

UNIJUÍ - UNIVERSIDADE REGIONAL DO NOROESTE  
DO ESTADO DO RIO GRANDE DO SUL  
CURSO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

CAMILA DE SOUZA

ESTUDO DE CASO: GERENCIAMENTO DE FLUXO DE POTÊNCIA EM USINAS  
FOTOVOLTAICAS CONSIDERANDO O ARMAZENAMENTO DE ENERGIA  
UTILIZANDO BATERIAS

IJUÍ - RS  
2023

CAMILA DE SOUZA

ESTUDO DE CASO: GERENCIAMENTO DE FLUXO DE POTÊNCIA EM USINAS  
FOTOVOLTAICAS CONSIDERANDO O ARMAZENAMENTO DE ENERGIA  
UTILIZANDO BATERIAS

Trabalho de Conclusão de Curso de Engenharia Elétrica - apresentado como requisito parcial para obtenção do título de Engenheira Eletricista na Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul - Unijuí.

Orientador: Prof. Dr. Maurício de Campos

IJUÍ - RS

2023

CAMILA DE SOUZA

ESTUDO DE CASO: GERENCIAMENTO DE FLUXO DE POTÊNCIA EM USINAS  
FOTOVOLTAICAS CONSIDERANDO O ARMAZENAMENTO DE ENERGIA  
UTILIZANDO BATERIAS

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi julgado adequado para a obtenção do título de Engenheira Eletricista, concedido pela Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul - UNIJUÍ e aprovado em sua forma final pelo professor orientador e pelo membro da banca examinadora.

Ijuí, 30 de Junho de 2023

Prof. Dr. Maurício de Campos

Doutor pela Universidade Federal de Campina Grande - Orientador

Prof. Me. Eliseu Kotlinski

Coordenador do Curso de Engenharia Elétrica - UNIJUÍ

**BANCA EXAMINADORA**

Prof. Me. Eliseu Kotlinski

Mestre pela UNIJUÍ - Examinador

## AGRADECIMENTOS

Aos meus pais Soely e Edegar que nunca mediram esforços para que eu tivesse a oportunidade de estudar e seguir na profissão que escolhi, obrigada por todo o apoio, incentivo e amor.

Aos meus irmãos Mariza e Evandro, que sempre me incentivaram e acreditaram que eu conseguiria, amo vocês!

Ao meu companheiro de vida, João Ricardo, meu melhor amigo e amor, quero expressar minha gratidão pela paciência, apoio e incentivo constantes, obrigada por permanecer ao meu lado e me ajudar a superar os momentos de dificuldade.

Ao meu avô, João Florisnal, meu vovô Flor (*in memoriam*) que não está mais aqui fisicamente, mas quando lhe contei a quase 8 anos atrás a profissão que escolhi, sorriu e se alegrou pela minha escolha. Você está nos meus pensamentos todos os dias, e é um dos motivos pelos quais nunca desisti.

Ao Professor Maurício de Campos, expressei minha gratidão pela confiança e incentivo ao longo do desenvolvimento deste trabalho. Sua orientação e apoio foram fundamentais para meu crescimento acadêmico e profissional.

Ao professor João Manoel Lenz pela paciência ao longo dos últimos semestres, durante o PTCC e o Estágio e agora no TCC também, obrigada pelo apoio e ajuda, e pela disposição de me auxiliar em todas as etapas até aqui.

Ao professor Eliseu Kotlinski, pela sua paciência e compreensão nessa reta final, e pela sua dedicação ao curso e aos seus alunos.

A todos os demais professores e professoras que passaram pelo meu caminho ao longo destes seis anos e meio e que me trouxeram até aqui, obrigada pelo conhecimento compartilhado, pela paciência, meu mais sincero respeito e admiração por todos os excelentes profissionais com quem tive a honra de aprender e crescer como pessoa e como profissional.

A Deus, por me sustentar até aqui.

*"Deixem que o futuro diga a verdade e avalie cada um de acordo com o seu trabalho e realizações. O presente pertence a eles, mas o futuro pelo qual eu sempre trabalhei pertence a mim."*

***Nikola Tesla***

## RESUMO

SOUZA, C., **Estudo de Caso: Gerenciamento de fluxo de potência em usinas fotovoltaicas considerando o armazenamento de energia utilizando baterias** Trabalho de Conclusão de Curso. Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul - UNIJUÍ, Ijuí-RS, 2023.

Nos últimos anos, devido ao crescente aumento da demanda de energia elétrica no mundo todo, vem surgindo a necessidade de desenvolver estudos e novas tecnologias visando aumentar a capacidade de produção de energia elétrica. Neste contexto é necessário agregar qualidade, disponibilidade e confiabilidade ao sistema de fornecimento. Historicamente, os sistemas de geração, transmissão e distribuição de energia elétrica foram estruturados para operar produzindo grandes quantidades para atender a demanda de forma instantânea, transportando a energia diretamente para os centros de carga e, por fim, mensurar o fluxo de potência para determinar o consumo. Recentemente, tem sido possível observar uma mudança nesta estrutura, principalmente devido a questões ambientais e econômicas, visto que a dependência por energia elétrica aumentou de forma significativa no mundo todo. Isso ocasionou uma procura pela inserção de formas de geração de energia através dos recursos renováveis, como por exemplo, painéis fotovoltaicos e turbinas eólicas. Neste cenário, observa-se algumas questões adversas visto que a geração deste tipo de fonte depende da disponibilidade dos recursos renováveis, e a falta de integração dos sistemas de energias renováveis com os sistemas tradicionais. O uso de Sistemas de Armazenamento de Energia (SAEs) podem servir como forma de estabilizar a matriz energética quando combinados com recursos renováveis. Os SAEs têm a capacidade de agregar à energia elétrica maior disponibilidade, qualidade e confiabilidade. Tecnologias para armazenamento de energia elétrica, como acumuladores baseados em reações químicas reversíveis, baterias de cobre e zinco ou acumuladores de chumbo-ácido, foram desenvolvidos antes das máquinas geradoras rotativas, porém eram equipamentos pesados, que exigiam manutenção periódica, apresentavam baixa densidade de armazenamento e restrições ao descarte, por conter metais pesados. Atualmente já é possível construir baterias e acumuladores de alta confiabilidade, alta disponibilidade, alta densidade de energia e que possuem capacidade de realizar milhares de ciclos de carga/descarga através do desenvolvimento dessas tecnologias por preços mais acessíveis.

**Palavras-chave:** SAEs, baterias, demanda, energia solar fotovoltaica.

## ABSTRACT

SOUZA, C., **Estudo de Caso: Gerenciamento de fluxo de potência em usinas fotovoltaicas considerando o armazenamento de energia utilizando baterias** Trabalho de Conclusão de Curso. Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul - UNIJUÍ, Ijuí-RS, 2023.

In recent years, due to the increasing demand for electricity worldwide, there has been a need to develop studies and new technologies to increase the capacity to produce electricity. In this context, it is necessary to add quality, availability and reliability to the supply system. Historically, electricity generation, transmission and distribution systems were structured to operate by producing large quantities to meet demand instantly, transporting energy directly to load centers and, finally, measuring the power flow to determine the consumption. Recently, it has been possible to observe a change in this structure, mainly due to environmental and economic issues, since the dependence on electricity has increased significantly worldwide. This led to a demand for forms of energy generation through renewable resources, such as photovoltaic panels and wind turbines. In this scenario, there are some adverse issues since the generation of this type of source depends on the availability of renewable resources, and the lack of integration of renewable energy systems with traditional systems. The use of Energy Storage Systems SAEs can serve as a way to stabilize the energy matrix when combined with renewable resources. SAEs have the ability to add greater availability, quality and reliability to electricity. Technologies for storing electrical energy, such as accumulators based on reversible chemical reactions, copper and zinc batteries or lead-acid accumulators, were developed before rotary generating machines, but they were heavy equipment that required periodic maintenance, had low storage density and restrictions on disposal, as it contains heavy metals. Currently, it is already possible to build batteries and accumulators with high reliability, high availability, high energy density and that have the capacity to carry out thousands of charge/discharge cycles through the development of these technologies at more accessible prices.

**Keywords:** Energy storage systems, batteries, demand, photovoltaic solar energy.

## ABREVIATURAS E SIGLAS

<b>ABAQUE</b>	Associação Brasileira de Armazenamento e Qualidade de Energia
<b>ABSOLAR</b>	Associação Brasileira de Energia Solar Fotovoltaica
<b>ANEEL</b>	Agência Nacional de Energia Elétrica
<b>APE</b>	Autoprodução de Energia
<b>CA</b>	Corrente Alternada
<b>CC</b>	Corrente Contínua
<b>CPFL</b>	Companhia Paulista de Força e Luz
<b>DEMEI</b>	Departamento Municipal de Energia de Ijuí
<b>DHT</b>	Distorção Harmônica Total
<b>EPE</b>	Empresa de Pesquisa Energética
<b>EMS</b>	<i>Energy Management Systems</i> - Sistema de Gerenciamento de Energia
<b>ESS</b>	<i>Energy Storage System</i>
<b>FP</b>	Horário Fora Ponta
<b>FV</b>	Fotovoltaica
<b>GD</b>	Geração Distribuída
<b>GEE</b>	Gases do Efeito Estufa
<b>HP</b>	Horário de Ponta
<b>MMGD</b>	Micro e Minigeração Distribuída
<b>MPPT</b>	<i>Maximum Power Point Tracking</i>
<b>ONS</b>	Operador Nacional do Sistema Elétrico
<b>ONU</b>	Organização das Nações Unidas
<b>PDE</b>	Plano Decenal de Expansão de Energia
<b>PEE</b>	Programa de Eficiência Energética



<b>PV</b>	Produção Fotovoltaica
<b>REN</b>	Resolução Normativa
<b>SAE</b>	Sistema de Armazenamento de Energia
<b>SAEs</b>	Sistemas de Armazenamento de Energia
<b>SEP</b>	Sistema Elétrico de Potência
<b>SOC</b>	<i>State of Charge</i> - Estado de Carregamento
<b>UC</b>	Unidade Consumidora
<b>UCP</b>	Unidade de Condicionamento de Potência

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO</b> . . . . .	<b>13</b>
1.1. Objetivos do Trabalho . . . . .	14
<b>1.1.1. Objetivos Específicos</b> . . . . .	<b>14</b>
1.2. Descrição do Problema . . . . .	14
1.3. Justificativa . . . . .	15
1.4. Estrutura do Trabalho . . . . .	17
<b>2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> . . . . .	<b>17</b>
2.1. Considerações iniciais . . . . .	18
2.2. Potencial de Geração de Energia Solar no Brasil. . . . .	18
2.3. Bandeiras Tarifárias . . . . .	23
2.4. Postos Tarifários . . . . .	25
2.5. Tarifa Horosazonal . . . . .	25
2.6. Geração Centralizada. . . . .	26
2.7. Geração Distribuída . . . . .	27
2.8. Impacto Socioambiental. . . . .	30
2.9. Sistemas de Armazenamento de Energia . . . . .	31
<b>2.9.1. Tipos de sistemas de armazenamento</b> . . . . .	<b>33</b>
<b>2.9.2. Baterias</b> . . . . .	<b>42</b>
2.10. Sistema Fotovoltaico <i>On-Grid</i> . . . . .	44
<b>2.10.1. Radiação Solar</b> . . . . .	<b>46</b>
<b>2.10.2. Módulo Fotovoltaico</b> . . . . .	<b>47</b>
<b>2.10.3. Inversor Fotovoltaico</b> . . . . .	<b>49</b>
2.11. Resumo do Capítulo . . . . .	50
<b>3. MATERIAIS E MÉTODOS</b> . . . . .	<b>51</b>
3.1. Considerações iniciais . . . . .	52
3.2. Formulação do problema . . . . .	52
3.3. Arquitetura proposta . . . . .	52
3.4. Modelo de Um diodo da célula fotovoltaica . . . . .	54
3.5. Modelo da Bateria Elétrica . . . . .	56
<b>3.5.1. Modelo Battery</b> . . . . .	<b>57</b>
<b>3.5.2. Modelo PQ</b> . . . . .	<b>62</b>
3.6. Demanda Residencial . . . . .	63

3.7. Geração Fotovoltaica . . . . .	65
3.8. Bateria Estacionária . . . . .	66
3.9. Sistema de Gerenciamento de Energia . . . . .	67
<b>3.9.1. EMS Controlado. . . . .</b>	<b>68</b>
3.10. Resumo do Capítulo . . . . .	70
<b>4. RESULTADOS . . . . .</b>	<b>71</b>
4.1. Considerações iniciais . . . . .	72
4.2. Definição dos cenários de simulação . . . . .	75
<b>4.2.1. Cenário 0 - Análise da situação atual da residência. . . . .</b>	<b>75</b>
<b>4.2.2. Cenário 1 - Inclusão do SAE no sistema . . . . .</b>	<b>77</b>
<b>4.2.3. Cenário 2 - Inclusão do SAE no sistema + Geração PV . . . . .</b>	<b>78</b>
4.3. Resumo do Capítulo . . . . .	80
<b>5. CONCLUSÃO . . . . .</b>	<b>81</b>
5.1. Trabalhos Futuros . . . . .	82
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS . . . . .</b>	<b>84</b>

## Lista de Figuras

1	Capacidade Instalada de Geração por fonte . . . . .	19
2	Evolução da capacidade instalada total por fonte . . . . .	20
3	Ranking Estadual de Geração Distribuída . . . . .	22
4	Potência Instalada e Status das Usinas Solares . . . . .	23
5	Conceito de Geração Centralizada . . . . .	27
6	Conceito de Geração Distribuída . . . . .	28
7	Dados Geração Distribuída no Brasil . . . . .	29
8	Geração Distribuída no Brasil por Classe de Consumo . . . . .	30
9	Tecnologias de Armazenamento de Energia . . . . .	33
10	Sistemas Químicos de Armazenamento de Energia . . . . .	34
11	Diagrama da eletroquímica de uma bateria de íons de lítio . . . . .	35
12	Componentes de uma bateria de chumbo ácido . . . . .	36
13	Diagrama de operação de carga e descarga da bateria de Níquel Cádmio . . . . .	37
14	Esquema de uma bateria de fluxo . . . . .	38
15	Diagrama de uma bateria de Vanádio . . . . .	39
16	Diagrama esquemático de um SAE com hidrogênio . . . . .	41
17	Diagrama de um Singás . . . . .	42
18	Processo de Oxirredução da Bateria . . . . .	43
19	Funcionamento do Medidor Bidirecional em um Sistema On Grid . . . . .	44
20	Sistema On-Grid . . . . .	45
21	Radiação Solar . . . . .	46
22	Módulo Fotovoltaico . . . . .	47
23	Ligação Módulos em Série . . . . .	48
24	Ligação Módulos em Paralelo . . . . .	48
25	Topologia básica de um inversor fotovoltaico . . . . .	49
26	Diagrama de blocos da metodologia proposta . . . . .	53
27	Circuito equivalente do modelo de um diodo . . . . .	54
28	(a) Associação série. (b) Associação Paralelo. . . . .	56
29	Modelo Battery . . . . .	57
30	Diagrama de blocos do modelo Battery . . . . .	58
31	Curva característica de descarga da bateria . . . . .	59
32	Tempo de resposta da bateria . . . . .	61

33	Bloco <i>three-phase-load</i> . . . . .	63
34	Demanda por fase da residência . . . . .	64
35	Formas de Onda por fase da residência . . . . .	64
36	Irradiação média diária em Ijuí - RS . . . . .	66
37	EMS Controlado: definição de parâmetros . . . . .	69
38	EMS Controlado: Fluxograma . . . . .	70
39	Modelo completo desenvolvido em <i>Matlab/Simulink</i> . . . . .	73
40	Padrões de Tensão Departamento Municipal de Energia de Ijuí (DEMEI) . . . . .	74
41	Modelo para geração da demanda da Unidade Consumidora (UC) . . . . .	74
42	Modelo de um diodo para temperatura e irradiação . . . . .	74
43	Modelo da bateria . . . . .	75
44	Potência Demandada (kW) entre os dias 28/02/23 e 06/03/23. . . . .	76
45	Potência Demandada (kW) no dia 28/02/23. . . . .	76
46	Resultado do cenário 1: dia 28/02/23. . . . .	77
47	Resultado do cenário 1: SOC(%) da Bateria. . . . .	78
48	Resultado do cenário 2: Geração Fotovoltaica. . . . .	79
49	Resultado do cenário 2: dia 28/02/23. . . . .	79
50	Resultado do cenário 2: SOC(%) da Bateria . . . . .	80

## 1. INTRODUÇÃO

A demanda por energia elétrica tem aumentado significativamente em todo o mundo, impulsionando a necessidade de desenvolver novas tecnologias para aumentar a capacidade de produção e melhorar a qualidade, disponibilidade e confiabilidade do fornecimento. Em resposta às questões ambientais e econômicas, surgem formas de geração de energia renovável, como painéis fotovoltaicos e turbinas eólicas.

No entanto, essas fontes de energia dependem da disponibilidade de recursos renováveis e a falta de integração com os sistemas tradicionais representa um desafio. A utilização de SAEs pode ajudar a estabilizar a matriz energética quando combinados com recursos renováveis, agregando maior disponibilidade, qualidade e confiabilidade à energia elétrica. O desenvolvimento de tecnologias para armazenamento de energia elétrica, como baterias e acumuladores de alta confiabilidade, disponibilidade e densidade de energia, tornou possível a sua utilização por preços mais acessíveis.

Em meados da década de 80, na Comissão Mundial sobre o Meio Ambiente e Desenvolvimento da Organização das Nações Unidas (ONU), o termo “desenvolvimento sustentável” foi usado pela primeira vez, o qual significa “suprir as necessidades do presente sem afetar a habilidade das gerações futuras de suprirem as próprias necessidades” (BRUNDTLAND, 1987). Desta data em diante, conciliar o crescimento econômico com a preservação ambiental passou a ser de extrema importância.

Uma das questões fundamentais para o desenvolvimento sustentável está na inovação e aprimoramento de tecnologias de conversão e aproveitamento de recursos energéticos naturais, principalmente energia elétrica, que é essencial para garantir o crescimento econômico e o desenvolvimento de um país (PEREIRA et al., 2017).

Para reduzir as emissões de Gases do Efeito Estufa (GEE) e minimizar os impactos ambientais negativos, tais como o aquecimento global, a extinção de espécies e danos aos ecossistemas, os países estabelecem metas de descarbonização das matrizes energética e elétrica, através da utilização de fontes renováveis de energia.

A fim de aumentar a eficiência das fontes de energia renováveis e das redes elétricas, tem sido cada vez mais frequente o uso dos SAEs, para que o excedente de geração possa ser usado posteriormente em momentos os quais ocorrem picos de demanda de energia, otimizando o funcionamento destas usinas e contribuindo para evitar sobrecargas no sistema elétrico de potência, nos períodos de demanda superior ao convencional.

Diante desse contexto, o projeto propõe estudar o gerenciamento de fluxo de potência em

usinas fotovoltaicas com armazenamento de energia, respondendo questões sobre o momento mais adequado para injetar e vender energia na rede, viabilidade financeira, relação custo-benefício e análise e gerenciamento do fluxo de potência elétrica em sistemas com Sistema de Armazenamento de Energia (SAE).

Com a aplicação de SAE em redes de distribuição, o consumidor passa a ter a opção de ser um usuário ativo, podendo demandar ou injetar potência na rede, tornando-se um desafio para as concessionárias.

Baseado nessas questões, este trabalho visa entender o funcionamento destes sistemas e sua aplicabilidade, bem como analisar as variáveis envolvidas neste processo.

## 1.1. OBJETIVOS DO TRABALHO

### 1.1.1. Objetivos Específicos

- Compreender aspectos gerais da atual situação do sistema de armazenamento de energia elétrica no Brasil, e verificar quais são os desafios para sua difusão e implementação no país;
- Revisar o estado da arte de tecnologias de sistemas de armazenamento de energia, possibilitando a obtenção de novas informações sobre os serviços ofertados por tais tecnologias;
- Simular no *Matlab/Simulink* uma curva de demanda residencial associada a geração fotovoltaica e SAE.
- Identificar quais estratégias de armazenamento de energia elétrica são particularmente interessantes para adoção considerando a demanda;

## 1.2. DESCRIÇÃO DO PROBLEMA

O projeto traz a problemática a respeito da crescente demanda por energia elétrica, visando analisar formas viáveis na solução deste desafio, propõe-se o estudo de caso onde será analisado o armazenamento de energia elétrica através do uso de baterias de lítio em uma residência com alta curva de demanda, combinado com a geração de energia solar fotovoltaica. Essa abordagem integrada busca otimizar o consumo, reduzir custos e aumentar a eficiência energética, promovendo a sustentabilidade e a independência em relação à rede convencional de distribuição de eletricidade.

### 1.3. JUSTIFICATIVA

A aplicação de SAE em redes de distribuição é um tema recente já que o consumidor, que antes era considerado um usuário passivo do sistema, passa a ter a opção de escolher ser um usuário ativo, tendo como alternativa em determinado momento demandar potência da rede, noutra injetar potência na rede, de maneira não controlada pela concessionária.

No Brasil, encontra-se vigente a Resolução Normativa (REN) nº 482 de 2012, onde foi criado o Sistema de Compensação de Energia Elétrica, o qual é um mecanismo que permite que a energia excedente gerada por uma unidade consumidora com micro ou minigeração seja injetada na rede da distribuidora e posteriormente utilizada para abater o seu consumo mensal (Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL, 2018).

Para exemplificar o crescimento de instalações de Micro e Minigeração Distribuída (MMGD), a potência instalada neste quesito no Brasil estava no patamar de 0,4MW antes de 2012. Em julho de 2019, o Brasil alcançou o marco histórico de 1 GW, ou seja, 2.500 vezes o existente antes da regulamentação (Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL, 2019).

Em agosto de 2021 a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) liberou 795,98 MW em usinas para operação comercial, o maior quantitativo em 2021. A energia solar fotovoltaica chegou a 2,1% da potência instalada no país (Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL, 2021).

De acordo com a Associação Brasileira de Armazenamento e Qualidade de Energia (ABAQUE), a aplicação de SAEs pode ser classificada em 4 grandes grupos (BUENO; BRANDÃO, 2013):

- **Deslocamento da energia no tempo:** conhecido também como arbitragem, é uma forma para obter vantagem na diferença entre os preços da energia elétrica nos horários de ponta e fora de ponta, onde compra-se (e armazena-se) energia no Horário Fora Ponta (FP) para utilização no Horário de Ponta (HP).
- **Capacidade adicional de fornecimento:** quando uma carga demanda uma potência elevada por um período curto, um SAE pode ser utilizado para suprir a energia adicional durante este intervalo, evitando a ampliação ou o reforço do sistema elétrico de suprimento ou até mesmo a contratação de energia adicional. Este item inclui outro aspecto, o de Transmissão e Distribuição, os quais as ações visam postergar investimentos em ampliações do sistema elétrico, buscando manter a confiabilidade enquanto garante o atendimento ao crescimento das novas cargas e integração das fontes renováveis na rede.
- **Integração de fontes renováveis:** boa parte dos sistemas de geração distribuída apresen-



tam intermitências inerentes a fonte primária, como por exemplo momentos sem vento no caso da geração eólica, e sem sol no caso da geração de energia solar. Neste caso um SAE pode prover a “suavização” da curva de geração, resultando no aumento da capacidade de geração, redução da variabilidade associada a fonte renovável, ajuste no fornecimento de energia conforme condições sazonais, reserva de geração, e alterações no horário de fornecimento da energia gerada de forma a prover recursos para aumento da capacidade de integração de fontes renováveis na rede.

- **Prestação de serviços ancilares:** Há uma série de serviços de suporte ao Sistema Elétrico de Potência (SEP) em que os SAEs podem ser utilizados para aumentar a estabilidade da rede, a capacidade de suprimento e a confiabilidade, provendo suporte, regulação, controle de tensão e reservas girantes e não girantes de energia, suporte para capacidade de restauração autônoma e suprimento de perdas.

Além dos itens apontados anteriormente, ainda é necessário considerar ações que visem atender as demandas e necessidades dos consumidores, garantindo ações que buscam qualidade de energia e confiabilidade em momentos de interrupções no fornecimento, assim como o gerenciamento de energia, buscando benefícios como redução na fatura junto a concessionária.

Cada uma das categorias citadas acima, demandam requisitos específicos dos SAEs, mediante isto fica claro que a aplicação pode e deve ser diferenciada de acordo com o seu propósito, como por exemplo, avaliando requisitos de potência, energia ou capacidade.

No Brasil, atualmente se tem um perfil de consumo caracterizado pelo horário de maior consumo das 18 às 21 horas no período chamado de horário de ponta (CPFL-Energia, 2021).

Hoje o índice de inserção de sistemas de geração de energia fotovoltaica nas redes de distribuição tem apresentado benefícios aos consumidores e concessionárias de energia elétrica, no entanto, o potencial gerado pelos sistemas fotovoltaicos *on-grid* é limitado devido a disponibilidade e variação na geração de energia solar, pois os horários de ponta do sistema não coincidem com a geração máxima dos sistemas solares.

Atualmente, ainda enfrentamos diversos desafios para a implementação dos SAEs, especialmente no que diz respeito ao seu uso em sistemas de energia solar fotovoltaica. Até o momento, não existem soluções consolidadas para o emprego dos SAEs nesse contexto. Segundo Copetti e Macagnan (2007), quando os SAEs são integrados aos sistemas solares fotovoltaicos, eles comprometem a confiabilidade dos projetos, pois são responsáveis pela maior parte das falhas observadas nesse tipo de sistema. No entanto, a situação está gradualmente melhorando devido ao surgimento de baterias com menor suscetibilidade a falhas. Isso tem contribuído para a redução progressiva desse problema.

#### 1.4. ESTRUTURA DO TRABALHO

Este trabalho está organizado em 5 capítulos. O capítulo 1 se dedica a introdução do tema, os objetivos e as justificativas para elaboração deste trabalho.

O capítulo 2 aborda assuntos derivados e relacionados a geração de energia fotovoltaica e os sistemas de armazenamento de energia. Sua definição é apresentada e discutida, bem como seus benefícios e delimitações.

O capítulo 3 aborda as ferramentas e os métodos utilizados para as análises realizadas. Os resultados obtidos aplicando a metodologia proposta são apresentados no capítulo 4. O capítulo 5 descreve as conclusões obtidas com o trabalho.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Este capítulo apresenta a revisão bibliográfica utilizada como base para o desenvolvimento deste trabalho. São abordados o potencial da geração de energia solar no país, bandeiras tarifárias, entre outros, enfocando a gestão do consumo de energia elétrica. Além disso, são apresentados dois modelos de geração de energia: a Geração Centralizada, tradicional, e a Geração Distribuída, mais sustentável.

Destaca-se também o impacto socioambiental da geração de energia, ressaltando a importância de considerar não apenas os aspectos econômicos, mas também os efeitos na sociedade e no meio ambiente. Posteriormente, são explorados os Sistemas de Armazenamento de Energia, com ênfase nas baterias. Por fim, dentro do contexto dos sistemas fotovoltaicos, são abordados os Sistemas Fotovoltaicos *On-Grid*.

### 2.2. POTENCIAL DE GERAÇÃO DE ENERGIA SOLAR NO BRASIL

O sistema elétrico brasileiro é o maior e mais robusto da América Latina, destacando-se pela sua extensa infraestrutura e capacidade de atendimento energético em larga escala. Atualmente o Brasil mantém a oitava posição entre os maiores consumidores de eletricidade do mundo.

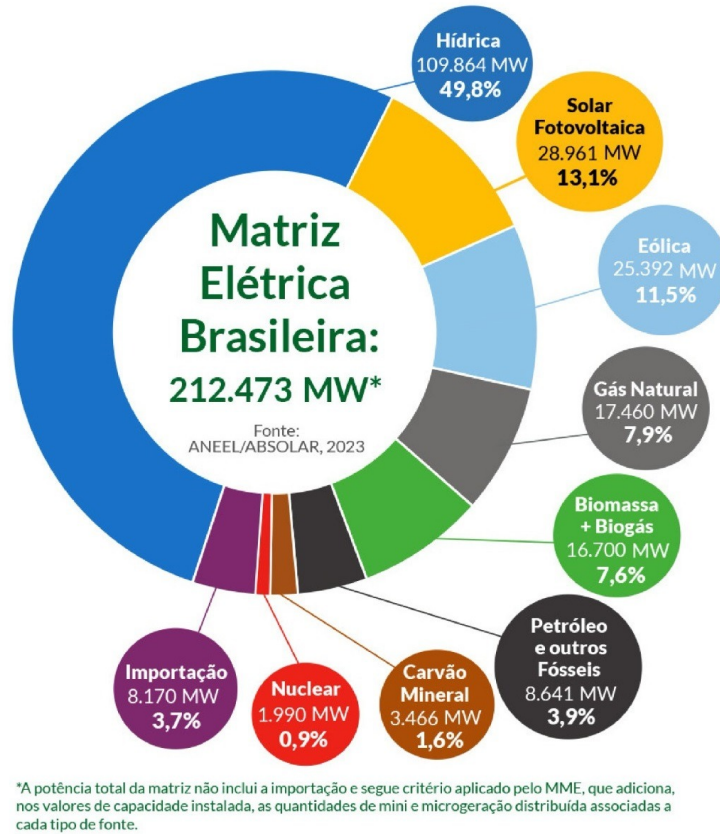
Em agosto de 2021, a capacidade instalada de geração no Brasil totalizava aproximadamente 179,246 MW, dos quais 2% eram referentes a geração fotovoltaica centralizada. A matriz elétrica neste período mantinha-se dominada por grandes usinas hidrelétricas, responsáveis por 584% da capacidade instalada de geração.

