

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

“JÚLIO DE MESQUITA FILHO”

Câmpus de Ilha Solteira - SP

HUMBERTO KOSKI DE OLIVEIRA

**SISTEMA DE ARMAZENAMENTO DE ENERGIA POR
BATERIAS: HISTÓRICO, ANÁLISE TECNOLÓGICA E
APLICAÇÃO EM REDES DE DISTRIBUIÇÃO DE
ENERGIA ELÉTRICA**

Ilha Solteira - SP

2024

HUMBERTO KOSKI DE OLIVEIRA

**SISTEMA DE ARMAZENAMENTO DE ENERGIA POR
BATERIAS: HISTÓRICO, ANÁLISE TECNOLÓGICA E
APLICAÇÃO EM REDES DE DISTRIBUIÇÃO DE
ENERGIA ELÉTRICA**

Trabalho de Graduação apresentado à Faculdade de Engenharia do Câmpus de Ilha Solteira - UNESP como parte dos requisitos para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica.
Especialidade: Automação.

Prof. Dr. Jônatas Boás Leite
Orientador

Ilha Solteira - SP

2024

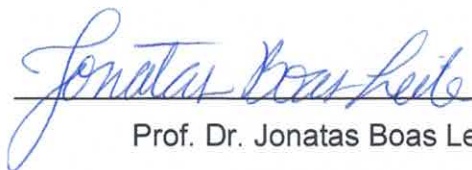
FICHA CATALOGRÁFICA

Desenvolvido pelo Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação

- O48s Oliveira, Humberto Koski de.
Sistema de armazenamento de energia por baterias: histórico, análise tecnológica e aplicação em redes de distribuição de energia elétrica / Humberto Koski de Oliveira. -- Ilha Solteira: [s.n.], 2024
70 f. : il.
- Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia Elétrica) - Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Engenharia, Ilha Solteira, 2024
- Orientador: Jonatas Boas Leite
- Inclui bibliografia
1. Armazenamento. 2. Bateria. 3. Energia. 4. Renovável. 5. Sistema. 6. Distribuição.

ATA DE DEFESA DE TRABALHO DE GRADUAÇÃO

Aos vinte e nove dias do mês de novembro do ano de dois mil e vinte e quatro, o discente **Humberto Koski de Oliveira**, matriculado sob o nº 181051397, tendo como banca examinadora o seu orientador, o Prof. Dr. Jonatas Boas Leite, o Dr. Wilson Enrique Chumbi Quito e o Doutorando Gabriel Victor De Oliveira Blanco, apresentou o Trabalho de Graduação intitulado "**Sistemas de Armazenamento de Energia por Baterias: Histórico, Análise Tecnológica e Aplicação em Redes de Distribuição de Energia Elétrica**", obtendo a nota 9,0 (NOVE) e conceito APROVADO.



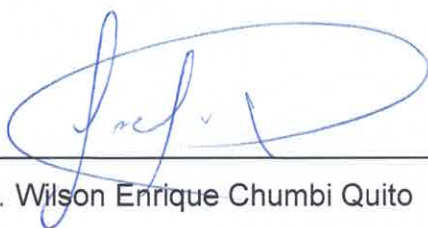
Prof. Dr. Jonatas Boas Leite

- Orientador -



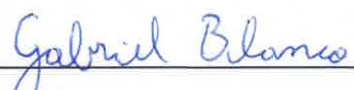
Humberto Koski de Oliveira

- Discente -



Dr. Wilson Enrique Chumbi Quito

- Membro da Banca -



Doutorando Gabriel Victor De Oliveira Blanco

- Membro da Banca -

*Ao meu avô Minoru, por todo apoio durante minha jornada,
que secretamente, sempre teve por objetivo obter mais do seu orgulho.*

AGRADECIMENTOS

Meus agradecimentos a meus familiares, amigos, professores e funcionários da FEIS-UNESP, que direta ou indiretamente contribuíram para a realização deste trabalho. Em especial, dedico meus agradecimentos:

- A meu avô, por ter me dado um objetivo para chegar até aqui, sempre estará comigo;
- Aos meus pais, Flavia e Elcio, pelo amor, apoio, incentivo e sacrifício na distância;
- Ao meu padrasto, Carlos, pelo carinho, apoio e incentivo;
- Ao Prof. Dr. Jonatas Boas Leite, pela confiança, orientação e atenção disposta durante todo o processo. Sem ele, isso definitivamente não seria possível;
- Aos meus amigos da FEIS, em especial ao Eduardo, o irmão de outra mãe que me acompanhou durante toda a graduação em momentos indescritíveis;
- A minha república, minha segunda família, onde cresci e evoluí ao longo dos anos em Ilha Solteira. Todos os que tornaram minha passagem pela FEIS única e inesquecível. A memória dos momentos vividos e histórias escritas devem perdurar até o fim.

*“Ah se sonhassem o quanto me dedico, filho
cada linha um parto, entre a raiz e o fruto puro
eu, tenho me deparado, tento nunca paro.*

Desconhecido

RESUMO

No cenário atual da matriz energética global, muito se discute sobre os impactos ambientais causados pela dependência de fontes de energia não renováveis. Dessa forma, se evidencia a busca por uma transição energética, novas tecnologias que possibilitem uma geração elétrica sustentável. Com o desenvolvimento de novos sistemas com maior eficiência e capacidade de produção, é verificado um forte investimento em fontes de energia renovável variável (ERV), tais como solar, eólica e maremotriz, que trazem diversidade e possibilitam o desenvolvimento de um sistema complexo de fornecimento energético que se torna mais seguro, constante e viável financeiramente ao consumidor final. Sistemas de armazenamento por bateria (BESS) e recursos distribuídos de energia são exemplos de mudanças significativas no setor elétrico que se alinham com o objetivo anteriormente descrito. A fim de reduzir riscos de insuficiência de geração por ERV e para se beneficiar de arbitragem tarifária, existe amplo interesse na inserção de BESS em diversos níveis de tensão. Em média e baixa tensão (em escopo de distribuidoras de energia), podem reduzir necessidade de contratação de montante de uso de sistema de transmissão e para arbitragem tarifária. Propõe-se, nesse trabalho de graduação, realizar o levantamento do avanço tecnológico de sistemas de baterias; as principais aplicações atuais e prospectivas; e os desafios gerais para sua implementação ampla no setor elétrico no curto-médio prazo, em particular nas redes de distribuição de energia elétrica.

Palavras-chave: Armazenamento; Bateria; Energia; Renovável; Geração; Sistema; Distribuição; Rede.

ABSTRACT

To date at the global electricity matrix scene, much has been discussed around the environmental impact caused by the dependency on non-renewable energy sources. On that matter, it gets on evidence when searching for an energetic transition, new technologies that allow a sustainable electrical generation. With the development of new systems with better efficiency and larger capacity of production, it's possible to verify a large investment on variable renewable energy (VRE) sources such as solar, wind, tidal that provides diversity and allow the development of a complex energetic supply system that becomes safer, constant and economically viable to the customer. Battery energy storage system (BESS) and spread energy resources (SER) are fine examples of major changes in the electrical sector that are aligned with the objective previously mentioned. In order to lower the risks of insufficient supply by VRE and aiming benefits from taxes management, can be seen a great interest on inserting the BESS at a variety of voltage levels. At low and medium voltages (energy companies scope), it may decrease the need to hire a specific amount of use from the transmission system and also taxes wise. It is proposed, at this graduation work, to accomplish a data collection of the technological advances on battery systems; the main currently application and perspectives; and the general challenges to its wide application at the electrical sector in short to medium term, particularly focusing on electrical energy distribution nets.

Keywords: Storage; Battery; Energy; Renewable; Generation; System; Distribution; Grid.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	Representação de um SEE.	15
Figura 2	Ilustração da origem das fontes de energia aplicadas no sistema de geração.	17
Figura 3	Representação do processo de geração termelétrica a partir do ciclo Rankine.	18
Figura 4	Representação do processo de geração nuclear por PWR.	20
Figura 5	Representação dos componentes de uma central hidrelétrica.	21
Figura 6	Diagrama de blocos representando um sistema eólico automático.	23
Figura 7	Esquema de reresetanção da geração por energia solar.	23
Figura 8	Esquema de reresetanção transmissão-distribuição.	25
Figura 9	Curva típica de carga (a) residencial, (b) comercial, (c) industrial e de (d) iluminação pública.	27
Figura 10	Representação de modelo conceitual de uma rede inteligente.	29
Figura 11	Esquema de reresetanção de um fluxo bidirecional de energia elétrica.	31
Figura 12	Representação da evolução da GD de 2012 até 2022 no Brasil segundo ABGD.	34
Figura 13	Representação da evolução das conexões de GD no Brasil até outubro deste ano.	34
Figura 14	Arranjo das conexões de GD no Brasil até outubro de 2024.	36
Figura 15	Representação da evolução da potência instalada em geração fotovoltaica no Brasil.	37
Figura 16	Representação da demanda por aplicação de baterias na indústria global.	39
Figura 17	Evolução histórica da demanda globalmente.	40
Figura 18	Battery Energy Storage System (BESS).	41
Figura 19	Sistema de armazenamento por baterias de Chumbo-Ácido.	44
Figura 20	Sistema de armazenamento por baterias de Sódio-Enxofre.	45
Figura 21	Sistema de armazenamento por baterias de íons de lítio.	46
Figura 22	Representação das técnicas de gerenciamento pelo lado da demanda.	48
Figura 23	Redução da demanda a partir da combinação de um sistema fotovoltaico e aplicação de BESS.	50
Figura 24	Representação de conexões que definem uma microrrede.	54

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	Composição típica da carga de uma subestação	26
Tabela 2	Principais marcos legais da geração distribuída no Brasil.	32

