), que estabelece que a corrente total que flui por um nó de um circuito elétrico é igual à soma das correntes individuais que nele convergem (NILSSON; RIEDEL, 2015). Aplicada à associação de baterias em paralelo, essa lei implica que a corrente máxima total fornecida pelo banco é diretamente proporcional ao número de unidades conectadas — ou seja, cada unidade contribui com sua corrente nominal para a corrente total do conjunto.

Esse princípio evidencia um aspecto técnico relevante para o dimensionamento: à medida que o número de unidades aumenta para atender a maiores demandas de autonomia ou menores profundidades de descarga, a corrente máxima do banco cresce proporcionalmente, impondo requisitos cada vez mais exigentes ao dimensionamento dos componentes elétricos da instalação (NILSSON; RIEDEL, 2015). Esse comportamento é o inverso da associação em série, na qual a tensão se multiplica e a corrente permanece constante — princípio

igualmente fundamentado na Lei de *Kirchhoff* das Tensões (LKT) (BOYLESTAD, 2012).

### 2.6.2 Corrente Média Real de Operação

A corrente média real de operação representa a corrente efetivamente demandada pelo sistema para suprir o consumo médio diário da unidade consumidora, distribuído ao longo do período de autonomia. Essa grandeza é obtida a partir da relação fundamental entre energia elétrica, tensão, corrente e tempo, e evidencia de forma direta o impacto da tensão nominal do banco sobre as correntes de operação do sistema: quanto maior a tensão, menor a corrente necessária para fornecer a mesma energia, o que reduz as perdas resistivas nos condutores e simplifica o dimensionamento elétrico da instalação (VILLALVA; GAZOLI, 2012).

Esse princípio é especialmente relevante na comparação entre sistemas de baixa e alta tensão. Para uma mesma demanda energética, um banco operando em alta tensão demandará correntes médias significativamente inferiores às de um banco equivalente operando em baixa tensão, com impacto direto sobre a seção transversal dos condutores, a capacidade de interrupção dos dispositivos de proteção e as perdas por efeito Joule na instalação. Essa relação inversamente proporcional entre tensão e corrente, para uma mesma potência, é um dos princípios fundamentais da engenharia elétrica e constitui uma das principais motivações para a adoção de sistemas de armazenamento em alta tensão em aplicações de maior porte (CREDER, 2016).

### 2.6.3 Impacto das Correntes no Dimensionamento Elétrico

O conhecimento das correntes de operação do banco de baterias é requisito indispensável para o dimensionamento dos componentes elétricos da instalação. A norma ABNT NBR 16690 (2019), que regulamenta os requisitos de projeto de instalações elétricas de arranjos fotovoltaicos no Brasil, estabelece que todos os condutores e dispositivos de proteção devem ser dimensionados com base na corrente de projeto do circuito, definida como a corrente máxima que o circuito pode conduzir em regime contínuo de operação.

Nesse contexto, a corrente máxima do banco representa o parâmetro de referência para o dimensionamento dos dispositivos de proteção — como disjuntores e fusíveis —, que devem ser capazes de interromper essa corrente em condições de falha sem comprometer a segurança da instalação (CREDER, 2016). A corrente de descarga, por sua vez, é utilizada como referência para o dimensionamento dos condutores em regime normal de operação, enquanto a corrente média real fornece uma perspectiva do regime efetivo de trabalho do sistema ao longo do tempo.

A correta determinação e análise dessas três grandezas — corrente máxima, corrente de descarga e corrente média real — constitui, portanto, etapa essencial no projeto de sistemas fotovoltaicos com armazenamento por baterias, garantindo não apenas o desempenho técnico esperado, mas também a segurança e a conformidade normativa da instalação.

### 3 METODOLOGIA E EQUACIONAMENTO

Este capítulo apresenta a metodologia adotada para o dimensionamento dos bancos de baterias estudados neste trabalho. São definidos os parâmetros gerais do sistema, caracterizadas as três baterias utilizadas nos estudos de caso e desenvolvido o equacionamento matemático empregado nos cálculos. O equacionamento apresentado nesta seção foi implementado no *software MATLAB*, ambiente utilizado para a obtenção de todos os resultados apresentados no Capítulo 4, tanto para o dimensionamento estático quanto para a análise paramétrica com variações da profundidade de descarga (DoD) e do número de dias de autonomia (Nd).

#### 3.1 Definição dos Parâmetros do Sistema

O dimensionamento adequado de um banco de baterias para um sistema fotovoltaico pressupõe a definição criteriosa de um conjunto de parâmetros que traduzem, de forma quantitativa, tanto o perfil de consumo da unidade a ser atendida quanto às condições técnicas e operacionais do sistema de armazenamento. A escolha equivocada de qualquer um desses parâmetros pode resultar em um banco subdimensionado — incapaz de garantir a autonomia energética desejada — ou superdimensionado, elevando desnecessariamente os custos de implantação. Neste trabalho, cada parâmetro foi estabelecido com base em dados de consumo real, em critérios técnicos consolidados na literatura especializada e em *datasheets* de baterias com modelos adequados conforme detalhado a seguir.

##### 3.1.1 Definição do Consumo Médio Residencial

O conhecimento da energia consumida ao longo de determinado período é fundamental, pois esse parâmetro serve como base para todos os cálculos subsequentes relacionados à capacidade do banco de baterias, autonomia desejada, número de módulos necessários e viabilidade técnica da solução proposta.

Para fins de dimensionamento, torna-se necessário converter o consumo mensal em consumo diário médio, de modo a compatibilizar a análise com a autonomia requerida do banco de baterias. Dessa forma, a energia média diária pode ser obtida a partir da divisão do consumo mensal pelo número médio de dias do mês, conforme apresentado na Equação (1).

$$Ed = \frac{Em}{30} \quad (1)$$

$Ed$  = energia média diária consumida (kWh/dia)

$Em$  = energia média mensal consumida (kWh/mês)

Neste trabalho, adotou-se como referência o consumo médio residencial de 217 kWh por mês, conforme expressado na seção 2.5. Assim, a energia média diária considerada para o dimensionamento é dada por:

$$Ed = \frac{217}{30} = 7,23 \text{ kWh/dia}$$

Portanto, considera-se que a residência analisada demanda, em média, aproximadamente 7,23 kWh de energia por dia, valor que será utilizado como base para as etapas posteriores de dimensionamento do banco de baterias.

### 3.1.2 Número de Dias de Autonomia

A autonomia de um sistema de armazenamento corresponde ao intervalo de tempo em que o banco de baterias é capaz de suprir a carga elétrica sem necessidade de recarga proveniente da rede ou da geração fotovoltaica. Esse parâmetro é amplamente utilizado em projetos de sistemas de *backup* e armazenamento estacionário, sendo diretamente proporcional à capacidade total requerida do banco de baterias. O Número de dias de autonomia expressado como:

$$Nd = \text{número de dias de autonomia}$$

Neste trabalho, adotou-se inicialmente  $Nd = 1$ , valor considerado adequado para sistemas fotovoltaicos residenciais conectados à rede, nos quais o banco de baterias atua principalmente como complemento energético e recurso de segurança operacional, e não como única fonte permanente de suprimento.

A escolha de um dia de autonomia busca equilibrar desempenho técnico e viabilidade econômica, evitando aumento excessivo de custos e ocupação física elevada do banco de baterias.

### 3.1.3 Profundidade de Descarga (DOD)

A profundidade de descarga, conhecida internacionalmente como *Depth of Discharge* (DoD), representa a parcela da capacidade total de uma bateria que é efetivamente utilizada durante um ciclo de descarga. Em outras palavras, o DoD indica quanto da energia armazenada foi retirada da bateria em relação à sua capacidade nominal total. Por exemplo, uma bateria com 50% de DoD teve metade de sua capacidade utilizada, permanecendo com aproximadamente 50% de estado de carga (*State of Charge* – SoC). O DoD expressado como:

$$DoD = \text{profundidade de descarga}$$

Dessa forma, o DoD está diretamente relacionado ao SoC, porém de maneira inversa: enquanto o SoC indica a energia ainda disponível na bateria, o DoD representa a energia já consumida. Segundo a definição técnica apresentada pela *ScienceDirect*, o DoD corresponde à quantidade de carga removida da bateria em relação à capacidade total que pode ser armazenada, sendo usualmente expresso em percentual.

A escolha da profundidade de descarga é um fator importante no dimensionamento, pois influencia diretamente a capacidade útil disponível do banco de baterias. Quanto menor o DoD adotado, menor será a parcela efetivamente utilizada da capacidade nominal, exigindo um banco de baterias maior. Por outro lado, descargas mais profundas permitem maior aproveitamento da capacidade instalada, mas podem aumentar o desgaste das células ao longo do tempo.

Neste trabalho, adotou-se inicialmente DoD igual a 50%, valor considerado conservador para fins de dimensionamento. Essa escolha permite preservar uma margem significativa de energia no banco de baterias, reduzir o esforço operacional imposto às células e favorecer maior vida útil do sistema. Além disso, a adoção desse valor possibilita comparar posteriormente o comportamento do dimensionamento com outros níveis de descarga, avaliando sua influência sobre a capacidade requerida, quantidade de baterias e peso total do conjunto.

Assim, a profundidade de descarga constitui um dos principais parâmetros de projeto, pois afeta simultaneamente a autonomia, a vida útil e o custo final do sistema de armazenamento.

### 3.1.4 Fator de Segurança

O fator de segurança é um coeficiente adimensional aplicado ao dimensionamento teórico de sistemas de engenharia com o objetivo de incorporar as incertezas inerentes às condições reais de operação. No contexto do dimensionamento de bancos de baterias para sistemas fotovoltaicos, sua utilização é fundamental para compensar um conjunto de variáveis que o modelo matemático idealizado não é capaz de representar com exatidão, entre as quais se destacam: flutuações no perfil de consumo energético da unidade atendida, perdas associadas aos processos de carga e descarga das células, degradação natural da capacidade das baterias ao longo do tempo e influências ambientais, como variações de temperatura e umidade. Ele é expressado como:

$$\beta = \text{fator de segurança}$$

Do ponto de vista matemático, o fator de segurança  $\beta$  atua como um multiplicador aplicado sobre a capacidade calculada, de modo que a capacidade real dimensionada seja sempre superior à capacidade estritamente necessária para atender a demanda teórica. Dessa forma, o sistema passa a dispor de uma reserva operacional que garante o atendimento da carga mesmo diante de condições menos favoráveis do que as previstas no projeto.

A necessidade de adoção desse coeficiente é amplamente reconhecida e justificada na literatura técnica. Segundo a *International Energy Agency* (IEA, 2024), sistemas de armazenamento por baterias estão sujeitos a diversas fontes de ineficiência e degradação ao longo de sua vida útil — incluindo o aumento da resistência interna das células, a redução gradual da capacidade nominal e as perdas coulômbicas associadas aos ciclos de carga e descarga —, o que reforça a necessidade de contemplar margens adicionais no dimensionamento para garantir confiabilidade operacional ao longo de toda a vida do sistema. De forma complementar, estudos sobre dimensionamento de sistemas fotovoltaicos com armazenamento indicam que a adoção de coeficientes de segurança é prática recorrente e recomendada em projetos, visando assegurar o atendimento da demanda energética mesmo em condições desfavoráveis de operação (ANDRÉ, 2022).

Neste trabalho, adotou-se  $\beta = 1,1$ , correspondente a um acréscimo de 10% sobre a capacidade calculada do banco de baterias. Esse valor foi escolhido por representar uma margem moderada e tecnicamente consolidada, suficiente para conferir robustez ao sistema frente às principais fontes de incerteza operacional — como a degradação da capacidade das células ao longo dos anos e as variações no consumo residencial — sem resultar em superdimensionamento significativo. A aplicação desse coeficiente contribui diretamente para a maior continuidade de fornecimento, a maior confiabilidade do sistema e o melhor desempenho ao longo de toda a sua vida útil.

### 3.2 Caracterização das Baterias

Os três estudos de dimensionamento desenvolvidos neste trabalho foram realizados com baterias de tecnologia  $\text{LiFePO}_4$  (lítio ferro-fosfato), diferenciando-se entre si pela tensão nominal do banco. A escolha dessa tecnologia é justificada por suas reconhecidas vantagens em aplicações estacionárias, como elevada estabilidade química, longa vida útil em ciclos, ausência de cobalto na composição — elemento associado a riscos ambientais e de segurança —, e desempenho confiável em condições de operação contínua (WARNER, 2015). As seções a seguir apresentam a caracterização técnica de cada bateria.

#### 3.2.1 Bateria AXE 5.0L Modular Battery Growatt - 51,2V

A bateria *AXE 5.0L Modular Battery*, fabricada pela *Growatt*, é um sistema de armazenamento modular baseado em células de fosfato de ferro de lítio sem cobalto (LFP), com tensão nominal de 51,2 V e capacidade energética de 5,0 kWh por módulo. Sua principal característica é a arquitetura modular e escalável: módulos individuais podem ser empilhados para formar agrupamentos (*clusters*) de até 10 módulos — atingindo 50,0 kWh por *cluster* —, e até 8 *clusters* podem ser conectados em paralelo, resultando em uma capacidade máxima instalável de 400 kWh por sistema (GROWATT, 2025). Essa flexibilidade torna a bateria *AXE 5.0L* adequada para uma ampla faixa de aplicações, desde instalações residenciais de pequeno porte até sistemas comerciais e industriais de maior demanda energética.

A Tabela 1 apresenta as principais especificações técnicas do módulo *AXE 5.0L* utilizado neste projeto.

**Tabela 1 — Especificações técnicas da bateria AXE 5.0L Growatt**

| <b>Parâmetro</b>                  | <b>Valor</b>                          |
|-----------------------------------|---------------------------------------|
| Tipo de bateria                   | LiFePO <sub>4</sub> (LFP) sem cobalto |
| Tensão Nominal                    | 51,2 V                                |
| Faixa de tensão operacional       | 48,0 V a 57,6 V                       |
| Capacidade energética nominal     | 5,0 kWh                               |
| Capacidade nominal (Ah)           | 97,65 Ah                              |
| Profundidade de descarga (DoD)    | 92%                                   |
| Corrente máxima de carga/descarga | 60 A                                  |
| Potência nominal                  | 3,0 kW                                |
| Potência de pico                  | 4,6 kW @ 3 s                          |
| Porta de comunicação              | CAN / RS485                           |
| Grau de proteção                  | IP20                                  |
| Temperatura de operação           | 0 °C a 50 °C                          |
| Peso por módulo                   | 42 kg                                 |
| Dimensões (L × P × A)             | 0,650 × 0,350 × 0,165 m               |
| Clusters em paralelo (máx.)       | 8 clusters                            |
| Capacidade máxima do sistema      | 400 kWh                               |
| Garantia                          | 10 anos                               |
| Certificações                     | CE, RoHS, UL1973, FCC, UN38.3         |

Fonte: Growatt (2025).

Do ponto de vista técnico, a bateria AXE 5.0L destaca-se pela instalação empilhada sem necessidade de conexão por cabos entre módulos, o que simplifica a montagem e reduz pontos de falha na instalação. O sistema conta com gerenciamento integrado por BMS (*Battery Management System*), responsável pelo monitoramento contínuo de parâmetros como estado de carga (SOC), tensão do sistema, corrente, tensão individual das células e temperatura, garantindo a operação segura dentro dos limites estabelecidos pelo fabricante (GROWATT, 2025).

No que diz respeito à escalabilidade, a arquitetura da AXE 5.0L oferece uma vantagem técnica relevante para o presente estudo: nos cenários em que o dimensionamento paramétrico — com variações de DoD e número de dias de autonomia — exigir um número de módulos superior ao limite de 10 unidades simples, é possível complementar o banco por meio da adição de *clusters* com maior número de módulos, respeitando o limite máximo de 400 kWh do sistema. Essa característica garante que praticamente todas as combinações de DoD e Nd avaliadas na análise paramétrica sejam tecnicamente viáveis dentro das especificações do fabricante, conferindo à solução *Growatt* uma flexibilidade de dimensionamento superior à das demais baterias estudadas neste trabalho.

Vale observar que, embora o fabricante especifique uma profundidade de descarga de 92% para a bateria AXE 5.0L, o presente projeto adota DoD = 0,5 (50%) como parâmetro de dimensionamento base, conforme justificado na seção 3.1.3. Essa decisão é intencional e visa prolongar a vida útil do banco além das condições nominais de projeto, operando as baterias de forma conservadora em relação ao limite máximo especificado pelo fabricante.