A energia eólica também tem crescido significativamente nos últimos anos, correspondendo a 10,4% da capacidade instalada total em 2021. A energia produzida a partir de biomassa também mantém uma participação significativa, com cerca de 8,3% da capacidade total instalada (ABSOLAR, 2021).

Com o passar dos anos, o setor energético vem passando por mudanças significativas, e em 2023 já é possível visualizar uma transformação notável nos números. Em comparação com os dados de 2021, houve um incremento de energia significativo na matriz elétrica brasileira de cerca de 15,64% no valor total, sendo que só a geração de energia solar fotovoltaica cresceu cerca de 15,27% em relação ao ano de 2021.

A Figura 1 ilustra a projeção atual para o setor energético em 2023, possibilitando uma melhor compreensão do cenário atual.

Figura 1: Capacidade Instalada de Geração por fonte



Fonte: Adaptado de (ABSOLAR, 2023).

Essa mudança já era esperada em virtude de diversas iniciativas que têm sido implementadas para aumentar a participação de fontes renováveis na matriz elétrica brasileira, visando a sustentabilidade ambiental e a segurança energética do país. Além disso, a crescente demanda por energia e a busca por soluções mais eficientes e econômicas também impulsionam essa mudança.

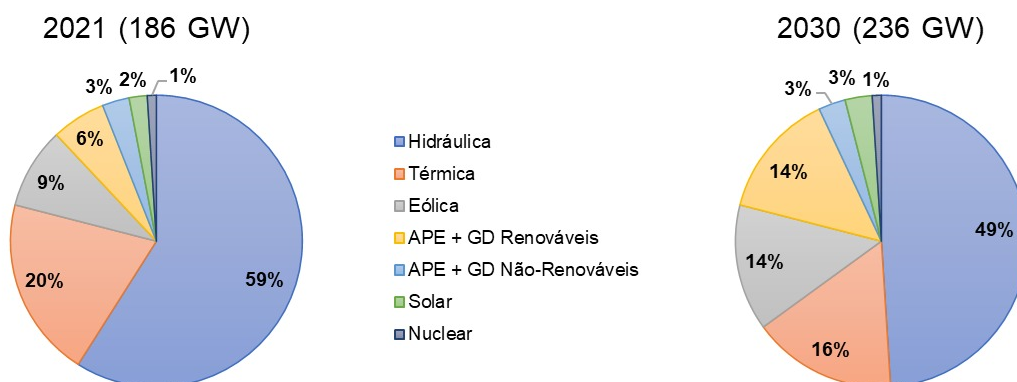
Em relação à matriz energética, o Brasil tem buscado cada vez mais a diversificação de suas fontes, principalmente com o incentivo à expansão da energia solar e eólica, além de investimentos em tecnologias de armazenamento de energia e redes inteligentes. A expectativa é que a participação das fontes renováveis na geração de energia elétrica continue crescendo nos próximos anos, fortalecendo a posição do país como líder em energias limpas na América Latina ONS (2021).

Conforme estabelecido no Plano Decenal de Expansão de Energia (PDE) 2030, elaborado pela EPE (2021), prevê-se um crescimento anual de 3,1% no consumo total de eletricidade entre 2019 e 2030. Considerando o cenário mais otimista, estima-se que esse consumo possa alcançar

762 TWh em 2030, considerando condições favoráveis de desenvolvimento econômico.

Com isso, estima-se um crescimento da capacidade instalada de cerca de 21,19% de 2021 até 2030, segundo a EPE (2021) para atender este crescimento no consumo, conforme pode ser visto na Figura 2:

Figura 2: Evolução da capacidade instalada total por fonte



Fonte: Adaptado de (EPE, 2021).

Além disso, a Figura 2 demonstra também a progressiva diversificação da matriz elétrica brasileira ao longo dos anos, caracterizada pela diminuição da participação percentual da energia hidrelétrica em decorrência do crescimento das fontes renováveis, principalmente eólica e solar. Ressaltando também o aumento da Autoprodução de Energia (APE) e da Geração Distribuída (GD), contribuindo para a redução dos impactos ambientais negativos causados pela geração de energia elétrica no Brasil e tornando a matriz elétrica mais sustentável.

A Geração Distribuída no Brasil foi regulamentada no ano de 2012, ano em que foi publicada a REN nº 482 pela ANEEL, a qual estabeleceu regras para o acesso da MMGD aos sistemas de distribuição de energia elétrica. Visando ampliar o acesso à Geração Distribuída para um número maior de unidades consumidoras, a REN nº 482 foi revisada e alterada para a REN nº 687 (Ministério de Minas e Energia, 2016).

Nesta revisão foi atualizada a definição de MMGD, classificando como microgeração toda central geradora de energia elétrica com potência instalada menor ou igual a 75 kW, que utilize cogeração qualificada ou fontes renováveis de energia elétrica e que são conectadas a rede de distribuição por meio de instalações de unidades consumidoras e como minigeração distribuída toda central geradora de energia elétrica com potência superior a 75kW e menor ou igual a 5 MW e que também faça uso de cogeração qualificada ou fontes renováveis de energia elétrica (Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL, 2015).

No mês de janeiro de 2022, foi publicada a Lei nº 14.300 a qual criou o Marco Legal da MMGD. De acordo com os Estudos do PDE 2032 desenvolvidos pela EPE (2022) foram

definidas algumas alterações em relação as normativas anteriores, dentre elas destacam-se:

- Alterado o limite de mini GD FV de 5 MW para 3 MW;
- Ficou estabelecido o conceito de fontes despacháveis: hidro, biomassa, cogeração e Fotovoltaica (FV) + baterias;
- Foi permitido sistemas com baterias e sistemas híbridos (com previsão de regulamentação futura);
- Diminuído a cobrança do custo de disponibilidade;
- Incluso novas formas de associação civil permitidas na geração compartilhada;
- Criado Programa de Energia Renovável Social, que prevê contratação de MMGD com recursos do Programa de Eficiência Energética (PEE) para atender consumidores de baixa renda.

Nos últimos anos, o setor de energia solar fotovoltaica no Brasil tem apresentado uma significativa evolução, o que tem contribuído para a superação dos desafios ainda existentes na geração de energia solar. Dentre esses desafios, podemos citar a necessidade de incentivos governamentais, a melhoria da infraestrutura energética, a redução dos custos e a disseminação do conhecimento sobre a tecnologia.

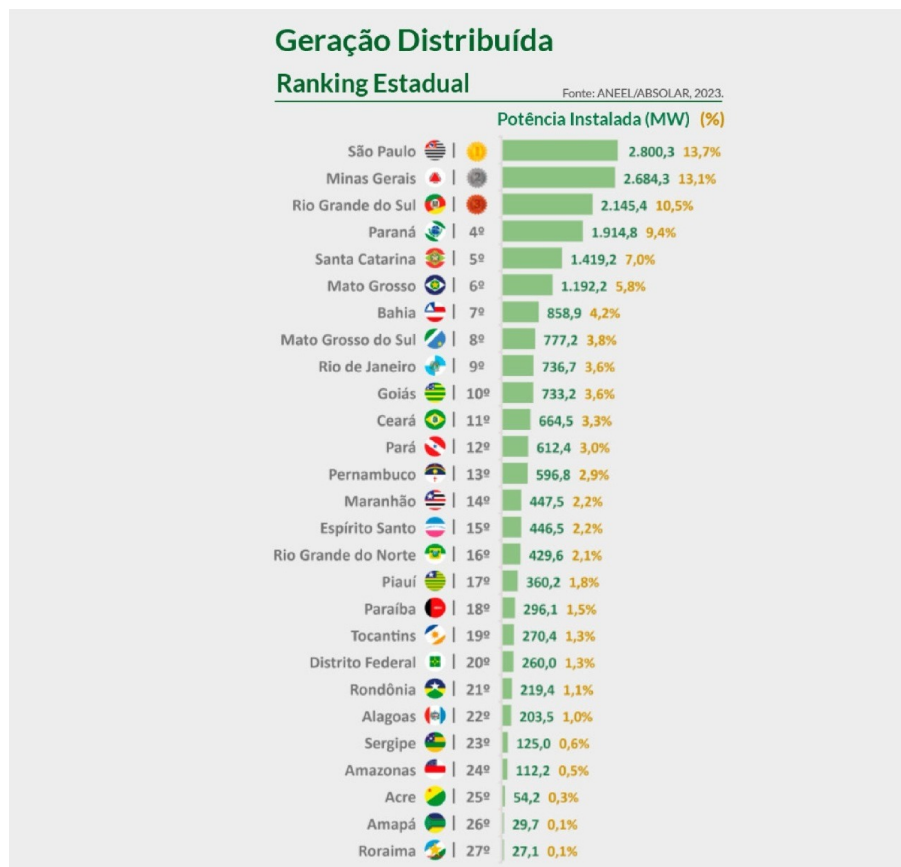
No entanto, apesar dos avanços, ainda há muito a ser feito para a expansão do setor, especialmente em relação à ampliação do acesso a tecnologia solar fotovoltaica para toda a população brasileira e a sua integração de forma eficiente à rede elétrica nacional. Um dos objetivos fundamentais é ampliar o acesso à tecnologia solar fotovoltaica para toda a população brasileira, incluindo áreas rurais e comunidades de baixa renda. Isso envolve o desenvolvimento de políticas e programas que facilitem a instalação de sistemas solares em residências, empresas e instituições, incentivando a transição para uma matriz energética mais limpa e sustentável.

Além disso, é essencial garantir uma integração eficiente dos sistemas fotovoltaicos à rede elétrica nacional, possibilitando a troca de energia entre os consumidores e as concessionárias. Para isso, é necessário fortalecer a infraestrutura elétrica, implementar regulamentações adequadas e incentivar soluções tecnológicas avançadas, como sistemas de armazenamento de energia, para lidar com a intermitência da geração solar.

Na Figura 3, é possível observar que o estado de São Paulo destaca-se no cenário nacional, detendo atualmente 13,7% de todo o percentual de potência de energia solar instalada no país. Em seguida, temos Minas Gerais com 13,1% e o Rio Grande do Sul com 10,5%, evidenciando a relevância desses estados na adoção e implantação de sistemas solares fotovoltaicos.

Esses números demonstram o crescente interesse e o avanço da geração distribuída de energia solar, impulsionada por políticas de incentivo e conscientização sobre a importância das fontes renováveis.

Figura 3: Ranking Estadual de Geração Distribuída

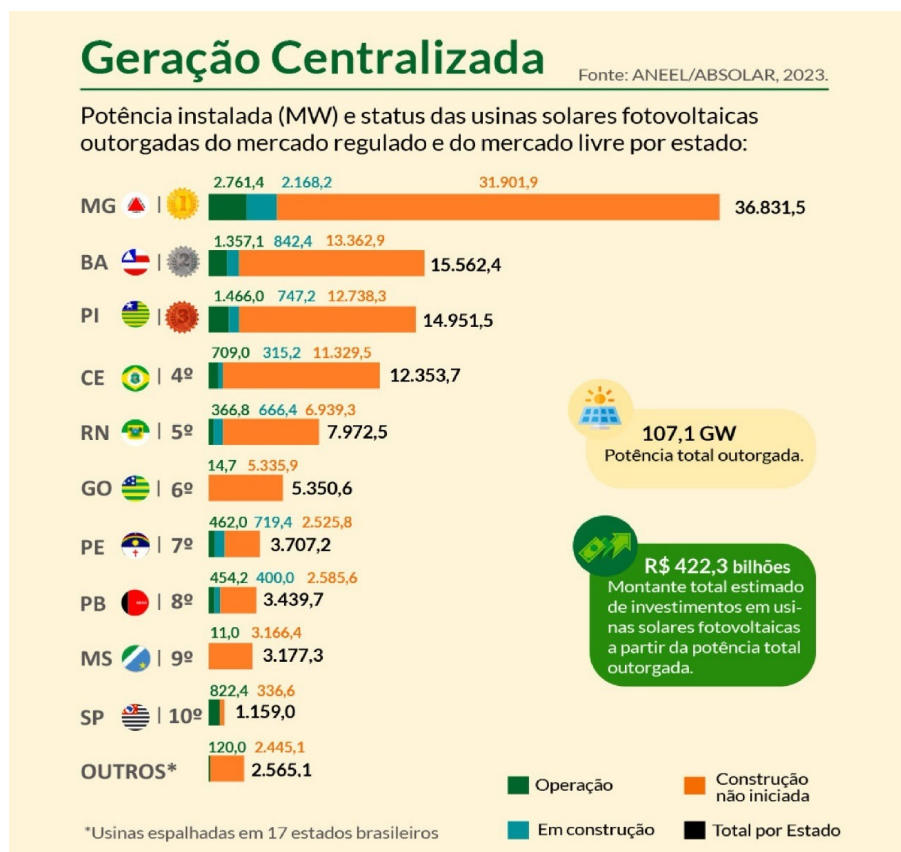


Fonte: Adaptado de (ABSOLAR, 2023).

Na Figura 4, podemos observar os dados de potência instalada no Brasil, contemplando usinas solares já em operação, em construção e construções que ainda não foram iniciadas, mas já possuem investimentos definidos. Esses dados revelam uma potência outorgada impressionante de 107,1 GW. Esse cenário apresenta um desafio significativo para as concessionárias de energia, que precisam se adaptar e manter sua eficiência diante das incertezas no planejamento. Um dos principais desafios está relacionado à intermitência das fontes renováveis, cada vez mais presentes nas redes de distribuição.

No entanto, é importante ressaltar que essas fontes estão se consolidando como agentes responsáveis por grandes transformações na matriz energética mundial e estão se tornando cada vez mais presentes no mercado energético brasileiro. Nesse contexto, é fundamental que as concessionárias busquem soluções tecnológicas e estratégias de gestão para lidar de forma eficaz com a integração e o gerenciamento das energias renováveis, visando garantir a estabilidade e a confiabilidade do sistema elétrico.

Figura 4: Potência Instalada e Status das Usinas Solares



Fonte: Adaptado de (ABSOLAR, 2023).

### 2.3. BANDEIRAS TARIFÁRIAS

O acesso ao sistema elétrico por parte de consumidores residenciais, comerciais e industriais de pequeno porte, conhecidos como consumidores cativos, é obrigatoriamente realizado através da rede da concessionária distribuidora de energia, e esses consumidores não têm a liberdade de escolher a fonte de geração.

Esse fornecimento de eletricidade está condicionado ao pagamento da conta de energia, seguindo as regras estabelecidas na REN da ANEEL N°1.000, publicada em 7 de dezembro de 2021. Nessa resolução, estão estabelecidos os direitos e deveres do consumidor e demais usuários do serviço.

Nesta resolução, os consumidores estão divididos em dois grupos: Grupo A e Grupo B, e as regras que definem em qual grupo cada consumidor se enquadra de acordo com a REN N° 1000 da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) (2021):

- Grupo A, com tensão maior ou igual a 2,3 kV e menor que 69 kV: caso a carga ou a potência instalada de geração na unidade consumidora seja superior a 75 kW e a maior demanda a ser contratada seja igual ou inferior a 2.500 kW; e



- Grupo A, com tensão maior ou igual a 69 kV: caso a maior demanda a ser contratada seja superior a 2.500 kW.
- Grupo B, com tensão menor que 2,3 kV em rede aérea: caso a carga e a potência de geração instalada na unidade consumidora sejam iguais ou inferiores a 75 kW.
- Grupo B, com tensão menor que 2,3 kV em sistema subterrâneo: até o limite de potência instalada, conforme estabelecido pelo padrão de atendimento da distribuidora. É importante observar que os consumidores desse grupo têm o direito de optar pelo subgrupo AS do Grupo A, conforme disposto no § 3º da REN N° 1000;

A cobrança da conta de energia será realizada pela distribuidora aos consumidores cativos. Para os consumidores do Grupo A, a cobrança é feita de forma binômica, ou seja, considera tanto o consumo quanto a demanda. A demanda, medida em kW, corresponde à potência necessária para atender à unidade consumidora, enquanto o consumo, medido em kWh, representa a quantidade de energia utilizada ao longo do tempo. Para os consumidores do Grupo B, o faturamento será baseado no consumo de eletricidade ao longo de um mês.

As tarifas aplicadas, expressas em R\$/kWh para o consumo e em R\$/kW para a demanda, são determinadas pela ANEEL. O valor total da conta de energia também leva em consideração a cobrança de tributos e encargos setoriais, bem como a aplicação das bandeiras tarifárias, que podem ser classificadas como verde, amarela, vermelha patamar 1 e vermelha patamar 2.

Em julho de 2023, a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) (2022) atualizou os valores das tabelas tarifárias de julho de 2022 a junho de 2023, conforme abaixo:

- Bandeira Verde: Condições favoráveis de geração, sem custo adicional;
- Bandeira Amarela: Condições menos favoráveis, R\$ 2,989 a cada 100 quilowatts-hora (kWh) consumidos;
- Bandeira Vermelha 1: Condições desfavoráveis, R\$ 6,500 a cada 100 kWh consumidos;
- Bandeira Vermelha 2: Condições muito desfavoráveis, R\$ 9,795 a cada 100 kWh consumidos.

A aplicação das bandeiras é determinada pela ANEEL e decorre da condição dos reservatórios das hidrelétricas. Quando os reservatórios estão com baixo volume, os custos de geração de energia elétrica aumentam devido à necessidade de acionar mais termelétricas.

Com o objetivo de reduzir sobrecargas no sistema elétrico nos períodos do dia onde a demanda é maior, geralmente no final do dia, a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL)

(2022) criou medidas como a aplicação de tarifas mais elevadas, afim de desencorajar o alto consumo de energia elétrica nesses períodos.

#### 2.4. POSTOS TARIFÁRIOS

Para aplicação destas medidas, criou-se os postos tarifários, que são basicamente os diferentes períodos de tempo ao longo do dia, em que as distribuidoras de energia definem um valor de tarifa diferente no consumo de energia para os consumidores os quais se enquadrem no modelo de tarifação horária (GARCIA, 2020).

Baseados na REN da ANEEL Nº 1000, as distribuidoras definem os postos tarifários, os quais são divididos conforme abaixo:

- Horário de ponta: período diário de 3h consecutivas, com exceção realizada aos sábados, domingos e feriados nacionais;
- Horário intermediário: período de horas conjugadas ao horário de ponta, aplicado exclusivamente às unidades consumidoras do grupo B que optem pela Tarifa Branca. Podendo variar de 1h à 1h30 antes e depois do horário de ponta;
- Horário fora de ponta: período diário composto pelas horas consecutivas e complementares ao horário de ponta e intermediário.

No caso dos consumidores do Grupo A, são considerados apenas os postos tarifários de ponta e fora de ponta, e para os consumidores do Grupo B com contrato de Tarifa Branca, os três postos tarifários são aplicáveis.

Os consumidores do Grupo B que não possuem contrato de Tarifa Branca, não tem os postos tarifários considerados em sua conta de energia. Eles são cobrados apenas com a Tarifa Convencional, que se aplica a todo o consumo registrado no mês. Geralmente, essa tarifa costuma ser mais alta do que a cobrada no horário fora de ponta e mais baixa do que a cobrada nos postos de ponta e intermediário.

#### 2.5. TARIFA HOROSAZONAL

Para os consumidores do Grupo A é aplicada a tarifa horosazonal, a qual considera diferentes postos tarifários ao longo do dia. A tarifa horosazonal é classificada em dois grupos:

- Horosazonal verde: tem como característica tarifas diferenciadas para o consumo em diferentes postos tarifários e por tarifa única para a demanda medida;

- Horosazonal azul: tem como característica tarifas diferenciadas para o consumo e para a demanda medida em diferentes postos tarifários.

A cobrança do consumo do Grupo A é realizada para as duas modalidades horosazonais de acordo com as seguintes equações, onde "HP" corresponde ao posto tarifário de ponta e "FP" corresponde ao posto tarifário fora ponta:

$$CobrançaConsumoHP = ConsumoHP \cdot TarifaConsumoHP \quad (1)$$

$$CobrançaConsumoFP = JConsumoFP \cdot TarifaConsumoFP \quad (2)$$

## 2.6. GERAÇÃO CENTRALIZADA

O sistema elétrico atual é um conjunto complexo de usinas, subestações, linhas de transmissão e outros equipamentos que desempenham papéis fundamentais na geração, transmissão e distribuição de energia elétrica em uma área específica. Esses componentes trabalham em conjunto para garantir o fornecimento contínuo e confiável de eletricidade para consumidores residenciais, comerciais e industriais.

As usinas são responsáveis pela geração de energia elétrica, podendo ser hidrelétricas, termelétricas, eólicas, solares, entre outras. Elas convertem diferentes fontes de energia em eletricidade por meio de processos de geração específicos.

As subestações desempenham um papel importante na transformação e controle da energia elétrica antes de ser transmitida pelas linhas de transmissão. Elas garantem que a eletricidade seja transmitida em níveis adequados de tensão e fornecem a capacidade de interconectar diferentes sistemas de energia.

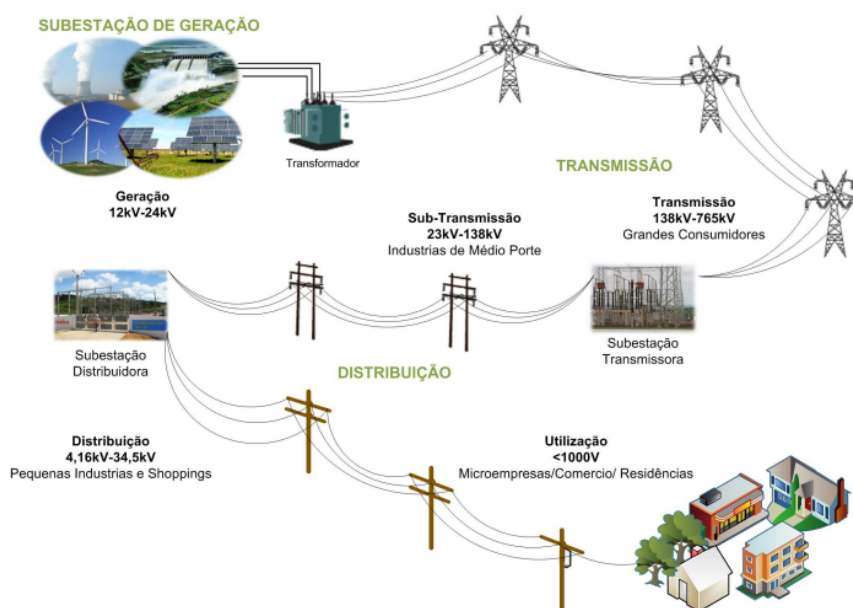
As linhas de transmissão são responsáveis por transportar a energia elétrica em longas distâncias, conectando as usinas às áreas de consumo. Essas linhas são projetadas para minimizar as perdas de energia durante a transmissão e garantir a entrega eficiente da eletricidade. Além disso, existem outros equipamentos e dispositivos, como transformadores, reatores e dispositivos de proteção, que desempenham funções específicas no sistema elétrico.

Em conjunto, esses elementos formam a infraestrutura essencial para a geração, transmissão e distribuição de energia elétrica. A interação e a coordenação eficientes desses componentes são fundamentais para garantir o fornecimento confiável de eletricidade para atender às demandas dos consumidores em uma área específica (FARIA; PINTO, 2015).

Na Figura 5 está representado o sistema de transmissão de energia com geração centrali-

zada, o qual enfrenta muitos desafios e problemas oriundos da necessidade de transferir energia dos centros de produção para os locais de consumo por meio de uma extensa rede de sistemas de transmissão interconectados em diferentes níveis de voltagem. Essa transferência de energia acarreta em perdas de energia ao longo do processo, desde os centros de produção até os pontos de consumo.

Figura 5: Conceito de Geração Centralizada



Fonte: (LOPES et al., 2012).

## 2.7. GERAÇÃO DISTRIBUÍDA

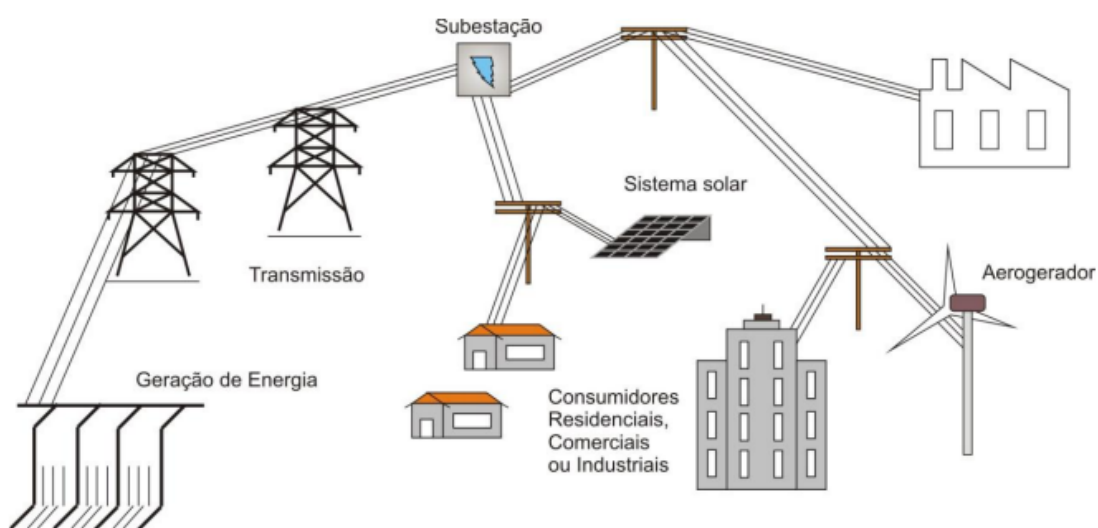
O conceito de geração distribuída refere-se à produção de energia elétrica em pequena escala, próxima aos pontos de consumo. A energia solar fotovoltaica tem se destacado como uma das principais tecnologias empregadas na geração distribuída. Os painéis solares instalados em telhados de residências, edifícios comerciais, áreas industriais e em espaços públicos convertem a luz solar em eletricidade de forma limpa e sustentável. Essa energia gerada localmente é utilizada para abastecer as necessidades energéticas do próprio local, reduzindo a dependência da rede elétrica convencional e os custos associados.

Da mesma forma, a energia eólica, proveniente do vento, também desempenha um papel importante na geração distribuída. Aerogeradores instalados em áreas propícias captam a energia cinética do vento, convertendo-a em energia elétrica. Essa energia é consumida localmente ou pode ser injetada na rede elétrica, contribuindo para a suplementação do suprimento energético geral.

Outras fontes de energia, como hidrelétrica e biomassa, também podem ser exploradas na geração distribuída, desde que haja disponibilidade de recursos naturais adequados. Essas tecnologias permitem que a eletricidade seja produzida de forma descentralizada, proporcionando uma maior diversificação da matriz energética e reduzindo as perdas de transmissão e distribuição.

Em contraste com a geração centralizada, em que a eletricidade é produzida em grandes usinas e transmitida por longas distâncias até os consumidores, a geração distribuída busca trazer a produção de energia mais próxima dos locais de consumo conforme pode ser visto na Figura 6.

Figura 6: Conceito de Geração Distribuída



Fonte: (MOREIRA, 2018).

A geração distribuída oferece diversas vantagens, como a redução de perdas na transmissão de energia, maior eficiência energética, menor impacto ambiental, diversificação da matriz energética e aumento da resiliência do sistema elétrico (SOARES; LIMA, 2017).

Esses sistemas permitem que os consumidores se tornem produtores de energia, gerando eletricidade a partir de fontes renováveis, como solar fotovoltaica e eólica, e injetando o excedente na rede elétrica. Essa forma de geração descentralizada tem crescido significativamente nos últimos anos, impulsionada por políticas de incentivo e pela conscientização sobre a importância da transição para uma matriz energética mais limpa e sustentável. A Geração Distribuída não apenas contribui para a redução das emissões de gases de efeito estufa, mas também promove a independência energética, a economia de recursos e a criação de empregos na cadeia produtiva das energias renováveis.