LISTA DE ABREVIACÕES E SIGLAS

BESS	Battery Energy Storage System
ERV	Energia Renovável Variável
GD	Geração Distribuída
GDFV	Geração Distribuída Fotovoltaica
NREL	National Renewable Energy Laboratory
CAISO	California Independent System Operator
PWR	Pressurized Water Reactor)
ANEEL	Agcia Nacional de Energia Elétrica
PRODIST	Procedimento de Distribuição
SDEE	Sistema de Distribuição de Energia Elétrica
RDE	Recursos Energéticos Eistribuídos
MMGD	Micro e Minigeração Gistribuída
ABGD	Associação Brasileira de Geração Distribuída.
EMUC	Empreendimento com Múltiplas Unidades Consumidoras
UG	Unidade Geradora
GC	Geração Compartilhada
PROINFA	Programa de Incentivo s Fontes Alternativas de Energia Elétrica
ZEBRA	Zeolite Battery Research Africa posteriormente Zero Emission Battery Research Activity
FV	Fotovoltaica
GLD	Geranciamento pelo Lado da Demanda
AE	Armazenamento de Energia
QEE	Qualidade de Energia Elétrica
MPC	Model Predictive Control

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
1.1	Objetivo Geral	14
1.2	Organização dos Capítulos	14
2	REVISÃO DA LITERATURA	15
2.1	Sistema de Geração	16
2.1.1	Geração Termelétrica e Nuclear	18
2.1.2	Geração Hidrelétrica	20
2.1.3	Geração Eólica e Solar	22
2.2	Sistema de Transmissão	24
2.3	Sistema de Distribuição	24
2.3.1	Redes Inteligentes	27
2.3.1.1	<i>Smart Grids</i>	28
3	GERAÇÃO DISTRIBUÍDA	30
3.1	Fluxo Bidirecional	30
3.2	Evolução no Brasil	31
3.2.1	História	31
3.2.2	Desenvolvimento	32
3.3	Integração com a rede de distribuição	33
3.3.1	Geração Solar Fotovoltaica	35
4	Sistema de Armazenamento de Energia por BESS	38
4.1	Apresentação do Conceito de Armazenamento de Energia Elétrica em Baterias	38
4.1.1	Importância do BESS em um Sistema de Energia Elétrica	39
4.2	<i>Battery Energy Storage System</i>	40
4.2.1	Principais características	41
4.2.1.1	<i>Eficiência</i>	42
4.2.1.2	<i>Flexibilidade</i>	42
4.3	Principais Tecnologias de Baterias	43
4.3.1	Bateria de Chumbo-Ácido	43
4.3.2	Bateria de Sódio-Enxofre	44
4.3.3	Bateria de Íons de Lítio	45

5	Análise e Aplicação do BESS	47
5.1	Conceitos Relevantes	47
5.1.1	Gerenciamento pelo lado da Demanda	47
5.1.2	<i>Peak-Shaving</i>	50
5.1.3	Integração com Fontes Renováveis	51
5.1.4	Contribuição para a Estabilidade da Rede	51
5.1.5	Regulação de Frequência e Tensão	52
5.1.6	Microrredes	53
5.2	Estudos Relacionados	53
6	CONCLUSÕES	59
	REFERÊNCIAS	64

1 INTRODUÇÃO

De acordo com Vasconcelos (2017), o consumo de energia elétrica está intimamente ligado ao crescimento e desenvolvimento econômico global. Nesse contexto, aproximadamente um terço das emissões de gases de efeito estufa tem por origem na produção de energia para suprir a crescente demanda.

Nos últimos anos, devido à crescente preocupação com o impacto ambiental da geração de energia elétrica utilizando combustíveis fósseis, foi observado um esforço mundial para a utilização de fontes renováveis de energia, como eólica e solar. Neste contexto, a utilização de Geração Distribuída (GD), em especial a Geração Distribuída Fotovoltaica (GDFV), se tornou bastante popular. Contudo, o uso de GD está causando mudanças operacionais no sistema de distribuição de energia, pois a operação tradicional consiste no fluxo de potência da subestação para o consumidor, enquanto nesse novo cenário o fluxo de potência pode se inverter, tornando o consumidor uma fonte de potência no sistema de distribuição.

Um fenômeno importante, conhecido como curva do pato, do inglês *duck curve*, ocorre especificamente devido à alta penetração de GDFV. Tal fenômeno consiste no formato da curva de carga líquida durante um dia típico de um sistema com alta penetração de GDFV e foi descoberto em 2008 por analistas do NREL que pesquisavam como planejar a integração em larga escala de GDFV (NREL, 2018), sendo apelidado de *duck curve* pelo California Independent System Operator (CAISO). De acordo com Denholm et al. (2018) a curva ilustra o desafio de acomodar a produção de energia solar, pois a “barriga” do pato representa o período de menor carga líquida, que é quando há o pico de geração de energia solar. Neste período, considerando esta e outras fontes, pode ocorrer sobregeração de energia.

O armazenamento é um processo de conversão de energia elétrica em outros tipos de energia que posteriormente, possa ser convertida em elétrica novamente. Tal processo permite que aquela gerada em períodos de baixa demanda de consumo possa ser armazenada e aproveitada em horários de pico (CHEN et al., 2009), possibilitando que os sistemas de GD de fontes renováveis possam ser integrados ao sistema de distribuição, proporcionando controle da injeção de potência na rede e aumentando a eficiência da geração.

O uso de baterias no sistema de distribuição é um tópico de pesquisa recente, e é consequência da popularização do uso de fontes renováveis, como a energia solar e eólica. Apesar do benefício do uso de baterias na integração da GD à rede de distribuição, existem vários desafios que devem ser superados para que esta integração seja viável. Estes desafios são tecnológicos, financeiros e regulatórios (SILVA; BORTONI, 2016). Os desafios tecnológicos são

constituídos de duas partes principais, sendo as baterias e os conversores eletrônicos. É necessário entender a aplicação na qual a bateria vai ser utilizada, as condições ambientais de instalação e o seu regime de trabalho, para que se utilize a tecnologia que proporcione mais eficiência ao processo.

1.1 Objetivo Geral

Neste trabalho é abordado o sistema de armazenamento de energia por baterias para apresentar um estudo sobre sua história e analisar tecnicamente as novas tecnologias envolvidas e sua aplicação em redes de distribuição de energia elétrica.

1.2 Organização dos Capítulos

Na próxima seção deste, é apresentada uma revisão da literatura com base no tema proposto, para permitir o entendimento da necessidade na origem de novas tecnologias aplicadas à matriz energética atual. Partindo da definição do SEE e suas ramificações, em particular a distribuição, são apresentadas definições e diferentes tipos de curvas de carga.

Em seguida, no terceiro capítulo, é disposto o conceito de GD, que inclui sua evolução, história e marcos legais para sua implementação e desenvolvimento no Brasil. É apresentada a integração de fontes de GD com a rede, com foco em sistemas de geração fotovoltaica, a principal no Brasil.

O quarto capítulo é composto por uma descrição detalhada do sistema de armazenamento por baterias, seu conceito, construção, características e análise tecnológica da evolução. Discorre sobre a importância deste em um conjunto energético no geral.

No quinto capítulo, é disposta uma discussão com base em trabalhos acadêmicos acerca da análise da aplicação do BESS, que ilustram a utilização do sistema em redes de distribuição. Têm por objetivo demonstrar a gama de possibilidades que o BESS oferece para o SEE, colaborando com a segurança e regulação da rede elétrica a que se aplica, alinhado à redução de custos para o consumidor.

No sexto capítulo, por fim, se verificam as conclusões finais com relação ao estudo apresentado neste trabalho e observações pertinentes ao tema proposto.

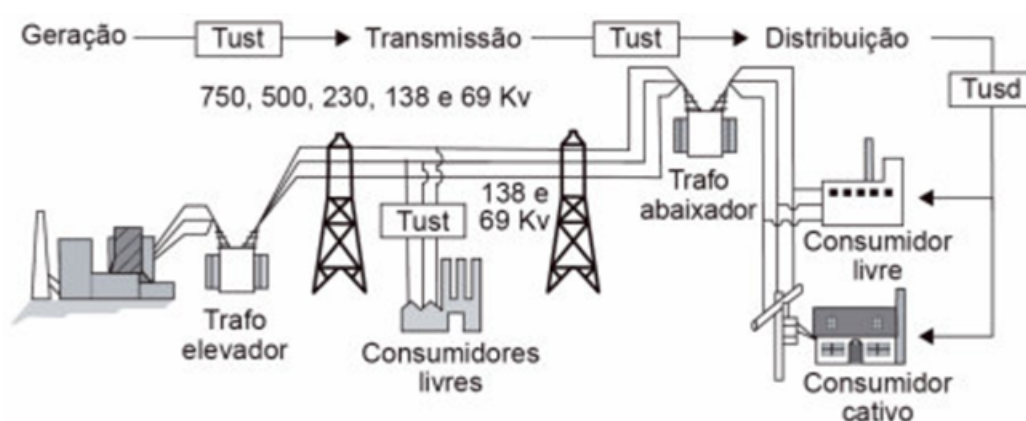
2 REVISÃO DA LITERATURA

Neste capítulo, é apresentado o estudo relacionado aos principais componentes do sistema de energia elétrica com foco no sistema de distribuição; formas de GDs integradas nas redes de distribuição; definição das principais características do BESS e sua evolução tecnológica.

Partindo da definição de sistema de energia elétrica, que se trata de uma rede complexa e pode ser seccionada em três processos principais: geração, transmissão e distribuição. É composto por diversas etapas interconectadas que, por meio de componentes da rede elétrica, desempenham o papel de atender às necessidades da sociedade moderna quanto à aplicação de energia elétrica. Conforme o documento informativo publicado IEC e FISE (2011) um sistema de energia é estruturado a partir de conectividade entre geradores e consumidores. A produção e consumo de eletricidade deve sempre ser balanceada, uma vez que a falta de equilíbrio entre a produção e a demanda pode causar um congestionamento no fluxo das linhas de transmissão, instabilidade no fornecimento e instabilidade na qualidade em termos de tensão e frequência, interrupção de eletricidade bem como variações periódicas no custo, (IEC; FISE, 2011).