### 3.2.2 Bateria SBW CB050 W00 WEG — 192 V

A bateria SBW CB050 W00, fabricada pela WEG, é um sistema de armazenamento de alta tensão baseado em células prismáticas de lítio ferro-fosfato ( $\text{LiFePO}_4$ ), com tensão nominal de 192 V e capacidade energética nominal de 5,18 kWh por unidade. O sistema é projetado para aplicações que demandam alta tensão e alta eficiência, sendo compatível exclusivamente com inversores das séries SIW200H e SIW400H da própria WEG. Diferentemente da solução *Growatt*, a arquitetura da SBW CB050 W00 impõe uma restrição significativa de escalabilidade:

o sistema admite no máximo 4 unidades em paralelo, resultando em uma capacidade máxima instalável de 20,8 kWh (WEG, 2025).

A Tabela 2 apresenta as principais especificações técnicas da bateria SBW CB050 W00.

**Tabela 2 — Especificações técnicas da bateria SBW CB050 W00 WEG**

| <b>Parâmetro</b>                  | <b>Valor</b>                          |
|-----------------------------------|---------------------------------------|
| Tipo de bateria                   | Célula Prismática LiFePO <sub>4</sub> |
| Tensão Nominal                    | 192 V                                 |
| Faixa de tensão operacional       | 174,0 V a 218,4 V                     |
| Capacidade energética nominal     | 5,18 kWh                              |
| Capacidade nominal (Ah)           | 27 Ah                                 |
| Profundidade de descarga (DoD)    | 90%                                   |
| Corrente máxima de carga/descarga | 27A                                   |
| Ciclo de vida                     | ≥ 6.000 ciclos                        |
| Comunicação                       | CAN                                   |
| Grau de Proteção                  | IP65                                  |
| Temperatura de operação           | 0 °C a 55 °C                          |
| Unidades em paralelo (máx.)       | 4 unidades                            |
| Capacidade máxima do sistema      | 20,8 kWh                              |
| Peso                              | 50,5 kg                               |
| Dimensões (L x A x P)             | 0,380 x 0,625 x 0,147 m               |

Fonte: WEG (2025).

Em relação às características técnicas relevantes para o projeto, destaca-se o elevado ciclo de vida declarado pelo fabricante — igual ou superior a 6.000 ciclos nas condições de referência de 25 °C, 70% de SOH e 90% de DoD —, o que representa uma vida útil expressiva para aplicações estacionárias de armazenamento de energia solar. O grau de proteção IP65 permite instalação tanto em ambientes internos quanto externos, conferindo maior flexibilidade ao posicionamento do banco. O sistema conta igualmente com BMS integrado para monitoramento e proteção das células durante a operação (WEG, 2025).

### 3.2.3 Bateria *SBW CB100 W00 WEG* — 384 V

A bateria *SBW CB100 W00*, também fabricada pela *WEG*, é a versão de maior capacidade da linha *SBW*, baseada igualmente em células prismáticas de lítio ferro-fosfato ( $\text{LiFePO}_4$ ). Com tensão nominal de 384 V e capacidade energética nominal de 10,36 kWh por unidade, representa o dobro da capacidade da *SBW CB050 W00*, mantendo as mesmas características construtivas e de compatibilidade com inversores. Assim como o modelo anterior, o sistema admite no máximo 4 unidades em paralelo, resultando em uma capacidade máxima instalável de 41,6 kWh (WEG, 2025) — o dobro do limite da *CB050*, porém ainda uma restrição relevante para cenários de maior autonomia, conforme será demonstrado na análise paramétrica. A Tabela 3 apresenta as principais especificações técnicas da bateria *SBW CB100 W00*.

**Tabela 3 — Especificações técnicas da bateria *SBW CB100 W00 WEG***

| <b>Parâmetro</b>                  | <b>Valor</b>                          |
|-----------------------------------|---------------------------------------|
| Tipo de bateria                   | Célula Prismática LiFePO <sub>4</sub> |
| Tensão Nominal                    | 384 V                                 |
| Faixa de tensão operacional       | 348,0 V a 436,8 V                     |
| Capacidade energética nominal     | 10,36 kWh                             |
| Capacidade nominal (Ah)           | 27 Ah                                 |
| Profundidade de descarga (DoD)    | 90%                                   |
| Corrente máxima de carga/descarga | 27A                                   |
| Ciclo de vida                     | ≥ 6.000 ciclos                        |
| Comunicação                       | CAN                                   |
| Grau de Proteção                  | IP65                                  |
| Temperatura de operação           | 0 °C a 55 °C                          |
| Unidades em paralelo (máx.)       | 4 unidades                            |
| Capacidade máxima do sistema      | 41,6 kWh                              |
| Peso                              | 99 kg                                 |
| Dimensões (L x A x P)             | 0,710 x 0,625 x 0,147 m               |

Fonte: WEG (2025).

Em termos construtivos, a *SBW CB100 W00* compartilha com a *CB050* as mesmas características de resfriamento por convecção natural, comunicação via protocolo CAN, grau de proteção IP65 e BMS integrado para monitoramento contínuo das células. A principal diferença entre os dois modelos reside na tensão nominal — 384 V contra 192 V —, resultante da associação em série de um maior número de células internas, o que eleva proporcionalmente a capacidade energética

por unidade sem alterar a capacidade em ampère-hora, que permanece em 27 Ah em ambos os modelos (WEG, 2025).

Assim como nos estudos anteriores, embora o fabricante especifique DoD de 90%, este projeto adota  $\text{DoD} = 0,5$  (50%) como parâmetro de dimensionamento base, conforme justificado na seção 3.1.3.

### 3.3 Equacionamento do dimensionamento

O dimensionamento do banco de baterias é realizado por meio de um conjunto de equações que traduzem matematicamente os parâmetros definidos na seção 3.1 em grandezas físicas mensuráveis — capacidade em ampère-hora, número de unidades, volume e peso total do banco. O equacionamento apresentado nesta seção é aplicado de forma idêntica aos três estudos de caso, variando apenas os valores de tensão nominal e capacidade unitária de cada bateria.

#### 3.3.1 Capacidade Ideal do Banco

A capacidade ideal representa a quantidade mínima de carga elétrica — em ampère-hora — necessária para armazenar a energia diária consumida pela residência, considerando a tensão nominal do banco e o número de dias de autonomia, conforme Equação (2):

$$C_{ideal} = \frac{E_d \cdot N_d}{V_{pack}} \quad (2)$$

$$V_{pack} = \text{tensão nominal (V)}$$

#### 3.3.2 Capacidade Real do Banco

A capacidade real incorpora as correções impostas pelo fator de segurança e pela profundidade de descarga, resultando na capacidade efetiva que o banco deve apresentar para garantir o atendimento da demanda nas condições de projeto, expressado na Equação (3):

$$C_{real} = \frac{\beta \cdot N_d \cdot E_d}{\text{DoD} \cdot V_{pack}} \quad (3)$$

A relação entre capacidade ideal e capacidade real evidencia o impacto combinado do fator de segurança e do DoD sobre o dimensionamento: quanto

menor o DoD adotado e quanto maior o fator de segurança, maior será a capacidade real em relação à capacidade ideal, e consequentemente maior o número de baterias necessárias.

### 3.3.3 Número de Baterias, Peso e Volume Total

O número de unidades necessárias em paralelo é obtido pela divisão da capacidade real pela capacidade nominal de cada unidade, aplicando-se a função teto (*ceil*) para garantir que o resultado seja sempre arredondado para o inteiro superior, como em todos os três estudos de caso a tensão nominal de cada bateria já corresponde à tensão do banco, não há necessidade de associação em série, sendo o número total de unidades igual ao número em paralelo, indicado na Equação (4):

$$N_{total} = N_{paralelo} = \frac{C_{real}}{C_{bat}} \quad (4)$$

$$C_{bat} = \text{capacidade nominal de cada bateria (Ah)}$$

O peso total do banco é calculado pelo produto entre o peso unitário de cada bateria e o número total de unidades (Equação (5)):

$$Peso_{total} = Peso_{bat} \cdot N_{total} \quad (5)$$

O volume total da instalação é calculado com base nas dimensões físicas de cada bateria e no modo de instalação previsto pelo fabricante, sendo uma grandeza relevante para o planejamento do espaço físico destinado ao banco de baterias.

### 3.3.4 Correntes de Operação do Banco

A análise das correntes de operação do banco de baterias é fundamental para o dimensionamento dos componentes elétricos do sistema, como cabos, disjuntores e dispositivos de proteção. A determinação dessas correntes parte dos princípios básicos de circuitos elétricos aplicados à configuração de associação em paralelo adotada nos três estudos de caso deste trabalho.

### 3.3.4.1 Corrente Máxima do Banco

Quando baterias idênticas são conectadas em paralelo, cada unidade contribui com sua corrente nominal para a corrente total do conjunto — princípio diretamente derivado da Lei de *Kirchhoff* das Correntes (LKC), conforme apresentado na seção 2.6.1. A corrente máxima total fornecida pelo banco é, portanto, dada pela Equação (6):

$$I_{max} = I_{nominal} \cdot N_{total} \quad (6)$$

*I<sub>nominal</sub>* = corrente nominal de cada unidade

De forma análoga, a capacidade total do banco em ampère-hora é dada pela soma das capacidades individuais de cada unidade, expressado na Equação (7):

$$C_{banco} = C_{bat} \cdot N_{total} \quad (7)$$

### 3.3.4.2 Corrente Média Real de Operação

A corrente média real de operação representa a corrente efetivamente demandada pelo sistema para suprir o consumo médio diário da residência, distribuído ao longo das 24 horas do período de autonomia. Essa grandeza é obtida a partir da relação fundamental entre energia elétrica, tensão, corrente e tempo (Equação (8)):

$$I_{med} = \frac{E_d}{24 \cdot V_{pack}} \quad (8)$$

Essa expressão evidencia o impacto direto da tensão nominal do banco sobre as correntes de operação: quanto maior a tensão, menor a corrente necessária para fornecer a mesma energia, o que reduz as perdas resistivas nos condutores e simplifica o dimensionamento elétrico da instalação (VILLALVA; GAZOLI, 2012). É importante observar que a corrente média real não depende do número de dias de autonomia nem do *DoD* adotado — ela reflete exclusivamente a relação entre o consumo diário da residência e a tensão do banco, sendo constante para todas as combinações da análise paramétrica de cada bateria.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Este capítulo apresenta os resultados obtidos a partir da aplicação do equacionamento desenvolvido no Capítulo 3 aos três estudos de caso. Os resultados são organizados em três seções: dimensionamento estático, realizado com os parâmetros base definidos na seção 3.1; análise paramétrica, que avalia o comportamento do dimensionamento frente a variações de *DoD* e número de dias de autonomia; e análise comparativa, que confronta os três bancos de baterias estudados em termos de número de unidades, peso total, volume da instalação e viabilidade técnica dentro dos limites impostos pelos fabricantes. Os resultados apresentados neste capítulo foram obtidos por meio de cálculos realizados no *software MATLAB*, a partir da implementação do equacionamento desenvolvido na seção 3.3.

### 4.1 Dimensionamento Estático

O dimensionamento estático corresponde ao cálculo do banco de baterias para as condições de projeto base: consumo médio diário de 7,233 kWh, *DoD* = 0,5, *Nd* = 1 dia e  $\beta = 1,1$ . Os resultados para cada bateria são apresentados a seguir.

#### 4.1.1 Banco de 51,2 V — AXE 5.0L Growatt

Aplicando-se o equacionamento da seção 3.3 com os parâmetros da bateria *AXE 5.0L Growatt*, obtêm-se os seguintes resultados:

$$C_{ideal} = \frac{7,233 \cdot 1}{51,2} = 141,276 \text{ Ah} \quad (2)$$

$$C_{real} = \frac{1,1 \cdot 1 \cdot 7,233}{0,5 \cdot 51,2} = 310,807 \text{ Ah} \quad (3)$$

$$N_{total} = \frac{310,807}{97,65} = 3,183 \approx 4 \text{ módulos} \quad (4)$$

$$Peso_{total} = 42 \cdot 4 = 168 \text{ kg} \quad (5)$$

Para o cálculo do volume do sistema da *Growatt*, considera-se a forma de instalação na configuração empilhada. Dessa forma, as dimensões de comprimento e largura permanecem constantes para cada conjunto (*cluster*), enquanto a altura do

sistema varia em função da quantidade de módulos empilhados. Assim, a altura torna-se a principal variável geométrica no dimensionamento físico do banco de baterias, influenciando diretamente o volume total ocupado e os requisitos estruturais da instalação.

$$V_{total} = 0,650 \cdot 0,350 \cdot (4 \cdot 0,165) = 0,133 \text{ m}^3$$

Nos casos em que o sistema demanda a utilização de mais de um *cluster*, o volume total não é calculado de forma direta a partir de um único arranjo. Nessa situação, o volume de cada *cluster* é determinado individualmente, considerando suas respectivas configurações, e, posteriormente, os volumes obtidos são somados, resultando no volume total do banco de baterias.

As correntes calculadas para esta bateria foram:

$$I_{max} = 60 \cdot 4 = 240 \text{ A} \quad (6)$$

$$I_{med} = \frac{7233}{24 \cdot 51,2} = 5,886 \text{ A} \quad (8)$$

A Tabela 4 resume os resultados do dimensionamento estático para a bateria AXE 5.0L Growatt.

**Tabela 4 — Resultados do dimensionamento estático — AXE 5.0L Growatt (51,2 V)**

| Grandeza                  | Símbolo          | Valor      |
|---------------------------|------------------|------------|
| Capacidade ideal do banco | Cideal           | 141,276 Ah |
| Capacidade real do banco  | Creal            | 310,807 Ah |
| Número total de módulos   | Ntotal           | 4 módulos  |
| Peso total do banco       | Pesototal        | 168 kg     |
| Volume total do banco     | Vtotal           | 0,133 m³   |
| Corrente máxima do banco  | I <sub>max</sub> | 240 A      |

|                     |           |         |
|---------------------|-----------|---------|
| Corrente média real | $I_{med}$ | 5,886 A |
|---------------------|-----------|---------|

Fonte: autoria própria (2026).

O resultado indica que o banco requer 4 módulos em paralelo, totalizando 20,0 kWh de capacidade instalada e 168 kg de peso total. Esse resultado está muito abaixo do limite máximo de 400 kWh permitido pelo fabricante, confirmando ampla margem para expansão do sistema caso necessário. A corrente máxima de 240 A reflete a baixa tensão nominal do sistema — característica intrínseca da tecnologia de 51,2 V.

#### 4.1.2 Banco de 192 V — *SBW CB050 W00 WEG*

Aplicando-se o mesmo equacionamento com os parâmetros da bateria *SBW CB050 W00*, a maior tensão nominal de 192 V resulta em uma capacidade ideal significativamente menor em comparação com o banco de 51,2 V:

$$C_{ideal} = \frac{7,233 \cdot 1}{192} = 37,674 \text{ Ah} \quad (2)$$

$$C_{real} = \frac{1,1 \cdot 1 \cdot 7,233}{0,5 \cdot 192} = 82,882 \text{ Ah} \quad (3)$$

$$N_{total} = \frac{82,882}{27} = 3,070 \approx 4 \text{ unidades} \quad (4)$$

$$Peso_{total} = 50,5 \cdot 4 = 202 \text{ kg} \quad (5)$$

Para esta aplicação, o arranjo físico dos módulos varia conforme a quantidade total de baterias utilizadas. Para um único módulo, o volume corresponde às dimensões unitárias do equipamento. No caso de dois módulos, estes são dispostos de forma empilhada, resultando em variação apenas na altura do conjunto. Para três módulos, a disposição adotada é em linha, mantendo-se a altura constante e aumentando o comprimento do arranjo. Já para quatro módulos, considera-se a formação de dois conjuntos empilhados de dois módulos cada, dispostos lado a lado, resultando em variação tanto na largura quanto na altura do sistema. Essa abordagem permite representar de forma mais realista as possibilidades de instalação, considerando diferentes arranjos físicos conforme a quantidade de módulos necessária.

$$V_{total} = (2 \cdot 0,625) \cdot (2 \cdot 0,380) \cdot 0,147 = 0,139 \text{ m}^3$$

As correntes calculadas para esta bateria foram:

$$I_{max} = 27 \cdot 4 = 108A \quad (7)$$

$$I_{med} = \frac{7233}{24 \cdot 192} = 1,569 A \quad (8)$$

A Tabela 5 resume os resultados do dimensionamento estático para a bateria SBW CB050 W00.