Na Figura 7, podemos observar um resumo dos dados referentes à Geração Distribuída no Brasil, considerando tanto a microgeração quanto a minigeração de energia distribuída implantadas em diversos setores, como residências, comércios, indústrias, propriedades rurais e prédios públicos.

Esses dados ilustram a crescente adoção da geração distribuída como uma alternativa viável e sustentável para suprir parte das necessidades energéticas desses diferentes segmentos. Através da instalação de sistemas fotovoltaicos, eólicos, hidrelétricos de pequeno porte ou outras fontes de energia renovável, essas unidades consumidoras têm a capacidade de produzir eletricidade de forma local, reduzindo a dependência da rede elétrica convencional.

Figura 7: Dados Geração Distribuída no Brasil



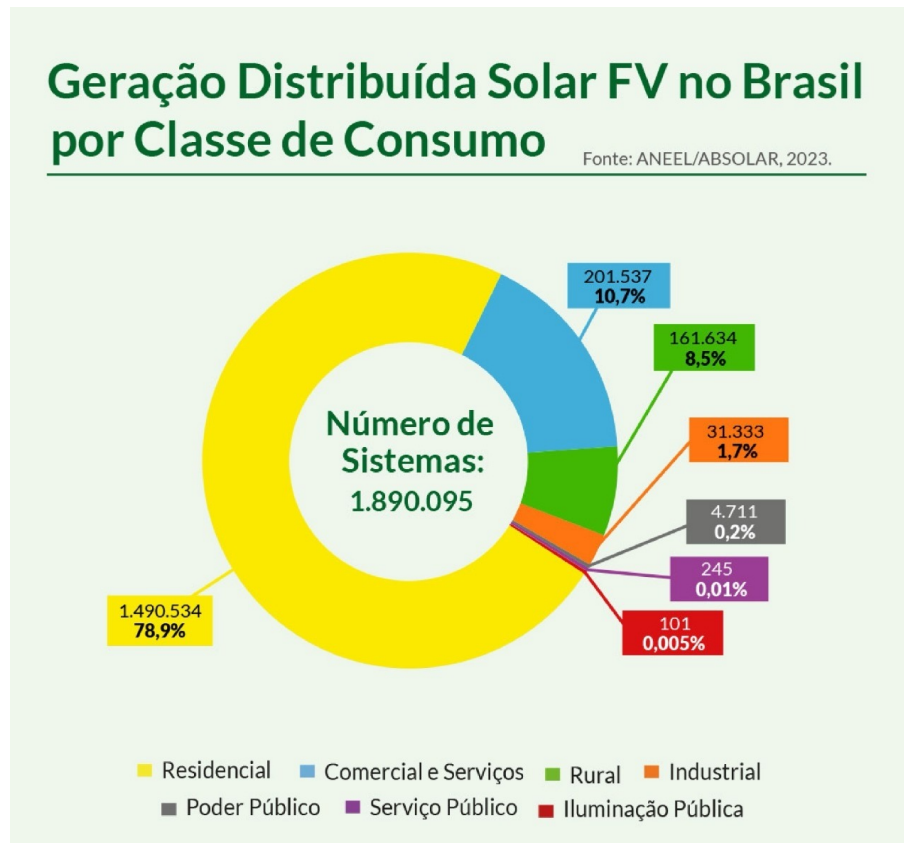
Fonte: Adaptado de (ABSOLAR, 2023).

A Figura 8 fornece uma visão detalhada dos dados de Geração Distribuída Solar no Brasil, segmentados por classe de consumo e número de sistemas instalados. Essa análise revela informações importantes sobre a adoção crescente de soluções sustentáveis pelos consumidores brasileiros em suas residências.

Os dados mostram que os sistemas residenciais representam a parcela mais significativa, totalizando 78,9% do número total de sistemas de geração distribuída solar instalados no país. Essa tendência evidencia uma mudança de mentalidade e uma maior conscientização

dos consumidores em relação à importância da sustentabilidade e do uso de fontes de energia renovável.

Figura 8: Geração Distribuída no Brasil por Classe de Consumo



Fonte: Adaptado de (ABSOLAR, 2023).

A crescente adoção de sistemas solares em residências reflete a busca por uma maior autonomia energética, redução de custos com energia elétrica e a preocupação com o impacto ambiental. Os consumidores estão cada vez mais interessados em aproveitar os benefícios econômicos e ambientais oferecidos pela geração distribuída solar, como a possibilidade de gerar eletricidade limpa, reduzir a dependência da rede elétrica convencional e, em muitos casos, até mesmo vender o excedente de energia de volta à rede.

## 2.8. IMPACTO SOCIOAMBIENTAL

O Brasil é um país que enfrenta recorrentes períodos de seca, os quais provocam crises de energia no setor elétrico devido a principal fonte de energia do país vir das hidrelétricas, já que elas estão sujeitas a fatores climáticos, como os períodos de seca ou menor incidência de chuva fazendo com que os níveis dos reservatórios atinjam valores críticos, ocasionando insegurança energética. Conseqüentemente ocorre o aumento dos preços da energia no país,

que está diretamente relacionando com o cálculo para acionamento das bandeiras tarifárias onde parte dos valores pagos pelos consumidores, são repassados para compensar os custos extras de produção de energia nestes períodos de seca.

Diante disto, a necessidade de diversificar a matriz energética do país torna-se indispensável para suprir a demanda atual e futura de energia elétrica, além de tornar possível a redução dos ajustes tarifários. Os benefícios ambientais e sociais da Energia Solar Fotovoltaica destacam-se por se tratar de uma energia limpa, renovável e sustentável, além de proporcionar emprego e renda.

O uso das baterias em sistemas de armazenamento na matriz elétrica, tem como principal vantagem do ponto de vista ambiental, a redução das emissões de gases de efeito estufa à medida que possibilita o aumento da participação de fontes renováveis.

As baterias contribuem para flexibilidade e estabilidade da matriz, balanceando as fontes de geração variável e não-controlável, além disso podem ser instaladas de forma centralizada ou descentralizada sem limitações locais específicas. Desta forma é possível selecionar locais com menor sensibilidade socioambiental para sua instalação.

Há outros benefícios socioambientais no uso de baterias como por exemplo, reduz a necessidade e impactos da instalação de linhas de transmissão e distribuição, e permite que comunidades dispersas não conectadas à rede elétrica tenham acesso à energia (World Economic Forum (WEF), 2019).

## 2.9. SISTEMAS DE ARMAZENAMENTO DE ENERGIA

O armazenamento de energia é uma tendência mundial, visto que visa proporcionar benefícios em toda a cadeia dos sistemas de energia, que inicia no processo de geração de energia até o usuário final. Os SAEs são essenciais para a integração dos sistemas de geração de energia convencionais e os sistemas de geração de energia renováveis.

A aplicação dos SAEs em sistemas de distribuição pode ocorrer de duas formas, de acordo com o seu objetivo: instalações centralizadas ou instalações distribuídas.

- As instalações centralizadas possuem como objetivo principal, a prestação de serviços ancilares, visando aumentar a qualidade de energia e desempenho elétrico do sistema; a redução do pico de demanda e otimização do uso da rede, instalação de sistemas de armazenamento em subestações, visando melhorar o fator de carga dos transformadores; postergação de investimentos em infraestruturas; aumento da capacidade de integração de fontes renováveis; aumento da confiabilidade do sistema, dentre outros.



- As instalações descentralizadas, possuem como objetivo, principalmente a prestação de serviços ancilares, o aumento da capacidade de integração de fontes renováveis e o aumento da confiabilidade do sistema.

As instalações descentralizadas instaladas por consumidores, no entanto, possuem como objetivo redução da fatura de energia, com gerenciamento do horário de utilização da energia ou do custo da demanda, qualidade da energia ou confiabilidade, sem objetivos específicos que beneficiem a rede (ALVES, 2020).

Um estudo realizado pela Deloitte Development LLC (no year) apresentou tendências de utilização das tecnologias de armazenamento, dentre elas, Suprimento de Energia Elétrica, Serviços Ancilares, Integração de Renováveis, T&D e Consumidores, considerando os aspectos técnicos e viabilidade econômica e período de 2015 a 2030. O estudo comparou tecnologias aplicáveis à mesma categoria de uso com base na evolução do custo-benefício ao longo do tempo, considerando o aprimoramento das tecnologias, tornando-as mais atrativas economicamente.

As baterias de Íon-Lítio e Chumbo-Ácidas se mostram bastante adequadas para prestação de serviços ancilares, pois possuem boa capacidade de resposta para condições em que são demandadas descargas frequentes, mas curtas. Como tecnologias potenciais para esta categoria, mas que ainda demandam aperfeiçoamento tecnológico, se apresentam os supercapacitores e supercondutores.

Para sistemas de distribuição e transmissão as baterias de fluxo se apresentam como uma boa alternativa. As soluções de Supercapacitores e Supercondutores são adequadas para necessidades que possuem como requisito tempos de resposta inferiores aos segundos.

Com base no estudo, espera-se que as baterias, à medida que a tecnologia seja desenvolvida, liderem o mercado de armazenamento para instalações de pequeno e médio portes. Baterias de fluxo são alternativas que se mostram interessantes quando baterias tradicionais podem apresentar problemas de vida útil.

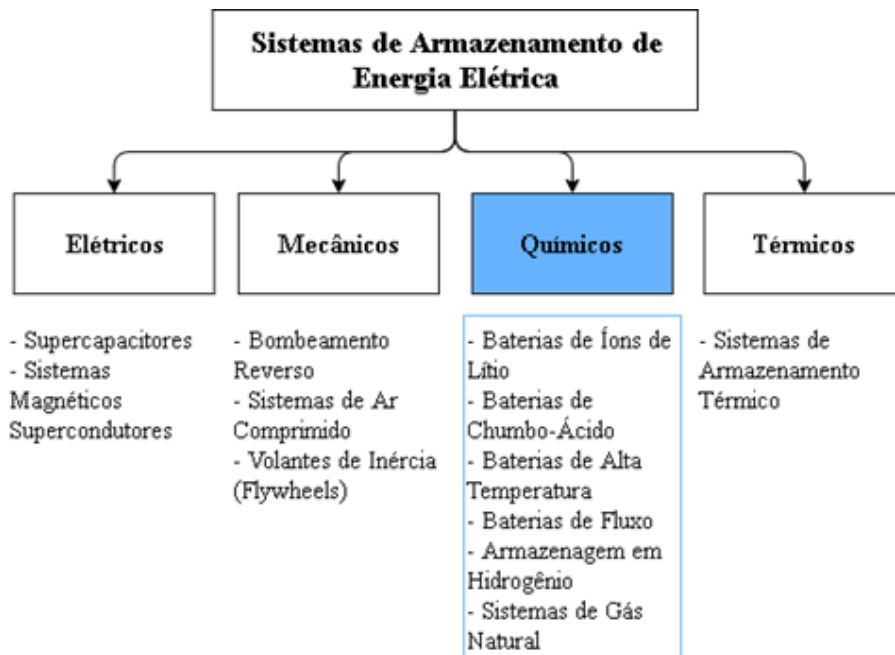
As baterias de Íon-Lítio e chumbo-ácidas destacam-se dentre as tecnologias potenciais para utilização pelos consumidores residenciais. Futuramente à medida que a tecnologia avança, a utilização de baterias de fluxo também se mostra uma alternativa promissora. Em relação aos consumidores comerciais, se destacam as baterias Íon-Lítio, Baterias de Fluxo e Hidrogênio (Deloitte Development LLC, no year).

### 2.9.1. Tipos de sistemas de armazenamento

Neste estudo será analisado o armazenamento de características químicas, com o objetivo de viabilizar o uso dessas tecnologias para a geração de energia distribuída. O armazenamento de energia elétrica pode ser realizado de diversas formas, na Figura 9 pode-se observar um esquema completo e com as características de cada tipo de armazenamento.

Por meio do armazenamento de características químicas, busca-se superar o desafio da intermitência das fontes de energia renovável, ou seja, a variação na disponibilidade de energia ao longo do tempo devido a fatores climáticos, como a ausência de sol ou vento. Essas tecnologias de armazenamento químico têm o potencial de armazenar energia em forma química e liberá-la posteriormente quando necessário, fornecendo uma fonte contínua e confiável de eletricidade.

Figura 9: Tecnologias de Armazenamento de Energia



Fonte: Adaptado de (BUENO; BRANDÃO, 2013).

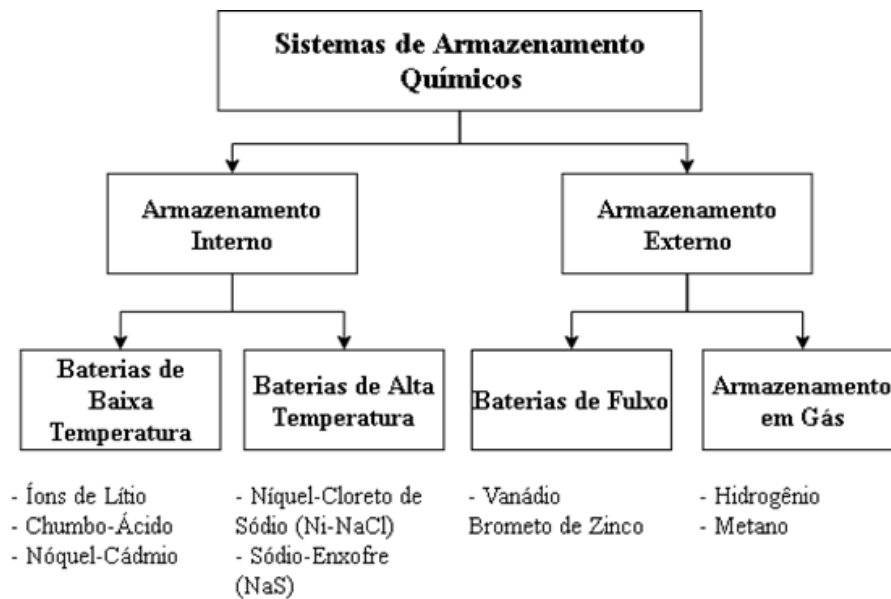
Os SAEs podem atuar como suporte a diversas necessidades técnicas da rede de acordo com as suas características, tecnologia, dimensionamento e aplicação, e tem se mostrado como elementos importantes diante das mudanças de cenário que tem ocorrido no sistema elétrico, que está evoluindo para um modelo moderno, baseado na geração de energia distribuída a partir do uso de fontes renováveis (CUNHA, 2017).

Os SAEs na forma de Energia Química funcionam a partir de uma reação eletroquímica reversível, onde há a movimentação de cargas elétricas através de um eletrólito. Atualmente os esforços são no sentido de desenvolver baterias com maior densidade de armazenamento, menores perdas no processo de carga/descarga, menores taxas de auto descarga, elevado número

de ciclos de carga/descarga, além de promover o desenvolvimento de materiais não tóxicos, que facilitem o processo de descarte e/ou reciclagem e, ainda, minimizem eventuais riscos ambientais, visto que os diferentes tipos de tecnologias possibilitam o uso efetivo desses sistemas tanto por concessionárias de energia como pelo consumidor final, podendo utilizar em aplicações industriais, comerciais ou residenciais (SERRA et al., 2016).

Os sistemas químicos de armazenamento de energia podem ser classificados como sistemas de armazenamento Interno ou Externo conforme a Figura 10.

Figura 10: Sistemas Químicos de Armazenamento de Energia



Fonte: Adaptado de (BUENO; BRANDÃO, 2013).

- **Armazenamento Interno**

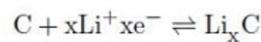
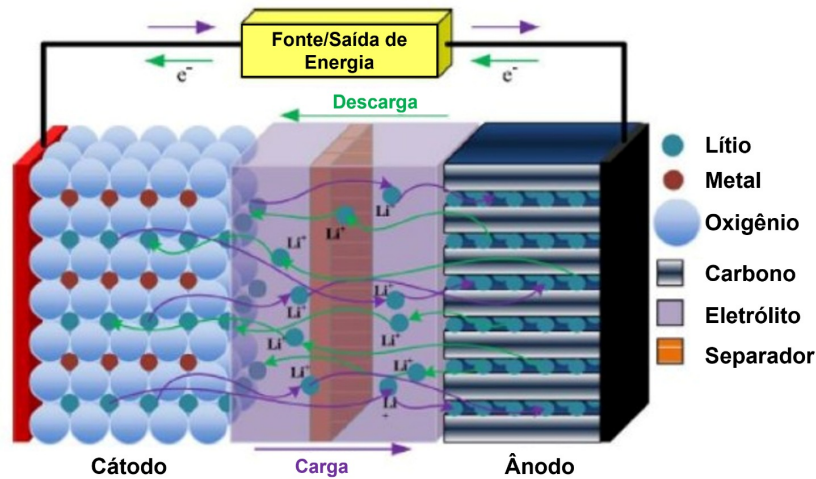
- **Baterias de Íons de Lítio:** Consideradas uma tecnologia relativamente nova, sua fabricação utiliza o lítio. São consideradas seguras e baratas, proporcionam altas densidades de energia e podem fornecer elevados picos de potência.

As baterias recarregáveis de íon de lítio são amplamente utilizadas em dispositivos eletrônicos e têm sido a opção preferencial para aplicações veiculares, tanto em veículos híbridos quanto em veículos elétricos puros. Essas aplicações abrangem tanto conjuntos de baixa capacidade (5 a 10 kW/20 kWh) para sistemas distribuídos, quanto conjuntos de capacidade elevada (1 MW) com resposta rápida para regulação de frequência.

Além de possuírem alta densidade energética, as baterias de íons de lítio são capazes de suportar altas taxas de carga e descarga, não sofrendo com o efeito memória. Além disso, apresentam uma vida útil elevada, podendo alcançar de 2000 a 3000 ciclos (SERRA et al., 2016).

Durante o processo de carregamento, os átomos de lítio no eletrodo negativo se transformam em íons e se deslocam para o eletrodo positivo, onde se combinam com elétrons externos para formar átomos de lítio. Durante a descarga, esse processo é reverso, como ilustrado na Figura 11:

Figura 11: Diagrama da eletroquímica de uma bateria de íons de lítio



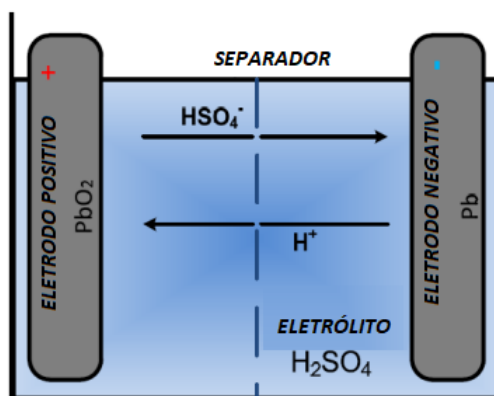
Fonte: Adaptado de (AKINYELE; BELIKOV; LEVRON, 2017).

- **Baterias Chumbo-Ácido:** As baterias de chumbo-ácido apresentam benefícios como custo reduzido, facilidade de fabricação, reações eletroquímicas rápidas e vida útil razoável quando operadas corretamente, o que resultou em uma ampla aceitação no mercado para várias aplicações. No entanto, para aplicações de grande escala e estáticas no setor elétrico, as baterias de chumbo-ácido possuem algumas desvantagens, estas incluem a utilização intensiva de materiais tóxicos e potencialmente prejudiciais ao meio ambiente, baixa densidade de energia e potência, problemas de manutenção e vida útil limitada. A vida útil dessas baterias varia consideravelmente de acordo com a aplicação, a taxa de descarga e o número de ciclos (SERRA et al., 2016).

No estado carregado, as baterias de chumbo-ácido possuem um polo negativo de chumbo e um polo positivo de dióxido de chumbo (PbO<sub>2</sub>). O eletrólito utilizado é o ácido sulfúrico (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) com uma concentração de cerca de 33,5%. Durante o processo de descarregamento, ocorre a migração dos eletrodos do polo negativo para o polo positivo. Isso resulta na formação de grãos de sulfeto de chumbo (PbSO<sub>4</sub>) nos eletrodos, e o eletrólito começa a perder concentração, transformando-se principalmente em água. Ao ser recarregada, a bateria dissolve esses grãos. No entanto, se a descarga for muito

profunda, os grãos podem crescer a um tamanho em que se tornam insolúveis, tornando o material ativo da bateria inutilizável, estes componentes podem ser vistos na Figura 12:

Figura 12: Componentes de uma bateria de chumbo ácido



Fonte: Adaptado de (FUCHS et al., 2012).

São adequadas a sistemas que requeiram tempos de armazenamento curtos ou médios. Os maiores mercados para esta tecnologia são a indústria automotiva e os sistemas de *back-up (no-breaks)* para telecomunicações. Utilizam em sua composição o chumbo (metal pesado tóxico) e o ácido sulfúrico, corrosivo.

- Baterias de Sódio (*Sodium-nickel-chloride*): Baterias de Sódio são construídas para operar em altas temperaturas, durante o ciclo de carga, o sal ( $NaCl$ ) reage com o Níquel, produzindo cloreto de níquel ( $NiCl_2$ ) e sódio fundido, durante o ciclo de descarga essa reação é revertida. A temperatura de operação fica entre de  $250^\circ C$  a  $300^\circ C$ , para manter o sódio no estado líquido, apesar de possuírem isolamento térmico, estas baterias consomem energia para compensar a perda de calor para o ambiente (SANTOS, 2018).

As aplicações mais comuns são em veículos elétricos e também, aplicações estacionárias onde aconteçam ciclos periódicos (diários), como suprimento de ponta e deslocamento de carga no tempo para arbitragem ou adiamento de investimentos. Com um dimensionamento adequado do isolamento térmico, durante o ciclo normal de operação (diário) a temperatura interna será mantida apenas com as perdas no processo de carga e descarga. Estas baterias são, portanto, adequadas para ciclos diários de operação, como em veículos elétricos, e inadequadas para aplicações com longos períodos de *stand-by*, como em *no-breaks*. São tipicamente adequadas para tempos médios de armazenamento.

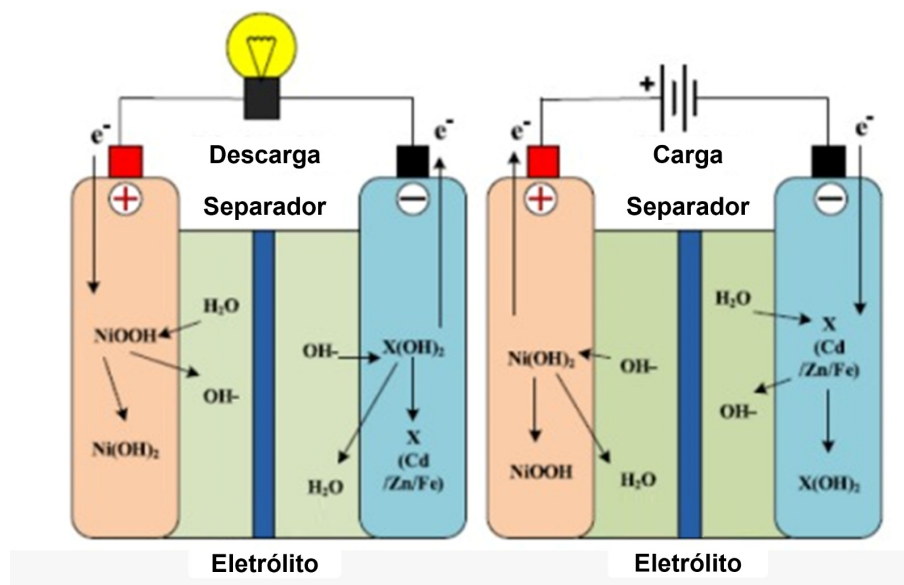
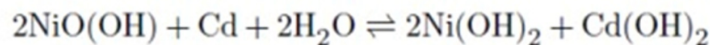
- Baterias de Sódio Enxofre: Baterias  $NaS$  têm um eletrólito em estado sólido, em lugar de fluido. Assim como as baterias  $Ni-NaCl$ , as nas requerem temperaturas elevadas para alcançar a condutividade suficiente (baixa resistência interna) para a transferência de

massa no eletrólito na condição fluida. Se a bateria é resfriada, a carga e descarga não são mais possíveis (é necessário reaquecê-la à temperatura de trabalho) e há risco de surgirem trincas e falhas no eletrólito de cerâmica.

As células produzem calor durante o processo de descarga, tanto por efeito de perdas ôhmicas quanto pela reação exotérmica. Com isolamento térmico adequado, a temperatura interna será mantida apenas com as perdas no processo de carga e descarga durante o ciclo normal de operação. São, portanto, adequadas para ciclos diários de operação, como em veículos elétricos, e inadequadas para aplicações com longos períodos de *stand-by*, como em *no-breaks*. Os fabricantes incluem uma resistência interna que serve para o aquecimento inicial e para uma possível recuperação da bateria no caso de resfriamento total. São tipicamente adequadas para tempos médios de armazenamento (BUENO; BRANDÃO, 2013).

- Baterias de Níquel Cádmio: As baterias de níquel cádmio (NiCd) foi uma das primeiras tecnologias de armazenamento reversível desenvolvidas. Sua densidade de energia é baixa, no entanto oferecem vida longa e altas correntes de descarga. As baterias de NiCd são mais adequadas para carga rápida e descarga em pulsos de potência. Na Figura 13 pode ser visto esse processo de carga e descarga:

Figura 13: Diagrama de operação de carga e descarga da bateria de Níquel Cádmio



Fonte: Adaptado de (AKINYELE; BELIKOV; LEVRON, 2017).

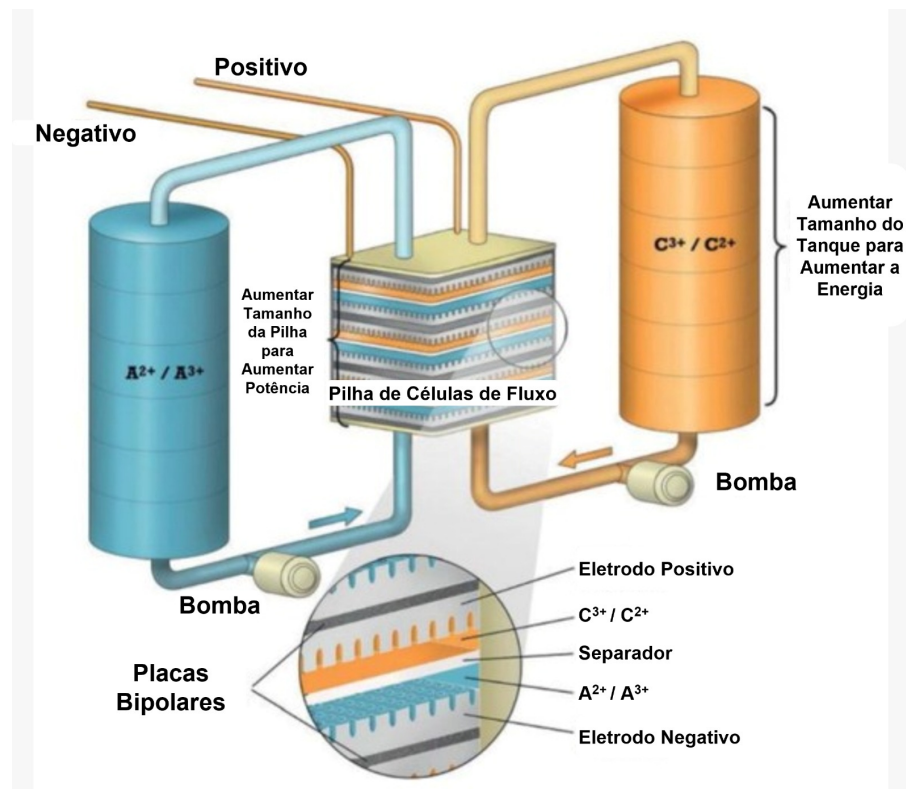
Não são adequadas a processos em que devem ser mantidas em flutuação, para uso ocasional por breves períodos. Uma descarga completa é tão importante que, se omitida, poderá causar a formação de grandes cristais nas placas das células (é o chamado efeito memória), levando à perda gradual de sua capacidade.

As baterias NiCd estão sendo utilizadas cada vez menos, pois, além do efeito memória, da menor capacidade, menor tempo de vida útil e elevada taxa de auto descarga, o cádmio é um metal tóxico, mesmo em pequenas quantidades, é bioacumulativo, podendo causar disfunção renal, problemas pulmonares e câncer (BUENO; BRANDÃO, 2013).

- **Armazenamento Externo**

- **Baterias de Fluxo:** Neste tipo de bateria o material ativo, onde a energia é armazenada é um sal dissolvido em eletrólito fluido. O eletrólito é armazenado em tanques e, durante o processo de carga-descarga, bombeado através de eletrodos, onde ocorre a reação química que absorve ou libera a corrente elétrica conforme pode ser visto na Figura 14. A capacidade de armazenamento de energia é definida pelo tamanho dos tanques de armazenamento e a potência fornecida, determinada pela unidade de reação. Neste tipo de baterias há, portanto, um desacoplamento entre energia e potência.