Segundo Rubbia (2006, p. 1), todos irão concordar com que o futuro progresso da humanidade será impossível sem um substancial e contínuo suprimento de energia.

Figura 1 - Representação de um SEE.



Fonte: Vasconcelos (2017).

Inaugurada por Edison, em 1882, a primeira central geradora dos Estados Unidos que alimentava cerca de 400 lâmpadas de 83 W. Em um período próximo ainda, a primeira estação em Londres dava início ao atendimento de consumidores comuns, a partir de um gerador de 60 kW acoplado a um motor a vapor horizontal. Posteriormente, 1926, foi inaugurada a pri-

meira grande estação geradora de energia em corrente alternada que transmitia a partir de seu maquinário 10 kV para a população consumidora em Londres (WEEDY et al., 2012).

Nota-se que com o passar do tempo, a partir dos avanços tecnológicos alcançados pela sociedade moderna, o sistema de energia elétrica passou por severos aperfeiçoamentos, para suprir a crescente no consumo.

Segundo Reis (2011), a energia é um elemento essencial à vida humana, integrando-se a áreas como transporte, telecomunicações e abastecimento de água e até saneamento, formando a infraestrutura necessária para inserir a sociedade no atual modelo de desenvolvimento. Dessa forma, o tratamento de questões energéticas dentro dessa infraestrutura é crucial para o avanço no rumo a um desenvolvimento sustentável. Para isso, é fundamental adotar uma abordagem holística e multidisciplinar, considerando todas as dimensões do problema: tecnológica, econômica, social, política e ambiental.

Devido ao aumento da preocupação com o impacto ambiental da produção de energia elétrica a partir de combustíveis fósseis, notou-se um esforço global para o uso de fontes de energia renováveis, tais como a eólica e a solar (SOUZA, 2020a).

Dessa forma, pode ser observada uma necessidade na diversificação das fontes geradoras da matriz elétrica global de forma que se alinhe uma maior eficiência e capacidade de produção de um sistema de energia seguro, com um processo mais sustentável a longo prazo.

2.1 Sistema de Geração

A geração de energia elétrica advém de um processo de conversão de diferentes formas de energia, em eletricidade. Processo esse que se tornou vital na manutenção da sociedade moderna, e, em busca de atender a crescente demanda deste elemento essencial tecnologias foram desenvolvidas ao longo dos anos para aplicação em diversas fontes de energia cada qual com suas características e peculiaridades.

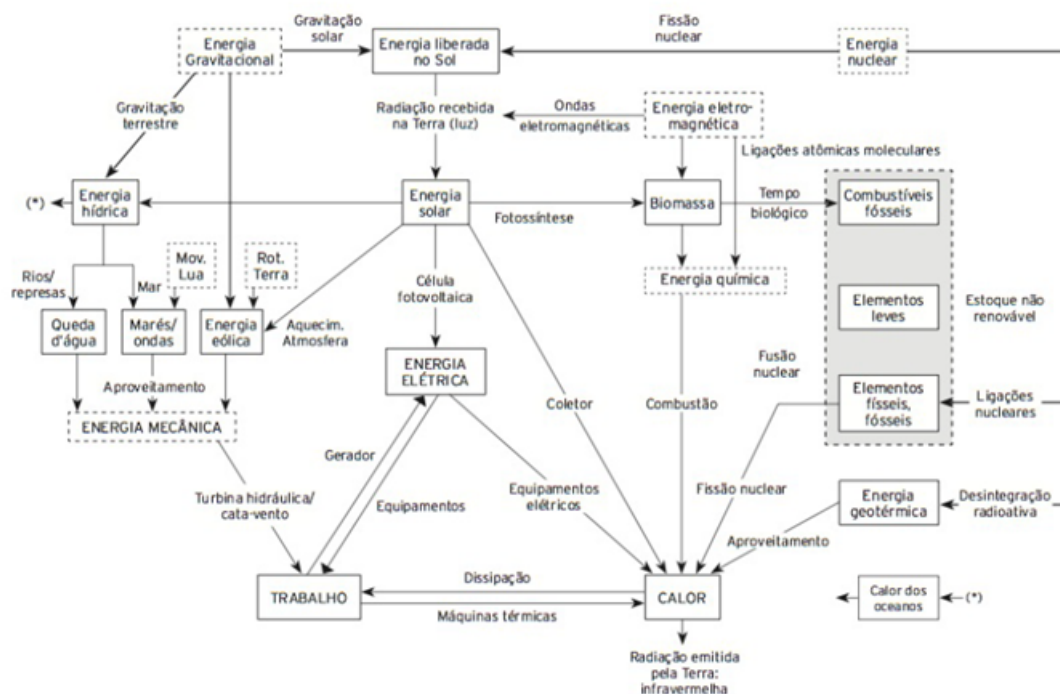
As fontes primárias utilizadas na geração de energia elétrica podem ser classificadas em renováveis e não renováveis. As fontes de energia não renováveis, tais como petróleo, gás natural e combustíveis nucleares, são recursos finitos que tendem a se esgotar a partir de uma necessidade de uso muito acelerada em função do tempo para sua formação. Sua transformação em energia elétrica é caracterizada principalmente por meio de processos térmicos, como combustão e fissão nuclear, o que se denomina como geração termelétrica. Em contraste, as fontes renováveis, como água, vento e sol, se reabastecem naturalmente em um ritmo menor do que seu consumo. Essas fontes podem ser geridas de forma sustentável e são aplicadas na geração de eletricidade em plantas hidrelétricas, eólicas e solares (REIS, 2011).

Segundo Peng et al. (2024), nos casos em que há a instabilidade entre geração e demanda, a

falta de fornecimento é convencionalmente apoiada por uma fonte de abastecimento confiável, como geradores a combustíveis fósseis. Uma instabilidade regional pode ser amenizada a partir de reforços nas interconexões entre áreas vizinhas, bem como instabilidades temporárias podem ser resolvidas a partir de sistemas de armazenamento de energia que operem em um determinado período. De forma adicional, a manutenção de um sistema de fornecimento contínuo e flexível para consumidores, industriais e comerciais é essencial, pois qualquer desequilíbrio entre o devido fornecimento de energia elétrica no período em que os consumidores necessitam, resulta desde uma oscilação no fornecimento até uma interrupção do serviço.

É notável a busca por um sistema seguro de fornecimento que comporte o suprimento do consumo mesmo em circunstâncias imprevisíveis. De acordo com Weedy et al. (2012), adicionalmente ao sistema de geração ser capaz de atender à carga consumida, uma certa porção da planta deve ser reservada para operar durante eventos repentinos, como uma falha em partes do conjunto ou um aumento inesperado na carga. Parte desta reserva deve ser capaz de ser levada à operação imediatamente nestes casos, e às vezes máquinas devem estar operando em uma faixa menor do que sua potência nominal para permitir que ainda reste uma capacidade de geração, o que é chamado de *spinning reserve*.

Figura 2 - Ilustração da origem das fontes de energia aplicadas no sistema de geração.



Fonte: Adaptado de Reis (2011).

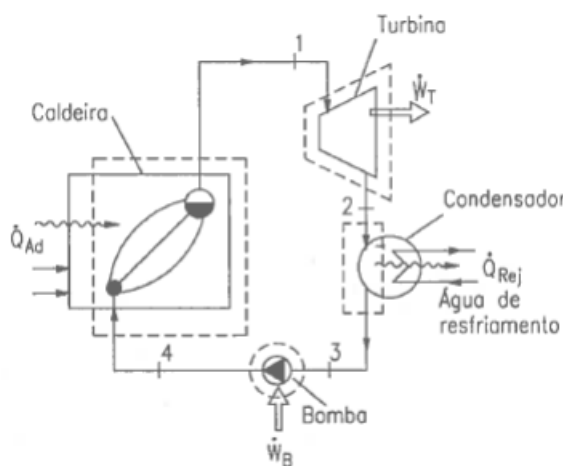
2.1.1 Geração Termelétrica e Nuclear

Partindo da conversão de energia térmica em mecânica e depois em elétrica, tem-se o princípio básico de funcionamento da geração termelétrica. Obtida por meio da queima de combustíveis fósseis ou renováveis, energia térmica é obtida no processo. Em uma central termelétrica se verifica a combustão como o primeiro estágio do processo de conversão de fontes potenciais em energia elétrica para em seguida dar partida a ciclos de sistemas de geração de potência, movendo turbinas a vapor, gás, ou até motores de combustão interna, (TOLMASQUIM, 2005; TEIXEIRA; LORA, 2004).

Um motor térmico rotativo de combustão externa é um exemplo de turbina a vapor que compõe unidades de grande potência, majoritariamente de alta confiabilidade, eficientes e de grande vida útil. No processo de combustão externa, uma mistura de combustível e ar que realiza o aquecimento do fluido de trabalho desse sistema, comumente água, sem entrar em contato direto com ele para transformá-lo em vapor. Este processo irá proporcionar o acionamento de uma turbina a partir do vapor que produzirá energia mecânica de rotação. Tendo o conjunto acoplado a um gerador elétrico, é possível obter eletricidade.

Ao se tratar de termodinâmica, é de conhecimento que o ciclo de geração de potência utilizando vapor, é denominado ciclo Rankine, exemplificado na figura 3.

Figura 3 - Representação do processo de geração termelétrica a partir do ciclo Rankine.



Fonte: Adaptado de Teixeira e Lora (2004).

Segundo Weedy et al. (2012), uma estação produtora de energia que opera no ciclo descrito pela figura 3, pode ser modificada para maximizar sua eficiência uma vez que opere com vapor em maior temperatura e pressão quanto possíveis.