**Tabela 5 — Resultados do dimensionamento estático — SBW CB050 W00 WEG (192 V)**

| Grandeza                  | Símbolo          | Valor                |
|---------------------------|------------------|----------------------|
| Capacidade ideal do banco | Cideal           | 37,674 Ah            |
| Capacidade real do banco  | Creal            | 82,882 Ah            |
| Número total de módulos   | Ntotal           | 4 módulos            |
| Peso total do banco       | Pesototal        | 202 kg               |
| Volume total do banco     | Vtotal           | 0,139 m <sup>3</sup> |
| Corrente máxima do banco  | I <sub>max</sub> | 108 A                |
| Corrente média real       | I <sub>med</sub> | 1,569 A              |

Fonte: autoria própria (2026).

O resultado indica que o banco requer 4 unidades em paralelo — exatamente o limite máximo permitido pelo fabricante —, totalizando 20,72 kWh e 202 kg. A corrente máxima de 108 A representa uma redução de 55% em relação ao banco *Growatt*, reflexo direto da tensão nominal quatro vezes superior. A corrente média real de 1,569 A demonstra que, em regime normal de operação, o banco opera muito abaixo de seu limite máximo, o que é tecnicamente favorável à longevidade

das células. É importante destacar que, por operar já no limite máximo de paralelismo nas condições base, o banco *SBW CB050* não dispõe de margem para expansão, aspecto com implicações diretas sobre a análise paramétrica apresentada na seção 4.2.

#### 4.1.3 Banco de 384 V — *SBW CB100 W00 WEG*

Aplicando-se o equacionamento com os parâmetros da bateria *SBW CB100 W00*, a tensão nominal de 384 V resulta na menor capacidade ideal entre os três estudos:

$$C_{ideal} = \frac{7,233 \cdot 1}{384} = 18,84 \text{ Ah} \quad (2)$$

$$C_{real} = \frac{1,1 \cdot 1 \cdot 7,233}{0,5 \cdot 384} = 41,44 \text{ Ah} \quad (3)$$

$$N_{total} = \frac{41,44}{27} = 1,53 \approx 2 \text{ unidades} \quad (4)$$

$$Peso_{total} = 99 \cdot 2 = 198 \text{ kg} \quad (5)$$

O cálculo do volume é igual ao da última aplicação:

$$V_{total} = (2 \cdot 0,625) \cdot 0,710 \cdot 0,147 = 0,130 \text{ m}^3$$

As correntes calculadas para esta bateria foram:

$$I_{max} = 27 \cdot 2 = 54 \text{ A} \quad (7)$$

$$I_{med} = \frac{7233}{24 \cdot 384} = 0,785 \text{ A} \quad (8)$$

A Tabela 6 resume os resultados do dimensionamento estático para a bateria *SBW CB100 W00*.

**Tabela 6 — Resultados do dimensionamento estático — SBW CB100  
W00 WEG (384 V)**

| <b>Grandeza</b>           | <b>Símbolo</b> | <b>Valor</b> |
|---------------------------|----------------|--------------|
| Capacidade ideal do banco | Cideal         | 18,84 Ah     |
| Capacidade real do banco  | Creal          | 41,44 Ah     |
| Número total de módulos   | Ntotal         | 2 módulos    |
| Peso total do banco       | Pesototal      | 198 kg       |
| Volume total do banco     | Vtotal         | 0,130 m³     |
| Corrente máxima do banco  | Imax           | 54 A         |
| Corrente média real       | Imed           | 0,785 A      |

Fonte: autoria própria (2026).

O resultado indica que o banco requer apenas 2 unidades em paralelo, totalizando 20,72 kWh e 198 kg, com corrente máxima de 54 A — a menor entre as três soluções. A corrente média real de 0,785 A confirma que o banco de 384 V opera com as menores solicitações de corrente dentre os três estudos, o que favorece o dimensionamento elétrico da instalação e reduz as perdas resistivas no sistema. A CB100 ainda apresenta folga de 2 unidades até o limite do fabricante, conferindo maior flexibilidade para cenários de maior autonomia.

## **4.2 Análise Paramétrica**

A análise paramétrica avalia o comportamento do dimensionamento dos três bancos de baterias frente a variações nos parâmetros DoD e número de dias de autonomia Nd, nos seguintes intervalos:

- Nd: de 1 a 5 dias
- DoD: de 0,4 a 0,8, com incrementos de 0,1

O número de unidades necessárias para cada combinação é calculado pela Equação (9):

$$N_{total\,var}(Nd, DoD) = \frac{\beta \cdot Nd \cdot Ed}{DoD \cdot V_{pack} \cdot C_{bat}} \quad (9)$$

#### 4.2.1 Banco de 51,2 V — AXE 5.0L Growatt

As tabelas 7,8,9 e 10 a seguir mostram os resultados da análise paramétrica para a bateria AXE 5.0L Growatt:

**Tabela 7 — Número de módulos necessários em função de Nd e DoD — AXE 5.0L Growatt (51,2 V)**

| Número de baterias |   |   |    |    |    |
|--------------------|---|---|----|----|----|
| DOD/ ND            | 1 | 2 | 3  | 4  | 5  |
| 0,4                | 4 | 8 | 12 | 16 | 20 |
| 0,5                | 4 | 7 | 10 | 13 | 16 |
| 0,6                | 3 | 6 | 8  | 11 | 14 |
| 0,7                | 3 | 5 | 7  | 10 | 12 |
| 0,8                | 2 | 4 | 6  | 8  | 10 |

Fonte: autoria própria (2026).

Para a combinação mais exigente — Nd = 5 dias e DoD = 0,4 —, o banco exigiria 20 módulos, correspondendo a uma capacidade instalada de 100 kWh, ainda dentro do limite de 400 kWh do sistema. Em todas as combinações avaliadas, a viabilidade técnica é garantida pela arquitetura escalável da AXE 5.0L.

**Tabela 8 — Volume Total da Instalação em função de Nd e DoD — AXE 5.0L  
Growatt (51,2 V)**

| Volume total da instalação (kg) |           |           |           |           |           |
|---------------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| DOD/ ND                         | 1         | 2         | 3         | 4         | 5         |
| 0,4                             | 0,1330875 | 0,2604875 | 0,393575  | 0,520975  | 0,648375  |
| 0,5                             | 0,1330875 | 0,2286375 | 0,3241875 | 0,425425  | 0,520975  |
| 0,6                             | 0,1012375 | 0,1967875 | 0,2604875 | 0,361725  | 0,457275  |
| 0,7                             | 0,1012375 | 0,1649375 | 0,2286375 | 0,3241875 | 0,393575  |
| 0,8                             | 0,0693875 | 0,1330875 | 0,1967875 | 0,2604875 | 0,3241875 |

Fonte: autoria própria (2026).

**Tabela 9 — Peso Total da Instalação em função de Nd e DoD — AXE 5.0L  
Growatt (51,2 V)**

| Peso total da instalação (kg) |     |     |     |     |     |
|-------------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|
| DOD/ ND                       | 1   | 2   | 3   | 4   | 5   |
| 0,4                           | 162 | 322 | 484 | 644 | 804 |
| 0,5                           | 162 | 282 | 402 | 524 | 644 |
| 0,6                           | 122 | 242 | 322 | 444 | 564 |
| 0,7                           | 122 | 202 | 282 | 402 | 484 |
| 0,8                           | 82  | 162 | 242 | 322 | 402 |

Fonte: autoria própria (2026).

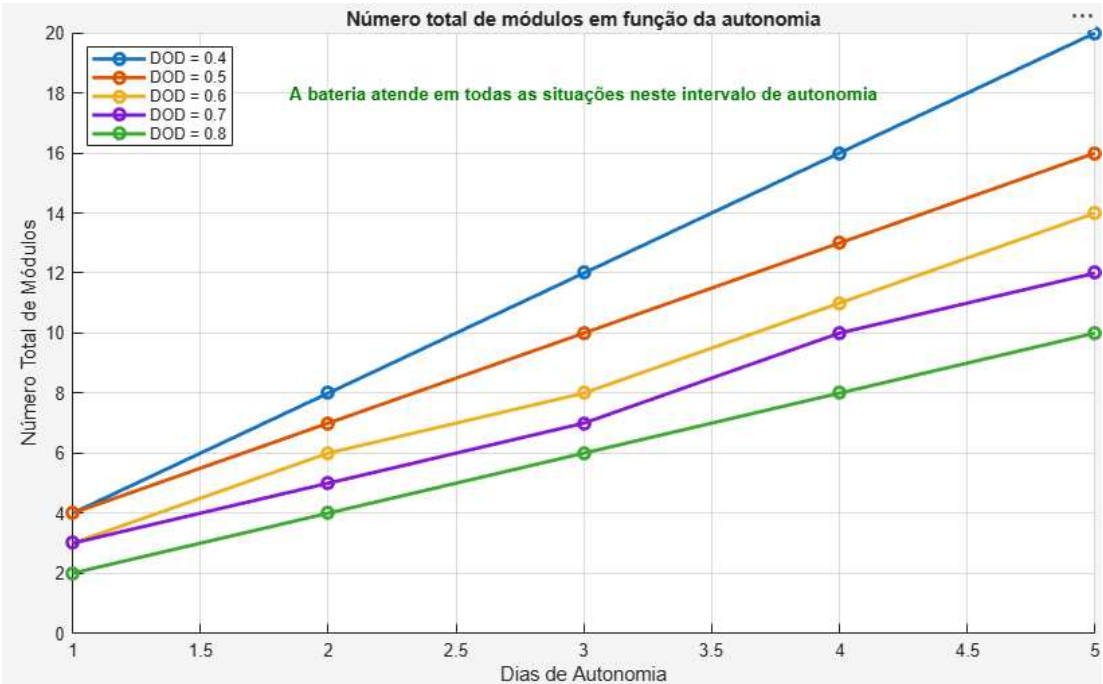
**Tabela 10 — Corrente máxima da Instalação em função de Nd e DoD — AXE  
5.0L Growatt (51,2 V)**

| Corrente máxima do banco (A) |     |     |     |     |      |
|------------------------------|-----|-----|-----|-----|------|
| DOD /<br>ND                  | 1   | 2   | 3   | 4   | 5    |
| 0,4                          | 240 | 480 | 720 | 960 | 1200 |
| 0,5                          | 240 | 420 | 600 | 780 | 960  |
| 0,6                          | 180 | 360 | 480 | 660 | 840  |
| 0,7                          | 180 | 300 | 420 | 600 | 720  |
| 0,8                          | 120 | 240 | 360 | 480 | 600  |

Fonte: autoria própria (2026).

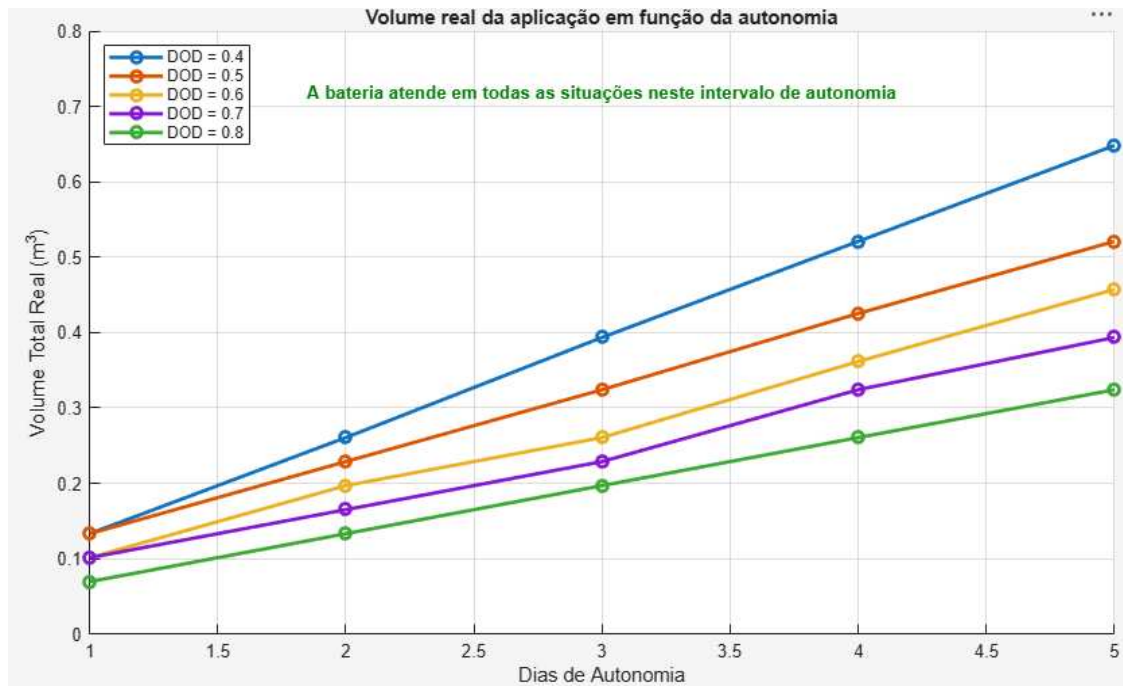
A seguir, são apresentadas as curvas obtidas a partir dos resultados do dimensionamento, permitindo a análise do comportamento do sistema frente às variáveis consideradas.

**Gráfico 5 - Curva apresentando o comportamento do número de módulos AXE  
5.0L.**



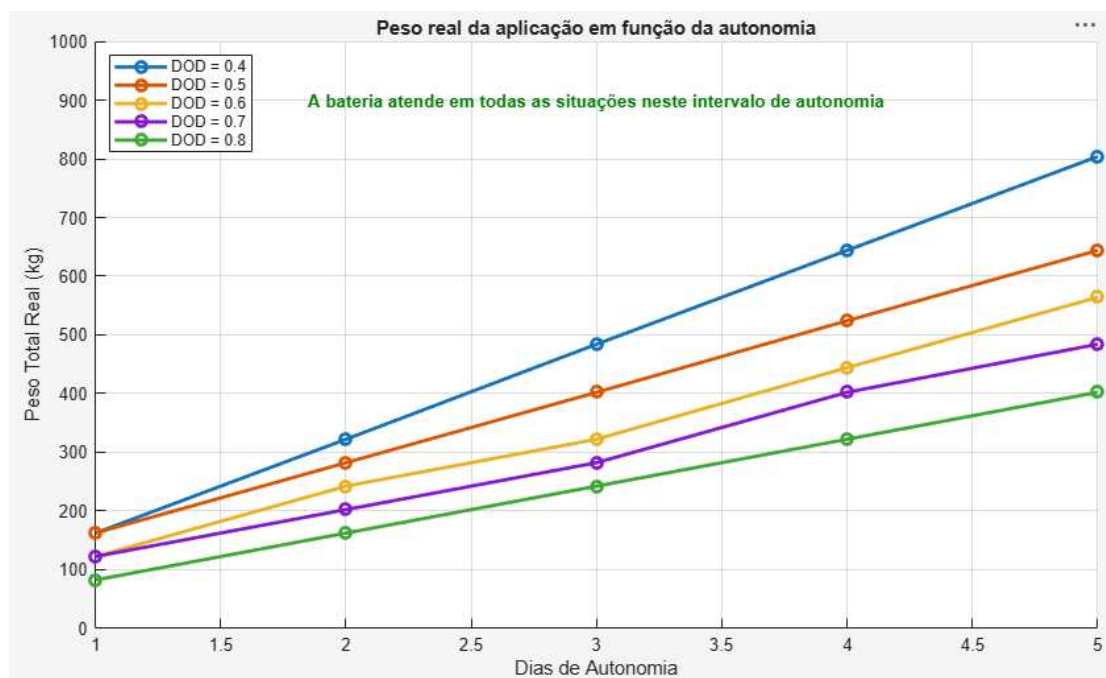
Fonte: autoria própria (2026).