Figura 14: Esquema de uma bateria de fluxo

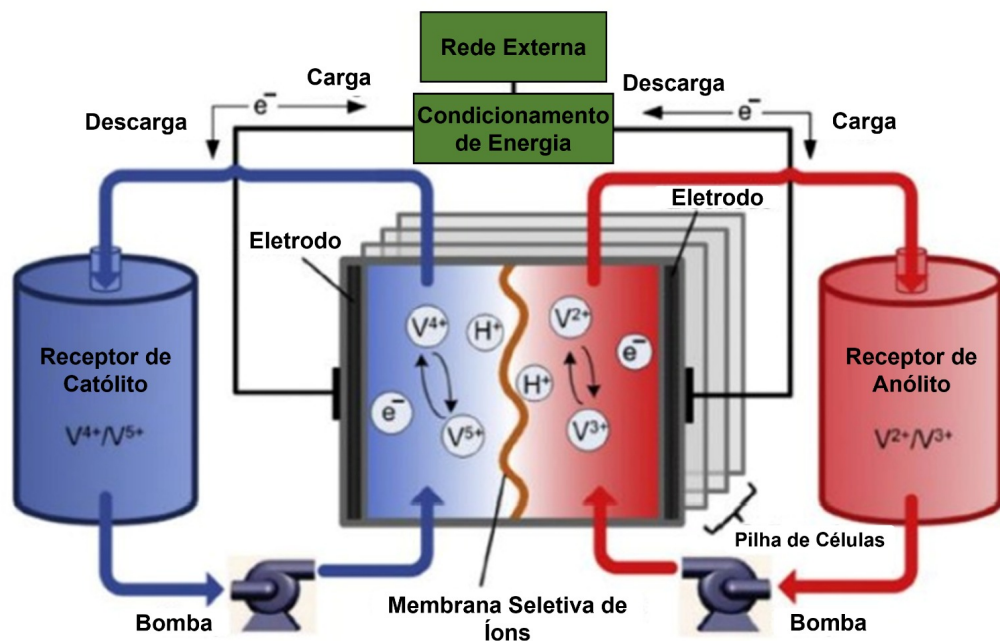


Fonte: Adaptado de (SERRA et al., 2016).

Consideradas adequadas para armazenamentos de médias a grandes quantidades de energia, uma vez que sua capacidade depende essencialmente do tamanho dos tanques de armazenamento. Trata-se de uma tecnologia viável, que pode suprir a lacuna entre armazenamento elétrico de média (até um dia) e longa duração (semanas), o que nos dias de hoje, não é considerado viável com baterias eletroquímicas devido à auto descarga. Porém, o custo de manutenção é elevado e há perdas de energia devido à auto descarga nos reagentes líquidos utilizados (BUENO; BRANDÃO, 2013).

- Baterias de Vanádio (*Vanadium Redox Batteries*): Baterias de redução e oxidação de Vanádio são derivadas de uma tecnologia onde o elemento ativo é dissolvido no eletrólito. Neste caso, os íons de vanádio permanecem na solução ácida aquosa durante todo o processo (STERZELECKI, 2018). O eletrólito é armazenado em tanques e, durante o processo de carga-descarga, é direcionado através dos eletrodos, onde ocorre a reação química que absorve ou libera corrente elétrica, conforme ilustrado na Figura 15.

Figura 15: Diagrama de uma bateria de Vanádio



Fonte: Adaptado de (AKINYELE; BELIKOV; LEVRON, 2017).

Seu funcionamento é baseado na reação de oxirredução de diferentes formas do vanádio. No processo de carga os íons  $V^{3+}$  são convertidos em íons  $V^{2+}$  no eletrodo negativo, recebendo elétrons. No eletrodo positivo, íons  $V^{4+}$  são convertidos em íons  $V^{5+}$ , liberando elétrons. Ambas as reações absorvem a energia elétrica fornecida e a armazenam na forma química. No processo de descarga, a reação ocorre na direção inversa (BUENO; BRANDÃO, 2013).



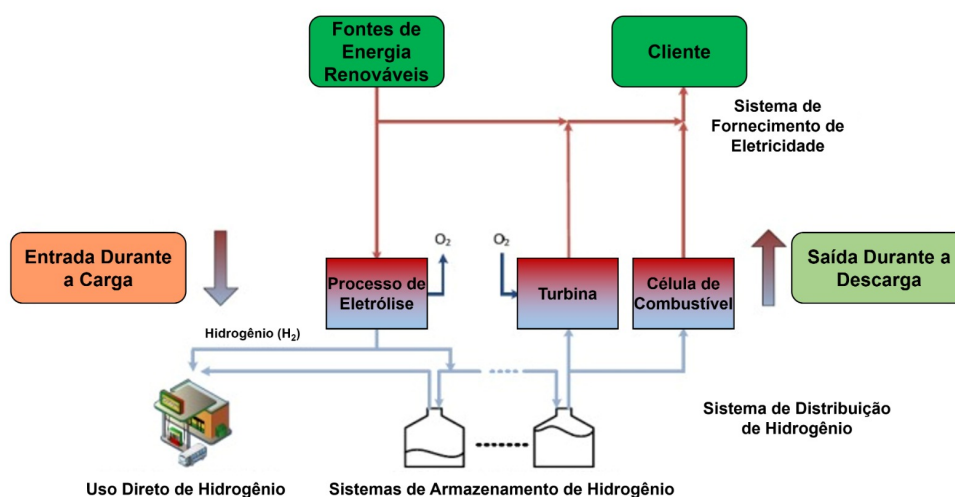
- **Baterias Ferro-Comum:** Baterias de fluxo do tipo Ferro Cromo (Fe-Cr) redox ainda estão em processo de pesquisa e desenvolvimento. O baixo custo dos materiais empregados estimula a possibilidade de uso em larga escala nos serviços ligados ao sistema elétrico. Ainda há muitas incertezas sobre a vida útil (número de ciclos de carga-descarga) e desempenho, o que torna seu custo elevado (BUENO; BRANDÃO, 2013).
- **Baterias de Brometo de Zinco:** Neste tipo de baterias, o zinco encontra-se no estado sólido quando a bateria está carregada e dissolvido, quando descarregada. O brometo é sempre dissolvido no eletrólito aquoso. Cada célula é composta por duas superfícies de eletrodo e por dois fluxos de eletrólito separados por um filme microporoso. Ambas as soluções eletrolíticas são aquosas de brometo de zinco ( $ZnBr_2$ ). Durante a carga, o elemento zinco é depositado sobre o eletrodo negativo, O brometo é depositado no eletrodo positivo. O separador microporoso permite que os íons de zinco e os íons brometo migrem para o fluxo de eletrólito oposto para equalizar a carga elétrica (BUENO; BRANDÃO, 2013).
- **Baterias Zinco-Ar:** Utilizam metais que se oxidam facilmente e que consomem grandes quantidades de energia elétrica em sua redução e transformação para a forma metálica. Baterias metal-ar usam um metal eletropositivo, como o zinco, alumínio, magnésio ou lítio em uma reação com o oxigênio do ar, retornando à forma de óxido e gerando eletricidade. Requerem apenas um eletrodo, têm potencial para elevadas densidade de energia, e como utilizam metais mais viáveis e de baixo custo, conseqüentemente o custo das baterias torna-se menor. A carga e descarga são processos reversíveis (BUENO; BRANDÃO, 2013).
- **Armazenamento em Hidrogênio:** Sistemas de armazenamento baseados em hidrogênio produzem o gás por meio de um processo de eletrólise durante a carga, em seguida, o hidrogênio é comprimido e armazenado em um reservatório. Durante o processo de descarga, o hidrogênio produzido pode ser utilizado para alimentar turbinas de combustão ou células de combustível.

Existem diferentes técnicas de armazenamento de hidrogênio, incluindo vapor de hidrogênio pressurizado, hidrogênio líquido e hidrogênio composto em estruturas químicas/físicas. A escolha da técnica depende do tamanho da instalação, necessidade de transporte ou mobilidade e restrições de espaço. Posteriormente, o hidrogênio é fornecido a uma célula de combustível, que o converte em energia elétrica. Esses sistemas têm uma eficiência variando de 34% a 50%, porém os tanques de armazenamento são caros. Essas

tecnologias são adequadas para armazenamento sazonal e aplicações em redes isoladas (STERZELECKI, 2018).

Primeiramente a energia é armazenada a partir da geração do hidrogênio, o qual é então armazenado e por último usado para a geração de eletricidade, conforme ilustrado no diagrama 16:

Figura 16: Diagrama esquemático de um SAE com hidrogênio



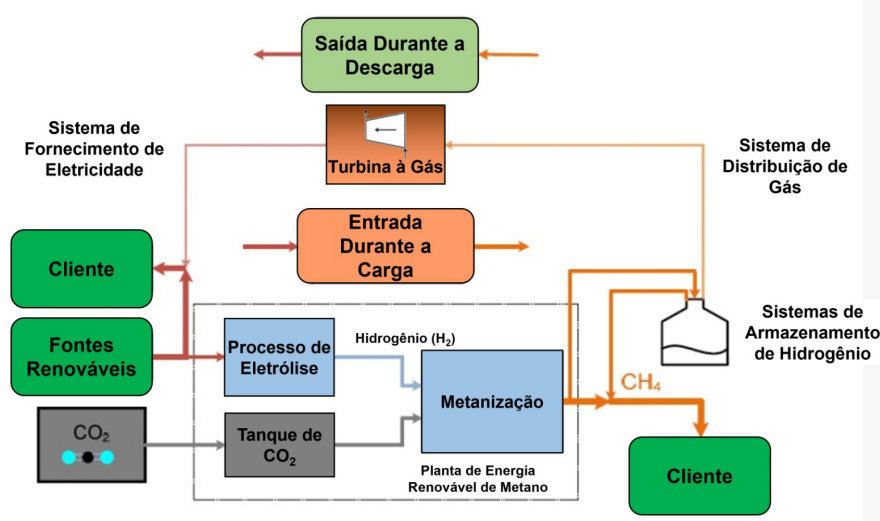
Fonte: Adaptado de (FUCHS et al., 2012).

Por ser um gás composto por apenas um próton, o hidrogênio possui uma viscosidade extremamente baixa e pode atravessar barreiras que normalmente reteriam outros gases. No entanto, o bombeamento ou a compressão do hidrogênio são processos complexos, frequentemente realizados por meio de bombas do tipo membrana, que apresentam eficiência relativamente baixa. Em contato com o ar, o hidrogênio é explosivo em concentrações de 10% até 90%, tornando-se um risco adicional.

No entanto, não há grandes sistemas de armazenamento de energia a hidrogênio em operação porque, no atual nível de penetração de fontes renováveis, a capacidade de geração de backup convencional ou intercâmbios (transmissão de longa distância), oferecem alternativas muito mais baratas, seguras e confiáveis (BUENO; BRANDÃO, 2013).

- **Baterias de Singás:** É considerada uma tecnologia alternativa de armazenamento de hidrogênio, o Singás (gás sintético) pode ser produzido aquecendo hidrogênio e dióxido de carbono em um recipiente fechado, em uma reação exotérmica chamada “Metanização”, também conhecida como reação de *Fischer-Tropsch* (gás sintético) (STERZELECKI, 2018). O produto é semelhante ao gás natural, compatível com a infraestrutura existente do gás. Os processos de geração, armazenamento e utilização do hidrogênio para a geração de energia elétrica por meio da metanização são ilustrados na Figura 17:

Figura 17: Diagrama de um Singás



Fonte: Adaptado de (FUCHS et al., 2012).

O produto final é semelhante ao gás natural, compatível com toda a infraestrutura existente de gás, o que é considerado a maior vantagem do metano sobre o hidrogênio. Justamente pelo manuseio de hidrogênio ser muito mais complexo que o do metano. Já a maior desvantagem é que há um processo adicional, que gera custo e perdas. Também é necessária uma fonte de CO<sub>2</sub> e há a produção de rejeito de calor, que pode ser recuperado para reutilização ou tornar-se perda adicional. O consumo de CO<sub>2</sub> pode tornar-se uma vantagem nos sistemas de captura de carbono.

### 2.9.2. Baterias

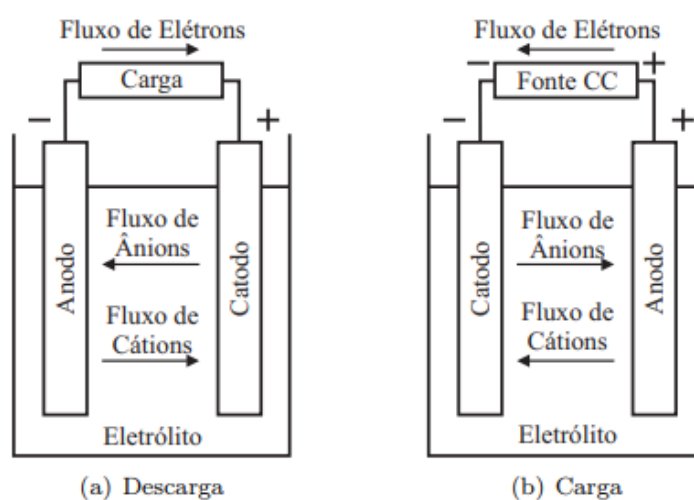
O armazenamento da energia gerada pelos módulos solares é importante para garantir o fornecimento contínuo de energia elétrica em aplicações específicas. Uma das formas de armazenamento é a utilização de SAEs. Os SAEs são compostos por baterias que armazenam a energia gerada pelos módulos solares para uso posterior. Eles são muito utilizados em sistemas híbridos, que combinam o uso de energia solar com outras fontes de energia, como geradores a diesel ou turbinas eólicas, por exemplo. Quando não há energia solar suficiente para atender a demanda, o SAE entra em ação, fornecendo a energia necessária para o sistema. É importante ressaltar que a escolha do tipo de bateria adequado ao sistema é fundamental para garantir sua eficiência e vida útil.

A bateria converte a energia química contida em seus materiais ativos em energia elétrica por meio de reações de oxirredução. Ela é composta por uma ou mais células que podem ser conectadas em série, em paralelo ou em ambas as configurações, dependendo dos requisitos de

projeto, como níveis de tensão, corrente máxima, capacidade, entre outros.

A célula é a unidade fundamental de um sistema eletroquímico, composta por eletrodos, separadores, eletrólitos, contêiner e terminais. Ela opera através de um processo de oxirredução, em que durante a descarga, o eletrodo negativo libera elétrons para um circuito externo, sofrendo oxidação, enquanto o eletrodo positivo recebe os elétrons provenientes do circuito externo, sofrendo redução. Durante o processo de carga, o fluxo de corrente é revertido, levando à oxidação do eletrodo positivo e à redução do eletrodo negativo. Por definição, o ânodo é o eletrodo onde ocorre a oxidação, enquanto o cátodo é o eletrodo onde ocorre a redução, conforme ilustrado na Figura 18.

Figura 18: Processo de Oxirredução da Bateria



Fonte: (POSSAMAI, 2018).

O separador desempenha um papel crucial na bateria, pois ele isola fisicamente os eletrodos, impedindo o curto-circuito direto entre eles. Geralmente, o separador é constituído por um filme microporoso de fibra ou polímero, que também atua como um condutor iônico, permitindo a passagem de íons entre os eletrodos. O meio onde ocorre a transferência de ânions e cátions entre o ânodo e o cátodo é conhecido como eletrólito. O eletrólito desempenha um papel fundamental na operação da bateria, facilitando a movimentação dos íons necessários para as reações eletroquímicas. O eletrólito é um líquido no qual sais, ácidos ou bases são dissolvidos, essa solução iônica permite a condução dos íons, possibilitando a reação redox durante a carga e descarga da bateria.

É importante ressaltar que diferentes tipos de baterias podem utilizar eletrólitos líquidos ou sólidos, dependendo da tecnologia e aplicação específicas. Eletrólitos sólidos, como polímeros condutores ou materiais cerâmicos, estão sendo cada vez mais explorados devido às suas vantagens, como maior estabilidade e segurança em comparação com os eletrólitos líqui-

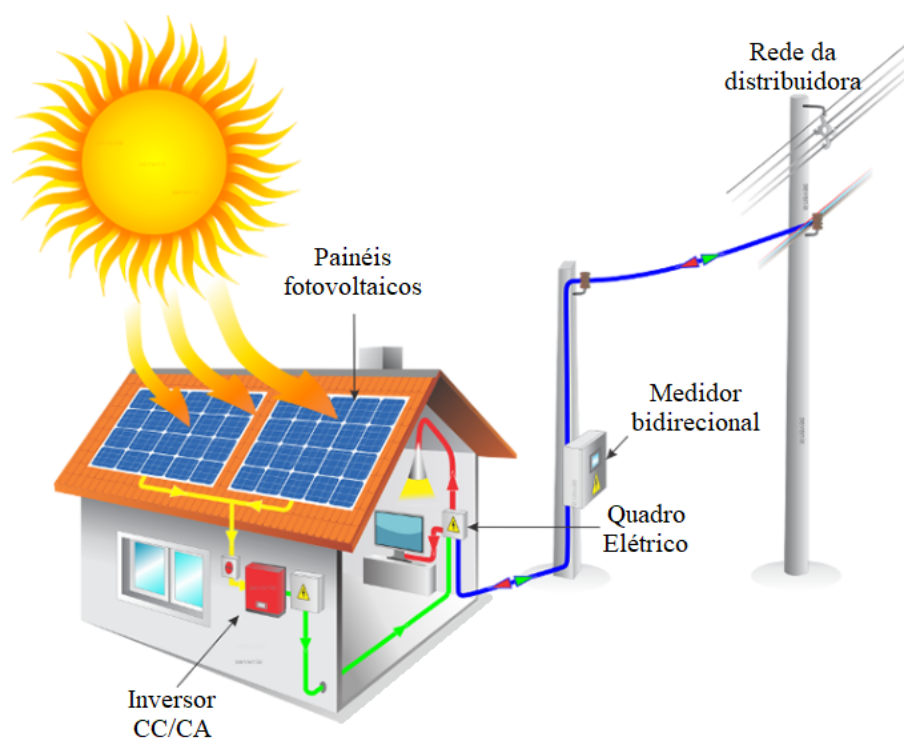
dos. Essa variedade de eletrólitos disponíveis contribui para a diversidade de baterias e suas características de desempenho (WU, 2015).

## 2.10. SISTEMA FOTOVOLTAICO *ON-GRID*

Os sistemas *On-Grid* também conhecidos como sistemas conectados à rede elétrica, permitem que a geração de eletricidade a partir da luz solar seja integrada com a rede elétrica convencional, estes sistemas são considerados uma fonte complementar ao sistema elétrico, e são empregados em locais que já possuem acesso à energia elétrica. Este tipo de sistema faz uso de geração distribuída pode ser classificado de acordo com a potência gerada (ALVES, 2019).

Para este tipo de sistema, as concessionárias de energia adotaram o uso dos medidores bidirecionais de energia, estes medidores são projetados para registrar e medir tanto a energia consumida da rede elétrica convencional quanto a energia gerada pelo sistema fotovoltaico e injetada de volta à rede, na Figura 19 é apresentado um esquema básico de ligação de um sistema conectado a rede elétrica convencional, operando em conjunto com um medidor bidirecional.

Figura 19: Funcionamento do Medidor Bidirecional em um Sistema On Grid



Fonte: (HUBERT, 2023).

A principal função desses medidores é monitorar a quantidade de energia que flui em ambas as direções: da rede elétrica para o local de consumo e do sistema fotovoltaico para a rede. Eles registram separadamente a energia consumida e a energia gerada, permitindo um

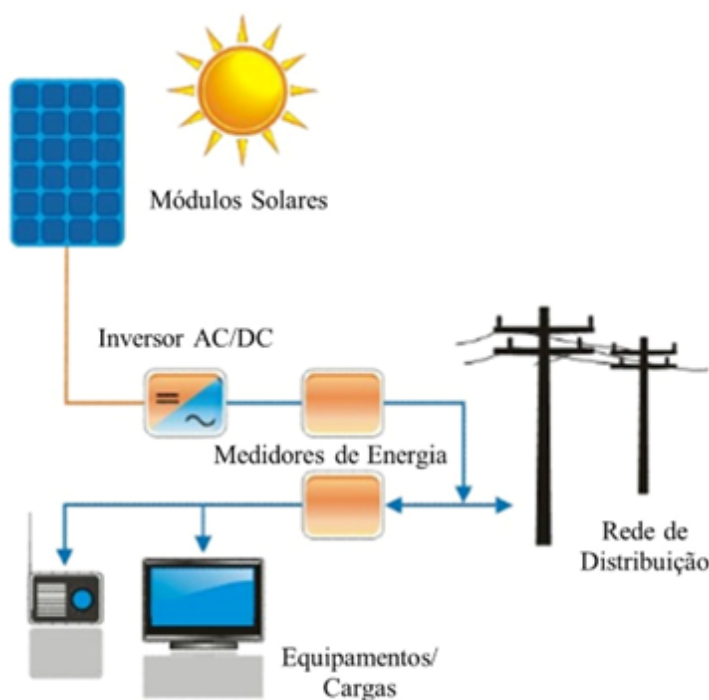
cálculo preciso dos créditos energéticos ou da energia líquida consumida.

Ao medir a energia gerada pelo sistema fotovoltaico, o medidor bidirecional permite que os proprietários acompanhem a quantidade de energia solar produzida e monitorem o desempenho do sistema. Além disso, quando o sistema solar gera mais energia do que é consumida localmente, o medidor registra o excesso de energia e o envia de volta para a rede elétrica.

Os sistemas *On-Grid* são amplamente utilizados em residências, empresas e edifícios comerciais, oferecendo uma solução sustentável e econômica para a geração de energia elétrica. Além dos benefícios ambientais, como a redução das emissões de gases de efeito estufa, o sistema *on-grid* também pode proporcionar economia na conta de luz, especialmente quando o consumo é menor durante o dia, coincidindo com a maior produção solar.

Estes sistemas geralmente são conectados em paralelo com a rede elétrica, onde o inversor converte a energia Corrente Contínua (CC) gerada pelos módulos fotovoltaicos em Corrente Alternada (CA) e fornece a energia para a rede, conforme pode ser observado na Figura 20:

Figura 20: Sistema On-Grid



Fonte: Adaptado de ABB, 2021.

Uma planta básica como demonstrada na Figura 20 para conversão de energia solar em energia elétrica é composta de alguns elementos físicos e construtivos que serão demonstrados a seguir.

### 2.10.1. Radiação Solar

A radiação solar é a energia emitida pelo Sol, que se propaga em todas as direções através do espaço por meio de ondas eletromagnéticas. Quando se fala em radiação, há alguns conceitos que são amplamente utilizados:

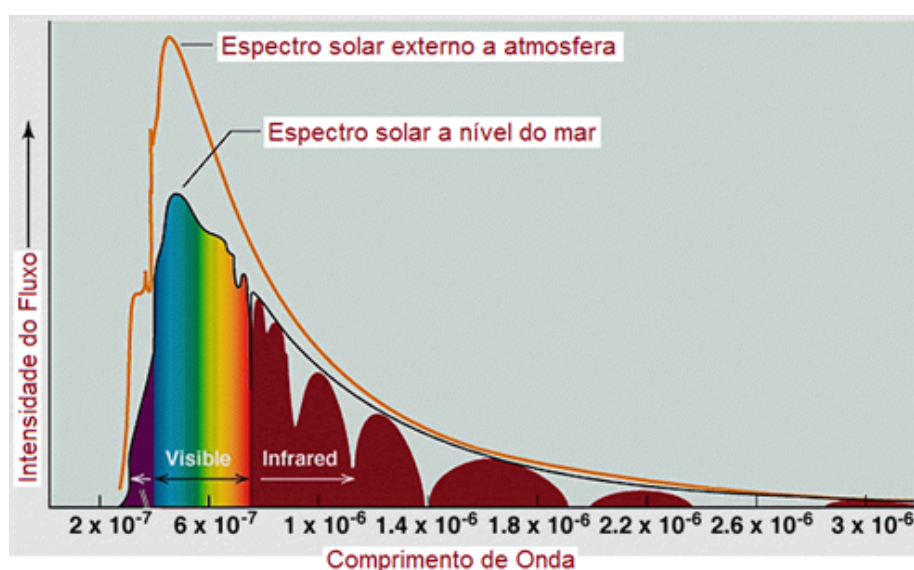
**Irradiação:** É conjunto de radiações emitidas por um corpo, neste caso o conjunto de radiações emitidas pelo sol durante um período; **Irradiância:** fluxo de radiação recebida por uma superfície por unidade de área. Este valor usa a sigla  $E$  e as unidades são  $W/m^2$ . **Irradiação global anual:** energia recebida na superfície no período dum ano, medida em  $Wh/m^2$ .

O espectro solar é a distribuição de energia radiante emitida pelo Sol em diferentes comprimentos de onda. Esse espectro é composto principalmente de radiação eletromagnética, mas também contém partículas de alta energia emitidas pelo sol, como prótons e elétrons.

No entanto, quando a radiação solar entra na atmosfera terrestre, ela interage com as moléculas e partículas presentes no ar. Isso resulta em diferentes fenômenos que afetam a distribuição da energia radiante e a aparência do espectro solar. Esses fenômenos incluem a dispersão, a absorção e a reflexão da radiação solar pela atmosfera.

A nível do mar, a radiação solar é mais intensa do que em altitudes mais elevadas, pois há menos camadas de atmosfera para absorver a radiação conforme visto na Figura 21. No entanto, a quantidade de radiação que chega à superfície também depende das condições meteorológicas, como a cobertura de nuvens e a presença de poluição (ROTTMAN et al., 2005).

Figura 21: Radiação Solar



Fonte: Adaptado de ABB, 2021.

A dispersão é o fenômeno em que a radiação solar é espalhada em diferentes direções

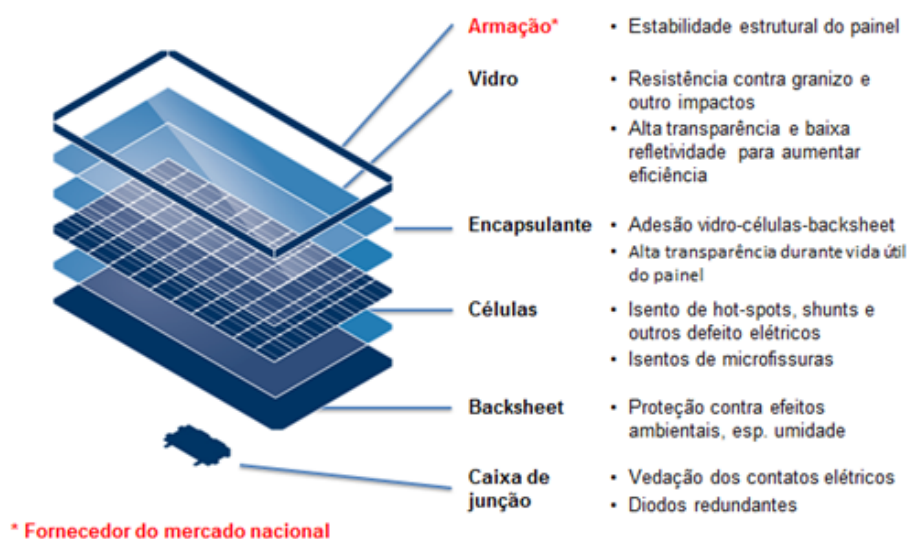
pela atmosfera, resultando em um céu azul durante o dia. A absorção ocorre quando a radiação é absorvida pelas moléculas da atmosfera, como o dióxido de carbono, vapor de água e ozônio, resultando na formação de diferentes camadas de absorção no espectro solar. A reflexão ocorre quando a radiação solar é refletida por superfícies terrestres, como água, neve e gelo.

A quantidade de radiação solar que atinge a superfície da Terra também depende da altitude, latitude e condições meteorológicas. Por exemplo, em altitudes mais elevadas, a atmosfera é mais rarefeita e há menos moléculas para absorver a radiação, resultando em maior intensidade da radiação solar. Na linha do equador, a incidência solar é mais direta, resultando em mais radiação solar do que em latitudes mais altas.

### 2.10.2. Módulo Fotovoltaico

O módulo é composto de várias células fotovoltaicas individuais interligadas em série, de modo a obter uma tensão que é a soma das tensões de cada célula, conforme pode ser observado na Figura 22.

Figura 22: Módulo Fotovoltaico



Fonte: ABB, 2021.