Uma grande diferença de temperatura é necessária para gerar vapor no ciclo Rankine. O processo de combustão deve causar a geração de gases com temperaturas na faixa de 1000 °C até 1300 °C, porém o vapor em si pode atingir temperaturas na ordem de 500 °C neste regime,

(ARRIETA; NASCIMENTO; MAZURENKO, 2004; NASCIMENTO, 2004).

A geração termelétrica possui alta flexibilidade de operação, não estando sujeita à disponibilidade de recursos naturais, tais como incidência solar ou vento, para seu funcionamento. O que exerce um papel importante como componente da matriz elétrica brasileira e global, existindo vantagens também na instalação em pontos próximos a recursos de implementação à rede elétrica devido a sua capacidade de armazenamento, se tratando de plantas que não utilizam somente combustível ou gás natural, reduzindo custos de investimento em transmissão, (ENERGIA, 2007; TERMELÉTRICAS, 2011).

Dessa forma, pode-se tratar a energia gerada por esse tipo de planta, como uma segurança ao sistema de fornecimento. Segundo Termelétricas (2011), na ocorrência de intempéries ambientais ou falha nos equipamentos em outros sistemas geradores, é acionada, podendo produzir energia para suprir a falha quando demandada. É ainda mencionado no relatório que em uma suposta composição da matriz elétrica nacional em 2030, o carvão não pode ser desconsiderado, devido à necessidade do uso de todas as fontes disponíveis e também por sua abundância como recurso natural.

Segundo (IAEA) (2015), se comparadas, a operação de plantas nucleares é similar em conceito às usinas térmicas de ciclo simples. Ao se expandir, o vapor aquecido e em alta pressão faz o acionamento de uma turbina térmica para movimentar o gerador elétrico que está acoplado ao seu eixo. O ciclo térmico de Rankine descreve o processo uma vez que o vapor, após passar pela turbina, é resfriado, condensado e reaquecido como componente principal do regime gerador.

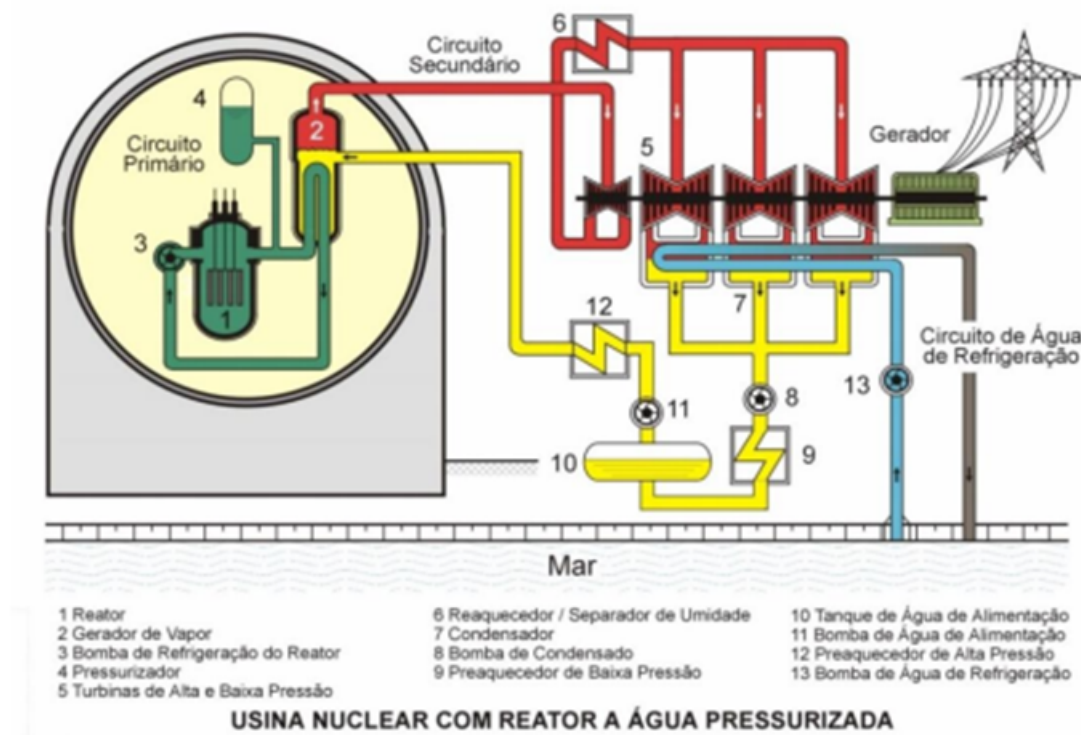
A diferenciação na geração termelétrica convencional para a nuclear se dá principalmente no combustível utilizado e pela forma que é realizado o aquecimento e vaporização da água dentro do sistema, (TOLMASQUIM, 2016).

Tendo como fonte reações nucleares, dentro do reator ocorre a fissão de átomos de um elemento radioativo que gera uma reação em cadeia, no procedimento de transformação de energia. Neste processo, um elemento de refrigeração deve realizar a absorção do calor formado e direcioná-lo ao exterior do reator para ser aproveitado, podendo acionar diretamente uma turbina a vapor ou trocar calor com um circuito secundário que tem por função o acionamento.

Um exemplo de geração nuclear pode ser verificado na figura 4. Um reator tipo PWR (*pressurized water reactor*) realiza o processo a partir da água em duas etapas diferentes. No circuito primário ela é aquecida e mantida sob pressão ótima para não ser vaporizada, somente para trocar calor com o conjunto subsequente. O circuito secundário é o que permite a formação de vapor a partir da troca térmica, acionando a turbina e assim movimentando o sistema para produção de energia elétrica (TOLMASQUIM, 2016).

Em termos de danos ambientais, não encontrar sinais de emissão de gases de efeito estufa é inerente à energia nuclear, que, em comparação com as termelétricas se verifica um grande

Figura 4 - Representação do processo de geração nuclear por PWR.



Fonte: Eletronuclear (2013).

prejuízo ao emitir quantidades expressivas de dióxido de carbono pelo uso de combustíveis fósseis (ROSA, 2007).

A opção nuclear vem sendo realocada na agenda de fóruns mundiais de energia devido à expectativa pelo gradativo aumento no consumo global advindo da crescente evolução tecnológica. Há grande ansiedade também na segurança energética e com pressões ambientais relacionadas à emissão de gases de efeito estufa (TOLMASQUIM, 2016). O que valoriza esta forma de geração, por se tratar de um processo mais sustentável do que a termelétrica convencional. Ainda que em contraste, segundo Tolmasquim (2016), mesmo com os avanços tecnológicos relacionados ao processo e sua manutenção, uma retomada vigorosa do setor é barrada pela preocupação relacionada aos custos envolvidos, resíduos e aceitação pública.

2.1.2 Geração Hidrelétrica

Segundo Weedy et al. (2012), o uso da força a partir da água é indiscutivelmente a forma mais antiga de conversão de energia. Esta que em uma estação hidrelétrica é obtida gratuitamente, mas a afirmação atrativa vem sempre sob a sombra de um enorme custo no investimento para sua construção, especialmente se tratando de trabalhos relacionados à engenharia civil. Não obstante, as condições geográficas necessárias para a geração hidráulica de grande potencial não são encontradas com facilidade e no projeto de usinas que possuam alta capacidade,

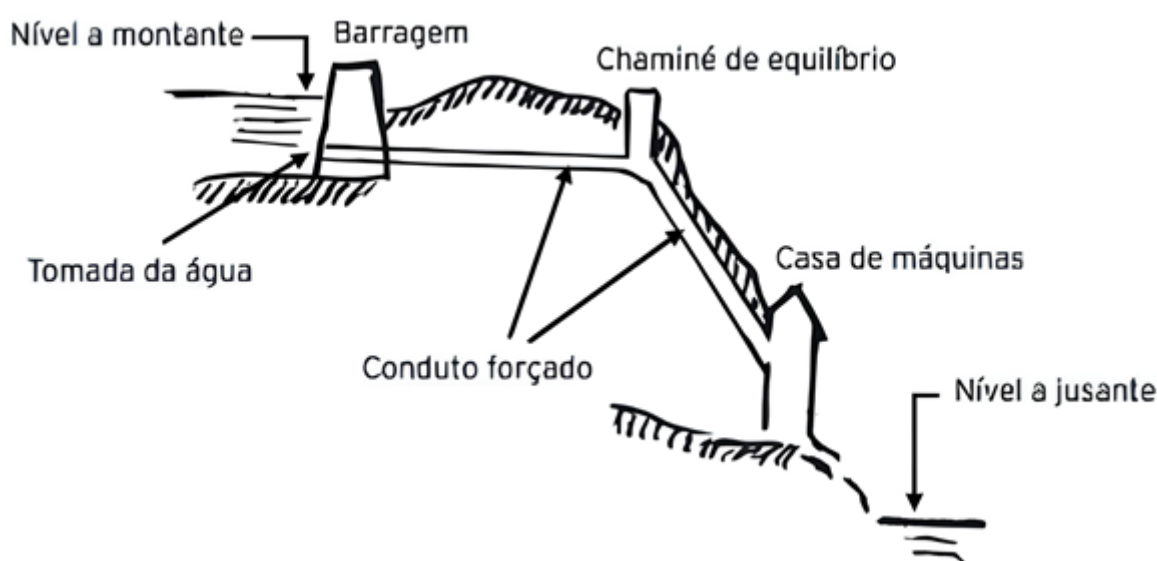
particularmente, necessitam de reservatórios compatíveis que causam um impacto significativo no ambiente e no cotidiano da população local.

As centrais geradoras hidrelétricas são parte fundamental dos sistemas de geração de energia elétrica, produzindo por meio do acionamento de um conjunto constituído por turbinas hidráulicas e geradores elétricos (grupos geradores), tendo a água como componente principal do sistema. Neste, a turbina é o componente que deve converter a energia hidráulica em energia mecânica quando impulsiona um conjunto de pás utilizando o fluxo de água. O gerador que possui o rotor acoplado mecânicamente à turbina, transforma a energia mecânica em elétrica. Normalmente, são empregados geradores síncronos, pois os SEEs devem sempre operar com frequência e tensão nominal constantes (VASCONCELOS, 2017).