**Gráfico 6 - Curva apresentando o comportamento do no volume da instalação.**



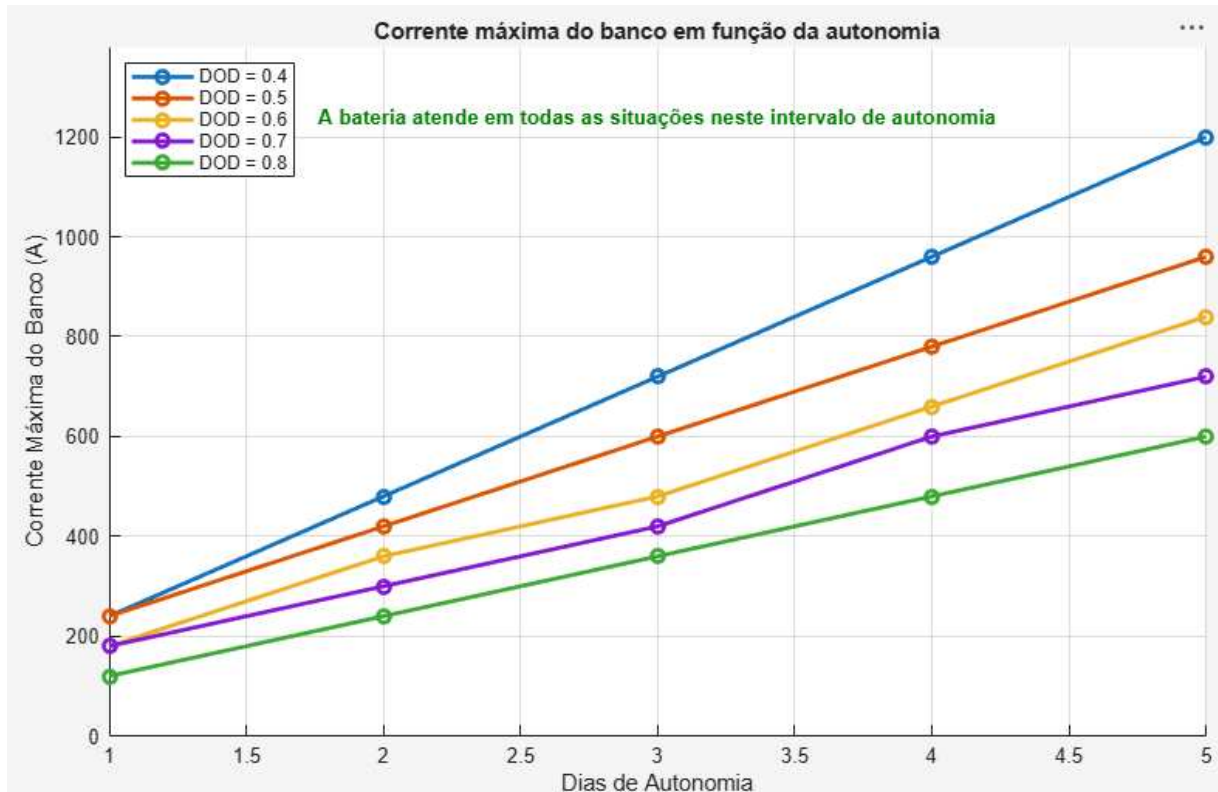
Fonte: autoria própria (2026).

**Gráfico 7 - Curva apresentando o comportamento do peso da instalação.**



Fonte: autoria própria (2026).

**Gráfico 8 - Curva apresentando o comportamento da corrente máxima da instalação.**



Fonte: autoria própria (2026).

#### 4.2.2 Banco de 192 V — SBW CB050 W00 WEG

As tabelas 11, 12, 13 e 14 a seguir mostram os resultados da análise paramétrica para a bateria SBW CB050 W00 WEG:

**Tabela 11 — Número de unidades necessárias em função de Nd e DoD — SBW CB050 W00 WEG**

| Número de baterias |   |   |    |    |    |
|--------------------|---|---|----|----|----|
| DOD/ ND            | 1 | 2 | 3  | 4  | 5  |
| 0,4                | 4 | 8 | 12 | 16 | 20 |
| 0,5                | 4 | 7 | 10 | 13 | 16 |
| 0,6                | 3 | 6 | 8  | 11 | 13 |
| 0,7                | 3 | 5 | 7  | 9  | 11 |
| 0,8                | 2 | 4 | 6  | 8  | 10 |

Fonte: autoria própria (2026).

Os resultados evidenciam de forma clara a limitação imposta pela restrição de paralelismo da bateria SBW CB050 W00. Das 25 combinações avaliadas, apenas 6 são tecnicamente viáveis, o que representa uma janela de operação extremamente estreita. Para todas as demais combinações (células vermelhas), o número de unidades exigido supera o limite de 4, tornando o sistema incapaz de atender à demanda energética nas condições analisadas sem que sejam adotadas soluções alternativas, como a substituição por um modelo de maior capacidade unitária.

**Tabela 12 — Volume total em função de Nd e DoD — SBW CB050 W00 WEG**

| Volume total da instalação (m³) |           |           |           |           |           |
|---------------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| DOD/ ND                         | 1         | 2         | 3         | 4         | 5         |
| 0,4                             | 0,13965   | 0,2793    | 0,41895   | 0,5586    | 0,69825   |
| 0,5                             | 0,13965   | 0,2443875 | 0,349125  | 0,4538625 | 0,5586    |
| 0,6                             | 0,1047375 | 0,209475  | 0,2793    | 0,3840375 | 0,4538625 |
| 0,7                             | 0,1047375 | 0,1745625 | 0,2443875 | 0,3142125 | 0,3840375 |
| 0,8                             | 0,069825  | 0,13965   | 0,209475  | 0,2793    | 0,349125  |

Fonte: autoria própria (2026).

**Tabela 13 — Peso total em função de Nd e DoD — SBW CB050 W00 WEG**

| Peso total da instalação (kg) |       |       |       |       |       |
|-------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| DOD/ ND                       | 1     | 2     | 3     | 4     | 5     |
| 0,4                           | 202   | 404   | 606   | 808   | 1010  |
| 0,5                           | 202   | 353,5 | 505   | 656,5 | 808   |
| 0,6                           | 151,5 | 303   | 404   | 555,5 | 656,5 |
| 0,7                           | 151,5 | 252,5 | 353,5 | 454,5 | 555,5 |
| 0,8                           | 101   | 202   | 303   | 404   | 505   |

Fonte: autoria própria (2026).

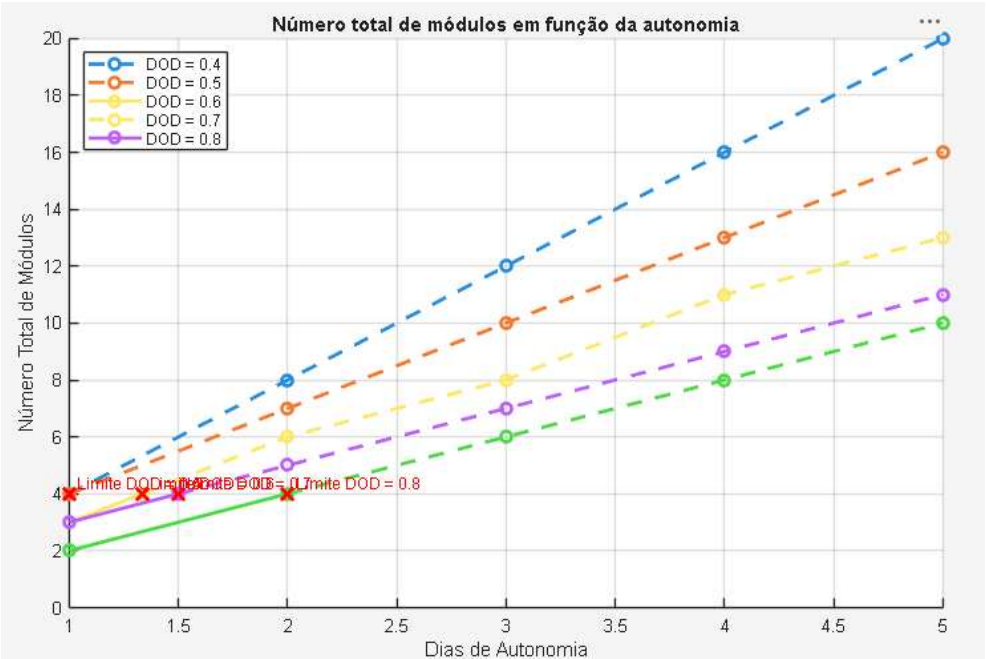
Tabela 14 — Corrente máxima em função de Nd e DoD — *SBW CB050 W00 WEG*

| Corrente máxima do banco (A) |     |     |     |     |     |
|------------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|
| DOD / ND                     | 1   | 2   | 3   | 4   | 5   |
| 0,4                          | 108 | 216 | 324 | 432 | 540 |
| 0,5                          | 108 | 189 | 270 | 351 | 432 |
| 0,6                          | 81  | 162 | 216 | 297 | 351 |
| 0,7                          | 81  | 135 | 189 | 243 | 297 |
| 0,8                          | 54  | 108 | 162 | 216 | 270 |

Fonte: autoria própria (2026).

Os gráficos das curvas serão apresentados a seguir:

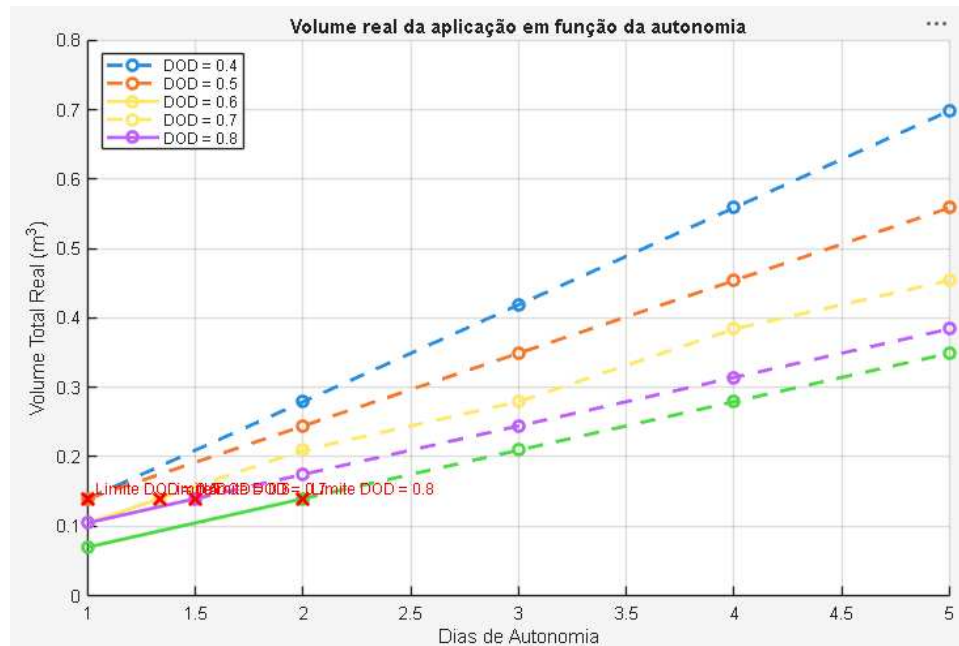
Gráfico 9 - Curva apresentando o comportamento da quantidade de módulos.



Fonte: autoria própria (2026)

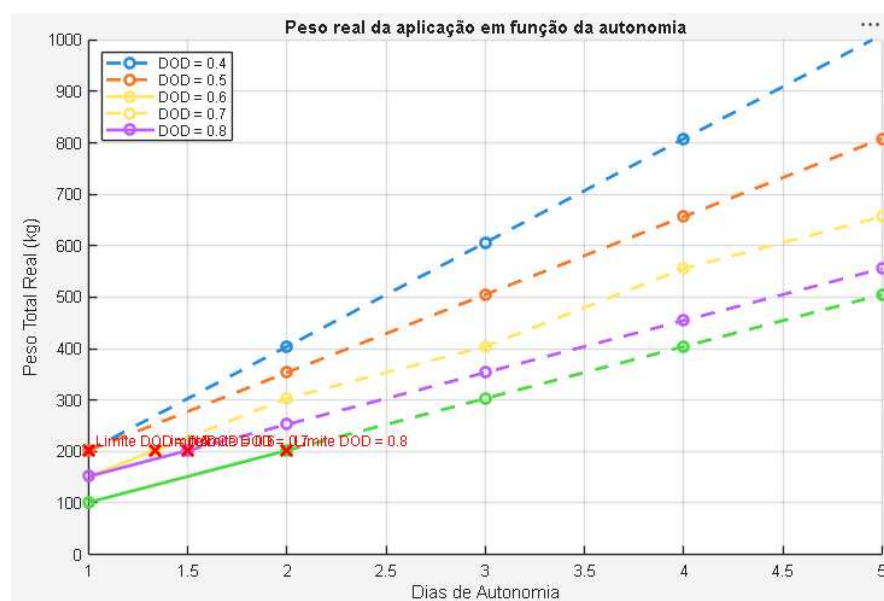
O limite da aplicação está sendo representado com o “X” vermelho, após ele, as curvas pontilhadas indicam que a bateria não atende a exigência da instalação.

**Gráfico 10 - Curva apresentando o comportamento do volume total da instalação.**



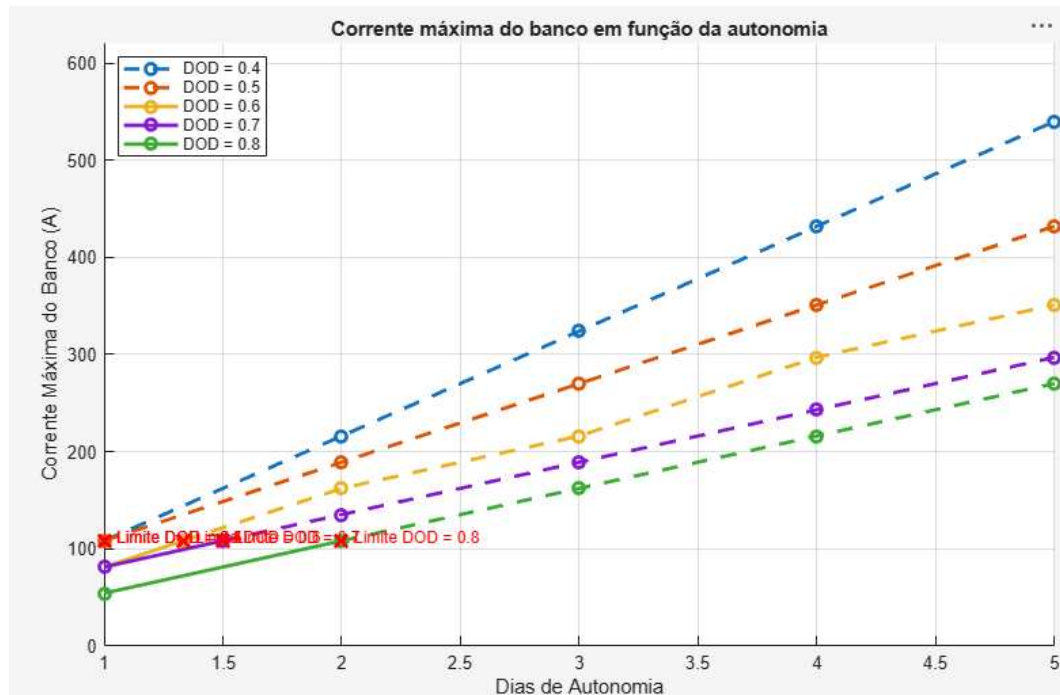
Fonte: autoria própria (2026).

**Gráfico 11 - Curva apresentando o comportamento do peso total da instalação.**



Fonte: autoria própria (2026).

**Gráfico 12 - Curva apresentando o comportamento da corrente máxima da instalação.**



Fonte: autoria própria (2026).

#### 4.2.3 Banco de 384 V — SBW CB100 W00 WEG

As tabelas 15, 16, 17 e 18 a seguir mostram os resultados da análise paramétrica para a bateria SBW CB100 W00 WEG:

**Tabela 15 — Número de unidades necessárias em função de Nd e DoD — SBW CB100 W00 WEG**

| Número de baterias |   |   |   |   |    |
|--------------------|---|---|---|---|----|
| DOD/ ND            | 1 | 2 | 3 | 4 | 5  |
| 0,4                | 2 | 4 | 6 | 8 | 10 |
| 0,5                | 2 | 4 | 5 | 7 | 8  |
| 0,6                | 2 | 3 | 4 | 6 | 7  |
| 0,7                | 2 | 3 | 4 | 5 | 6  |
| 0,8                | 1 | 2 | 3 | 4 | 5  |

Fonte: autoria própria (2026).