Mais de 95% de todas as células solares produzidas em todo mundo são compostas por material semicondutor Silício (SI). Para produzir uma célula solar, o material semicondutor precisar ser “dopado”. Ao fazer isso, dependendo do tipo de contaminante, pode obter-se um excedente de portadores com carga positiva (chamados camada condutora do semicondutor tipo P) ou portadores de carga negativa (chamados camada condutora do semicondutor tipo N).

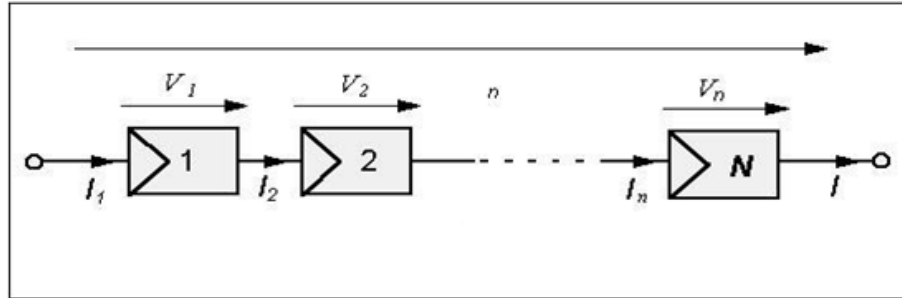
Os módulos fotovoltaicos são geralmente conectados em série ou em paralelo para formar um arranjo solar. A forma como os módulos são conectados depende do sistema em que serão



utilizados e da tensão e corrente que se deseja obter.

Na conexão em série, a conexão é feita em linha reta, com o terminal positivo de um módulo conectado ao terminal negativo do próximo. Isso permite que a tensão dos módulos seja somada, enquanto a corrente permanece constante, conforme a Figura 23:

Figura 23: Ligação Módulos em Série



Fonte: ABB, 2021.

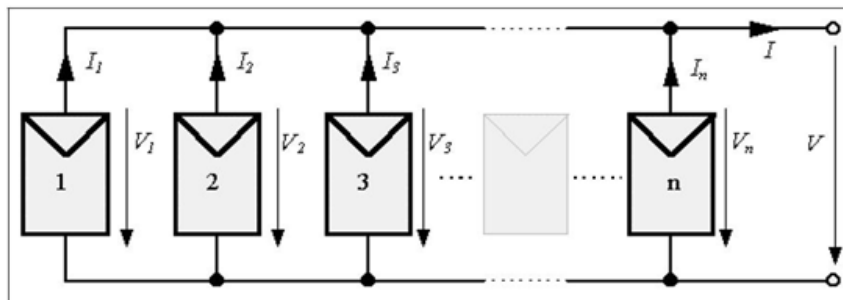
Esta ligação também pode ser representada pelas respectivas equações abaixo:

$$\sum_{i=0}^n \bar{V}_i = V_{pv} \quad (3)$$

$$I_1 = I_2 = I_3 = I_n = I_{pv} \quad (4)$$

Na conexão em paralelo, os terminais positivos de todos os módulos são conectados juntos, assim como os terminais negativos. Isso permite que a corrente seja somada, enquanto a tensão permanece constante conforme a Figura 24:

Figura 24: Ligação Módulos em Paralelo



Fonte: ABB, 2021.

Esta ligação também pode ser representada pelas respectivas equações abaixo:

$$\sum_{i=0}^n \bar{I}_i = I_{pv} \quad (5)$$

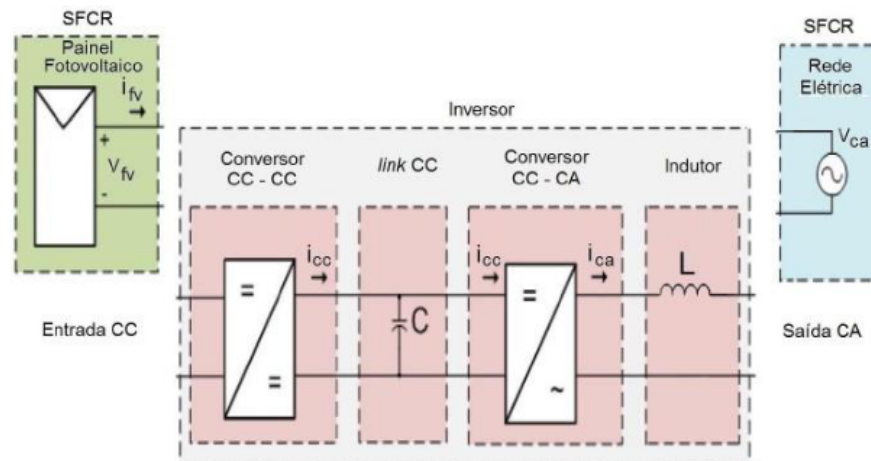
$$V_1 = V_2 = V_3 = V_n = V_{pv} \quad (6)$$

Existem também arranjos mistos, nos quais os módulos são conectados em série e em paralelo para atender às necessidades específicas do sistema.

### 2.10.3. Inversor Fotovoltaico

O inversor é um componente fundamental nos sistemas fotovoltaicos, responsável por converter a corrente contínua (CC) gerada pelo módulo fotovoltaico em corrente alternada (CA), seja monofásica ou trifásica. Ele estabelece a ligação entre o sistema fotovoltaico e a rede elétrica, desempenhando a função de transformar o sinal elétrico contínuo do painel em um sinal elétrico alternado, adequado à frequência e nível de tensão da rede à qual está conectado conforme esquema ilustrado na Figura 25. Por essa razão, o inversor é essencial para que a energia elétrica gerada pelos painéis fotovoltaicos possa ser utilizada pelos equipamentos eletroeletrônicos que operam em corrente alternada.

Figura 25: Topologia básica de um inversor fotovoltaico



Fonte: (RAMOS; MOREIRA, 2021).

De acordo com o INMETRO (2011), os inversores para serem aplicados em sistemas fotovoltaicos devem fornecer forma de onda senoidal pura; eficiência superior a 85% na faixa entre 50% e 100% da potência nominal e distorção harmônica total de tensão Distorção Harmônica Total (DHT) menor que 5%, em qualquer potência de operação. Os inversores também podem ser chamados de Unidade de Condicionamento de Potência (UCP) de um arranjo fotovoltaico (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2019).

Para definição do modelo de inversor utilizado, são analisadas as características de cada

inversor com base no *datasheet* fornecido pelos fabricantes. Tais dados são divididos em: dados de entrada CC, dados de saída CA, dados gerais e eficiência (RAMOS; MOREIRA, 2021). Sendo estas:

- Faixa de tensão *Maximum Power Point Tracking* (MPPT): é o intervalo de tensões elétricas CC que a UCP consegue operar com o MPPT, ou seja, o inversor só conseguirá otimizar a potência entregue à rede se a tensão aplicada em suas entradas estiver nesta faixa de valores de tensão;
- Tensão mínima de entrada: é o valor mínimo de tensão para que o inversor entre em operação, ou seja, permaneça ligado. Este valor normalmente está um pouco abaixo do valor mínimo de MPPT;
- Tensão máxima de entrada: é o valor de tensão máximo suportado pelas entradas do inversor. Este valor está relacionado à máxima tensão de circuito aberto da associação de módulos em série e está acima da tensão máxima de MPPT;
- Corrente máxima de entrada: é o valor máximo de corrente suportado pelas entradas do inversor. Está relacionado à corrente de curto-circuito máxima que o conjunto de módulos conectados a esta entrada pode injetar no inversor;
- Corrente máxima por MPPT: é a corrente máxima de curto-circuito suportado pelas entradas MPPT. Lembrando que a corrente máxima suportada pelas entradas CC do inversor não é necessariamente igual ao valor máximo de corrente das entradas MPPT.

## 2.11. RESUMO DO CAPÍTULO

O Capítulo 2 aborda diversos aspectos relacionados à geração de energia solar no Brasil e seus desdobramentos. Inicialmente, é apresentado o potencial de geração de energia solar no país, destacando as características favoráveis que o Brasil possui para a utilização dessa fonte renovável.

Em seguida, são discutidas as bandeiras tarifárias, que são mecanismos utilizados pelas concessionárias de energia elétrica para sinalizar o custo da geração de energia em determinados períodos. Além disso, são apresentados os postos tarifários, que correspondem aos diferentes horários de cobrança de energia elétrica, levando em consideração a demanda e oferta de energia.

Em relação à geração de energia solar, são discutidas duas modalidades: a geração centralizada, que é realizada por grandes usinas solares conectadas diretamente à rede elétrica,

e a geração distribuída, que envolve a instalação de sistemas fotovoltaicos em residências, empresas e outros locais, permitindo a geração de energia no próprio local de consumo.

O impacto socioambiental da energia solar também é explorado, destacando os benefícios dessa fonte renovável em termos de redução das emissões de gases de efeito estufa e os impactos positivos na qualidade de vida das comunidades.

Na seção sobre sistemas de armazenamento de energia, são apresentados os diferentes tipos de sistemas disponíveis, com destaque para as baterias, que são uma das principais tecnologias utilizadas para armazenar a energia gerada pelos sistemas fotovoltaicos.

Por fim, é abordado o sistema fotovoltaico *on-grid*, que se refere à conexão do sistema solar à rede elétrica, permitindo a troca de energia com a concessionária. São discutidos conceitos relacionados à radiação solar, que é a base para a geração de energia fotovoltaica, e aos módulos fotovoltaicos, que são os principais componentes dos sistemas solares.

Ao abordar esses tópicos, o capítulo fornece uma visão abrangente sobre a geração de energia solar no Brasil, os aspectos tarifários envolvidos, os diferentes tipos de sistemas de armazenamento e as características dos sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica.

### 3. MATERIAIS E MÉTODOS

#### 3.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Este capítulo apresenta a metodologia proposta para realizar a análise e o gerenciamento do fluxo de potência a partir da inserção de um SAE) em uma residência monofamiliar. Serão apresentados os modelos utilizados para analisar o desempenho do sistema de armazenamento em conjunto com a instalação fotovoltaica existente.

#### 3.2. FORMULAÇÃO DO PROBLEMA

No contexto brasileiro, o perfil de consumo de energia é caracterizado pelo horário de pico, que ocorre das 18h às 21h, conhecido como horário de ponta.

Atualmente, a incorporação de sistemas fotovoltaicos nas redes de distribuição tem trazido benefícios tanto para os consumidores quanto para as concessionárias. No entanto, o potencial gerado pelos sistemas FV conectados à rede é limitado pela disponibilidade do recurso solar, não sendo capaz de atender à demanda nos horários de ponta, que normalmente ocorrem entre as 15h e as 18h, não coincidindo com o pico de geração dos sistemas FV.

Nesse contexto, o armazenamento de energia surge como uma alternativa para mitigar os problemas nos horários de pico, pois adiciona aos sistemas FV a capacidade de armazenar uma parte da energia gerada para utilização nos momentos em que não há disponibilidade de geração solar. Essa tecnologia permite que a energia excedente produzida durante o dia seja armazenada e posteriormente utilizada durante os horários de maior demanda, contribuindo para uma melhor gestão do consumo e reduzindo a dependência da rede elétrica convencional.

Dessa forma, o armazenamento de energia se apresenta como uma solução promissora para otimizar o aproveitamento dos sistemas fotovoltaicos e suprir a demanda nos horários de pico, tornando-se uma importante ferramenta para a integração de fontes renováveis e o aprimoramento da eficiência energética no contexto brasileiro.

#### 3.3. ARQUITETURA PROPOSTA

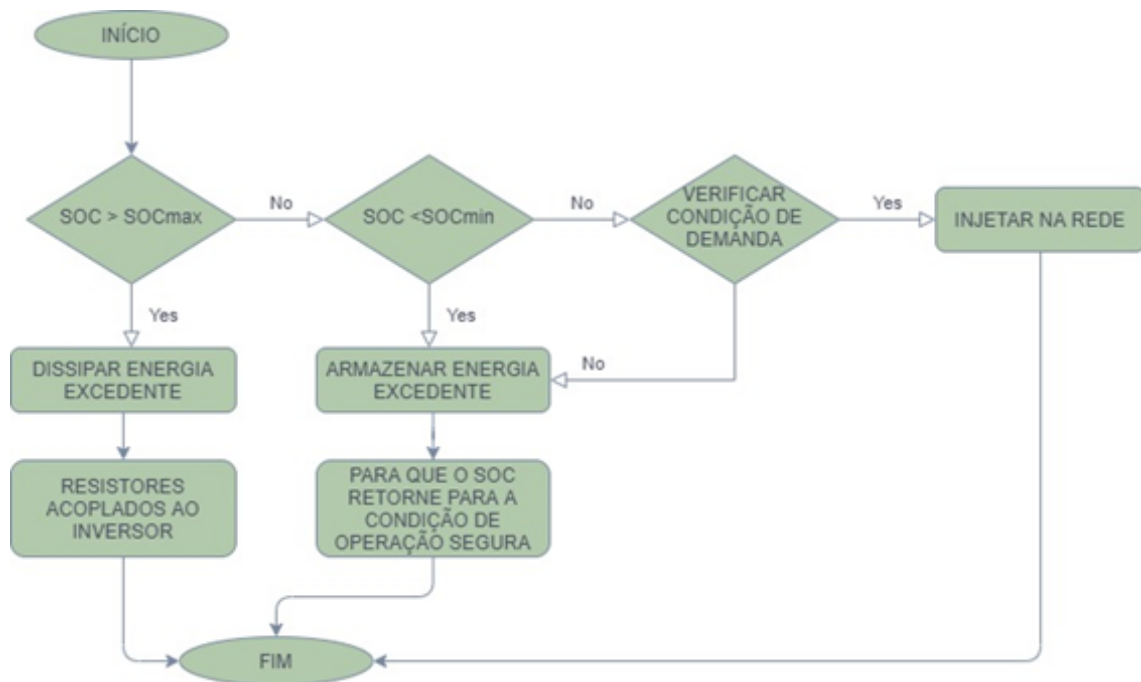
A Figura 26 traz um diagrama de blocos no qual é possível visualizar as etapas da metodologia proposta para este estudo. De início, ocorre a verificação das condições do estado de carregamento das baterias (*State of Charge - Estado de Carregamento (SOC)*), sendo que

estas devem operar dentro de uma faixa de carregamento com um limite inferior e um limite superior conforme

$$SOC_{min} < SOC < SOC_{max}, \quad (7)$$

Este trabalho foi elaborado considerando o estado de carregamento mínimo definido em 10% e o máximo em 90%, e o SAE deve operar dentro desta faixa de capacidade visando preservar a vida útil da bateria (MACHIAVELLI, 2018).

Figura 26: Diagrama de blocos da metodologia proposta



Fonte: Adaptado de (MACHIAVELLI, 2018).

Na etapa seguinte, o objetivo é buscar o deslocamento da energia armazenada nos períodos de alta insolação, para os horários em que o consumo é maior, o que consiste em armazenar energia em horários de carga reduzida para utilizá-la em horários de pico de demanda do sistema.

Se o  $SOC < SOC_{min}$ , o sistema busca armazenar a energia proveniente dos painéis, para que o  $SOC$  retorne para a condição segura de operação.

Seguindo Machiavelli (2018), se  $SOC > SOC_{max}$  o sistema começa a dissipar energia excedente utilizando os resistores acoplados ao inversor. Após cada etapa do fluxograma ocorre a análise do fluxo de potência, onde são verificadas todas as variáveis elétricas, como potência, tensão e frequência do sistema de distribuição. Este estudo visa compreender e avaliar formas para utilizar a energia excedente, sendo elas armazenando em SAE ou injetando na rede, visando o melhor aproveitamento da energia elétrica gerada pelo sistema solar fotovoltaico.

Baseado nestas informações, este método possibilita avaliar os impactos que os SAEs podem apresentar quando adicionados a novas instalações de geração de energia distribuída. A partir disto é possível analisar o impacto na curva de carga no horário de maior demanda, pois o percentual de energia elétrica armazenada é entregue a rede no horário de maior consumo, garantindo que o SAE opere dentro da capacidade e dos limites adequados, evitando danos por sobrecarga, ou falta dela, estendendo a vida útil das baterias.

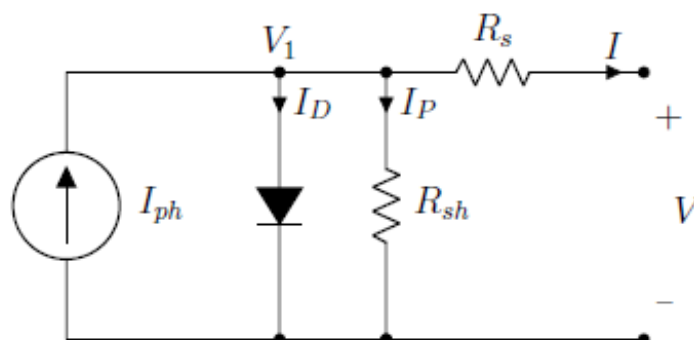
### 3.4. MODELO DE UM DIODO DA CÉLULA FOTOVOLTAICA

De acordo com Silva (2015) e Sauthier (2019) o modelo de um diodo presente na literatura é vastamente utilizado para realizar a modelagem da geração de energia fotovoltaica, por ser considerado um modelo simples mas com bastante acurácia, sendo o mais difundido para modelagem de células monocristalinas e policristalinas de silício.

A conexão das células que compõem o painel fotovoltaico resulta em uma resistência intrínseca ao módulo, o que acaba resultando em perda de potência. Nele, a corrente de fuga é modelada pela resistência *shunt*  $R_{sh}$ , a qual representa um caminho alternativo para a corrente elétrica gerada pela célula. Por outro lado, a resistência em série  $R_s$  representa as perdas internas causadas pelo fluxo de corrente e pelas conexões elétricas, além de desempenhar um papel importante na eficiência do modelo.

A Figura 27 representa o circuito equivalente do modelo, o qual é composto pela fonte de corrente  $I_{ph}$  que é a corrente fotovoltaica, o diodo, o qual tem sua corrente característica  $I_D$ , a corrente  $I_P$  que é gerada a partir das perdas elétricas geradas por  $R_{sh}$  e  $R_s$ , e então a corrente  $I$  que é gerada pela célula.

Figura 27: Circuito equivalente do modelo de um diodo



O diodo representa a junção  $pn$  que é a junção da camada tipo  $p$  com a camada do tipo  $n$ , no escuro. É ele quem dá a característica de não-linearidade do efeito fotovoltaico, visto que este é um circuito considerado do tipo caixa-preta, uma vez que não se tem acesso direto a nenhum desses componentes (SILVA, 2015).

Utilizando a Lei de Kirchhoff para as correntes, podemos estabelecer a corrente de saída  $I$ :

$$I = I_{ph} - I_D - I_P \quad (8)$$

A corrente  $I_P$  é definida pela tensão de saída  $V$  mais a queda de tensão no resistor  $R_s$ , sobre a resistência  $R_{sh}$ , conforme estabelecido na equação abaixo:

$$I_P = \frac{V + R_s \cdot I}{R_{sh}} \quad (9)$$

A corrente  $I_D$  característica do diodo é modelada a partir da tensão aplicada sobre ele, e pode ser representada pela equação de Shockley. A perda no diodo (na junção  $pn$ ) é representada por  $R_{sh}$ . A resistência  $R_s$  representa as perdas dos condutores metálicos do painel fotovoltaico, e a tensão  $V_1$  é a tensão aplicada nos terminais do diodo, e pode ser representada pela equação abaixo:

$$V_1 = I_P \cdot R_s = V + R_s \cdot I \quad (10)$$

A partir destas relações, é definido a corrente que passa pelo diodo:

$$I = I_0 \cdot \left[ e^{\left( \frac{V + R_s \cdot I}{aV_t} \right)} - 1 \right] \quad (11)$$

onde  $I$  representa a corrente que passa pelo diodo,  $I_0$  é a corrente de saturação reversa,  $V$  é a tensão da célula fotovoltaica,  $a$  é o fator de idealidade,  $I$  é a corrente de saída,  $R_s$  representa as perdas internas e  $V_t$  é a tensão térmica.

A relação entre o fluxo de corrente elétrica e o potencial eletrostático através de uma junção  $pn$  depende de uma tensão característica chamada tensão térmica  $V_t$ . De acordo com Tabeling e Chen (2005) considerando uma temperatura ambiente de 300 K,  $V_t$  tem um valor aproximado de 25,85 mV para o silício, essa tensão  $V_t$  representa o quanto a distribuição espacial dos elétrons é afetada por um limite estabelecido em uma tensão fixa (KIRBY, 2010):

$$V_t = \frac{N_s k T}{q} \quad (12)$$



onde  $N_s$  corresponde ao número de células conectadas em série e  $q$  é a carga do elétron.

A partir das relações definidas anteriormente, obtém-se a relação que representa o modelo matemático do modelo de um diodo de um módulo fotovoltaico (SAUTHIER, 2019):

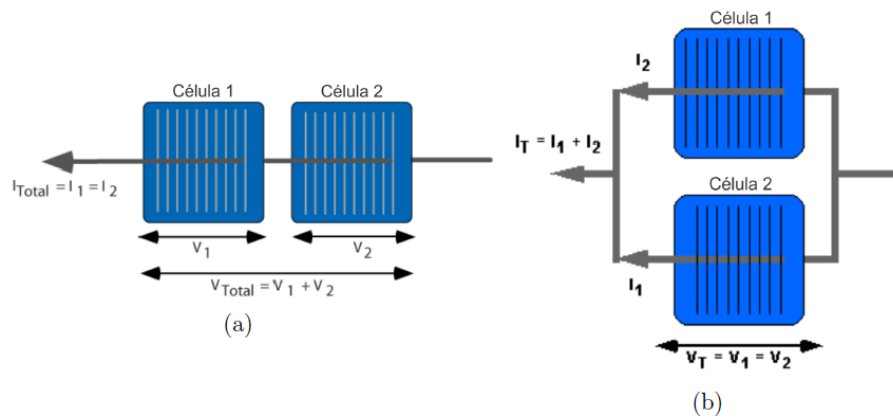
$$I = I_{ph} - I_0 \cdot \left[ e^{\left( \frac{V + R_s \cdot I}{aV_t} \right)} - 1 \right] - \left| \frac{(V + R_s \cdot I)}{R_{sh}} \right| \quad (13)$$

onde,  $I$  é a corrente total,  $I_{ph}$  é a corrente fotovoltaica,  $I_0$  é a corrente de saturação reversa do diodo,  $V$  é a tensão de saída aplicada ao dispositivo,  $R_s$  é a resistência série do dispositivo,  $a$  é um fator de idealidade,  $V_t$  é a tensão térmica,  $I_D$  é a corrente do diodo.

As células conectadas em série fornecem maiores tensões de saída, conforme Figura 28 (a), já o número de células conectadas em paralelo, conforme mostrado na Figura 28 (b), define maiores níveis de corrente que o painel fotovoltaico pode fornecer, se o painel é composto por conexões paralelas de  $N_p$  células, as correntes  $I_{pv}$  e  $I_0$  podem ser expressas como:

$$I_{pv} = I_{ph} \cdot N_p, \quad I_0 = I_0 \cdot N_p. \quad (14)$$

Figura 28: (a) Associação série. (b) Associação Paralelo.



Fonte: (SAUTHIER, 2019).

### 3.5. MODELO DA BATERIA ELÉTRICA

Por meio da revisão da literatura sobre sistemas de gerenciamento de energia, de acordo com Hubert (2023), observou-se que o utilizado é o bloco "*Battery*", disponível na biblioteca do *Matlab/Simulink*. No entanto, dado que o objetivo deste trabalho não é analisar transientes de tensão/corrente nem realizar análises detalhadas das características elétricas exclusivas da bateria, optou-se por utilizar o modelo "PQ". O modelo "PQ" é caracterizado como uma aproximação do modelo "*Battery*", e foi escolhido por atender às necessidades de simulação,

oferecendo resposta rápida e precisa.

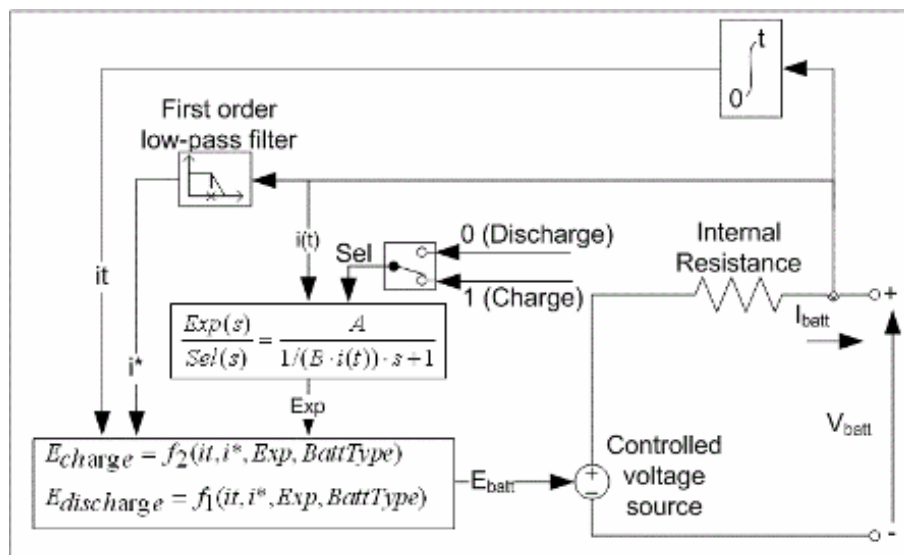
Conforme será evidenciado a seguir no modelo *Battery*, a variação da tensão em relação ao nível de carga (*SOC*) em uma bateria de íon de lítio não segue um padrão linear. No entanto, essa não linearidade ocorre nos extremos de *SOC*, permitindo uma aproximação linear do estado intermediário. Essa abordagem de utilizar a faixa "linear" não se trata apenas de simplificar o modelo *Battery* para facilitar o desenvolvimento da modelagem, mas também de aprimorar a longevidade da bateria. Isso ocorre porque os extremos mínimo e máximo de *SOC* são os principais causadores de estresse na bateria, comprometendo sua durabilidade.

Ao adotar o modelo "PQ", é possível obter resultados satisfatórios para o estudo do sistema de gerenciamento de energia proposto, sem a necessidade de uma abordagem mais complexa. Esse modelo permite uma simulação eficiente e confiável, garantindo a representação adequada das características elétricas relevantes para o escopo deste trabalho.

### 3.5.1. Modelo Battery

Na Figura 29 é apresentado o diagrama do modelo elétrico da bateria implementado no *Matlab/Simulink*. Este diagrama possui um resistor e uma fonte de tensão controlada. O resistor representa a resistência interna da bateria, enquanto a fonte de tensão controlada representa a tensão elétrica nos terminais da bateria.

Figura 29: Modelo Battery



Fonte: MathWorks (2023).

De acordo com Porciuncula et al. (2011), a equação matemática do modelo elétrico *Battery*, que descreve o decaimento da tensão elétrica de uma bateria em processo de descarga considerando uma bateria de íon lítio, é dada por:

$$f(it, i^*, i) = E_0 - K \frac{Q}{Q - it} i^* - K \frac{Q}{Q - it} it + A \exp(-Bit) \quad (15)$$

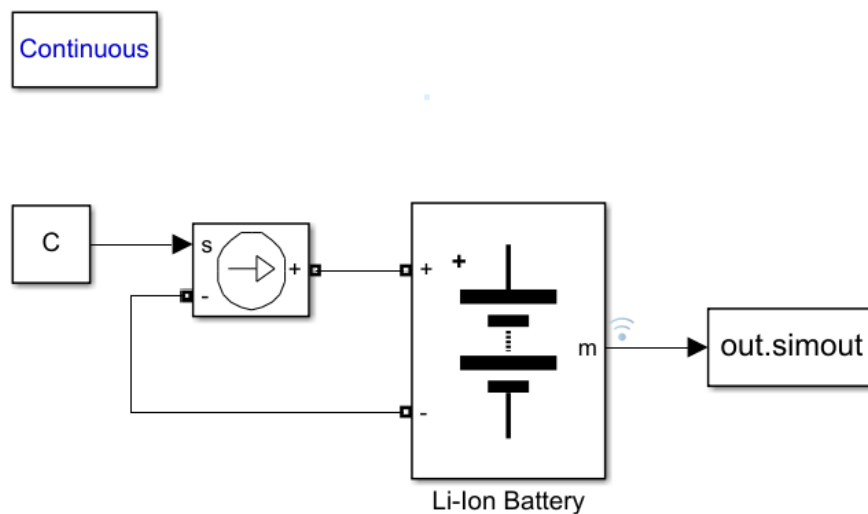
onde,  $E_0$  é a tensão inicial considerando a bateria totalmente carregada,  $K$  é a constante de polarização ou resistência de polarização,  $i$  é a corrente dinâmica em baixa frequência,  $it$  é a capacidade extraída,  $Q$  é a capacidade máxima da bateria,  $A$  é a tensão exponencial, e  $B$  é a capacidade exponencial.