Analisando o princípio de funcionamento de uma planta hidrelétrica, se verifica a aplicação de um recurso renovável como fonte geradora principal, que, para o cenário brasileiro de geração de energia, representa uma grande porcentagem da produção nacional. Dados advindos da ANEEL, 2024 descrevem uma capacidade instalada de aproximadamente 23 GW somente no estado de São Paulo. Tratando-se de âmbito nacional, conforme o Ministério de Minas e Energia pela Secretaria de Energia Elétrica, a federação brasileira possui cerca de 117,7 GW de capacidade instalada, dos quais 50,6 GW provém somente de usinas hidrelétricas de energia (UHE), o que representa mais de um terço de toda capacidade de produção do país (ANEEL, 2024; ENERGIA, 2024).

Tratando-se dos componentes das centrais, essencialmente, é possível verificar os seguintes elementos: barragens, extravasores, comportas, tomada de água, condutos, chaminés de equilíbrio (ou câmaras de descarga) e casa de força (REIS, 2011).

Figura 5 - Representação dos componentes de uma central hidrelétrica.



Fonte: Reis (2011) - p.83.

2.1.3 Geração Eólica e Solar

As plantas produtoras de energia elétrica por fontes eólica e solar, são notoriamente vinculadas à geração de energia renovável, pelo seu princípio de funcionamento que utiliza recursos naturais provenientes da radiação solar e do deslocamento de massas de ar, independentemente da ação humana para sua existência ou renovação.

Segundo Tolmasquim (2016, p. 70), nas energias solar e eólica, também inseridas no contexto de energias alternativas, a irradiação solar e a velocidade dos ventos funcionam como combustível para a produção de eletricidade.

Fotovoltaica e turbinas eólicas têm se tornado duas das mais promissoras fontes de energia porque suas fontes de energia são gratuitas e sustentáveis. Além disso, estas fontes de energia são preferíveis por serem complacentes ao meio ambiente (AHMED; MIYATAKE; AL-OTHMAN, 2008, p. 1).

Em termos de porcentagem, a energia eólica é a tecnologia energética que apresenta maior velocidade em crescimento anual por fonte de tecnologia em termos de capacidade instalada. Todavia, ao se tratar do desenvolvimento de plantas eólicas, ainda apresentam uma distribuição desuniforme no mundo (AHMED; MIYATAKE; AL-OTHMAN, 2008).

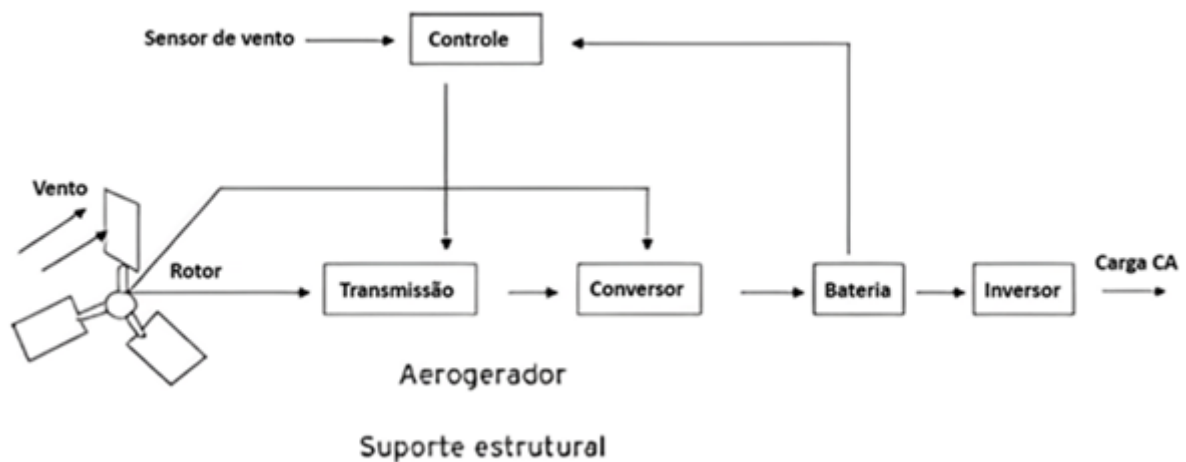
Segundo Tolmasquim (2016), a classificação das turbinas eólicas pode variar conforme a orientação do eixo de seu rotor em relação ao solo, podendo ser vertical ou horizontal. Rotores que possuem a orientação de seu eixo na horizontal são os mais comuns e eficientes para geração de eletricidade, aproveitam de forças de sustentação e de outros mecanismos para manter as pás perpendiculares ao vento. Se verifica maior eficiência na operação de turbinas com três pás e com ventos fortes, devido ao baixo torque de partida. Em contraste, as turbinas de eixo vertical são capazes de produzir energia sem a necessidade de ajuste da posição do rotor em relação a direção vento, que embora menos eficientes, são úteis em aplicações de baixa potência e não se verifica a necessidade de ventos fortes para iniciar sua operação.

Segundo GWEC (2023), 2022 foi o ano em que, apesar de apresentar o menor nível de crescimento dos últimos três anteriores e em meio a um ambiente econômico instável com a cadeia de suprimentos global interrompida, a capacidade de geração eólica apresentou desenvolvimento em cerca de 78 GW, registrando a terceira posição historicamente.

Naquele ano, foi registrada uma capacidade total instalada de 906 GW, incluindo os novos 77.6 GW, o que representa um crescimento anual de 9 pontos percentuais em capacidade instalada somente proveniente da energia eólica. Há uma previsão de que a energia eólica, em capacidade, atinja 2 TW por volta de 2030, (GWEC, 2023; IRNE, 2023).

Segundo Pankove (1975), pode ser verificada a geração de diferença de potencial elétrico entre dois pontos a partir de um dispositivo que absorve fótons, sob iluminação, que se denomina efeito fotovoltaico. Os sistemas fotovoltaicos podem ser classificados a partir de seu

Figura 6 - Diagrama de blocos representando um sistema eólico automático.

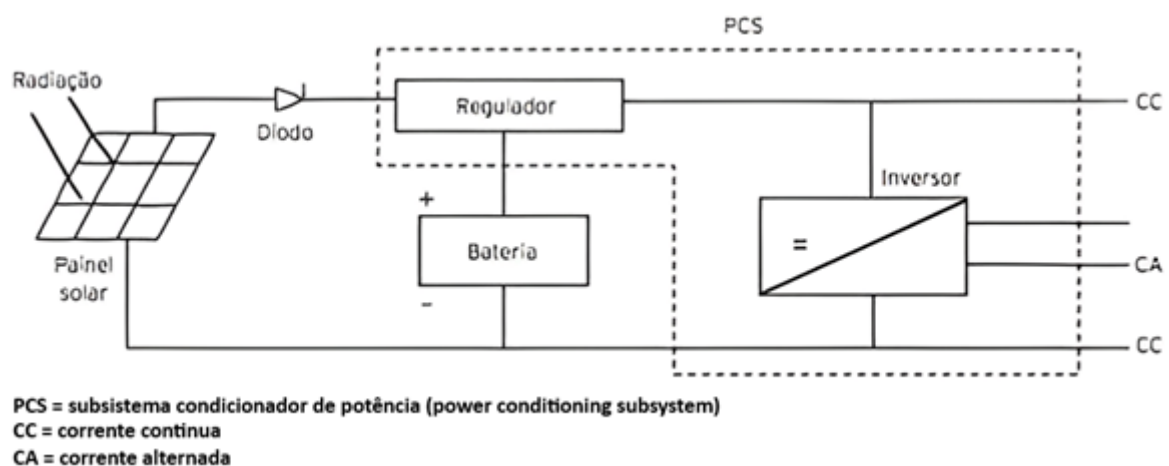


Fonte: Reis (2011) - p.245.

método de conversão que se utiliza da energia solar para produzir energia elétrica. No entanto, a fonte renovável solar fotovoltaica é considerada fonte intermitente de energia em decorrência de variações climáticas que estão associadas a eficiência da planta, (ALVES, 2019).

A transformação ocorre a partir do agrupamento série de componentes e equipamentos por meio de painéis solares para a captação da energia solar, possibilitando a geração de energia elétrica para utilização do usuário. Tendo como principais constituintes deste conjunto os elementos representados pela figura 11.

Figura 7 - Esquema de representação da geração por energia solar.



Fonte: Reis (2011) - p.216.

A solar é uma fonte de energia renovável importante para a execução de estratégias envolvendo baixas emissões de carbono, pois difere de fontes energéticas não renováveis como combustíveis fósseis ou carvão Zhang et al. (2024).

Segundo Alves (2019, p. 21), o sol é a maior fonte primária de energia renovável do planeta, além de ser também responsável pelo desenvolvimento e pela vida na terra, devido à abundância de calor e luz fornecidos por ele.

2.2 Sistema de Transmissão

A eletricidade se tornou uma necessidade para a existência humana e é usada para uma grande gama de propósitos, desde o doméstico até a indústria. Atualmente, devido ao desenvolvimento da tecnologia, é notável a presença de diversos tipos de dispositivos eletrônicos em residências, indústrias, hospitais e outros locais, que necessitam do fornecimento energia elétrica para seu funcionamento; assim, a energia elétrica se verifica como indispensável para o progresso tecnológico. No entanto, não é uma fonte de energia primária, ou seja, a sua produção requer a utilização de fontes de energia primária, como carvão, petróleo, gás natural, urânio, água do mar e do rio, vento, radiação solar. Muitas vezes, a fonte primária está distante da base consumidora, tornando necessário o investimento na transmissão de energia.