A SBW CB100 W00 apresenta viabilidade técnica em 14 das 25 combinações avaliadas — desempenho significativamente superior ao da *CB050*, porém ainda inferior à solução *Growatt*, onde todas as combinações são tecnicamente viáveis. As combinações viáveis concentram-se nos cenários de menor autonomia e DoD mais elevado, confirmando que o modelo é mais adequado para aplicações em que não se exige grande autonomia energética.

**Tabela 16 — Volume total em função de Nd e DoD — SBW CB100 W00 WEG**

| Volume total da instalação (m³) |            |            |            |            |            |
|---------------------------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| DOD/ ND                         | 1          | 2          | 3          | 4          | 5          |
| 0,4                             | 0,1304625  | 0,260925   | 0,3913875  | 0,52185    | 0,6523125  |
| 0,5                             | 0,1304625  | 0,260925   | 0,32615625 | 0,45661875 | 0,52185    |
| 0,6                             | 0,1304625  | 0,19569375 | 0,260925   | 0,3913875  | 0,45661875 |
| 0,7                             | 0,1304625  | 0,19569375 | 0,260925   | 0,32615625 | 0,3913875  |
| 0,8                             | 0,06523125 | 0,1304625  | 0,19569375 | 0,260925   | 0,32615625 |

Fonte: autoria própria (2026)

**Tabela 17 — Peso total em função de Nd e DoD — SBW CB100 W00 WEG**

| Peso total da instalação (kg) |     |     |     |     |     |
|-------------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|
| DOD/ ND                       | 1   | 2   | 3   | 4   | 5   |
| 0,4                           | 198 | 396 | 594 | 792 | 990 |
| 0,5                           | 198 | 396 | 495 | 693 | 792 |
| 0,6                           | 198 | 297 | 396 | 594 | 693 |
| 0,7                           | 198 | 297 | 396 | 495 | 594 |
| 0,8                           | 99  | 198 | 297 | 396 | 495 |

Fonte: autoria própria (2026).

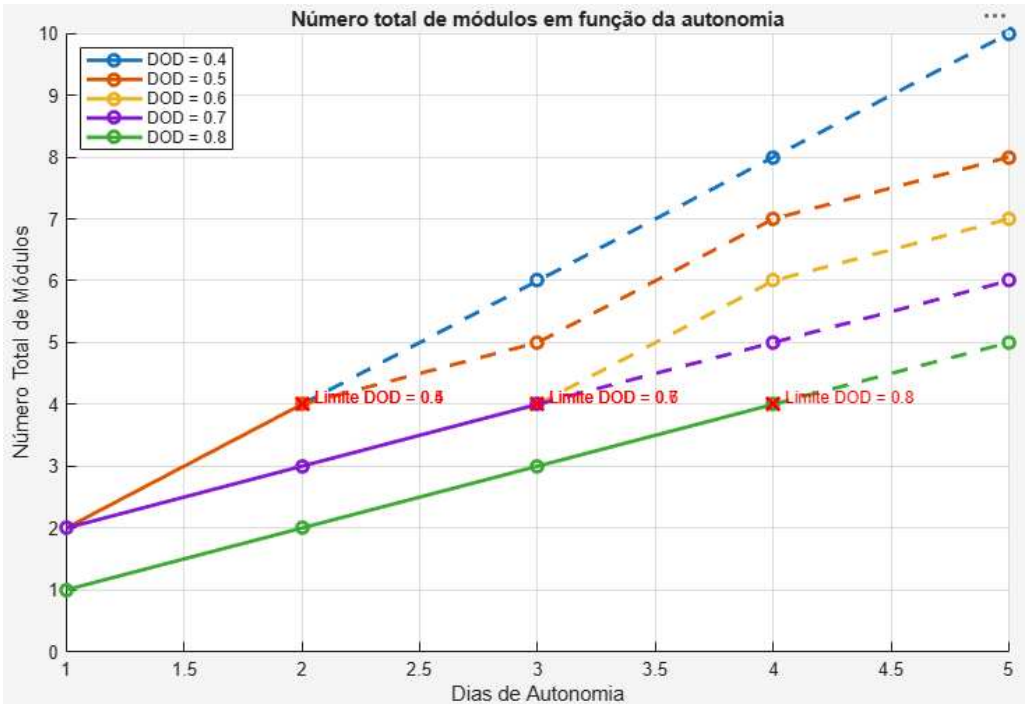
Tabela 18 — Corrente máxima em função de Nd e DoD — *SBW CB100 W00 WEG*

| Corrente máxima do banco (A) |    |     |     |     |     |
|------------------------------|----|-----|-----|-----|-----|
| DOD / ND                     | 1  | 2   | 3   | 4   | 5   |
| 0,4                          | 54 | 108 | 162 | 216 | 270 |
| 0,5                          | 54 | 108 | 135 | 189 | 216 |
| 0,6                          | 54 | 81  | 108 | 162 | 189 |
| 0,7                          | 54 | 81  | 108 | 135 | 162 |
| 0,8                          | 27 | 54  | 81  | 108 | 135 |

Fonte: autoria própria (2026).

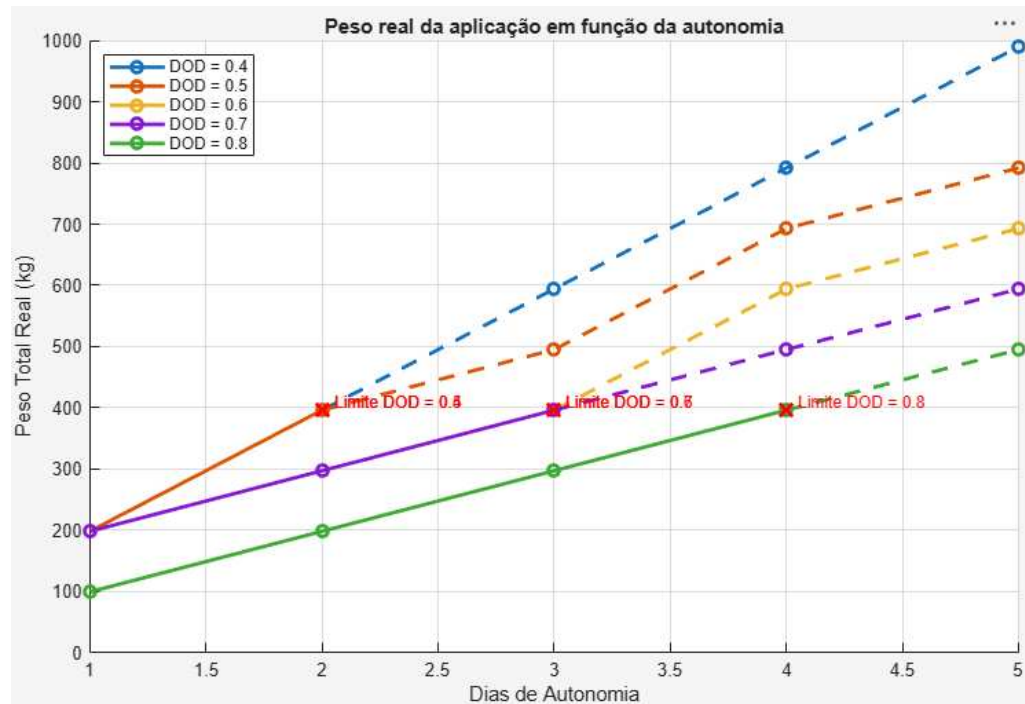
Os gráficos das curvas serão apresentados a seguir:

Gráfico 13 - Curva apresentando o comportamento do número de módulos da instalação.



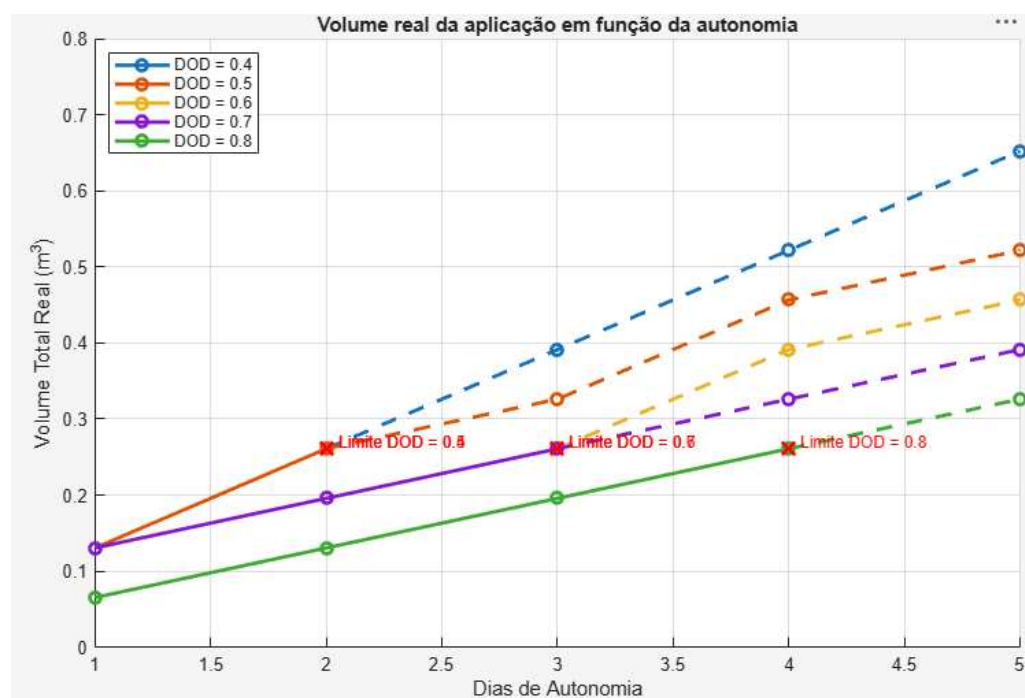
Fonte: autoria própria (2026).

**Gráfico 14 - Curva apresentando o comportamento do volume total da instalação.**



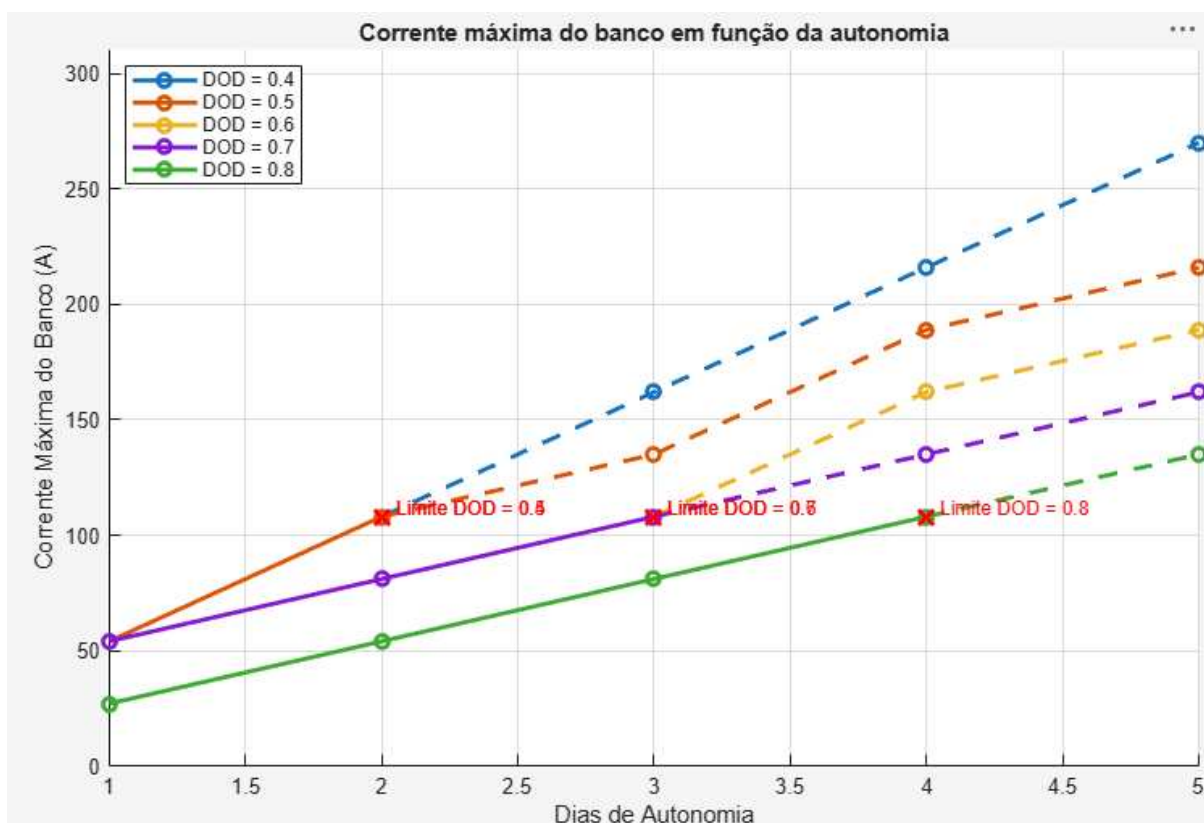
Fonte: autoria própria (2026).

**Gráfico 15 - Curva apresentando o comportamento do volume total da instalação.**



Fonte: autoria própria (2026).

**Gráfico 16 - Curva apresentando o comportamento da corrente máxima da instalação.**



Fonte: autoria própria (2026).

### 4.3 Análise Comparativa entre as três baterias

A análise comparativa tem como objetivo confrontar os três bancos de baterias estudados em termos de número de unidades necessárias, peso total, viabilidade técnica e flexibilidade de dimensionamento, permitindo identificar as vantagens e limitações de cada solução frente ao perfil de consumo e aos parâmetros adotados neste projeto.

#### 4.3.1 Dimensionamento Estático - Comparação

A Tabela 19 consolida os resultados do dimensionamento estático para os três bancos, permitindo uma comparação direta entre as soluções avaliadas

**Tabela 19 — Comparação dos resultados do dimensionamento estático**

| Parâmetro               | AXE 5.0L<br>Growatt (51,2<br>V) | SBW CB050<br>WEG (192 V) | SBW CB100<br>WEG (384 V) |
|-------------------------|---------------------------------|--------------------------|--------------------------|
| Capacidade ideal (Ah)   | 141,276                         | 37,674                   | 18,840                   |
| Capacidade real (Ah)    | 310,807                         | 82,882                   | 41,440                   |
| Número total de módulos | 4                               | 4                        | 2                        |
| Capacidade Inst. (kWh)  | 20,0                            | 20,72                    | 20,72                    |
| Peso total (kg)         | 168                             | 202                      | 198                      |
| Corrente máxima (A)     | 240                             | 108                      | 54                       |
| Corrente média (A)      | 5,886                           | 1,569                    | 0,785                    |
| Limite do fabricante    | 10 por <i>cluster</i>           | 4                        | 4                        |
| Margem até o limite     | Ampla                           | Nenhuma                  | 2 unidades               |

Fonte: autoria própria (2026).

Os resultados demonstram que, nas condições de projeto base, as três soluções entregam capacidades instaladas equivalentes — em torno de 20 kWh —, com pesos totais relativamente próximos, variando entre 168 kg e 202 kg. A principal diferença observada no dimensionamento estático reside na margem disponível em relação ao limite máximo de paralelismo: enquanto a *Growatt* dispõe de ampla margem de expansão, a *SBW CB050* já opera no seu limite máximo, e a *SBW CB100* ainda possui espaço para 2 unidades adicionais.

#### 4.3.2 Viabilidade Técnica na Análise Paramétrica — Comparação

A Tabela 20 apresenta o número de combinações de Nd e DoD tecnicamente viáveis para cada bateria, considerando o limite máximo de unidades em paralelo permitido pelo fabricante.

**Tabela 20 — Comparação de viabilidade técnica na análise paramétrica**

| Bateria                   | Combinações viáveis | Combinações inviáveis | Aproveitamento |
|---------------------------|---------------------|-----------------------|----------------|
| AXE 5.0L Growatt (51,2 V) | 25                  | 0                     | 100%           |
| SBW CB050 WEG (192 V)     | 6                   | 19                    | 24%            |
| SBW CB100 WEG (384 V)     | 14                  | 11                    | 56%            |

Fonte: autoria própria (2026).

Os resultados evidenciam de forma contundente a superioridade da solução *Growatt* em termos de flexibilidade de dimensionamento: todas as 25 combinações avaliadas são tecnicamente viáveis, graças à arquitetura escalável por clusters que permite atingir até 400 kWh de capacidade total. A *SBW CB100 W00* apresenta desempenho intermediário, viabilizando 56% das combinações, enquanto a *SBW CB050 W00* revela-se extremamente restritiva, com apenas 24% das combinações viáveis — limitando sua aplicação a cenários de baixa autonomia e DoD elevado.