Já para a carga, a equação considerada, de acordo com MathWorks (2023) é definida como:

$$f(it, i^*, i) = E_0 - K \frac{Q}{it + 0.1Q} i^* - K \frac{Q}{Q - it} it + A \exp(-Bit) \quad (16)$$

Após obtidas as equações do modelo da bateria e da carga, pode-se realizar a simulação do comportamento da bateria, usando o bloco *Battery* do *Simulink*, incluindo os parâmetros da mesma, obtidos no *datasheet* de cada fabricante (HUBERT, 2023). A Figura 30 representa o esquema para simulação de carga e descarga considerando uma bateria de íon lítio no *Simulink*:

Figura 30: Diagrama de blocos do modelo Battery



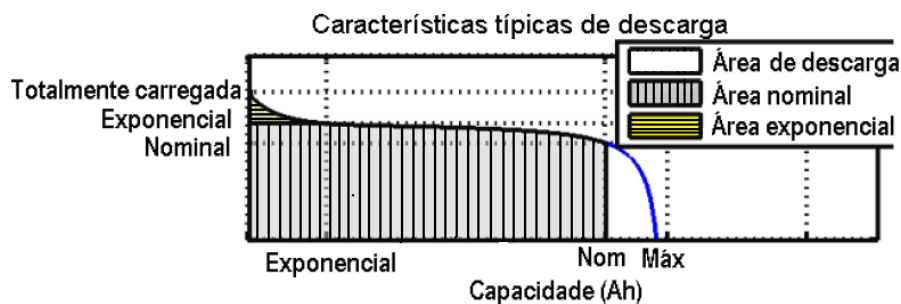
Fonte: (MATHWORKS, 2023).

A constante  $C$  da Figura 30 define a amplitude e o sentido da fonte de corrente contínua, responsável pelo carregamento ou descarregamento da bateria. Através de uma máscara, são definidos no modelo *Battery* o tipo de bateria e seus parâmetros. Os valores de tempo, *SOC*, tensão e corrente são obtidos na saída do modelo, na forma de uma matriz (*out.simout*).

Com base nesses dados, é possível traçar a curva de carga/descarga, analisando o *SOC* e a tensão interna. Além disso, a corrente e a tensão permitem calcular a potência ativa instantânea e, conseqüentemente, a energia solicitada/fornecida pela bateria.

Os parâmetros do modelo elétrico *Battery* são utilizados para representar um tipo específico de bateria, levando em consideração suas características de descarga. A curva característica de descarga é composta por três seções distintas, como ilustrado na Figura 31.

Figura 31: Curva característica de descarga da bateria



Fonte: (PORCIUNCULA et al., 2011).

A primeira seção da curva característica de descarga representa a diminuição exponencial da tensão quando a bateria está completamente carregada. A extensão dessa seção varia de acordo com o tipo de bateria. A segunda seção indica a quantidade de carga que pode ser extraída da bateria até que a tensão caia abaixo do limite de corte. Por fim, a terceira seção da curva característica representa a descarga completa da bateria, caracterizada por uma rápida diminuição da tensão. A fim de que o modelo elétrico *Battery* possa desempenhar sua função de simulação de descarga da bateria e, por conseguinte, prever seu estado de carga, são necessários os seguintes parâmetros:

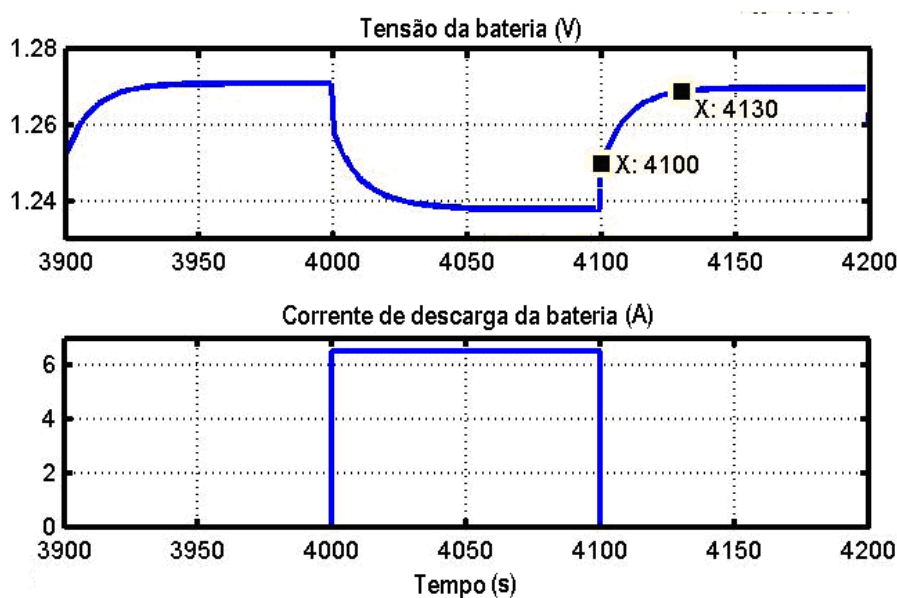
- Tipo de bateria: Essa informação é crucial, pois diferentes tecnologias de bateria, como íon-lítio, chumbo-ácido ou níquel-cádmio, possuem características de descarga distintas. O tipo de bateria determina as equações e parâmetros específicos a serem utilizados no modelo.
- Tensão de corte ( $V$ ): A tensão de corte representa o limite final da zona linear das características de descarga da bateria. Essa é a tensão em que a bateria é considerada completamente descarregada, é importante determinar esse valor com base nas especificações do fabricante da bateria para garantir precisão na simulação.
- Capacidade típica ( $Ah$ ): A capacidade típica refere-se à capacidade mínima efetiva da bateria, ou seja, a quantidade máxima de carga que a bateria pode armazenar e fornecer. Essa informação é fundamental para calibrar o modelo e realizar previsões precisas do tempo de vida útil da bateria.
- $SOC$  inicial (%): O  $SOC$  inicial representa o estado de carga inicial da bateria no momento em que a simulação é iniciada. Esse parâmetro é expresso em porcentagem, onde 100%

indica que a bateria está completamente carregada, e 0% indica que a bateria está sem carga. O SOC inicial é usado como condição inicial para a simulação, permitindo modelar a descarga da bateria a partir desse ponto.

- Capacidade máxima ( $Ah$ ): É a capacidade máxima da bateria, geralmente denotada como  $Q$ , na qual ocorre uma descontinuidade na tensão.
- Tensão com bateria carregada ( $V$ ): Representa a tensão da bateria quando está totalmente carregada e está sujeita a uma determinada corrente de descarga. É importante ressaltar que essa tensão não é a tensão quando a bateria está desconectada de qualquer sistema externo.
- Corrente nominal de descarga ( $A$ ): É a corrente de descarga à qual a bateria é submetida para obter uma curva característica de descarga.
- Resistência interna ( $Ohms$ ): Representa a resistência interna da bateria. Esse valor permanece constante durante a simulação e não varia com a amplitude da corrente elétrica. De acordo com MathWorks (2023) uma opção para esse parâmetro é utilizar um valor genérico correspondente a 1% do produto da tensão de corte pela capacidade típica da bateria.
- Capacidade na tensão de corte ( $Ah$ ): É a capacidade extraída da bateria até que sua tensão atinja o valor de tensão de corte.
- Zona exponencial (tensão, capacidade): Refere-se à região exponencial da curva característica de descarga da bateria. A tensão deve estar compreendida entre a tensão de corte e a tensão com a bateria carregada, enquanto a capacidade deve estar entre zero e a capacidade nominal da bateria.
- Unidade: Durante a simulação, é necessário definir a unidade do eixo x, que pode ser em segundos ( $s$ ) ou em *Ampère-hora* ( $Ah$ ), dependendo da conveniência e dos requisitos específicos da aplicação.
- Tempo de resposta da bateria ( $s$ ): Esse valor representa a dinâmica da tensão da bateria e pode ser observado em casos de corrente de descarga do tipo degrau.

Ao fornecer e configurar esses parâmetros corretamente, o modelo elétrico *Battery* será capaz de realizar simulações precisas de descarga da bateria e prever seu tempo de descarga com maior precisão. O tempo de resposta da bateria, pode ser visualizada como uma variação na tensão ao longo do tempo, conforme a Figura 32.

Figura 32: Tempo de resposta da bateria



Fonte: (PORCIUNCULA et al., 2011).

Ao submeter uma bateria a um degrau de corrente, é importante destacar que a queda de tensão não ocorre instantaneamente, mas sim de forma exponencial ao longo do tempo. Esse comportamento exponencial da tensão pode ser observado no instante de 4000 s, onde a tensão da bateria começa a decair de forma gradual. Esse decaimento exponencial da tensão é influenciado por fatores como a capacidade da bateria, a corrente de descarga e outras características específicas.

No momento de 4100 s, ocorre um aumento exponencial na tensão da bateria, conhecido como efeito de recuperação. Esse efeito não-linear é um fenômeno importante a ser considerado durante a simulação, uma vez que afeta o comportamento da bateria. O aumento exponencial na tensão dura cerca de 30 s, após os quais a tensão se estabiliza.

É fundamental levar em conta esse efeito de recuperação ao modelar o comportamento da bateria, pois ele pode ter um impacto significativo nas previsões de vida útil da bateria e no desempenho geral do sistema de energia. A consideração desse aumento exponencial na tensão e sua duração são essenciais para uma simulação precisa da descarga da bateria.

No entanto, é importante ressaltar que essa recuperação do nível da tensão não implica necessariamente que a carga (energia) da bateria será recuperada ao mesmo nível anterior. Outros fatores, como eficiência de carga e descarga, perdas internas e degradação ao longo do tempo, também influenciam a capacidade real da bateria de reter e fornecer energia. Portanto, é necessário considerar uma abordagem abrangente e realista ao avaliar o desempenho e a vida útil da bateria.

### 3.5.2. Modelo PQ

Existem, predominantemente, duas formas principais de degradação da bateria que resultam em perda de vida útil, de acordo com Woody et al. (2020), essas formas são a diminuição da capacidade e redução da potência. A diminuição da capacidade ocorre quando a bateria diminui de forma gradual a quantidade de energia que é capaz de armazenar. Isso significa que a capacidade nominal da bateria, reduz ao longo do tempo. Essa perda de capacidade afeta de forma direta a quantidade de energia disponível para uso e impõe limites a autonomia do dispositivo ou do sistema conectado a bateria, sendo um indicador importante da deterioração da bateria ao longo do tempo.

Por outro lado, a redução de potência está relacionada à capacidade da bateria de fornecer energia de forma eficiente, ao longo do tempo a resistência interna da bateria aumenta devido a esses fatores, como por exemplo o envelhecimento dos materiais e a formação de depósitos indesejados. Essa maior resistência interna resulta em uma diminuição da quantidade de potência que a bateria pode fornecer. Como resultado, a capacidade da bateria de atender às demandas de energia de forma rápida e eficaz é reduzida (WOODY et al., 2020).

Ambas as formas de degradação são preocupantes, pois limitam a vida útil e o desempenho geral da bateria. Compreender e monitorar a perda de capacidade e a perda de potência ao longo do tempo é essencial para o gerenciamento adequado das baterias, tanto em aplicações portáteis quanto estacionárias, garantindo assim um uso mais eficiente e prolongado desses dispositivos de armazenamento de energia.

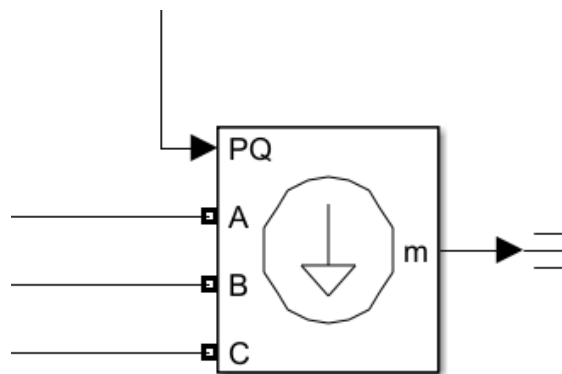
De acordo com estudos conduzidos por Woody et al. (2020) e Kabir e Demirocak (2017), a degradação das baterias elétricas de íon-lítio é influenciada por diversas variáveis, sendo estas: a variação de temperatura, amplitude da corrente de carga/descarga e o perfil do *SOC* no tempo. Entre essas variáveis, a amplitude da corrente e o nível de *SOC* podem ser controlados diretamente no modelo de carregamento, por meio da definição da corrente ideal de carga da bateria e estabelecendo limites máximos e mínimos de *SOC*.

A amplitude da corrente de carga/descarga desempenha um papel importante na degradação da bateria. Correntes elevadas aumentam o estresse interno da bateria, acelerando a degradação. Portanto, ao definir a corrente ideal de carga da bateria, é possível limitar a amplitude da corrente a um valor que minimize o impacto negativo na vida útil da mesma. Ao considerar essas variáveis controláveis durante o processo de carregamento da bateria, é possível implementar estratégias de gerenciamento adequadas que minimizem a degradação e otimizem o desempenho da bateria. Essas medidas preventivas contribuem para preservar a integridade

da bateria ao longo do tempo, maximizando sua vida útil e a eficiência do sistema como um todo.

Assim, o modelo PQ é uma parte linear do modelo *Battery* apresentado anteriormente. Ele recebe esse nome porque, ao conhecermos a corrente de carga/descarga da bateria, podemos facilmente obter os valores de potência ativa ( $P$ ) e potência reativa ( $Q$ ) demandadas ou fornecidas pela bateria. A modelagem é realizada tratando a relação entre tensão e *SOC* como linear, utilizando o bloco *three-phase-load* disponível no Simulink, representado na Figura 33.

Figura 33: Bloco *three-phase-load*



Fonte: Adaptado de (HUBERT, 2023).

### 3.6. DEMANDA RESIDENCIAL

Para caracterizar a demanda residencial, foram utilizados dados de medição das fases de entrada da unidade consumidora localizada no Município de Ijuí, RS, CEP 98.700-000. Essa residência foi selecionada devido à alta carga instalada (superior a 25 kW), conforme indicado na Tabela 1, o que justifica o fornecimento trifásico e a instalação de um sistema de geração fotovoltaica com o objetivo de reduzir os custos.

Tabela 1: Tabela de cargas da residência

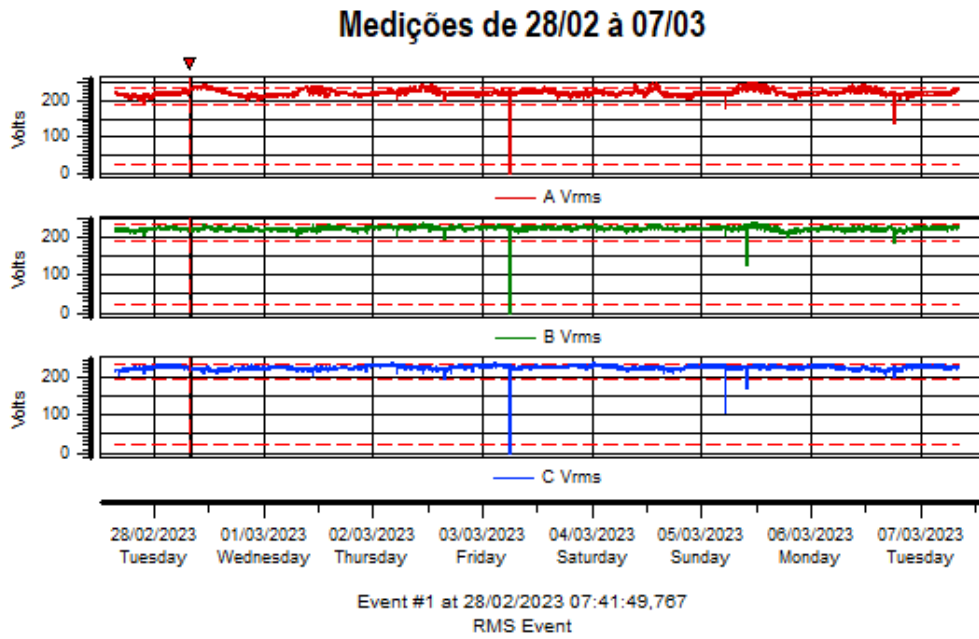
Descrição	Quantidade	Potência Unitária (W)	Potência Total (W)
Chuveiro	2	7000	14000
Torneira elétrica	1	6000	6000
Ar condicionado 12k BTUs	3	1200	3600
Televisores	2	200	400
Computadores	2	400	800
Bomba piscina 1/2 hp	1	380	380

Fonte: (HUBERT, 2023).



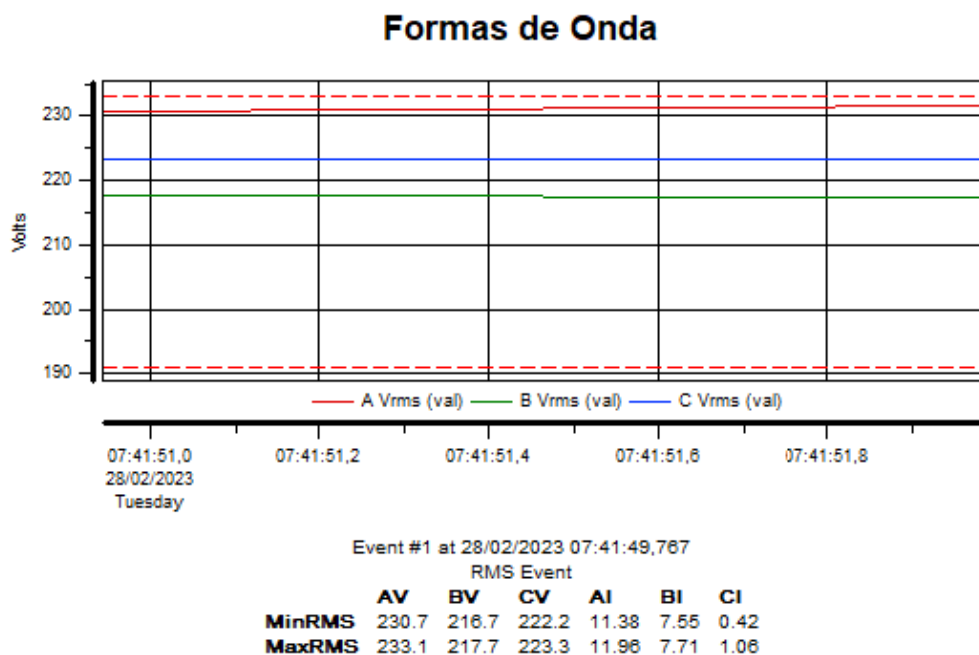
A medição da demanda da residência foi realizada usando um medidor de grandezas elétricas, o Dranetz HDPQ 1, que é capaz de medir corrente, tensão de fase, potência ativa (P) e outras grandezas elétricas. Dessa forma, a demanda total foi obtida somando as demandas das fases e descontando a geração fotovoltaica, que está conectada à fase A da residência, na Figura 34 e Figura 35, respectivamente pode ser observado os dados obtidos pelo medidor:

Figura 34: Demanda por fase da residência



Fonte: Dranetz HDPQ 1, 2023.

Figura 35: Formas de Onda por fase da residência



Fonte: Dranetz HDPQ 1, 2023.

A partir destas medições, foram extraídos os dados de demanda da residência utilizada nas simulações, sendo está calculada reduzindo a geração fotovoltaica, que foi descrita na seção subsequente, da demanda total da residência.

### 3.7. GERAÇÃO FOTOVOLTAICA

A potência ativa do sistema fotovoltaico instalado na residência mencionada, composto por 26 painéis *Canadian Solar*, modelo CS1U, de 400Wp cada, é uma potência instalada total de 10,4 kWp. Para converter a geração fotovoltaica, é utilizado um inversor Fronius Primo 8.2-1, com potência nominal de 8,2 kW.

Na Tabela 2 estão os parâmetros do módulo fotovoltaico obtidos no *datasheet* do fabricante:

Tabela 2: Parâmetros do painel fotovoltaico CS1U-400

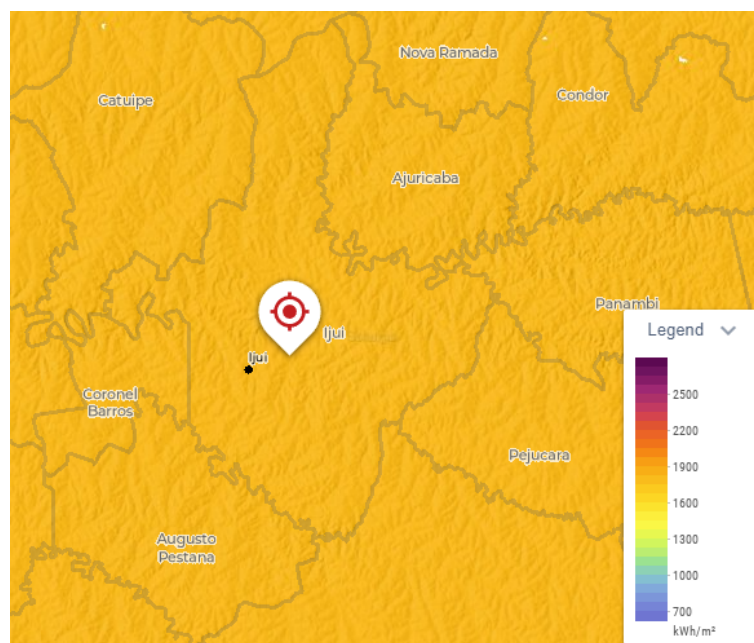
Parâmetro	STC	NMOT
$P_{max}$ (W)	400	296
$V_{mp}$ (V)	44,10	40,80
$I_{mp}$ (A)	9,08	7,26
$V_{oc}$ (V)	53,40	49,90
$I_{sc}$ (A)	9,60	7,75
$K_p$ (W/°C)	-0,37	-
$K_v$ (V/°C)	-0,29	-
$K_i$ (A/°C)	0,05	-

Fonte: *Canadian Solar* (2020).

onde  $P_{max}$  se refere a potência nominal máxima do módulo,  $V_{mp}$  é a tensão de operação,  $I_{mp}$  é a corrente de operação,  $V_{oc}$  é a tensão de circuito aberto,  $I_{sc}$  é a corrente de curto circuito,  $K_p$ ,  $K_v$  e  $K_i$  são coeficientes de temperatura de  $P_{max}$ ,  $V_{oc}$  e  $I_{sc}$  respectivamente.

Os dados de irradiação e temperatura foram coletados por meio de uma estação meteorológica instalada na sede acadêmica da UNIJUÍ. Essa estação está equipada com um piranômetro SR15-D2A2, um dispositivo especializado capaz de medir a radiação solar hemisférica, incluindo componentes diretas, difusas e refletidas. Portanto, foram utilizados para fins de simulação os dados de irradiação mostrados na Figura 36 para o município de Ijuí:

Figura 36: Irradiação média diária em Ijuí - RS



Fonte: (Solargis, 2022).

### 3.8. BATERIA ESTACIONÁRIA

O dimensionamento de um banco de baterias para uma instalação residencial envolve vários fatores, como a demanda de energia da residência, a capacidade de armazenamento desejada, a fonte de energia, a duração esperada da autonomia da bateria e a tensão do sistema.

- Determinar a demanda de energia: Deve-se analisar o consumo médio diário de energia em quilowatt-hora (kWh). Estes dados podem ser obtidos através das contas de energia elétrica ou por meio de dispositivos de medição;
- Estabelecer a autonomia desejada: Deve-se analisar por quanto tempo deseja-se que as baterias forneçam energia quando não houver fonte de energia disponível.
- Capacidade de armazenamento: Para determinar a capacidade do banco de baterias deve-se multiplicar a demanda de energia diária pelo número de dias de autonomia desejada.
- Eficiência do sistema: Deve-se considerar a eficiência do sistema de armazenamento de energia ao calcular a capacidade necessária do banco de baterias. As baterias geralmente tem um percentual de perdas, portanto, pode-ser necessário aumentar a capacidade para compensar as perdas.
- Tensão do sistema: Deve-se levar em consideração a tensão do sistema elétrico em que o banco de baterias será conectado. A tensão do sistema ajudará a determinar o número de

baterias em série ou em paralelo necessárias para atingir a capacidade desejada.

É importante ressaltar que o cálculo do banco de baterias é um processo complexo e pode envolver outros fatores, como a taxa de descarga das baterias, a temperatura ambiente, a vida útil esperada das baterias e outros requisitos específicos do sistema. É recomendado buscar a orientação de um profissional especializado em sistemas de armazenamento de energia ou energia solar para obter um dimensionamento adequado e preciso do banco de baterias (ABUBAKAR, 2020).

Para fins de simulação está sendo considerada a bateria de Lítio PHB, modelo LX U5.4-L fornecidas pela PHB Solar (2023). No entanto, é importante ressaltar que esse modelo permite a conexão de até seis baterias em paralelo, o que possibilita aumentar a autonomia do sistema. As características técnicas dessa bateria podem ser visualizadas na Tabela 3 abaixo, onde são apresentados dados como capacidade de armazenamento de energia, potência nominal, tensão de operação, entre outros. Essas informações são relevantes para o correto dimensionamento e configuração do sistema de armazenamento de energia durante as simulações.

Tabela 3: Dados técnicos da bateria LX U5.4-L

Modelo	LX U54-L
Tensão nominal	51.2 Vcc
Energia nominal	54 kWh
Energia útil	486 kWh
Paralelismo	Até 6 baterias
Corrente máx. de carga/descarga	50 A
Potência máx. de saída	2.88 kW
Peso	57 kg
Dimensões (CxLxA)	505 X 175 X 570 mm
Comunicação	CAN/RS485
Painel	Led indicador de SOC e falhas
Temperatura de operação	Carga: $0 < T < 50^{\circ}\text{C}$ / Descarga: $-10 < T < 50^{\circ}\text{C}$
Umidade	95%

Fonte: PHB Solar, (2023).

### 3.9. SISTEMA DE GERENCIAMENTO DE ENERGIA

Até o momento, foram reunidos os dados e os modelos matemáticos que descrevem os sistemas elétricos de uma unidade consumidora com geração distribuída e da bateria elétrica, os quais são capazes de realizar trocas bidirecionais de energia com a rede da distribuidora.

Esses componentes constituem uma unidade consumidora sem nenhum controle de demanda, o que significa que o fluxo de potência é determinado pela conexão das cargas, independentemente do horário tarifário ou de qualquer outra definição. Esse tipo de sistema é conhecido como "não controlado".

No entanto, um sistema sem controle de demanda pode acarretar prejuízos tanto para o consumidor, na forma de aumento de custos, quanto para a rede elétrica, devido aos picos de demanda, como discutido em capítulos anteriores.

Portanto, é necessário caracterizar e definir o *Energy Management Systems* - Sistema de Gerenciamento de Energia (EMS) do tipo "controlado" com o objetivo de resolver ou mitigar esses problemas. O sistema de gerenciamento de energia controlado é projetado com o objetivo de otimizar o sistema e reduzir o pico de demanda de potência na rede elétrica. Nesse contexto, serão levadas em consideração as características de cada modelo matemático dos subsistemas elétricos previamente definidos neste capítulo, a fim de estabelecer restrições relevantes para o sistema.

### 3.9.1. EMS Controlado

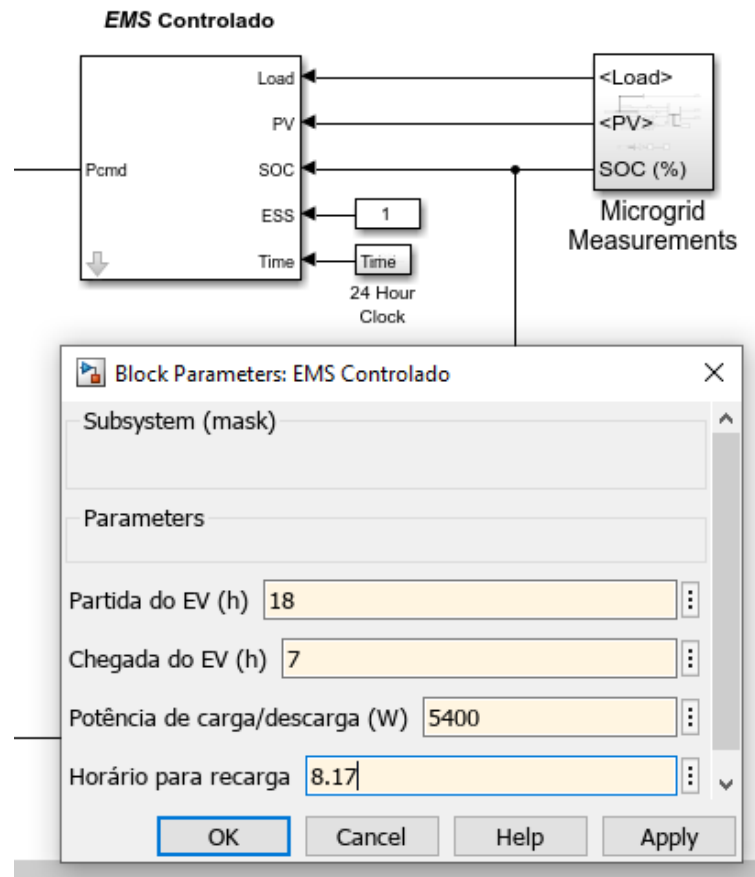
O sistema de gerenciamento de energia do tipo "controlado" é utilizado levando em consideração a redução do pico de potência na rede. Para isso, serão utilizadas as características de cada modelo matemático dos subsistemas elétricos mencionados neste capítulo para estabelecer algumas restrições. Portanto, as seguintes restrições são consideradas:

- Restrição do SOC: com o objetivo de preservar a vida útil da bateria, estabelece-se que o SOC deve estar dentro da faixa de 20% a 90%.
- Restrição de potência de carga/descarga: Com base no *datasheet* da bateria a potência nominal de 5,4 kW é definida.