Segundo Neoenergia (2024), o processo pelo qual a eletricidade gerada em usinas é transportada para residências, comércios e indústrias é conhecido como transmissão de energia. Isso é feito por meio de cabos e torres metálicas estrategicamente posicionados para conectar as geradoras de energia aos locais de consumo.

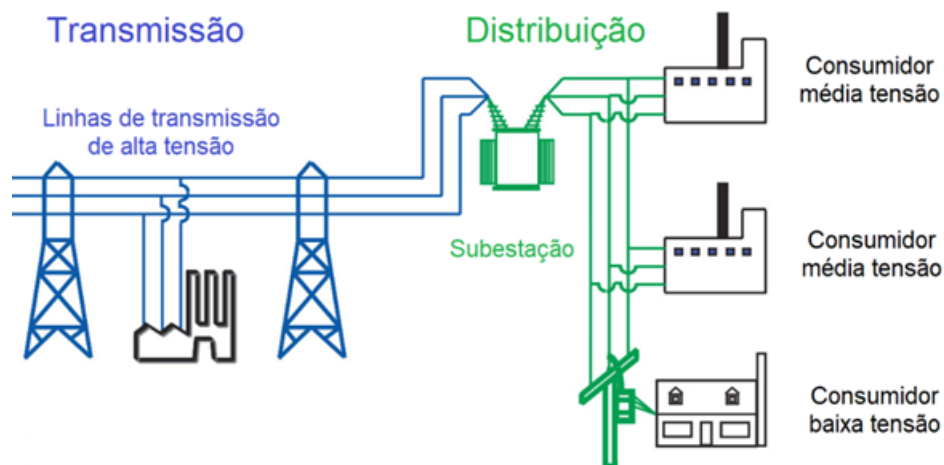
O Sistema de transmissão exerce papel fundamental além do atendimento o mercado consumidor. Ao interligar os submercados de energia elétrica, permite uma equalização dos preços pela minimização de estrangulamentos no fornecimento entre eles, dessa forma possibilitando um despacho mais otimizado a partir do parque gerador (EPE, 2017).

Para se aliar com perspectivas tecnológicas da expansão da rede distintas, sistemas de controle que proporcionem uma segurança elétrica do sistema interligado de forma adequada permanece sendo um desafio, por se tratar de um processo que tende a se tornar cada vez mais complexo quanto a seu desenvolvimento. Nesse sentido, cita-se o desenvolvimento de sistemas mais sofisticados para o monitoramento e o apoio à decisão operativa em tempo real, assim como de funções mais avançadas para a proteção do sistema elétrico (EPE, 2020).

2.3 Sistema de Distribuição

O sistema de distribuição é responsável pela interligação do sistema de transmissão até seu consumidor final. A conexão entre esses sistemas se verifica na subestação de distribuição, onde transformadores abaixam a alta tensão advinda do sistema de transmissão para os alimentadores de distribuição em média, que são componentes da distribuição primária, (SHORT, 2004).

Figura 8 - Esquema de represetanção transmissão-distribuição.



Fonte: Adaptado de Alfacomp (2024)

Segundo Vasconcelos (2017, p. 174), os sistemas de distribuição de energia elétrica são comumente inseridos como parte dos SEEs, cuja definição engloba desde a subestação abaixadora de distribuição até os pontos em que estão conectados os consumidores finais.

Dessa forma, em sequência, o conjunto de distribuição primária em média tensão é conectado à secundária em baixa tensão por meio de transformadores de distribuição. O sistema secundário é aquele que cuja função é ligar o consumidor final ao SEE.

Segundo Vasconcelos (2017, p. 174):

- Rede de Distribuição Primária: corresponde à média tensão – no Brasil equivale à rede de 13,8 kV – e compreende a subestação de distribuição (ou subestação primária) e os alimentadores primários;
- Rede de Distribuição Secundária: corresponde à baixa tensão – no Brasil equivale à rede de 220/127 V ou 380/220 V – e compreende os transformadores de distribuição, os alimentadores secundários e os ramais de serviço ou de ligação.

O sistema de distribuição de energia possui uma infraestrutura extensa e complexa, pois tem por função fornecer energia elétrica até a localidade consumidora onde quer que se encontre, sejam elas concentradas em cidades, no meio rural ou em regiões ainda mais remotas (SHORT, 2004).

Segundo Souza (2020a), essa infraestrutura deve se estender ao longo de ruas e estradas em estruturas aéreas ou então subterrâneas, disposição que deve dificultar a coexistência de mais de um sistema de distribuição em uma mesma área, o que torna este sistema um monopólio quase que de forma natural e, dessa maneira, é altamente regulado. No Brasil, a ANEEL é a organização governamental responsável por regular o sistema de distribuição que através do

Procedimento de Distribuição (PRODIST), uma série de documentos, normatiza e padroniza as atividades técnicas relacionadas ao sistema de distribuição.

A intensidade e a densidade de carga; tipo de consumidor; configuração; nível de tensão; e o número de fases e condutores, são todas, características dos sistemas de distribuição que devem ser definidas durante o planejamento, a operação e o projeto (VASCONCELOS, 2017). Ainda no contexto da complexidade do sistema, segundo Vasconcelos (2017) nos sistemas de distribuição de energia, os consumidores podem ser classificados por categorias como residencial; rural; comercial; industrial; ou serviços públicos.

Compreender o comportamento do consumo dos clientes conectados ao conjunto é essencial para a modelagem das cargas do sistema de distribuição. Essa que permite à concessionária estimar o fluxo de potência nos alimentadores, perfil de tensão e a corrente transmitida nas linhas. Essas aplicações são essenciais para o planejamento e a operação ótima dos sistemas de transmissão (SOUZA, 2020a). Devido ao comportamento de cada grupo consumidor, a demanda deve variar ao longo do tempo, formando uma curva conhecida como perfil de carga (ou curva de carga) que deve ter formatos comuns entre grupos de clientes específicos conforme as categorias descritas anteriormente.

Se tratando da classificação das cargas no sistema de energia elétrica, pode-se definir como carga a potência elétrica que é absorvida a partir de uma fonte de alimentação seja por um único elemento ou por um conjunto de equipamentos, podendo assim denominar o próprio equipamento a carga. Neste sentido, é possível definir a carga como sendo um consumidor final, uma carga advinda de um transformador, alimentador ou até de uma subestação, como ilustrado na tabela 1. Dessa forma é possível classificar a partir de diferentes critérios para obter um perfil específico a cada grupo que se veja necessário avaliar.

Tabela 1 - Composição típica da carga de uma subestação

	Percentual de Consumo
Motores de indução	50–70%
Iluminação e aquecimento	20–25%
Motores síncronos	10%
Perdas de transmissão e distribuição	10–12%

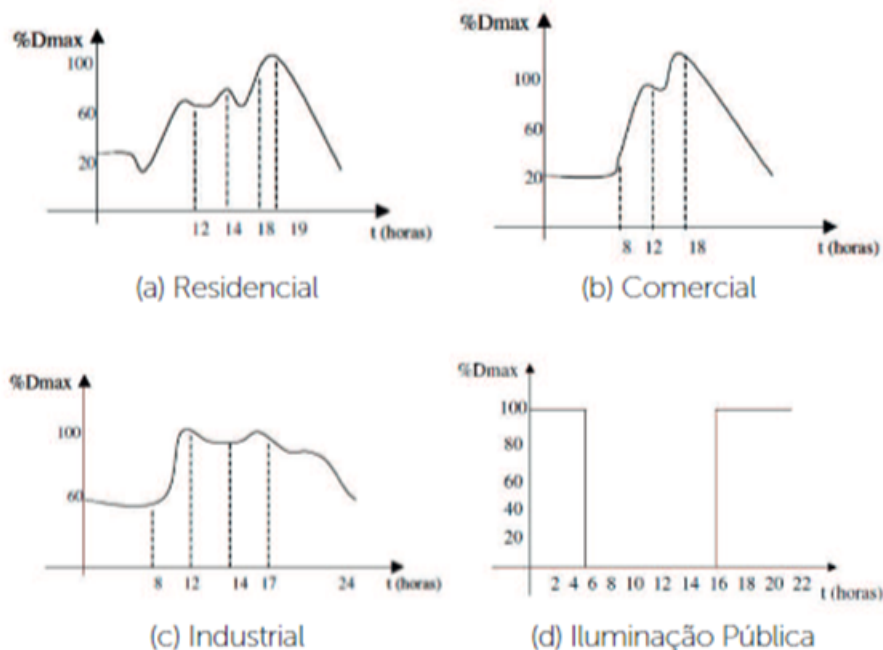
Fonte: Adaptado de (WEEDY et al., 2012, p. 178).

Ao longo de uma linha de distribuição de energia elétrica, ficam instalados diferentes tipos de consumidores, consequentemente, com diferentes hábitos de consumo. Em geral, um consumidor tem curva de carga diferente a cada dia. Mesmo diferentes, essas curvas guardam uma forma que é própria do consumidor e que serve para definir o grupo em que se enquadra (VASCONCELOS, 2017, p. 178 a 179).

Dessa forma, ao analisar a curva típica de carga de cada classe consumidora, é possível

obter perfis que representam o consumo ao longo do tempo para cada grupo específico, como é representado pela figura 9.

Figura 9 - Curva típica de carga (a) residencial, (b) comercial, (c) industrial e de (d) iluminação pública.



Fonte: Vasconcelos (2017) - p.180.

A partir da figura 9, é possível definir que um consumidor residencial típico, conforme ilustrado, utiliza mais energia entre 17 e 22 horas. Nesse intervalo, o consumo é ainda maior entre 19 e 21 horas, que se deve à carga de iluminação (figura 9 (a)). No setor comercial (figura 9 (b)), a demanda geralmente começa nos horários comuns de início da jornada de trabalho (8 – 9 horas) e cai acentuadamente após o fim do expediente (18 horas). Em indústrias que operam em dois turnos, a carga diminui na hora do almoço e se reduz ao mínimo por volta das 18 horas, o que se mantém até o início do turno seguinte. As cargas de processamento contínuo (fornos por exemplo) não devem ser desligadas durante a noite, a curva típica de carga industrial está representada pela figura 9 (c). Já a carga de iluminação pública, de modo geral, é bem definida (figura 9 (d)), apresenta consumo das 18 h às 6 h e não das 6 h às 18 h, a qual reflete as horas em que há iluminação natural disponível.