#### 4.3.3 Discussões Sobre os Resultados

A análise conjunta dos resultados permite estabelecer as seguintes considerações técnicas sobre cada solução estudada:

A bateria *AXE 5.0L Growatt* (51,2 V) destaca-se pela excepcional flexibilidade e escalabilidade, sendo a única das três soluções capaz de atender a todas as combinações de autonomia e DoD avaliadas. No entanto, sua baixa tensão nominal implica as maiores correntes de operação entre as três soluções — 240 A de corrente máxima e 5,886 A de corrente média real na condição base —, o que exige cabos de maior seção transversal, dispositivos de proteção de maior capacidade de interrupção e maior atenção às perdas resistivas na instalação (ABNT NBR 16690, 2019). Na análise paramétrica, a corrente máxima pode atingir valores superiores a 2.700 A nos cenários mais extremos, o que demanda atenção redobrada ao projeto elétrico da instalação.

A bateria *SBW CB050 W00 WEG* (192 V) apresenta correntes de operação significativamente menores — 108 A de corrente máxima e 1,569 A de corrente média real na condição base —, facilitando o dimensionamento elétrico da instalação. No entanto, sua restrição de escalabilidade é determinante: das 25 combinações avaliadas, apenas 6 são tecnicamente viáveis. Vale destacar que essa restrição é de natureza construtiva — imposta pelo limite de paralelismo do fabricante —, e não elétrica, uma vez que as correntes de descarga das combinações viáveis são muito inferiores aos limites nominais das células.

A bateria *SBW CB100 W00 WEG* (384 V) apresenta as menores correntes de operação entre as três soluções — 54 A de corrente máxima e 0,785 A de corrente média real na condição base —, representando a solução mais favorável do ponto de vista do dimensionamento elétrico. Viabiliza 14 das 25 combinações avaliadas e ainda dispõe de margem de 2 unidades até o limite do fabricante na condição base, constituindo a solução de alta tensão mais adequada entre as duas opções *WEG* para o perfil de consumo adotado neste projeto.

A análise das correntes de operação reforça de forma quantitativa uma das principais diferenças técnicas entre as soluções: o impacto direto da tensão nominal sobre as correntes do sistema. A corrente média real de descarga é de 5,886 A para o banco *Growatt* (51,2 V), 1,569 A para o banco *SBW CB050* (192 V) e 0,785 A para o banco *SBW CB100* (384 V) — reduções proporcionais ao aumento da tensão nominal, consistentes com a relação fundamental  $P = V \times I$  (VILLALVA; GAZOLI, 2012). Essa característica torna os sistemas de alta tensão intrinsecamente mais favoráveis ao dimensionamento elétrico da instalação, desde que sua capacidade de expansão seja suficiente para atender aos requisitos de autonomia e DoD do projeto.

## 5 CONCLUSÃO

Atualmente, o estudo de baterias é fundamental para que este tema seja cada vez mais viável e aplicado em instalações residenciais. Vale ressaltar que a variedade de baterias possibilita que o consumidor realize a instalação de diversas formas para qualquer aplicação.

O estudo de baterias é fundamental diante do crescimento das aplicações off-grid no cenário atual, evidenciando a importância de se projetar sistemas robustos e bem dimensionados. Além disso, a diversidade de modelos disponíveis no mercado permite ao consumidor adequar o seu banco de baterias à complexidade desejada, variando desde instalações mais simples até as mais complexas.

O presente trabalho consistiu em um estudo aprofundado de três modelos distintos de baterias, dimensionados para compor um banco capaz de suprir a demanda energética média de uma residência. Considerando um consumo diário de 7,233 kWh, uma profundidade de descarga (DoD) de 0,5, autonomia de um dia ( $N_d = 1$ ) e uma margem de segurança de 10%, a análise revelou comportamentos e especificações técnicas consideravelmente divergentes entre as tecnologias avaliadas.

Devido à sua menor tensão nominal (51,2 V), o modelo Growatt *AXE 5.0L* exige a maior corrente de operação (240 A), o que demanda condutores de maior bitola e aumenta a suscetibilidade a perdas resistivas. Esse sistema, composto por quatro módulos que totalizam 20 kWh, pesando 168 kg e destaca-se pela configuração de instalação vertical (empilhada), preservando a área de ocupação no chão e permitindo expansões futuras. Em contrapartida, o modelo WEG SBW CB050 W00 (192 V) fornece 20,72 kWh também com quatro módulos, mas operando com uma corrente máxima de 108 A. Como discutido no tópico 4, essa corrente de operação reduzida favorece a durabilidade das células. Contudo, seu arranjo em matriz (duas linhas e duas colunas) exige maior espaço físico em todas as dimensões, atinge o maior peso (202 kg) e não permite expansão.

Por fim, o modelo WEG SBW CB100 W00 (384 V) foi dimensionado com apenas dois módulos, alcançando os mesmos 20,72 kWh. Por possuir a maior tensão do estudo, este modelo opera com a menor corrente (54 A), minimizando

drasticamente as perdas elétricas. Além de pesar 198 kg, o sistema retoma a vantagem da modularidade, permitindo a adição de mais dois módulos.

Portanto, conclui-se que, embora cada modelo apresente características de destaque para diferentes cenários de instalação, o sistema WEG de 384 V demonstra a superioridade técnica global. Sabendo que o modelo da Growatt atende perfeitamente a restrições rigorosas de espaço e peso, a tecnologia de 384 V se consagra como a solução mais eficiente a longo prazo devido à sua baixa corrente operacional, menores perdas resistivas e plena viabilidade de expansão.

## REFERÊNCIAS

EPE. Empresa de Pesquisa Energética. Micro e Minigeração Distribuída & Baterias Atrás do Medidor. Rio de Janeiro, 2025.

ANEEL. Agência Nacional de Energia Elétrica. Micro e Minigeração Distribuída. Brasília, 2022. Disponível em: <https://www.gov.br/aneel/>.

EPE. Empresa de Pesquisa Energética. Micro e Minigeração Distribuída & Baterias Atrás do Medidor. Rio de Janeiro, 2025.

BRASIL. Lei nº 14.300, de 6 de janeiro de 2022. Institui o marco legal da microgeração e minigeração distribuída. Diário Oficial da União, Brasília, 2022.

VILLALVA, M. G.; GAZOLI, J. R. Energia Solar Fotovoltaica: Conceitos e Aplicações. São Paulo: Érica, 2012.

ANEEL. Agência Nacional de Energia Elétrica. Dados de Geração Distribuída. Brasília, 2026.

IEA. International Energy Agency. Renewables 2024. Paris, 2024.

CANAL SOLAR. *Lei 14.300: o que é e como calcular o fator de simultaneidade?* 19 jan. 2023. Atualizado em 16 fev. 2026. Disponível em: [Canal Solar - Lei 14.300: o que é e como calcular o fator de simultaneidade?](#). Acesso em: 22 abr. 2026.

DEYE. *Battery Energy Storage System (BESS): Revolutionizing Power Management for a Sustainable Future*. 15 set. 2023. Disponível em: <https://deye.com/battery-energy-storage-system-bess/>. Acesso em: 22 abr. 2026.

IRENA. International Renewable Energy Agency. Electricity Storage and Renewables: Costs and Markets to 2030. Abu Dhabi, 2017.

LINDEN, David; REDDY, Thomas B. *Handbook of Batteries*. 4. ed. New York: McGraw-Hill, 2011.

LUO, X.; WANG, J.; DOONER, M.; CLARKE, J. Overview of current development in electrical energy storage technologies and the application potential in power system operation. *Applied Energy*, v. 137, p. 511–536, 2015.

ANDRÉ, Francisco Mendes Micaelo. *Dimensionamento de Sistemas Fotovoltaicos com Baterias Ligados à Rede*. 2022. Dissertação (Mestrado em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores) – Universidade NOVA de Lisboa, Lisboa, 2022.

METWALLY, Soha H.; ZHANG, Xiaolei; ALI, Sidra; KRISHNAMOORTHY, Harish S. Solar PV and BESS based Home Energy System. In: *IEEE Conference Proceedings*. 2019.

SELVARASU, Uthandi; AMIRABADI, Mahshid; LI, Yuan; CROW, Caleb; LEHMAN, Brad. BESS Sizing for PV Power Smoothing. In: *2024 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*. IEEE, 2024.

IEA. International Energy Agency. *Batteries and Secure Energy Transitions*. Paris: IEA, 2024.

PESARAN, A.; SANTHANAGOPALAN, S.; KIM, G. Addressing the impact of temperature extremes on large format Li-ion batteries for vehicle applications. *National Renewable Energy Laboratory (NREL)*, Golden, Colorado, 2013.

COPEL. *Atividade econômica puxa crescimento do mercado de energia elétrica no Paraná*. Governo do Estado do Paraná, 29 maio 2025. Disponível em: <https://www.parana.pr.gov.br/aen/Noticia/Atividade-economica-puxa-crescimento-do-mercado-de-energia-eletrica-no-Parana>. Acesso em: 22 abr. 2026.

SCIENCEDIRECT. Depth of Discharge – an overview. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/depth-of-discharge>. Acesso em: 28 abr. 2026.

NILSSON, J. W.; RIEDEL, S. A. *Circuitos Elétricos*. 10. ed. São Paulo: Pearson, 2015.

BOYLESTAD, R. L. *Introdução à Análise de Circuitos*. 12. ed. São Paulo: Pearson, 2012.

CREDER, H. *Instalações Elétricas*. 16. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2016.

ABNT. *NBR 16690: Instalações elétricas de arranjos fotovoltaicos — Requisitos de projeto*. Rio de Janeiro: ABNT, 2019.

**APÊNDICE A - PROJETO DE DIMENSIONAMENTO DO BANCO DE BATERIA**  
**51,2V**

```

clc;
clear;
close all;

% Alunos: Eduardo e Maurício
% Orientador: Carlos Henrique Illa Font
% Ponta Grossa - PR - 04/2026
% Projeto de um Banco de Baterias para um Sistema Fotovoltaico - Bateria
51,2V

%% 1) ESPECIFICAÇÕES
Em = 217;          % Energia mensal (kWh)
Vpack = 51.2;      % Tensão do banco (V)
Cbat = 97.65;      % Capacidade da bateria (Ah)
Pesobat = 42;      % Peso unitário simplificado por módulo (kg)
Inominal = 60;     % Corrente nominal máxima de cada módulo (A)
Ta = 25;           % Temperatura (°C)
ND = 1;            % Dias de autonomia
DOD = 0.5;         % Profundidade de descarga
beta = 1.1;        % Fator de segurança

%% 1.1) VOLUMES DOS STACKS
% volume_stacks(n) = volume do stack com n módulos [m^3]
volume_stacks = [
    0.0375 % 1 módulo
    0.0694 % 2 módulos
    0.1012 % 3 módulos
    0.1331 % 4 módulos
    0.1650 % 5 módulos
    0.1969 % 6 módulos
    0.2288 % 7 módulos
    0.2607 % 8 módulos
    0.2926 % 9 módulos
    0.3242 % 10 módulos
];

%% 1.2) PESOS DOS STACKS
% peso_stacks(n) = peso do stack com n módulos [kg]

```

```

peso_stacks = [
    42 % 1 módulo
    82 % 2 módulos
    122 % 3 módulos
    162 % 4 módulos
    202 % 5 módulos
    242 % 6 módulos
    282 % 7 módulos
    322 % 8 módulos
    362 % 9 módulos
    402 % 10 módulos
];

% Observação:
% Dados retirados do datasheet do modelo da bateria
%% 1.3) LIMITES DO FABRICANTE
max_modulos_sistema = 80;
%% 2) CONDIÇÃO ESTÁTICA
Ed = (Em / 30) * 1000; % Energia diária em Wh
alphaT = 1 + 0.006*(Ta - 25);
Cideal = (Ed * ND) / Vpack;
Creal = (alphaT * beta * ND * Ed) / (DOD * Vpack);
Nbat_paralelo = ceil(Creal / Cbat);
Nbat_total = Nbat_paralelo; % Total físico de módulos
Pesototal_simplificado = Pesobat * Nbat_total;
% Corrente máxima do banco
Imax_banco_estatico = Inominal * Nbat_total;
[q10_est, resto_est, Vtotal_estatico] = calcula_volume_por_stacks(Nbat_total,
volume_stacks);
[~, ~, Pesototal_real_estatico] = calcula_peso_por_stacks(Nbat_total,
peso_stacks);
%% Exibição
fprintf('--- RESULTADOS ESTÁTICOS ---\n');
fprintf('Energia diária: %.2f Wh\n', Ed);
fprintf('Capacidade ideal: %.2f Ah\n', Cideal);

```

```

fprintf('Capacidade real: %.2f Ah\n', Creal);
fprintf('Baterias em paralelo: %d\n', Nbat_paralelo);
fprintf('Total físico de módulos: %d\n', Nbat_total);
fprintf('Corrente máxima do banco: %.2f A\n', Imax_banco_estatico);
fprintf('Peso total simplificado: %.2f kg\n', Pesototal_simplificado);
fprintf('Stacks de 10 módulos: %d\n', q10_est);
fprintf('Módulos restantes: %d\n', resto_est);
fprintf('Peso total real da aplicação: %.2f kg\n', Pesototal_real_estatico);
fprintf('Volume total real da aplicação: %.4f m^3\n\n', Vtotal_estatico);

```

### %% 3) VARIAÇÕES

```

ND_var = 1:5;
DOD_var = 0.4:0.1:0.8;
Nparalelo_var = zeros(length(DOD_var), length(ND_var));
Nmodulos_total_var = zeros(length(DOD_var), length(ND_var));
Pesototal_simplificado_var = zeros(length(DOD_var), length(ND_var));
Pesototal_real_var = zeros(length(DOD_var), length(ND_var));
Vtotal_real_var = zeros(length(DOD_var), length(ND_var));
Imax_banco_var = zeros(length(DOD_var), length(ND_var));
q10_var = zeros(length(DOD_var), length(ND_var));
resto_var = zeros(length(DOD_var), length(ND_var));
Atende_var = false(length(DOD_var), length(ND_var));
for i = 1:length(DOD_var)
    for j = 1:length(ND_var)

```

```

        NDv = ND_var(j);
        DODv = DOD_var(i);

```

#### % Capacidade real

```

        Creal_var = (beta * NDv * Ed) / (DODv * Vpack);

```

#### % Número de strings em paralelo

```

        Nparalelo_var(i,j) = ceil(Creal_var / Cbat);

```

#### % Total físico de módulos

```

Nmodulos_total_var(i,j) = Nparalelo_var(i,j);

% Corrente máxima do banco
Imax_banco_var(i,j) = Inominal * Nmodulos_total_var(i,j);

% Verificação de atendimento do fabricante
Atende_var(i,j) = Nmodulos_total_var(i,j) <= max_modulos_sistema;

% Peso simplificado
Pesototal_simplificado_var(i,j) = Pesobat * Nmodulos_total_var(i,j);

% Volume real por stacks
[q10, resto, Vtotal] = calcula_volume_por_stacks(Nmodulos_total_var(i,j),
volume_stacks);
q10_var(i,j) = q10;
resto_var(i,j) = resto;
Vtotal_real_var(i,j) = Vtotal;

% Peso real por stacks
[~, ~, Ptotal_real] = calcula_peso_por_stacks(Nmodulos_total_var(i,j),
peso_stacks);
Pesototal_real_var(i,j) = Ptotal_real;
end
end
%% 4) GRÁFICOS
cores = lines(length(DOD_var));
legend_strings = arrayfun(@(x) sprintf('DOD = %.1f', x), DOD_var,
'UniformOutput', false);
% -----
% GRÁFICO 1: Número total de módulos
% -----
figure;
hold on;
for i = 1:length(DOD_var)

```

```

        plot_curva_com_limite(ND_var, Nmodulos_total_var(i,:), Atende_var(i,:),
cores(i,:));
    end
    grid on;
    xlabel('Dias de Autonomia');
    ylabel('Número Total de Módulos');
    title('Número total de módulos em função da autonomia');
    legend(legend_strings, 'Location', 'northwest');
    ylim([0 20]);
    marcar_limite_no_grafico( ...
        ND_var, ...
        Nmodulos_total_var, ...
        Atende_var, ...
        DOD_var, ...
        'A bateria atende em todas as situações neste intervalo de autonomia');
    hold off;
    % -----
    % GRÁFICO 2: Peso real da aplicação
    % -----
    figure;
    hold on;
    for i = 1:length(DOD_var)
        plot_curva_com_limite(ND_var, Pesototal_real_var(i,:), Atende_var(i,:),
cores(i,:));
    end
    grid on;
    xlabel('Dias de Autonomia');
    ylabel('Peso Total Real (kg)');
    title('Peso real da aplicação em função da autonomia');
    legend(legend_strings, 'Location', 'northwest');
    ylim([0 1000]);
    marcar_limite_no_grafico( ...
        ND_var, ...
        Pesototal_real_var, ...