Existem dois estados possíveis para a bateria: indisponível e disponível. O estado indisponível ocorre quando a bateria está sendo recarregada, seja via rede ou utilizando a geração fotovoltaica da residência. O estado disponível é quando a bateria está sendo utilizada para suprir a demanda da residência nos horários em que a pouca ou nenhuma geração fotovoltaica.

Após definido as restrições de funcionamento da bateria e os tipos de carregamento, pode-se definir a operação do EMS controlado: os horários de uso da bateria na unidade consumidora é definido pelo usuário, através de uma máscara criada no modelo controlado conforme pode ser visto na Figura 37.

Figura 37: EMS Controlado: definição de parâmetros



Fonte: Adaptado de (HUBERT, 2023).

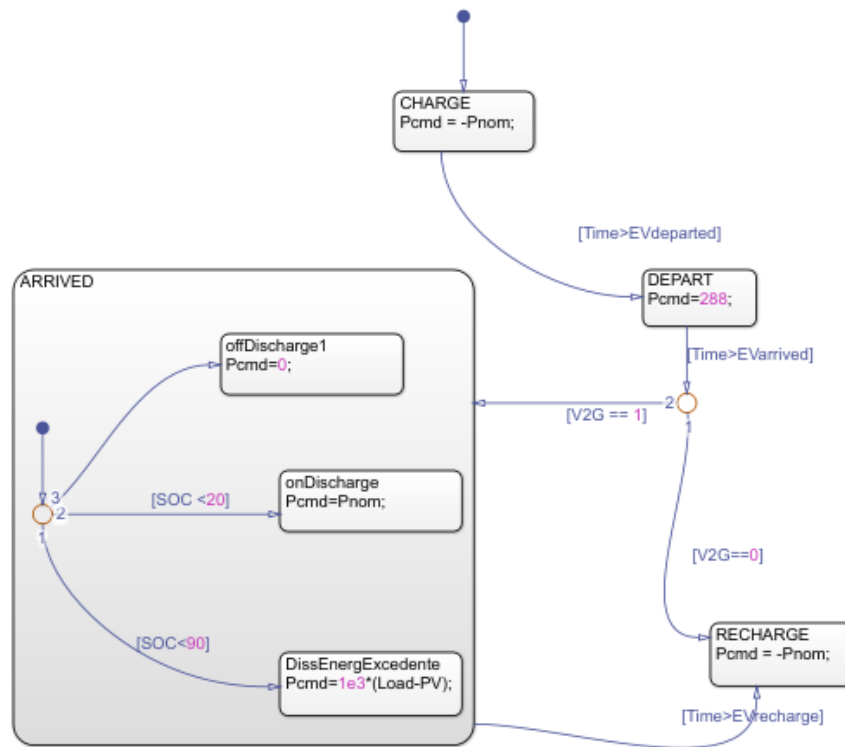
Dessa forma, é possível criar o fluxograma apresentado na Figura 38, que permite uma visualização clara da lógica de funcionamento do EMS controlado. O fluxograma representa a sequência de etapas e decisões que o EMS segue para otimizar o desempenho do sistema elétrico, levando em consideração as restrições estabelecidas.

Essa representação gráfica facilita a compreensão do fluxo de controle e das interações entre os diferentes componentes do sistema, auxiliando no desenvolvimento e na análise do EMS controlado.

Essa abordagem facilita o controle supervisionado, permitindo a definição de um cronograma para o sistema. O diagrama é baseado em medições instantâneas de tempo, potência da geração fotovoltaica (PV), estado de carga (SOC) da bateria e carga do sistema.

No fluxo de estados a bateria inicia no estado CHARGE, partindo com SOC inicial de acordo com o valor definido pelo usuário, carregando sua bateria em potência nominal até atingir o limite de SOC máximo definido em 90%. Na sequência, tem-se o estado DEPART, em que a bateria não está sendo utilizada, portanto, considera-se uma potência de descarga de 288W, simulando o uso da bateria. Descarregando cerca de 20% do SOC.

Figura 38: EMS Controlado: Fluxograma



Fonte: Elaborado pela autora.

Portanto, no Sistema de Gerenciamento de Energia (EMS) controlado, é estabelecido o cronograma de disponibilidade da bateria na unidade consumidora, os valores mínimo e máximo do estado de carga (SOC) da bateria e a potência de carga/descarga. Essas definições podem variar de acordo com o modelo da bateria.

### 3.10. RESUMO DO CAPÍTULO

O capítulo 3 apresenta a metodologia proposta para analisar e gerenciar o fluxo de potência em uma residência monofamiliar com a inserção de um sistema de armazenamento de energia (SAE) em conjunto com uma instalação fotovoltaica existente. Inicialmente, são discutidos os modelos utilizados para analisar o desempenho do sistema de armazenamento e da instalação fotovoltaica.

Em seguida, o capítulo aborda a formulação do problema, destacando o perfil de consumo de energia da residência. Apesar dos benefícios da geração fotovoltaica, o potencial dos sistemas conectados à rede é limitado pela disponibilidade solar, não atendendo à demanda nos horários de ponta. Nesse sentido, o armazenamento de energia surge como uma alternativa para mitigar os problemas nos horários de pico, permitindo o uso da energia excedente nos momentos de

baixa geração solar.

A arquitetura proposta é apresentada através de um diagrama de blocos, no qual são identificadas as etapas da metodologia. A primeira etapa é verificar as condições de carregamento da bateria, garantindo que ela opere dentro de uma faixa de carga segura. A etapa seguinte busca o deslocamento da energia armazenada nos períodos de alta geração solar para os horários de maior consumo. O fluxo de potência é analisado em cada etapa, verificando variáveis elétricas como potência, tensão e frequência do sistema de distribuição.

O estudo também apresenta o de um diodo da célula fotovoltaica, que representa a não-linearidade do efeito fotovoltaico. Esse modelo é utilizado para simular a geração de energia fotovoltaica e considera resistências intrínsecas e a corrente característica do diodo. O circuito equivalente desse modelo é apresentado, permitindo a análise das correntes e tensões envolvidas.

Por fim, é discutido o modelo da bateria elétrica, onde é utilizado o modelo "PQ" como uma aproximação do modelo "Battery" disponível na biblioteca do *Matlab/Simulink*. Esse modelo permite uma resposta rápida e precisa, considerando a variação da tensão em relação ao nível de carga da bateria.

O capítulo 3 fornece uma visão geral da metodologia proposta para analisar e gerenciar o fluxo de potência, incluindo a modelagem do sistema de armazenamento e da geração fotovoltaica, além de abordar a importância do armazenamento de energia para otimizar o aproveitamento dos sistemas fotovoltaicos e suprir a demanda nos horários de ponta.



## 4. RESULTADOS

Neste capítulo, são apresentadas as simulações realizadas e os resultados obtidos a partir da aplicação do sistema de gerenciamento de energia elétrica em uma residência com geração distribuída fotovoltaica e um sistema de armazenamento de energia.

### 4.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Uma residência com sistema fotovoltaico e bateria é uma solução comum para maximizar o uso de energia solar e reduzir a dependência da rede elétrica convencional.

O funcionamento desse sistema é geralmente organizado da seguinte maneira:

- **Painéis Fotovoltaicos:** A residência é equipada com painéis solares fotovoltaicos instalados no telhado. Esses painéis convertem a luz solar em eletricidade de corrente contínua.
- **Inversor Solar:** A eletricidade gerada pelos painéis solares em corrente contínua precisa ser convertida em corrente alternada.
- **Consumo Diurno:** Durante o dia, a energia gerada pelos painéis fotovoltaicos é usada diretamente para alimentar as cargas elétricas da residência. Isso inclui eletrodomésticos, iluminação, eletrônicos e outros dispositivos elétricos.
- **Carregamento da Bateria:** Quando a produção de energia solar excede o consumo imediato da residência, o excesso de eletricidade é direcionado para carregar as baterias do sistema. As baterias utilizadas neste caso são de íon-lítio, pois são eficientes e têm uma boa capacidade de armazenamento.
- **Uso Noturno:** Durante a noite, quando a produção de energia solar é menor ou inexistente, a eletricidade armazenada nas baterias é usada para alimentar as cargas elétricas da residência. Dessa forma, a energia solar captada durante o dia é aproveitada para suprir as necessidades noturnas.
- **Injeção na Rede Elétrica:** Se a produção de energia solar exceder a capacidade de armazenamento das baterias, o sistema é configurado para injetar o excesso de eletricidade na rede elétrica convencional. Isso permite que a residência receba créditos ou compensações pela energia excedente fornecida à rede. Esses créditos podem ser utilizados quando a demanda de energia é maior do que a produção solar.

- **Compra de Energia da Rede:** Quando a produção solar é insuficiente para suprir a demanda da residência durante a noite ou em períodos de baixa produção, a eletricidade necessária é adquirida da rede elétrica convencional. Nesses casos, o sistema funciona como uma conexão tradicional à rede, garantindo o fornecimento contínuo de energia.

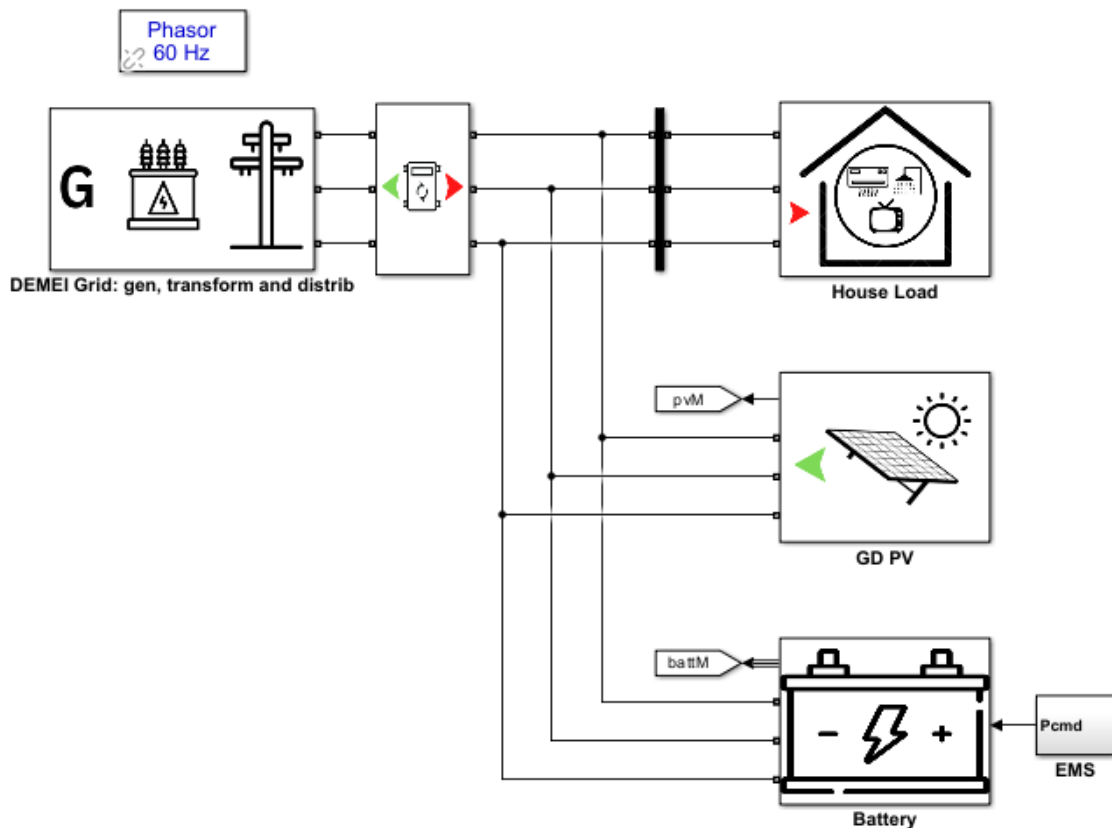
Esse tipo de sistema, com painéis solares, baterias e a possibilidade de injeção na rede elétrica, permite uma maior independência energética e reduz os custos com eletricidade, além de contribuir para a redução de emissões de carbono ao utilizar uma fonte de energia renovável.

É importante ressaltar que a configuração e o dimensionamento específico do sistema podem variar de acordo com as necessidades e características de cada residência.

Para realização das simulações, foram integrados os modelos previamente descritos nos capítulos anteriores em um modelo completo no *Matlab/Simulink*. É importante salientar que foram considerados todos os modelos ideais.

O diagrama completo do sistema que representa todas as etapas e componentes envolvidos, é apresentado na Figura 39.

Figura 39: Modelo completo desenvolvido em *Matlab/Simulink*

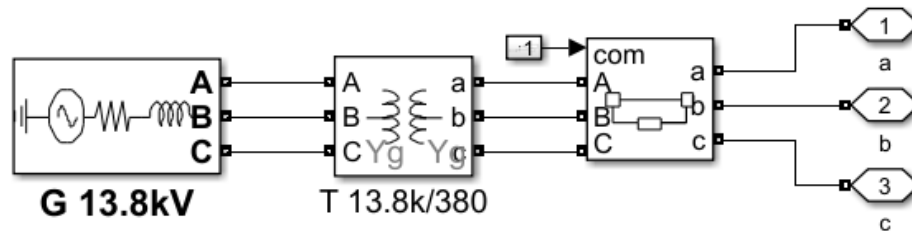


Fonte: Adaptado de (HUBERT, 2023).

Na Figura 39, no bloco *DEMEI Grid* tem-se a caracterização do sistema de distribuição de energia elétrica do DEMEI, para os padrões de tensão de 13,8 kV/380 V, conforme pode ser

visto na Figura 40:

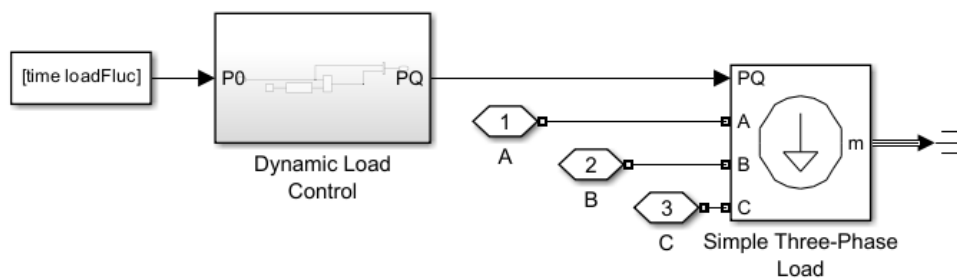
Figura 40: Padrões de Tensão DEMEI



Fonte: Adaptado de (LESAGE, 2023).

Na sequência, em *House Load*, tem-se a curva da demanda da unidade consumidora caracterizada na Figura 41, interligada ao modelo através do bloco *Three Phase Load*, apresentado anteriormente na Figura 33.

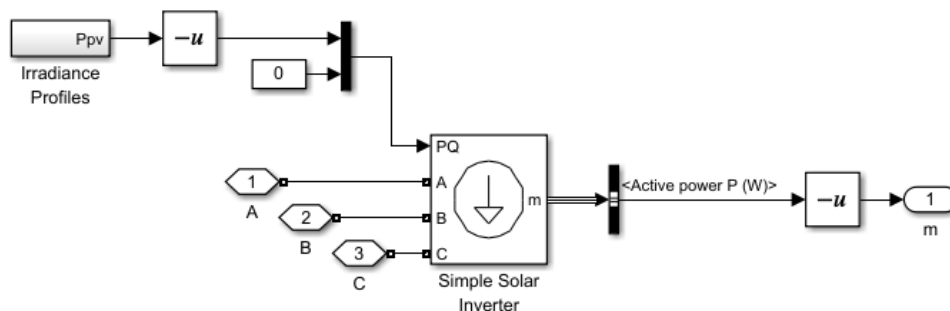
Figura 41: Modelo para geração da demanda da UC



Fonte: Adaptado de (LESAGE, 2023).

Em GD PV da Figura 39, tem-se o resultado do modelo de um diodo da geração fotovoltaica o qual recebe os dados de irradiação e temperatura que pode ser visto na Figura 42:

Figura 42: Modelo de um diodo para temperatura e irradiação

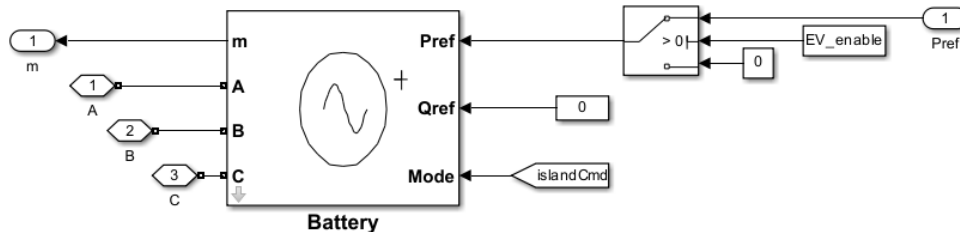


Fonte: Adaptado de (LESAGE, 2023).

Por fim, em *Battery*, tem-se a bateria de lítio estacionária, controlada pelo bloco EMS.

No bloco *Battery* são configurados as especificações da bateria, conforme pode ser visto na Figura 43:

Figura 43: Modelo da bateria



Fonte: Adaptado de (LESAGE, 2023).

Portanto, está completo o ambiente de simulação, abrangido pela rede de distribuição (DEMEI) e pela residência, composta pelas cargas, geração solar fotovoltaica e o SAE, controlado pelo EMS.

## 4.2. DEFINIÇÃO DOS CENÁRIOS DE SIMULAÇÃO

A definição dos cenários foi realizada afim de possibilitar a comparação e análise da inclusão de um SAE à carga residencial para entender o comportamento do sistema com essa integração. Portanto, para realizar as simulações, faz-se a inclusão progressiva das tecnologias disponíveis, definindo-se os cenários conforme segue:

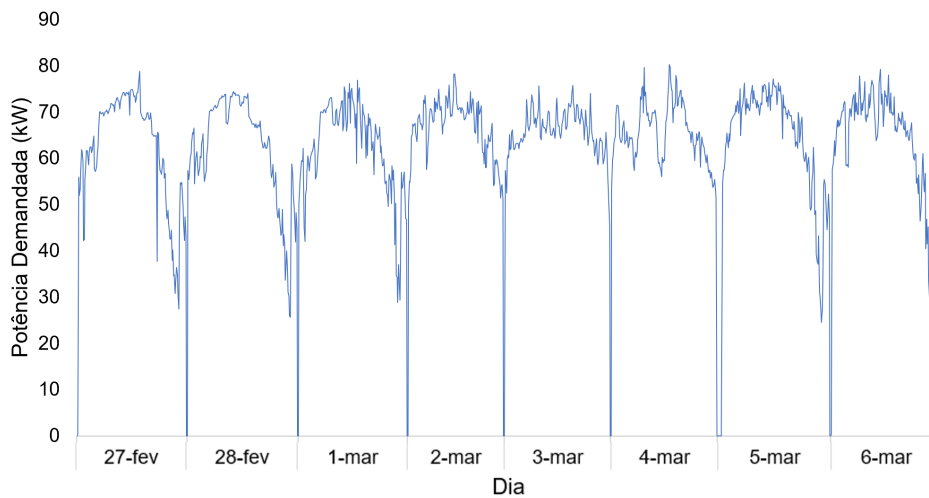
### 4.2.1. Cenário 0 - Análise da situação atual da residência

Neste cenário, será analisado a situação atual da residência em termos de demanda de energia, onde a ideia é compreender a carga elétrica atual da residência, sem a inclusão de outras fontes geradoras ou armazenadoras de energia.

Para isso, foram coletados dados sobre o consumo de energia ao longo de oito dias, de acordo com a metodologia citada no item 3.6 do capítulo anterior, os dados obtidos fase a fase foram convertidos para dados trifásicos.

A partir da Figura 44 pode-se observar que se trata de uma UC com alto consumo de energia elétrica. É importante ressaltar que esse tipo de UC, que possui um consumo significativo de energia elétrica, provavelmente será uma das primeiras a adotar tecnologias como o uso de sistemas de armazenamento de energia, carros elétricos, assim como já adotou a geração distribuída de energia. Com a implementação dessas tecnologias, é esperado um aumento ainda maior na demanda de energia elétrica.

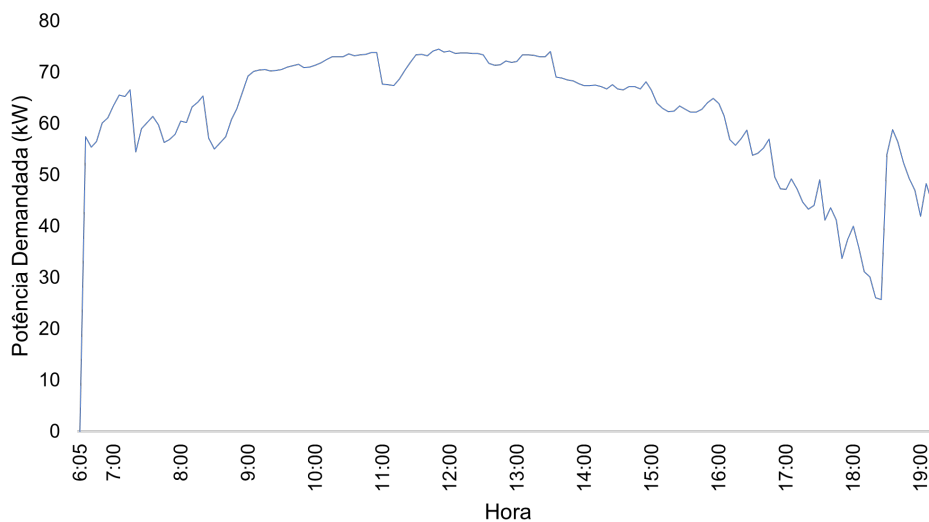
Figura 44: Potência Demandada (kW) entre os dias 28/02/23 e 06/03/23.



Fonte: Elaborada pela autora.

Portanto, é fundamental compreender e gerenciar de forma adequada o consumo de energia elétrica, a fim de garantir que as necessidades dos usuários sejam atendidas sem comprometer o fornecimento de energia e a qualidade de vida dos moradores da região. Na Figura 45 pode ser visto a potência demandada na residência ao longo do dia 28/02/2023:

Figura 45: Potência Demandada (kW) no dia 28/02/23.



Fonte: Elaborada pela autora.

Na Figura 45 pode se observar a demanda da residência em um único dia, tendo uma média de consumo de 62,61 kWh.

Nesse cenário, são apresentados os valores de demanda para a residência considerando apenas sua carga instalada, servindo como referência para a análise da inclusão de um SAE na residencial, realizada no cenário 1.

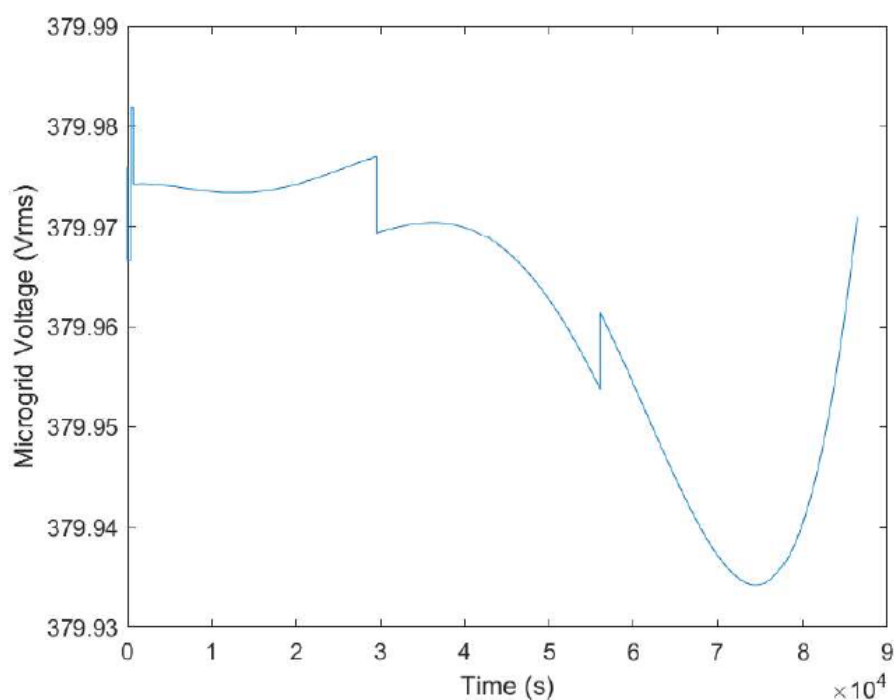
#### 4.2.2. Cenário 1 - Inclusão do SAE no sistema

Neste cenário, é considerada a inclusão de um SAE no sistema, onde ficou definido os horários onde este sistema irá apenas recarregar a partir da rede, ou seja das 08:00h da manhã as 17:00h da tarde. Lembrando que neste cenário ainda não está sendo considerado a geração Produção Fotovoltaica (PV) da residência.

Ao observar a Figura 46, também é possível notar que, assim que a bateria é inserida no sistema e entra no estado de carga, há um aumento no uso da rede elétrica. Isso indica que, durante o processo de carregamento da bateria, a demanda por energia da rede aumentou, permitindo que a energia necessária para carregar a bateria fosse fornecida pela rede.

Como estado de carga inicial, definiu-se  $SOC_{inicial} = 20\%$ , considerando que inicialmente a bateria estava descarregada. A partir deste ponto inicial, é realizado o carregamento da bateria até atingir o limite de  $SOC_{max} = 90\%$ . No entanto, ao analisar a Figura 47, é possível observar que o carregamento foi interrompido em 90%, conforme o limite máximo estabelecido previamente.

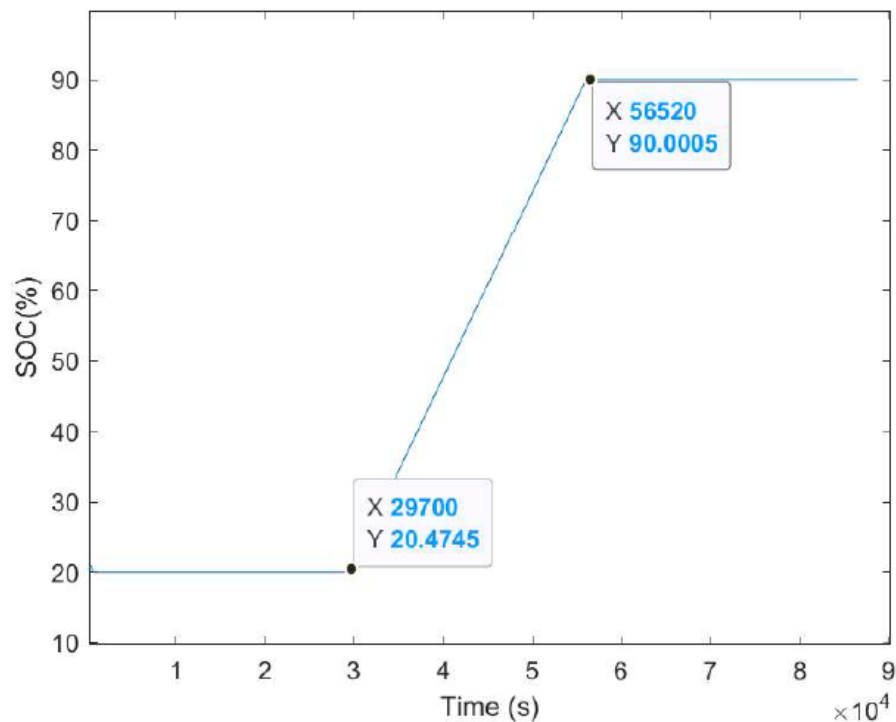
Figura 46: Resultado do cenário 1: dia 28/02/23.



Fonte: Elaborada pela autora.