2.3.1 Redes Inteligentes

Demonstrado o constante crescimento das redes de energia elétrica, se faz possível relacionar que o sistema de distribuição deve acompanhar a evolução da demanda para fornecer energia elétrica aos consumidores de maneira confiável. Neste sentido, também é notável o desenvolvimento tecnológico do próprio sistema de distribuição de energia elétrica (SDEE).

Segundo Jabir et al. (2018), dada a transição de redes convencionais para inteligentes e o aumento dos recursos energéticos distribuídos (REDs), é verificada a necessidade da renovação das redes para se adaptarem ao crescente nível de carga. Portanto, o gerenciamento da capacidade das redes de distribuição se torna essencial. Os programas de gerenciamento do lado da demanda oferecem soluções para tal, podendo melhorar significativamente a confiabilidade e o desempenho financeiro dos sistemas de energia elétrica.

Para reduzir perdas técnicas, melhorar o desempenho operacional e permitir a integração em larga escala de fontes renováveis ao SEE, um novo modelo de sistema se faz necessário. Esse modelo, que deve integrar de forma eficiente as fontes renováveis e intermitentes de geração de energia à rede, além de possibilitar o gerenciamento da demanda pelo consumidor, atuando assim como facilitador da implementação de projetos de recursos energéticos distribuídos (CIÊNCIA, 2022).

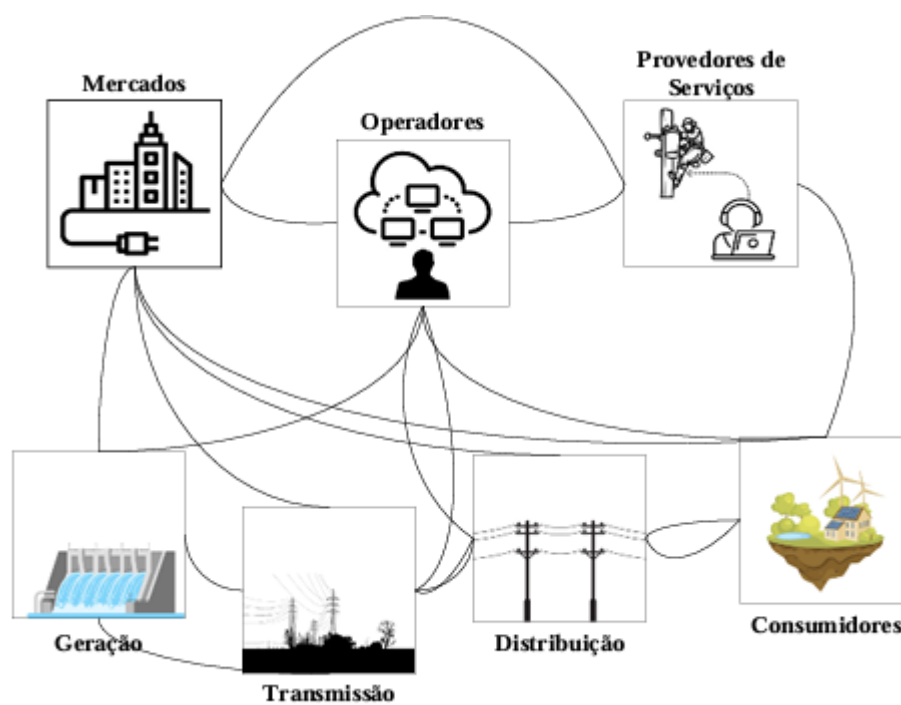
2.3.1.1 *Smart Grids*

Dado o conceito de redes inteligentes, um novo termo é introduzido. Segundo o autor Serrano (2023) ainda não se verifica um consenso em relação à definição de *smart grids*, mas cita que segundo Institute (2019), NIST (2010), Commission (2007) existe uma ideia comum de que representa a integração de infraestrutura de informação, comunicação e novas tecnologias na rede elétrica. O que permite um fluxo bidirecional de energia e informações, além de utilizar o gerenciamento da resposta à demanda, visando coordenar fontes de energia renováveis e cargas elétricas. É discutido ainda por Serrano (2023) que a *smart grid* deve ser interpretada como um conceito ao invés de como uma tecnologia específica. Trata-se de uma rede elétrica que emprega tecnologia de informação, sensoriamento e automação, atuando para fornecer energia elétrica de forma eficiente, confiável e segura.

Um sistema mais dinâmico baseado na GD está substituindo o sistema de distribuição tradicional baseado na geração de energia centralizada, tornando os sistemas mais complexos e altamente interconectados, (SERRANO, 2023).

As *smart grids* são uma alternativa inteligente aos altos investimentos necessários para atender à demanda da maneira tradicional. Permitem a integração de recursos energéticos distribuídos, medição online, além de apresentar capacidade adaptativa e de autorrecuperação (*self-healing*). Por isso, as *smart grids* são adaptações atraentes tanto para consumidores quanto para empresas de energia no âmbito da geração, transmissão e distribuição, que irão promover robustez, segurança e agilidade na rede. Assim, os usuários finais deixam de ser apenas consumidores e se tornam prosumidores, participando de programas de gerenciamento do lado da demanda (GLD), (ALCÂNTARA, 2011). Pode ser encontrada referência a um modelo conceitual de uma rede inteligente na figura 10.

Figura 10 - Representação de modelo conceitual de uma rede inteligente.



Fonte: NIST (2010).

3 GERAÇÃO DISTRIBUÍDA

A GD é uma fonte de produção de energia elétrica que se caracteriza primariamente pela proximidade dos geradores com os consumidores, podendo ser descrita como uma estratégia de geração descentralizada, que se contrapõe ao modelo tradicional de geração centralizada. Nela se verifica a existência de geradores menores que são instalados próximos aos centros de consumo ou até no mesmo local onde a produção é consumida, operando em paralelo com a rede elétrica comum. O que significa que o consumidor recebe a alimentação de forma simultânea tanto pela rede elétrica quanto pelo seu próprio gerador.

A geração distribuída localiza-se, por definição, próxima das cargas elétricas. Suas unidades geradoras, além de suprir a energia localmente, possuem condições próprias para desempenhar um papel importante para o conjunto do sistema interligado. Mesmo quando paradas, como geradores de emergência, aumentam as reservas de potência do sistema, melhorando a confiabilidade do fornecimento, (DRIEMEIER, 2009, p. 27).

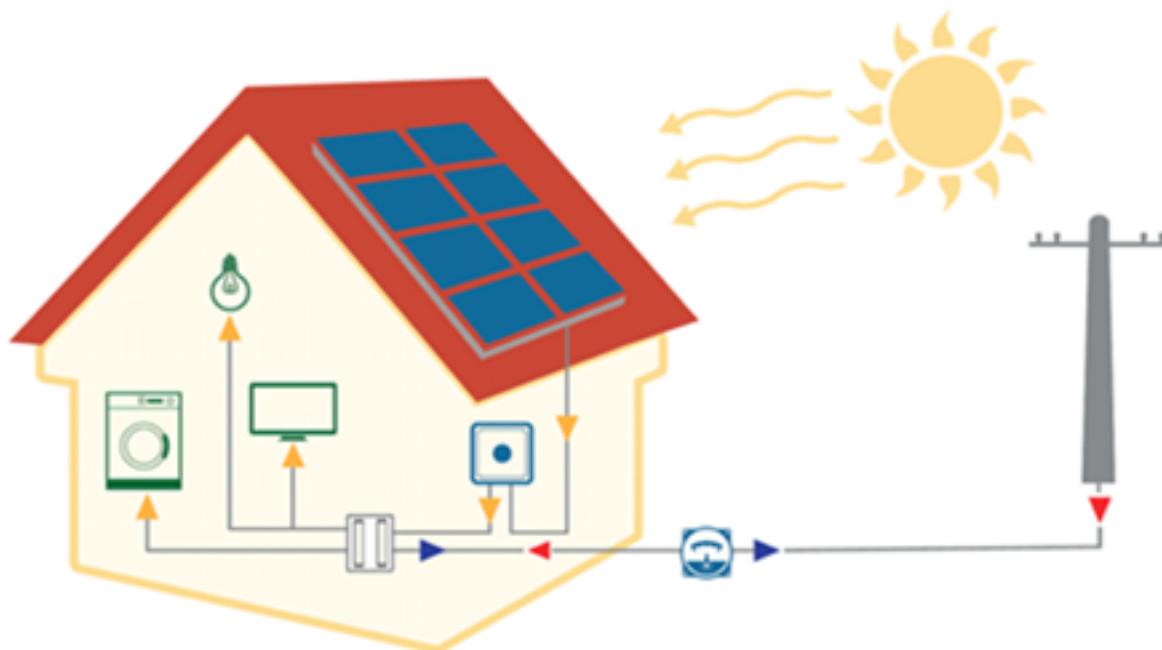
Segundo Santos et al. (2017), a GD refere-se à produção de energia elétrica realizada nas proximidades dos consumidores, que independe da potência, tecnologia ou fonte de energia empregada. A GD deve contemplar: Cogeneradores; Geradores em geral; Painéis fotovoltaicos; Pequenos aerogeradores até Pequenas Centrais Hidrelétricas.

3.1 Fluxo Bidirecional

Em contraste com um sistema elétrico tradicionalmente unidirecional, que envolve as etapas de geração, transmissão e distribuição para atender às demandas energéticas dos consumidores finais, se verifica atualmente um novo modelo no qual os próprios consumidores não apenas consomem energia, mas também a injetam de volta na rede como excedente da própria geração. Neste novo arranjo, o cliente passa a desempenhar um papel ativo na matriz elétrica, dando origem ao termo "prossumidores" atuando simultaneamente como consumidores, mas também como produtores de energia (SIMONE, 2019).