```

```

    Atende_var, ...
    DOD_var, ...
    'A bateria atende em todas as situações neste intervalo de autonomia');
hold off;
% -----
% GRÁFICO 3: Volume real da aplicação
% -----
figure;
hold on;
for i = 1:length(DOD_var)
    plot_curva_com_limite(ND_var, Volttotal_real_var(i,:), Atende_var(i,:),
cores(i,:));
end
grid on;
xlabel('Dias de Autonomia');
ylabel('Volume Total Real (m^3)');
title('Volume real da aplicação em função da autonomia');
legend(legend_strings, 'Location', 'northwest');
ylim([0 0.8]);
marcar_limite_no_grafico( ...
    ND_var, ...
    Volttotal_real_var, ...
    Atende_var, ...
    DOD_var, ...
    'A bateria atende em todas as situações neste intervalo de autonomia');
hold off;
% -----
% GRÁFICO 4: Corrente máxima do banco
% -----
figure;
hold on;
for i = 1:length(DOD_var)
    plot_curva_com_limite(ND_var, Imax_banco_var(i,:), Atende_var(i,:),
cores(i,:));

```

```

end
grid on;
xlabel('Dias de Autonomia');
ylabel('Corrente Máxima do Banco (A)');
title('Corrente máxima do banco em função da autonomia');
legend(legend_strings, 'Location', 'northwest');
ylim([0 max(lmax_banco_var(:))*1.15]);
marcar_limite_no_grafico( ...
    ND_var, ...
    lmax_banco_var, ...
    Atende_var, ...
    DOD_var, ...
    'A bateria atende em todas as situações neste intervalo de autonomia');
hold off;

```

#### %% 5) MATRIZES NO COMMAND WINDOW

```

disp('--- MATRIZ DE NÚMERO DE STRINGS EM PARALELO ---');
disp(Nparalelo_var);
disp('--- MATRIZ DE NÚMERO TOTAL DE MÓDULOS ---');
disp(Nmodulos_total_var);
disp('--- MATRIZ DE CORRENTE MÁXIMA DO BANCO (A) ---');
disp(lmax_banco_var);
disp('--- MATRIZ DE PESO REAL DA APLICAÇÃO (kg) ---');
disp(Pesototal_real_var);
disp('--- MATRIZ DE VOLUME REAL DA APLICAÇÃO (m^3) ---');
disp(Volttotal_real_var);
disp('--- MATRIZ DE ATENDIMENTO (1 = atende, 0 = não atende) ---');
disp(Atende_var);
disp('--- MATRIZ DE STACKS DE 10 ---');
disp(q10_var);
disp('--- MATRIZ DE RESTO DE MÓDULOS ---');
disp(resto_var);

```

#### %% FUNÇÕES LOCAIS

```

function [q10, resto, Vtotal] = calcula_volume_por_stacks(Nmodulos,
volume_stacks)

```

```

q10 = floor(Nmodulos / 10);
resto = mod(Nmodulos, 10);
Vtotal = q10 * volume_stacks(10);
if resto > 0
    Vtotal = Vtotal + volume_stacks(resto);
end
end
function [q10, resto, Ptotal] = calcula_peso_por_stacks(Nmodulos,
peso_stacks)
    q10 = floor(Nmodulos / 10);
    resto = mod(Nmodulos, 10);
    Ptotal = q10 * peso_stacks(10);
    if resto > 0
        Ptotal = Ptotal + peso_stacks(resto);
    end
end
function plot_curva_com_limite(x, y, atende, cor)
    % Plota contínuo até o primeiro ponto inválido
    % e pontilhado a partir desse mesmo ponto
    idx_primeiro_invalido = find(~atende, 1, 'first');
    if isempty(idx_primeiro_invalido)
        % Tudo atende
        plot(x, y, '-', ...
            'LineWidth', 2, ...
            'Color', cor, ...
            'Marker', 'o');
    else
        % Parte válida: vai até o ponto de limitação
        plot(x(1:idx_primeiro_invalido), y(1:idx_primeiro_invalido), '-', ...
            'LineWidth', 2, ...
            'Color', cor, ...
            'Marker', 'o');
        % Parte inválida: começa no mesmo ponto de limitação
        plot(x(idx_primeiro_invalido:end), y(idx_primeiro_invalido:end), '--', ...

```

```

        'LineWidth', 2, ...
        'Color', cor, ...
        'Marker', 'o');
    end
end
function marcar_limite_no_grafico(x, Yplot_original, Atende_var, DOD_var,
texto_ok)
    hold on;
    houve_limitacao = false;
    for i = 1:length(DOD_var)
        idx_primeiro_invalido = find(~Atende_var(i,:), 1, 'first');
        if ~isempty(idx_primeiro_invalido)
            houve_limitacao = true;
            plot(x(idx_primeiro_invalido), ...
                Yplot_original(i,idx_primeiro_invalido), ...
                'rx', 'MarkerSize', 10, 'LineWidth', 2, ...
                'HandleVisibility', 'off');
            text(x(idx_primeiro_invalido), ...
                Yplot_original(i,idx_primeiro_invalido), ...
                sprintf(' Limite DOD = %.1f', DOD_var(i)), ...
                'FontSize', 9, ...
                'Color', 'r', ...
                'VerticalAlignment', 'bottom');
        end
    end
end
if ~houve_limitacao
    xl = xlim;
    yl = ylim;
    text(mean(xl), yl(2)*0.90, texto_ok, ...
        'HorizontalAlignment', 'center', ...
        'FontSize', 10, ...
        'FontWeight', 'bold', ...
        'Color', [0 0.5 0]);
end
end

```

**APÊNDICE B - PROJETO DE DIMENSIONAMENTO DO BANCO DE BATERIA  
192V**

```

clc;
clear;
close all;
% Alunos: Eduardo e Maurício
% Orientador: Carlos Henrique Illa Font
% Ponta Grossa - PR - 04/2026
% Projeto de um Banco de Baterias para um Sistema Fotovoltaico - Bateria 192V
%% 1) ESPECIFICAÇÕES
Em = 217;           % Energia mensal (kWh)
Vpack = 192;        % Tensão do banco (V)
Cbat = 27;          % Capacidade da bateria (Ah)
Pesobat = 50.5;     % Peso unitário simplificado por módulo (kg)
Inominal = 27;      % Corrente nominal máxima de cada módulo (A)
Ta = 25;           % Temperatura (°C)
ND = 1;            % Dias de autonomia
DOD = 0.5;         % Profundidade de descarga
beta = 1.1;        % Fator de segurança
%% 1.1) VOLUMES DOS STACKS
volume_stacks = [
    0.0349125 % 1 módulo
    0.069825  % 2 módulos
    0.1047375 % 3 módulos
    0.13965   % 4 módulos
];
%% 1.2) PESOS DOS STACKS
peso_stacks = [
    50.5
    101
    151.5
    202
];
%% 1.3) LIMITES DO FABRICANTE
max_modulos_sistema = 4;
%% 2) CONDIÇÃO ESTÁTICA
Ed = (Em / 30) * 1000;
alphaT = 1 + 0.006*(Ta - 25);
Cideal = (Ed * ND) / Vpack;
Creal = (alphaT * beta * ND * Ed) / (DOD * Vpack);
Nbat_paralelo = ceil(Creal / Cbat);
Nbat_total = Nbat_paralelo;
Pesototal_simplificado = Pesobat * Nbat_total;
% Corrente máxima do banco
Imax_banco_estatico = Inominal * Nbat_total;
[q10_est, resto_est, Vtotal_estatico] = ...
    calcula_volume_por_stacks(Nbat_total, volume_stacks);
[~, ~, Pesototal_real_estatico] = ...
    calcula_peso_por_stacks(Nbat_total, peso_stacks);
%% EXIBIÇÃO
fprintf('--- RESULTADOS ESTÁTICOS ---\n');
fprintf('Energia diária: %.2f Wh\n', Ed);

```

```

fprintf('Capacidade ideal: %.2f Ah\n', Cideal);
fprintf('Capacidade real: %.2f Ah\n', Creal);
fprintf('Baterias em paralelo: %d\n', Nbat_paralelo);
fprintf('Total físico de módulos: %d\n', Nbat_total);
fprintf('Corrente máxima do banco: %.2f A\n', Imax_banco_estatico);
fprintf('Peso total simplificado: %.2f kg\n', Pesototal_simplificado);
fprintf('Stacks de 4 módulos: %d\n', q10_est);
fprintf('Módulos restantes: %d\n', resto_est);
fprintf('Peso total real da aplicação: %.2f kg\n', Pesototal_real_estatico);
fprintf('Volume total real da aplicação: %.4f m^3\n\n', Vtotal_estatico);
%% 3) VARIAÇÕES
ND_var = 1:5;
DOD_var = 0.4:0.1:0.8;
Nparalelo_var = zeros(length(DOD_var), length(ND_var));
Nmodulos_total_var = zeros(length(DOD_var), length(ND_var));
Pesototal_simplificado_var = zeros(length(DOD_var), length(ND_var));
Pesototal_real_var = zeros(length(DOD_var), length(ND_var));
Vtotal_real_var = zeros(length(DOD_var), length(ND_var));
Imax_banco_var = zeros(length(DOD_var), length(ND_var));
q10_var = zeros(length(DOD_var), length(ND_var));
resto_var = zeros(length(DOD_var), length(ND_var));
Atende_var = false(length(DOD_var), length(ND_var));
for i = 1:length(DOD_var)
    for j = 1:length(ND_var)
        NDv = ND_var(j);
        DODv = DOD_var(i);
        Creal_var = (beta * NDv * Ed) / (DODv * Vpack);
        Nparalelo_var(i,j) = ceil(Creal_var / Cbat);
        Nmodulos_total_var(i,j) = Nparalelo_var(i,j);
        % Corrente máxima do banco
        Imax_banco_var(i,j) = Inominal * Nmodulos_total_var(i,j);
        Atende_var(i,j) = ...
            Nmodulos_total_var(i,j) <= max_modulos_sistema;
        Pesototal_simplificado_var(i,j) = ...
            Pesobat * Nmodulos_total_var(i,j);
        [q10, resto, Vtotal] = ...
            calcula_volume_por_stacks( ...
                Nmodulos_total_var(i,j), ...
                volume_stacks);
        q10_var(i,j) = q10;
        resto_var(i,j) = resto;
        Vtotal_real_var(i,j) = Vtotal;
        [~, ~, Ptotal_real] = ...
            calcula_peso_por_stacks( ...
                Nmodulos_total_var(i,j), ...
                peso_stacks);
        Pesototal_real_var(i,j) = Ptotal_real;
    end
end
%% 4) GRÁFICOS

```

```

cores = lines(length(DOD_var));
legend_strings = arrayfun( ...
    @(x) sprintf('DOD = %.1f', x), ...
    DOD_var, ...
    'UniformOutput', false);
%% -----
% GRÁFICO 1
% -----
figure;
hold on;
for i = 1:length(DOD_var)
    plot_curva_com_limite( ...
        ND_var, ...
        Nmodulos_total_var(i,:), ...
        max_modulos_sistema, ...
        cores(i,:), ...
        legend_strings{i});
end
grid on;
xlabel('Dias de Autonomia');
ylabel('Número Total de Módulos');
title('Número total de módulos em função da autonomia');
legend('Location', 'northwest');
ylim([0 20]);
marcar_limite_no_grafico( ...
    ND_var, ...
    Nmodulos_total_var, ...
    max_modulos_sistema, ...
    DOD_var, ...
    'A bateria atende em todas as situações neste intervalo de autonomia');
hold off;
%% -----
% GRÁFICO 2
% -----
[~, ~, peso_limite_real] = ...
    calcula_peso_por_stacks( ...
        max_modulos_sistema, ...
        peso_stacks);
figure;
hold on;
for i = 1:length(DOD_var)
    plot_curva_com_limite( ...
        ND_var, ...
        Pesototal_real_var(i,:), ...
        peso_limite_real, ...
        cores(i,:), ...
        legend_strings{i});
end
grid on;
xlabel('Dias de Autonomia');

```

```

ylabel('Peso Total Real (kg)');
title('Peso real da aplicação em função da autonomia');
legend('Location', 'northwest');
ylim([0 1000]);
marcar_limite_no_grafico( ...
    ND_var, ...
    Pesototal_real_var, ...
    peso_limite_real, ...
    DOD_var, ...
    'A bateria atende em todas as situações neste intervalo de autonomia');
hold off;
%% -----
% GRÁFICO 3
% -----
[~, ~, volume_limite_real] = ...
    calcula_volume_por_stacks( ...
        max_modulos_sistema, ...
        volume_stacks);
figure;
hold on;
for i = 1:length(DOD_var)
    plot_curva_com_limite( ...
        ND_var, ...
        Volttotal_real_var(i,:), ...
        volume_limite_real, ...
        cores(i,:), ...
        legend_strings{i});
end
grid on;
xlabel('Dias de Autonomia');
ylabel('Volume Total Real (m^3)');
title('Volume real da aplicação em função da autonomia');
legend('Location', 'northwest');
ylim([0 0.8]);
marcar_limite_no_grafico( ...
    ND_var, ...
    Volttotal_real_var, ...
    volume_limite_real, ...
    DOD_var, ...
    'A bateria atende em todas as situações neste intervalo de autonomia');
hold off;
%% -----
% GRÁFICO 4
% -----
Imax_limite_banco = Inominal * max_modulos_sistema;
figure;
hold on;
for i = 1:length(DOD_var)
    plot_curva_com_limite( ...
        ND_var, ...