Analisando as Figuras 46 e 47 é possível perceber um pico na rede no instante em que a bateria começa carregar, e também no instante em que a bateria atinge o SOC máximo de 90%, e a partir desse ponto ocorre uma queda no consumo da rede, momento em que a energia da bateria é utilizada na residência.

Figura 47: Resultado do cenário 1: SOC(%) da Bateria.



Fonte: Elaborada pela autora.

#### 4.2.3. Cenário 2 - Inclusão do SAE no sistema + Geração PV

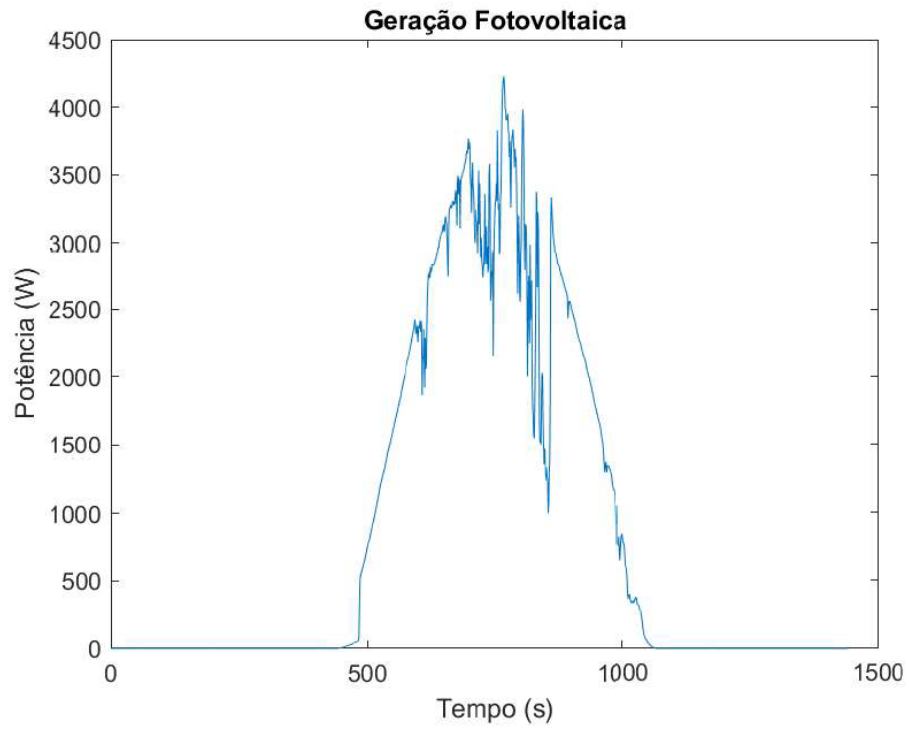
Neste cenário, é considerada a inclusão de um SAE no sistema juntamente com o sistema fotovoltaico. Foi definido que o sistema fotovoltaico será responsável pelo carregamento da bateria do SAE durante determinados horários, das 11:00h às 14:00h, que foi considerado o horário de maior geração do sistema.

Essa estratégia permite aproveitar o excedente de geração solar para recarregar a bateria, reduzindo a dependência da rede elétrica convencional durante o dia. Essa configuração permite uma gestão mais eficiente da energia, maximizando o aproveitamento da energia solar disponível e reduzindo a necessidade de consumo direto da rede elétrica durante os períodos de baixa produção, na Figura 48 pode ser visto a geração solar medida ao longo do dia 28/02/2023.

Analisando a curva da rede demonstrada na Figura 49, pode-se perceber uma diminuição no consumo de energia no mesmo instante em que a bateria passa a utilizar o excedente da geração fotovoltaica na Figura 50.

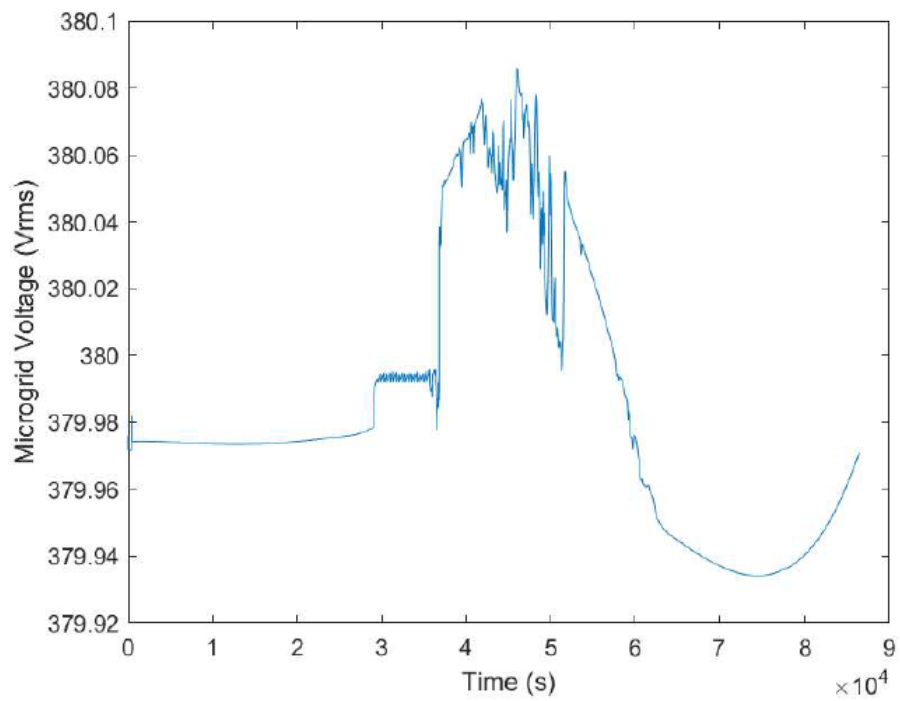
Na Figura 50 é possível observar que a mesma atende as definições do estado de carregamento, sendo que a mesma se mantém dentro dos limites pré-estabelecidos de 20% a 90%, atingindo o limite de carga utilizando o excedente da geração solar.

Figura 48: Resultado do cenário 2: Geração Fotovoltaica.



Fonte: Elaborada pela autora.

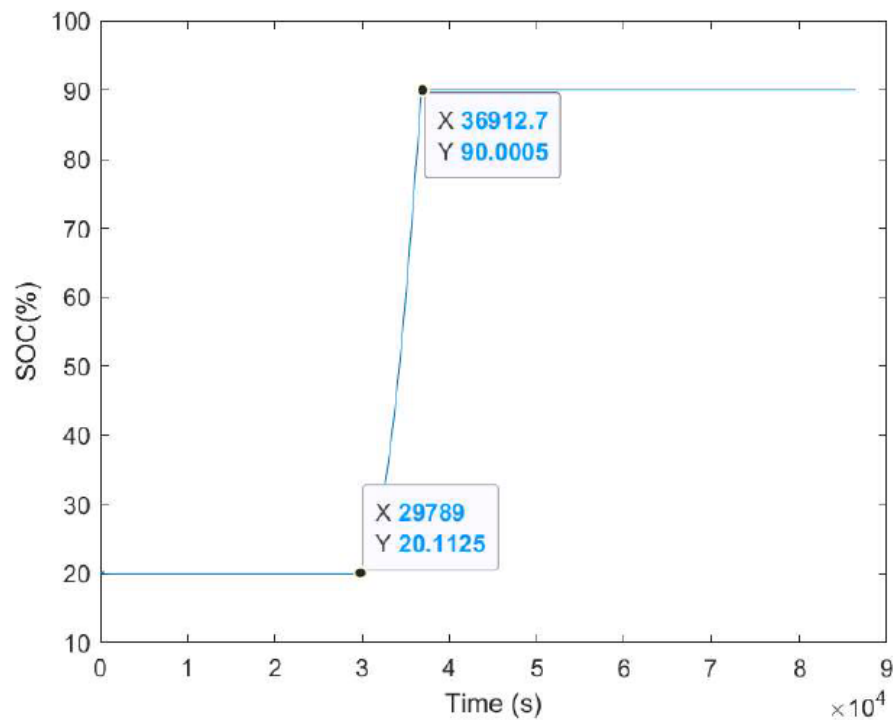
Figura 49: Resultado do cenário 2: dia 28/02/23.



Fonte: Elaborada pela autora.



Figura 50: Resultado do cenário 2: SOC(%) da Bateria



Fonte: Elaborada pela autora.

#### 4.3. RESUMO DO CAPÍTULO

Neste capítulo, são apresentadas as simulações e resultados obtidos ao analisar uma residência com geração distribuída fotovoltaica e um sistema de armazenamento de energia.

Inicialmente, é discutida a configuração comum de uma residência equipada com painéis solares fotovoltaicos e bateria. Durante o dia, a energia gerada pelos painéis é utilizada diretamente para alimentar as cargas elétricas da residência. O excesso de energia solar é direcionado para carregar a bateria de íon-lítio. Nos períodos de baixa insolação, a eletricidade armazenada é utilizada para suprir as necessidades da residência. Se a produção solar exceder a capacidade de armazenamento, o excesso de eletricidade pode ser injetado na rede elétrica convencional. Caso a produção solar seja insuficiente, a eletricidade necessária é adquirida da rede elétrica.

No presente estudo, essas características foram integradas em um modelo completo utilizando o ambiente do *Matlab/Simulink*. O diagrama completo do sistema, representando todos os componentes e etapas envolvidos, é apresentado. O modelo inclui o sistema de distribuição do DEMEI, os padrões de tensão, a demanda da unidade consumidora, a geração fotovoltaica e o sistema de armazenamento de energia controlado pelo *EMS*.

Em seguida, são definidos os cenários de simulação para permitir a comparação e análise da inclusão do sistema de armazenamento de energia à carga residencial.

## 5. CONCLUSÃO

Durante o desenvolvimento deste trabalho, foi realizada uma revisão bibliográfica abrangente que abordou o panorama energético brasileiro, destacando a crescente demanda por energia elétrica em todo o país. Esses aspectos têm impulsionado a necessidade de desenvolver novas tecnologias com o objetivo de aumentar a capacidade de produção e geração de energia, melhorando a qualidade, disponibilidade e confiabilidade do fornecimento energético. Nesse contexto, surge a necessidade de integrar fontes de energia renovável juntamente com outros sistemas, como é o caso dos SAEs, onde o principal desafio é realizar a integração com os sistemas convencionais de forma eficiente.

A integração desses sistemas é fundamental para a transição em direção a um sistema energético mais sustentável e resiliente. Esses sistemas proporcionam uma solução para os desafios enfrentados pelas fontes renováveis, como a variabilidade e a intermitência, ao mesmo tempo em que oferecem benefícios como estabilidade do sistema elétrico, gerenciamento de picos de demanda e fornecimento de energia de reserva.

No contexto brasileiro, a implementação dos sistemas de armazenamento de energia ainda enfrenta muitos desafios, incluindo questões regulatórias, financeiras e tecnológicas. No entanto, é crucial que sejam adotadas estratégias para incentivar e facilitar a difusão dessas tecnologias, a fim de aproveitar plenamente o potencial das fontes renováveis e promover a descarbonização da matriz energética.

Nesse sentido, este trabalho ressalta a importância da integração dos sistemas de geração e armazenamento de energia, a fim de enfrentar os desafios decorrentes da crescente eletrificação das residências e do aumento da demanda de energia resultante da inclusão dessas fontes à rede elétrica. A implementação dos SAEs desempenha um papel fundamental na redução do consumo de energia elétrica durante os períodos de pico de demanda, garantindo a eficiência energética do sistema elétrico.

Além disso, é necessário considerar a participação ativa dos consumidores, conhecidos como 'prosumidores', que têm a capacidade de demandar e injetar energia na rede. O gerenciamento adequado dessa interação entre os consumidores e o sistema elétrico é essencial para garantir uma transição suave e eficiente para um futuro energético mais sustentável.

Neste trabalho, foram abordados aspectos relacionados aos diferentes tipos de tecnologias de sistemas de armazenamento de energia elétrica presentes no Brasil, visando compreender suas características e aplicações, sua situação atual e os desafios enfrentados para sua difusão e implementação no país.

Através da revisão do estado da arte das tecnologias de armazenamento de energia, foram obtidas informações relevantes sobre os serviços oferecidos por essas tecnologias, possibilitando uma compreensão mais aprofundada de suas capacidades e aplicações. Além disso, foram realizadas simulações no *Matlab/Simulink* para analisar a curva de demanda residencial em conjunto com a geração fotovoltaica e o sistema de armazenamento de energia.

Com base nos resultados obtidos, foi possível compreender e identificar estratégias de armazenamento de energia elétrica que se mostraram particularmente interessantes para adoção, levando em consideração as características da demanda. Essas informações contribuem para o avanço no desenvolvimento e implementação de soluções de armazenamento de energia elétrica no país, visando melhorar a eficiência e a sustentabilidade do sistema energético como um todo.

Em suma, a inclusão de sistemas de armazenamento de energia nas redes de distribuição desempenha um papel crucial na transformação do setor energético. Através dessas tecnologias, é possível enfrentar os desafios e aproveitar as oportunidades apresentadas pelas fontes renováveis, contribuindo para a construção de um sistema elétrico mais limpo, confiável e resiliente, alinhado com os princípios do desenvolvimento sustentável.

## 5.1. TRABALHOS FUTUROS

Com o intuito de aprimorar o trabalho apresentado, propõe-se, para trabalhos futuros, os seguintes itens:

- Aprimorar o modelo de simulação, para possibilitar a criação de diferentes cenários e realizar a combinação de diferentes fontes de energia renovável, como energia solar e eólica, em sistemas híbridos, visando maximizar a produção de energia limpa e minimizar a dependência de fontes não renováveis.
- Análise do desempenho e eficiência de sistemas de armazenamento de energia em larga escala, considerando diferentes tecnologias de baterias e outros tipos de sistemas de armazenamento.
- Estudo da viabilidade econômica e financeira da implementação de sistemas fotovoltaicos *on-grid* em diferentes setores, como residencial, comercial e industrial, considerando os custos de instalação, operação e manutenção, bem como os benefícios econômicos gerados ao longo do tempo.
- Avaliação do impacto socioambiental da geração distribuída de energia solar, considerando aspectos como a redução de emissões de gases de efeito estufa, a melhoria na qualidade

do ar e a geração de empregos no setor de energia renovável.

- Investigação de estratégias de integração de sistemas de armazenamento de energia com redes inteligentes (*smart grids*), visando otimizar o fluxo de energia, maximizar a eficiência do sistema e promover uma maior flexibilidade na operação da rede elétrica.

Ao explorar esses tópicos, estudos futuros poderão contribuir para o avanço e aperfeiçoamento das tecnologias e práticas relacionadas à geração de energia solar, armazenamento de energia e integração com a rede elétrica, promovendo um desenvolvimento mais sustentável e eficiente do setor energético.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABSOLAR. **Panorama da solar fotovoltaica no Brasil e no mundo**. 2021. Acesso em: 26 de abril de 2023. Disponível em: <<https://www.absolar.org.br/mercado/infografico/>>. Citado na página 18.

ABSOLAR. **Infográfico do mercado solar brasileiro**. 2023. <<https://www.absolar.org.br/mercado/infografico/>>. Acesso em 11 de maio de 2023. Citado 5 vezes nas páginas 19, 22, 23, 29 e 30.

ABUBAKAR, A. **O dimensionamento do sistema de armazenamento de energia da bateria em sistemas fotovoltaicos isoladas usando dados de radiação solar previstos**. 120 p. Tese (Dissertação de Mestrado) — Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2020. Citado na página 67.

Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL. **Revisão das Regras Aplicáveis à Micro e Minigeração Distribuída – Resolução Normativa no 482/2012 Relatório de Análise de Impacto Regulatório no 0004/2018-SRD/SCG/SMA/ANEEL**. [S.l.], 2018. Citado na página 15.

Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL. **Resolução Normativa nº 687/2015**. Brasília: [s.n.], 2015. Citado na página 20.

\_\_\_\_\_. **Brasil ultrapassa marca de 1GW em geração distribuída**. 2019. Acesso em: 26 de abril de 2023. Disponível em: <[https://www.aneel.gov.br/sala-de-imprensa-exibicao/-/asset\\_publisher/XGPXSqdMFHrE/content/brasil-ultrapassa-marca-de-1gw-em-geracao-distribuida/656877](https://www.aneel.gov.br/sala-de-imprensa-exibicao/-/asset_publisher/XGPXSqdMFHrE/content/brasil-ultrapassa-marca-de-1gw-em-geracao-distribuida/656877)>. Citado na página 15.

\_\_\_\_\_. **Agosto obteve a maior expansão de 2021. Usinas solares chegam a 2,1% da matriz elétrica**. 2021. Acesso em: 26 de abril de 2023. Disponível em: <[bit.ly/3yLeQ1H](https://bit.ly/3yLeQ1H)>. Citado na página 15.

Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL). **Resolução Normativa Nº 1000**. 2021. Brasília. Disponível em: <<https://www.in.gov.br/en/web/dou/-/resolucao-normativa-aneel-n-1.000-de-7-de-dezembro-de-2021-368359651>>. Citado na página 23.

\_\_\_\_\_. **Valores das Bandeiras Tarifárias são atualizados para o período 2022-2023**. 2022. Website. Publicado em 21/06/2022. Disponível em: <<https://www.gov.br/aneel/pt-br/assuntos/noticias/2022/valores-das-bandeiras-tarifarias-sao-atualizados-para-o-periodo-2022-2023>>. Citado 2 vezes nas páginas 24 e 25.

AKINYELE, D.; BELIKOV, J.; LEVRON, Y. Battery storage technologies for electrical applications: Impact in stand-alone photovoltaic systems. **MDPI Journal – Energies, Basel**, 2017. Citado 3 vezes nas páginas 35, 37 e 39.

ALVES, M. d. O. L. **Energia solar: Estudo da geração de energia elétrica através dos sistemas fotovoltaicos on-grid e off-grid**. 2019. Citado na página 44.

ALVES, M. N. **Aplicação de Sistemas de Armazenamento de Energia em Redes de Distribuição com Elevada Penetração de Geração Solar Fotovoltaica Distribuída**. 2020. Citado na página 32.

Associação Brasileira de Normas Técnicas. **ABNT NBR 16690 - Instalações elétricas de arranjos fotovoltaicos - Requisitos de projeto**. 2019. Brasil. Citado na página 49.

BRUNDTLAND, G. H. **Nosso Futuro Comum**. 2. ed. Rio de Janeiro: Fundação Getúlio Vargas, 1987. Citado na página 13.

BUENO, F.; BRANDÃO, D. Visão geral de tecnologia e mercado para os sistemas de armazenamento de energia elétrica no Brasil. **Associação Brasileira de Armazenamento e Qualidade de Energia**, 2013. Citado 8 vezes nas páginas 15, 33, 34, 37, 38, 39, 40 e 41.

COPETTI, J. B.; MACAGNAN, M. H. Baterias em sistemas solares fotovoltaicos. In: **CBENS – I Congresso Brasileiro de Energia Solar**. [S.l.: s.n.], 2007. Citado na página 16.

CPFL-Energia. **Horário de Pico**. 2021. <<https://www.cpfl.com.br/energias-sustentaveis/eficiencia-energetica/uso-consciente/Paginas/horario-de-pico.aspx>>. Citado na página 16.

CUNHA, V. C. D. **Aplicação de Sistemas de Armazenamento de Energia em Redes de Distribuição com Elevada Penetração de Geração Fotovoltaica e Veículos Elétricos**. 2017. Citado na página 33.

Deloitte Development LLC. **Energy storage: Tracking the technologies that will transform the power sector**. [S.l.]: s.n., no year. Citado na página 32.

EPE, E. de P. E. **Plano Decenal de Expansão de Energia 2030**. 2021. Brasília: MME/EPE. Citado 2 vezes nas páginas 19 e 20.

\_\_\_\_\_. **Estudos do Plano Decenal de Expansão de Energia 2032: Micro e Minigeração Distribuída & Baterias**. 2022. Disponível em: <[https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-689/topico-640/Caderno\\_MMGD\\_Baterias.pdf](https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-689/topico-640/Caderno_MMGD_Baterias.pdf)>. Citado na página 20.

FARIA, R. N.; PINTO, A. J. **Sistemas Elétricos de Potência: Análise e Projeto**. Rio de Janeiro: LTC, 2015. Citado na página 26.

FUCHS, G.; LUNZ, B.; LEUTHOLD, M.; SAUER, D. Technology overview on electricity storage. **ISEA, Aachen**, 2012. Citado 3 vezes nas páginas 36, 41 e 42.

GARCIA, L. **Postos tarifários**. 2020. EÓLOS JR. Disponível em: <<https://www.eolosjr.com/post/postos-tarifarios-voce-sabe-como-funciona-a-tarifacao-horaria>>. Citado na página 25.

HUBERT, M. A. **Modelagem Matemática de um Sistema de Gerenciamento de Energia para Residências em um Cenário de Smart Grid**. Dissertação (Mestrado) — Programa de Pós-Graduação em Modelagem Matemática Computacional (PPGMMC), UNIJUÍ – CAMPUS IJUÍ, Abril 2023. Citado 6 vezes nas páginas 44, 56, 58, 63, 69 e 73.

INMETRO. [S.l.], 2011. 2011. <<http://www.inmetro.gov.br/legislacao/rtac/pdf/RTAC001652.pdf>>. Citado na página 49.

KABIR, M. M.; DEMIROCAK, D. E. Degradation mechanisms in li-ion batteries: a state-of-the-art review. **International Journal of Energy Research**, v. 41, n. 14, p. 1963–1986, 2017. Citado na página 62.

KIRBY, B. **Micro- and Nanoscale Fluid Mechanics: Transport in Microfluidic Devices**. Cambridge University Press, 2010. ISBN 9781139489836. Disponível em: <<https://books.google.com.br/books?id=y7PB9f5zmU4C>>. Citado na página 55.

LESAGE, J. **Microgrid Energy Management System (EMS) using Optimization**. 2023. GitHub repository. Version 19.1.0. Disponível em: <<https://github.com/jonlesage/Microgrid-EMS-Optimization/releases/tag/v19.1.0>>. Citado 2 vezes nas páginas 74 e 75.

LOPES, Y.; FRANCO, R. H. F.; MOLANO, D. A.; SANTOS, M. A. d.; CALHAU, F. G.; BASTOS, C. A. M.; MARTINS, J. S. B.; FERNANDES, N. C. Minicurso para o sbrt'2012: Smart grid e iec 61850: Novos desafios em redes e telecomunicações para o sistema elétrico. In: **XXX Simpósio Brasileiro de Telecomunicações - SBrT'12**. Brasília, DF, Brazil: [s.n.], 2012. Citado na página 27.

MACHIAVELLI, A. J. **Sistemas de Armazenamento de Energia em Redes de Distribuição para o Gerenciamento da Curva de Carga**. 2018. Apresentação realizada em evento interno. Citado na página 53.

MATHWORKS. **MathWorks Online**. 2023. <<http://www.mathworks.com/help/toolbox/physmod/powersys/ref/battery.html>>. Acessado em 22 de maio de 2023. Citado 3 vezes nas páginas 57, 58 e 60.

Ministério de Minas e Energia. **Projeção da demanda de energia elétrica para os próximos 10 anos (2016-2025) Nota Técnica DEA 24/16**. Rio de Janeiro, 2016. Citado na página 20.

MOREIRA, A. **ALOCAÇÃO E DIMENSIONAMENTO DE PAINÉIS FOTOVOLTAICOS UTILIZANDO OTIMIZAÇÃO POR ENXAME DE PARTÍCULAS PARA REDUZIR AS PERDAS VISANDO OS ASPECTOS ECONÔMICOS**. 2018. Citado na página 28.

ONS, O. N. do S. E. **Boletim Mensal de Monitoramento do Sistema Elétrico Brasileiro**. 2021. <<https://www.ons.org.br/Paginas/resultados-operacionais/boletim-mensal-monitoramento-sistema-eletrico-brasileiro.aspx>>. Acesso em 11 de maio de 2023. Citado na página 19.

PEREIRA, E. B. et al. **Atlas brasileiro de energia solar**. 2. ed. São José dos Campos: INPE, 2017. 80 p. ISBN 978-85-17-00089-8. Citado na página 13.

PHB Solar. **Bateria de Lítio PHB Lynx 5.4**. 2023. <<https://www.energiasolarphb.com.br/produto/bateria-de-litio-phb-lynx-5-4/>>. Citado na página 67.

PORCIUNCULA, C.; OLIVEIRA, A.; SAUSEN, P.; SAUSEN, A. Avaliação comparativa entre o modelo elétrico battery e os modelos analíticos linear e lei de peukert. **Revista Brasileira de Computação Aplicada**, v. 4, n. 1, p. 71–80, dezembro 2011. Disponível em: <<https://doi.org/10.5335/rbca.2013.1989>>. Citado 3 vezes nas páginas 57, 59 e 61.

POSSAMAI, C. E. **Conversor modular aplicado ao carregamento de veículos elétricos a partir de uma bateria estacionária residencial**. Tese (Doutorado) — Nome da Instituição, 2018. Citado na página 43.

RAMOS, A. G.; MOREIRA, J. P. J. Segurança em usinas fotovoltaicas conforme a nbr 16690:2019. 2021. Citado 2 vezes nas páginas 49 e 50.

ROTTMAN, G.; WOODS, T.; CASPI, A.; CHAMBERLIN, P.; COLDREN, C.; HOCK, R.; JONES, A.; PAP, J.; PANKRATZ, C.; SOLOMON, S. et al. The solar radiation and climate experiment (sorce): Mission description and early results. **Solar Physics**, Springer, v. 230, n. 1-2, p. 7–25, 2005. Citado na página 46.

SANTOS, C. A. L. d. Baterias de íons li para veículos elétricos. **Revista IPT**, IPT, v. 2, n. 9, 2018. Disponível em: <<https://revista.ipt.br/index.php/revistaIPT/article/view/71>>. Citado na página 36.

SAUTHIER, L. F. **Modelagem Matemática de Módulos Fotovoltaicos Aplicados a Ambientes de Simulação de Geração Distribuída**. Ijuí, RS, Brasil: [s.n.], 2019. Citado 2 vezes nas páginas 54 e 56.

SERRA, A. E. T.; ORLANDO, A. de F.; MOSSÉ, A.; MARTINS, N. **ARMAZENAMENTO DE ENERGIA: SITUAÇÃO ATUAL, PERSPECTIVAS E RECOMENDAÇÕES**. Endereço da Instituição, 2016. Citado 3 vezes nas páginas 34, 35 e 38.

SILVA, J. M. Lenz Vianna da. **Maximização do aproveitamento energético de painéis fotovoltaicos usando rastreadores mecânicos**. Dissertação (Masters Thesis) — Universidade Federal de Santa Maria, RS, 2015. Orientador: Felix Alberto Farret. Citado 2 vezes nas páginas 54 e 55.

SOARES, T. S.; LIMA, L. R. **Geração Distribuída e Energia Renovável: Tecnologia e Aplicações**. Rio de Janeiro: LTC, 2017. Citado na página 28.

Solargis. **Global Solar Atlas**. 2022. <<https://globalsolaratlas.info/map?c=-28.387873,-53.920169,11&s=-28.387873,-53.920169&m=site>>. Citado na página 66.

STERZELECKI, G. R. C. **TECNOLOGIAS DE ARMAZENAMENTO DE ENERGIA ELÉTRICA E SUA INTEGRAÇÃO COM SISTEMAS FOTOVOLTAICOS DE PEQUENO E MÉDIO PORTE**. Curitiba: [s.n.], 2018. Trabalho de Conclusão de Curso da Especialização em Energias Renováveis – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Disponível em: <[https://repositorio.roca.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/3822/1/CT\\_REENP\\_PPGEPP\\_Curitiba\\_2018.pdf](https://repositorio.roca.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/3822/1/CT_REENP_PPGEPP_Curitiba_2018.pdf)>. Citado 2 vezes nas páginas 39 e 41.

TABELING, P.; CHEN, S. **Introduction to Microfluidics**. OUP Oxford, 2005. ISBN 9780191524554. Disponível em: <<https://books.google.com.br/books?id=h4ZguvxYW0kC>>. Citado na página 55.

WOODY, M.; ARBABZADEH, M.; LEWIS, G. M.; KEOLEIAN, G. A.; STEFANOPOULOU, A. Strategies to limit degradation and maximize li-ion battery service lifetime - critical review and guidance for stakeholders. **Journal of Energy Storage**, Elsevier Ltd, v. 28, p. 101251, 2020. ISSN 2352-152X. Citado na página 62.

World Economic Forum (WEF). **A Vision for a Sustainable Battery Value Chain in 2030. Unlocking the Full Potential to Power Sustainable Development and Climate Change Mitigation**. 2019. Citado na página 31.

WU, Y. (Ed.). **Lithium-Ion Batteries: Fundamentals and Applications**. 1st. ed. Florida: CRC Press, 2015. 582 p. Hardcover. ISBN 9781466557338. Citado na página 44.