```

```

        lmax_banco_var(i,:), ...
        lmax_limite_banco, ...
        cores(i,:), ...
        legend_strings{i});
end
grid on;
xlabel('Dias de Autonomia');
ylabel('Corrente Máxima do Banco (A)');
title('Corrente máxima do banco em função da autonomia');
legend('Location', 'northwest');
ylim([0 max(lmax_banco_var(:))*1.15]);
marcar_limite_no_grafico( ...
    ND_var, ...
    lmax_banco_var, ...
    lmax_limite_banco, ...
    DOD_var, ...
    'A bateria atende em todas as situações neste intervalo de autonomia');
hold off;
%% 5) MATRIZES
disp('--- MATRIZ DE NÚMERO DE STRINGS EM PARALELO ---');
disp(Nparalelo_var);
disp('--- MATRIZ DE NÚMERO TOTAL DE MÓDULOS ---');
disp(Nmodulos_total_var);
disp('--- MATRIZ DE CORRENTE MÁXIMA DO BANCO (A) ---');
disp(lmax_banco_var);
disp('--- MATRIZ DE PESO REAL DA APLICAÇÃO (kg) ---');
disp(Pesototal_real_var);
disp('--- MATRIZ DE VOLUME REAL DA APLICAÇÃO (m^3) ---');
disp(Voltotal_real_var);
disp('--- MATRIZ DE ATENDIMENTO ---');
disp(Atende_var);
disp('--- MATRIZ DE STACKS DE 4 ---');
disp(q10_var);
disp('--- MATRIZ DE RESTO DE MÓDULOS ---');
disp(resto_var);
%% FUNÇÕES LOCAIS
function [q10, resto, Vtotal] = ...
    calcula_volume_por_stacks(Nmodulos, volume_stacks)
    q10 = floor(Nmodulos / 4);
    resto = mod(Nmodulos, 4);
    Vtotal = q10 * volume_stacks(4);
    if resto > 0
        Vtotal = Vtotal + volume_stacks(resto);
    end
end
function [q10, resto, Ptotal] = ...
    calcula_peso_por_stacks(Nmodulos, peso_stacks)
    q10 = floor(Nmodulos / 4);
    resto = mod(Nmodulos, 4);
    Ptotal = q10 * peso_stacks(4);

```

```

if resto > 0
    Ptotal = Ptotal + peso_stacks(resto);
end
end
function plot_curva_com_limite( ...
    x, y, limite_maximo, cor, nome_legenda)
    idx_limite = find(y >= limite_maximo, 1, 'first');
    if isempty(idx_limite)
        plot(x, y, '-', ...
            'LineWidth', 2, ...
            'Color', cor, ...
            'Marker', 'o', ...
            'DisplayName', nome_legenda);
    elseif idx_limite == 1
        plot(x, y, '--', ...
            'LineWidth', 2, ...
            'Color', cor, ...
            'Marker', 'o', ...
            'DisplayName', nome_legenda);
    else
        x1 = x(idx_limite-1);
        x2 = x(idx_limite);
        y1 = y(idx_limite-1);
        y2 = y(idx_limite);
        x_lim = x1 + ...
            (limite_maximo - y1) * ...
            (x2 - x1) / ...
            (y2 - y1);
        x_cont = [x(1:idx_limite-1), x_lim];
        y_cont = [y(1:idx_limite-1), limite_maximo];
        plot(x_cont, y_cont, '-', ...
            'LineWidth', 2, ...
            'Color', cor, ...
            'Marker', 'o', ...
            'DisplayName', nome_legenda);
        x_pont = [x_lim, x(idx_limite:end)];
        y_pont = [limite_maximo, y(idx_limite:end)];
        plot(x_pont, y_pont, '--', ...
            'LineWidth', 2, ...
            'Color', cor, ...
            'Marker', 'o', ...
            'HandleVisibility', 'off');
    end
end
function marcar_limite_no_grafico( ...
    x, ...
    Yplot_original, ...
    limite_maximo, ...
    DOD_var, ...
    texto_ok)

```

```

hold on;
houve_limitacao = false;
for i = 1:length(DOD_var)
    y = Yplot_original(i,:);
    idx_limite = find(y >= limite_maximo, 1, 'first');
    if ~isempty(idx_limite)
        houve_limitacao = true;
        if idx_limite == 1
            x_lim = x(1);
            y_lim = limite_maximo;
        else
            x1 = x(idx_limite-1);
            x2 = x(idx_limite);
            y1 = y(idx_limite-1);
            y2 = y(idx_limite);
            x_lim = x1 + ...
                (limite_maximo - y1) * ...
                (x2 - x1) / ...
                (y2 - y1);
            y_lim = limite_maximo;
        end
        plot(x_lim, y_lim, ...
            'rx', ...
            'MarkerSize', 10, ...
            'LineWidth', 2, ...
            'HandleVisibility', 'off');
        offset_y = limite_maximo * 0.03;
        text(x_lim + 0.05, ...
            y_lim + offset_y, ...
            sprintf('Limite DOD = %.1f', DOD_var(i)), ...
            'FontSize', 9, ...
            'Color', 'r');
    end
end
if ~houve_limitacao
    xl = xlim;
    yl = ylim;
    text(mean(xl), ...
        yl(2)*0.90, ...
        texto_ok, ...
        'HorizontalAlignment', 'center', ...
        'FontSize', 10, ...
        'FontWeight', 'bold', ...
        'Color', [0 0.5 0]);
end
end
end

```

**APÊNDICE C - PROJETO DE DIMENSIONAMENTO DO BANCO DE BATERIA  
384V**

```

clc;
clear;
close all;
% Alunos: Eduardo e Maurício
% Orientador: Carlos Henrique Illa Font
% Ponta Grossa - PR - 04/2026
% Projeto de um Banco de Baterias para um Sistema Fotovoltaico - Bateria 384V
%% 1) ESPECIFICAÇÕES
Em = 217;           % Energia mensal (kWh)
Vpack = 384;        % Tensão do banco (V)
Cbat = 27;          % Capacidade da bateria (Ah)
Pesobat = 99;       % Peso unitário simplificado por módulo (kg)
Inominal = 27;      % Corrente nominal máxima de cada módulo (A)
Ta = 25;           % Temperatura (°C)
ND = 1;            % Dias de autonomia
DOD = 0.5;         % Profundidade de descarga
beta = 1.1;        % Fator de segurança
%% 1.1) VOLUMES DOS STACKS
volume_stacks = [
    0.0349125 % 1 módulo
    0.069825  % 2 módulos
    0.1047375 % 3 módulos
    0.13965   % 4 módulos
];
%% 1.2) PESOS DOS STACKS
peso_stacks = [
    50.5
    101
    151.5
    202
];
%% 1.3) LIMITES DO FABRICANTE
max_modulos_sistema = 4;
%% 2) CONDIÇÃO ESTÁTICA
Ed = (Em / 30) * 1000;
alphaT = 1 + 0.006*(Ta - 25);
Cideal = (Ed * ND) / Vpack;
Creal = (alphaT * beta * ND * Ed) / (DOD * Vpack);
Nbat_paralelo = ceil(Creal / Cbat);
Nbat_total = Nbat_paralelo;
Pesototal_simplificado = Pesobat * Nbat_total;
% Corrente máxima do banco
Imax_banco_estatico = Inominal * Nbat_total;
[q10_est, resto_est, Vtotal_estatico] = ...
    calcula_volume_por_stacks(Nbat_total, volume_stacks);
[~, ~, Pesototal_real_estatico] = ...
    calcula_peso_por_stacks(Nbat_total, peso_stacks);
%% EXIBIÇÃO
fprintf('--- RESULTADOS ESTÁTICOS ---\n');
fprintf('Energia diária: %.2f Wh\n', Ed);

```

```

fprintf('Capacidade ideal: %.2f Ah\n', Cideal);
fprintf('Capacidade real: %.2f Ah\n', Creal);
fprintf('Baterias em paralelo: %d\n', Nbat_paralelo);
fprintf('Total físico de módulos: %d\n', Nbat_total);
fprintf('Corrente máxima do banco: %.2f A\n', Imax_banco_estatico);
fprintf('Peso total simplificado: %.2f kg\n', Pesototal_simplificado);
fprintf('Stacks de 4 módulos: %d\n', q10_est);
fprintf('Módulos restantes: %d\n', resto_est);
fprintf('Peso total real da aplicação: %.2f kg\n', Pesototal_real_estatico);
fprintf('Volume total real da aplicação: %.4f m^3\n\n', Vtotal_estatico);
%% 3) VARIAÇÕES
ND_var = 1:5;
DOD_var = 0.4:0.1:0.8;
Nparalelo_var = zeros(length(DOD_var), length(ND_var));
Nmodulos_total_var = zeros(length(DOD_var), length(ND_var));
Pesototal_simplificado_var = zeros(length(DOD_var), length(ND_var));
Pesototal_real_var = zeros(length(DOD_var), length(ND_var));
Vtotal_real_var = zeros(length(DOD_var), length(ND_var));
Imax_banco_var = zeros(length(DOD_var), length(ND_var));
q10_var = zeros(length(DOD_var), length(ND_var));
resto_var = zeros(length(DOD_var), length(ND_var));
Atende_var = false(length(DOD_var), length(ND_var));
for i = 1:length(DOD_var)
    for j = 1:length(ND_var)
        NDv = ND_var(j);
        DODv = DOD_var(i);
        Creal_var = (beta * NDv * Ed) / (DODv * Vpack);
        Nparalelo_var(i,j) = ceil(Creal_var / Cbat);
        Nmodulos_total_var(i,j) = Nparalelo_var(i,j);
        % Corrente máxima do banco
        Imax_banco_var(i,j) = Inominal * Nmodulos_total_var(i,j);
        Atende_var(i,j) = ...
            Nmodulos_total_var(i,j) <= max_modulos_sistema;
        Pesototal_simplificado_var(i,j) = ...
            Pesobat * Nmodulos_total_var(i,j);
        [q10, resto, Vtotal] = ...
            calcula_volume_por_stacks( ...
                Nmodulos_total_var(i,j), ...
                volume_stacks);
        q10_var(i,j) = q10;
        resto_var(i,j) = resto;
        Vtotal_real_var(i,j) = Vtotal;
        [~, ~, Ptotal_real] = ...
            calcula_peso_por_stacks( ...
                Nmodulos_total_var(i,j), ...
                peso_stacks);
        Pesototal_real_var(i,j) = Ptotal_real;
    end
end
%% 4) GRÁFICOS

```

```

cores = lines(length(DOD_var));
legend_strings = arrayfun( ...
    @(x) sprintf('DOD = %.1f', x), ...
    DOD_var, ...
    'UniformOutput', false);
%% -----
% GRÁFICO 1
% -----
figure;
hold on;
for i = 1:length(DOD_var)
    plot_curva_com_limite( ...
        ND_var, ...
        Nmodulos_total_var(i,:), ...
        max_modulos_sistema, ...
        cores(i,:), ...
        legend_strings{i});
end
grid on;
xlabel('Dias de Autonomia');
ylabel('Número Total de Módulos');
title('Número total de módulos em função da autonomia');
legend('Location', 'northwest');
ylim([0 20]);
marcar_limite_no_grafico( ...
    ND_var, ...
    Nmodulos_total_var, ...
    max_modulos_sistema, ...
    DOD_var, ...
    'A bateria atende em todas as situações neste intervalo de autonomia');
hold off;
%% -----
% GRÁFICO 2
% -----
[~, ~, peso_limite_real] = ...
    calcula_peso_por_stacks( ...
        max_modulos_sistema, ...
        peso_stacks);
figure;
hold on;
for i = 1:length(DOD_var)
    plot_curva_com_limite( ...
        ND_var, ...
        Pesototal_real_var(i,:), ...
        peso_limite_real, ...
        cores(i,:), ...
        legend_strings{i});
end
grid on;
xlabel('Dias de Autonomia');

```

```

ylabel('Peso Total Real (kg)');
title('Peso real da aplicação em função da autonomia');
legend('Location', 'northwest');
ylim([0 1000]);
marcar_limite_no_grafico( ...
    ND_var, ...
    Pesototal_real_var, ...
    peso_limite_real, ...
    DOD_var, ...
    'A bateria atende em todas as situações neste intervalo de autonomia');
hold off;
%% -----
% GRÁFICO 3
% -----
[~, ~, volume_limite_real] = ...
    calcula_volume_por_stacks( ...
        max_modulos_sistema, ...
        volume_stacks);
figure;
hold on;
for i = 1:length(DOD_var)
    plot_curva_com_limite( ...
        ND_var, ...
        Volttotal_real_var(i,:), ...
        volume_limite_real, ...
        cores(i,:), ...
        legend_strings{i});
end
grid on;
xlabel('Dias de Autonomia');
ylabel('Volume Total Real (m^3)');
title('Volume real da aplicação em função da autonomia');
legend('Location', 'northwest');
ylim([0 0.8]);
marcar_limite_no_grafico( ...
    ND_var, ...
    Volttotal_real_var, ...
    volume_limite_real, ...
    DOD_var, ...
    'A bateria atende em todas as situações neste intervalo de autonomia');
hold off;
%% -----
% GRÁFICO 4
% -----
Imax_limite_banco = Inominal * max_modulos_sistema;
figure;
hold on;
for i = 1:length(DOD_var)
    plot_curva_com_limite( ...
        ND_var, ...

```

```

        lmax_banco_var(i,:), ...
        lmax_limite_banco, ...
        cores(i,:), ...
        legend_strings{i});
end
grid on;
xlabel('Dias de Autonomia');
ylabel('Corrente Máxima do Banco (A)');
title('Corrente máxima do banco em função da autonomia');
legend('Location', 'northwest');
ylim([0 max(lmax_banco_var(:))*1.15]);
marcar_limite_no_grafico( ...
    ND_var, ...
    lmax_banco_var, ...
    lmax_limite_banco, ...
    DOD_var, ...
    'A bateria atende em todas as situações neste intervalo de autonomia');
hold off;
%% 5) MATRIZES
disp('--- MATRIZ DE NÚMERO DE STRINGS EM PARALELO ---');
disp(Nparalelo_var);
disp('--- MATRIZ DE NÚMERO TOTAL DE MÓDULOS ---');
disp(Nmodulos_total_var);
disp('--- MATRIZ DE CORRENTE MÁXIMA DO BANCO (A) ---');
disp(lmax_banco_var);
disp('--- MATRIZ DE PESO REAL DA APLICAÇÃO (kg) ---');
disp(Pesototal_real_var);
disp('--- MATRIZ DE VOLUME REAL DA APLICAÇÃO (m^3) ---');
disp(Voltotal_real_var);
disp('--- MATRIZ DE ATENDIMENTO ---');
disp(Atende_var);
disp('--- MATRIZ DE STACKS DE 4 ---');
disp(q10_var);
disp('--- MATRIZ DE RESTO DE MÓDULOS ---');
disp(resto_var);
%% FUNÇÕES LOCAIS
function [q10, resto, Vtotal] = ...
    calcula_volume_por_stacks(Nmodulos, volume_stacks)
    q10 = floor(Nmodulos / 4);
    resto = mod(Nmodulos, 4);
    Vtotal = q10 * volume_stacks(4);
    if resto > 0
        Vtotal = Vtotal + volume_stacks(resto);
    end
end
function [q10, resto, Ptotal] = ...
    calcula_peso_por_stacks(Nmodulos, peso_stacks)
    q10 = floor(Nmodulos / 4);
    resto = mod(Nmodulos, 4);
    Ptotal = q10 * peso_stacks(4);

```

```

if resto > 0
    Ptotal = Ptotal + peso_stacks(resto);
end
end
function plot_curva_com_limite( ...
    x, y, limite_maximo, cor, nome_legenda)
    idx_limite = find(y >= limite_maximo, 1, 'first');
    if isempty(idx_limite)
        plot(x, y, '-', ...
            'LineWidth', 2, ...
            'Color', cor, ...
            'Marker', 'o', ...
            'DisplayName', nome_legenda);
    elseif idx_limite == 1
        plot(x, y, '--', ...
            'LineWidth', 2, ...
            'Color', cor, ...
            'Marker', 'o', ...
            'DisplayName', nome_legenda);
    else
        x1 = x(idx_limite-1);
        x2 = x(idx_limite);
        y1 = y(idx_limite-1);
        y2 = y(idx_limite);
        x_lim = x1 + ...
            (limite_maximo - y1) * ...
            (x2 - x1) / ...
            (y2 - y1);
        x_cont = [x(1:idx_limite-1), x_lim];
        y_cont = [y(1:idx_limite-1), limite_maximo];
        plot(x_cont, y_cont, '-', ...
            'LineWidth', 2, ...
            'Color', cor, ...
            'Marker', 'o', ...
            'DisplayName', nome_legenda);
        x_pont = [x_lim, x(idx_limite:end)];
        y_pont = [limite_maximo, y(idx_limite:end)];
        plot(x_pont, y_pont, '--', ...
            'LineWidth', 2, ...
            'Color', cor, ...
            'Marker', 'o', ...
            'HandleVisibility', 'off');
    end
end
function marcar_limite_no_grafico( ...
    x, ...
    Yplot_original, ...
    limite_maximo, ...
    DOD_var, ...
    texto_ok)

```

```

hold on;
houve_limitacao = false;
for i = 1:length(DOD_var)
    y = Yplot_original(i,:);
    idx_limite = find(y >= limite_maximo, 1, 'first');
    if ~isempty(idx_limite)
        houve_limitacao = true;
        if idx_limite == 1
            x_lim = x(1);
            y_lim = limite_maximo;
        else
            x1 = x(idx_limite-1);
            x2 = x(idx_limite);
            y1 = y(idx_limite-1);
            y2 = y(idx_limite);
            x_lim = x1 + ...
                (limite_maximo - y1) * ...
                (x2 - x1) / ...
                (y2 - y1);
            y_lim = limite_maximo;
        end
        plot(x_lim, y_lim, ...
            'rx', ...
            'MarkerSize', 10, ...
            'LineWidth', 2, ...
            'HandleVisibility', 'off');
        offset_y = limite_maximo * 0.03;
        text(x_lim + 0.05, ...
            y_lim + offset_y, ...
            sprintf('Limite DOD = %.1f', DOD_var(i)), ...
            'FontSize', 9, ...
            'Color', 'r');
    end
end
if ~houve_limitacao
    xl = xlim;
    yl = ylim;
    text(mean(xl), ...
        yl(2)*0.90, ...
        texto_ok, ...
        'HorizontalAlignment', 'center', ...
        'FontSize', 10, ...
        'FontWeight', 'bold', ...
        'Color', [0 0.5 0]);
end
end
end

```