Seguindo a linha de raciocínio, segundo Souza (2020b), a partir da transição para esse novo sistema, o fluxo de energia se verifica bidirecional, o que requer uma gestão em tempo real por parte das distribuidoras. O que deve implicar na necessidade de investimentos em planejamento, operação e manutenção do novo modelo. Para garantir a qualidade do serviço prestado, as empresas devem realizar aportes técnicos e financeiros adequados com a transição, assegurando seu funcionamento de maneira segura e eficiente.

Figura 11 - Esquema de representação de um fluxo bidirecional de energia elétrica.



Fonte: ABSOLAR (2024)

3.2 Evolução no Brasil

Nesta seção se dispõe um breve estudo sobre o desenvolvimento da GD no Brasil, de forma que se verifique clara a origem e importância do novo modelo de geração que compõe uma porção, hoje significativa, do sistema energético nacional.

Além de gerar energia limpa e renovável, a GD também contribui para levar desenvolvimento social e empreendedorismo a todos os estados brasileiros. Faço questão de destacar que a geração distribuída é a mais democrática das modalidades de geração de energia. E quem ganha com isso, sem dúvida nenhuma, é a população (CHRISPIM, 2022), presidente da ABGD.

3.2.1 História

Foi em 2004, com a Lei nº 10.848/2004, que ocorreu a reorganização do sistema elétrico brasileiro (SEB), instituindo leilões para a contratação de geração centralizada (GC) e definindo o conceito, de forma propriamente dita, de GD no Brasil. O Decreto nº 5.163/2004 foi o que complementou essa reorganização, ao regulamentar a comercialização de energia elétrica bem como outros procedimentos. Posteriormente naquele mesmo ano, a REN nº 77/2004 da ANEEL estabeleceu procedimentos para a redução das tarifas pelo uso dos sistemas elétricos de transmissão e distribuição para a geração solar distribuída e outras fontes. A REN nº 414/2010 foi a

que atualizou e consolidou as condições gerais de fornecimento.

Tem-se início com a Resolução Normativa 482/2012 da ANEEL, a história da GD no Brasil de forma efetiva. Resolução essa que estabelece as condições gerais para o acesso de unidades de micro e minigeração distribuída aos sistemas de distribuição, além de criar um sistema de compensação de energia elétrica, que permite o retorno do excedente de produção à rede como forma de empréstimo. Posteriormente, a Resolução Normativa 687/2015 complementa a Resolução 482, adicionando diferentes modalidades de adesão ao sistema, o que atuou para moldar a legislação atual. Desde então, a GD tem crescido progressivamente, ganhando cada vez mais destaque na matriz energética nacional (Ministério de Minas e Energia/Empresa de Pesquisa Energética, 2020).

A partir da RN 482/2012 foi estabelecida a possibilidade de entidades privadas (pessoa física ou jurídica) a construir sistemas de geração e interligá-los ao sistema integrado nacional (SIN) desde que especificadas condições fossem atendidas, o que inclui que a fonte primária seja renovável ou uma cogeração qualificada estabelecendo também limites para categorizar a micro e minigeração, assim como outras condições de regulamentação.

Na tabela 2, são organizados os principais marcos legais, segundo Santos et al. (2017), conforme descrito anteriormente.

Tabela 2 - Principais marcos legais da geração distribuída no Brasil.

Marcos Legais	Data	Definição
Regulamentação		
Lei Nº 10.848/2004 da Presidência da República	15/03/2004	Corresponde ao atual Marco Regulatório do Setor Elétrico Brasileiro (SEB) e introduziu o conceito de geração distribuída. Dispõe sobre a comercialização de energia elétrica, altera as Leis Nº 5.655/1971, Nº 8.631/1993, Nº 9.074/1995, Nº 9.427/1996, Nº 9.478/1997, Nº 9.648/1998, Nº 9.991/2000, Nº 10.438/2002, e dá outras providências.
Decreto Nº 5.163/2004 da Presidência da República	30/07/2004	Regulamenta a comercialização de energia elétrica, o processo de outorga de concessões e de autorizações de geração de energia elétrica, e dá outras providências.
Regulação		
Resolução Normativa (REN) Nº 482/2012 da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL)	17/04/2012	Estabelece as condições gerais para o acesso de microgeração e minigeração distribuída aos sistemas de distribuição de energia elétrica, o sistema de compensação de energia elétrica, e dá outras providências.
REN Nº 517/2012 da ANEEL	11/12/2012	Altera a RN Nº 482/2012 e o Módulo 3 dos Procedimentos de Distribuição – PRODIST.

Fonte: Santos et al. (2017)

3.2.2 Desenvolvimento

A expansão do novo modelo, apresenta incentivo aos consumidores de distintas categorias a produzir sua própria energia; movimenta o setor trabalhista para a instalação e fabricação de

seus componentes; fomenta o uso de fontes alternativas e limpas de geração para se alinhar visando de uma sociedade mais sustentável; e ainda torna o próprio sistema energético mais eficiente ao atenuar perdas pela transmissão. Se mostrando uma escolha viável por apresentar vantagens nas esferas econômica, social e ambiental. O sistema introduzido permite uma rápida expansão na oferta de energia elétrica nacionalmente, reduzindo também custos ao aumentar a disponibilidade.

Segundo Pimentel (2022, p. 22), como incentivo à adesão dos consumidores à GD, trata-se de um mecanismo que permite a compensação futura do consumo de energia elétrica, onde a unidade com MMGD, seja junto à carga, múltiplas unidades consumidoras, compartilhada ou caracterizada como auto-consumo remoto, injeta na rede de distribuição a quantidade de energia ativa não consumida no momento da geração. O saldo positivo da injeção maior que o consumo é chamado de crédito. Cada 01 kWh de crédito equivale a 01 kWh injetado, e o crédito poderá ser utilizado pela unidade consumidora para compensação em ciclos futuros.

Se tratando de território nacional, segundo o sistema de informações de geração da ANEEL (SIGA), até junho de 2022, o Brasil possuía 1.083.709 unidades conectadas ao sistema energético, totalizando uma potência instalada de aproximadamente 11,6 GW. Ainda naquele ano, em outubro, segundo Chrispim (2022) o Brasil ultrapassou a marca de 14 gigawatts (GW) de capacidade em GD superando a potência instalada da usina de Itaipu, que, sozinha, é responsável por cerca de um décimo da energia consumida no País, a maior hidrelétrica em operação. Na figura 12, é representada a evolução ano a ano conforme registrado pela ABGD (Associação Brasileira de Geração Distribuída).

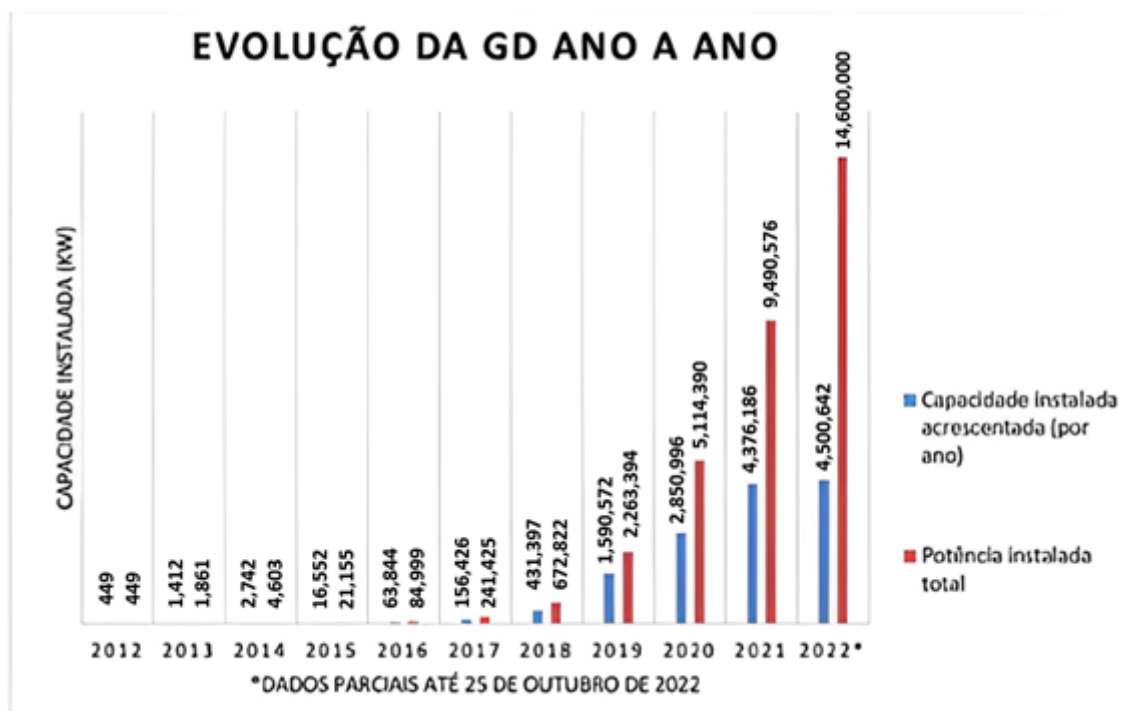
Em termos de evolução deste novo modelo, há registro pelo SIGA que até outubro deste ano, 2,942,780 unidades, representando uma potência instalada de 33,01 GW distribuídos por 5,555 municípios pelo Brasil. Na figura 13, é apresentado como as conexões cresceram nos últimos anos segundo dados da ANEEL.

3.3 Integração com a rede de distribuição

Antes da publicação da RN 687/2015, era regulamentada pela ANEEL apenas uma modalidade de GD, a que atuava junto à carga. Com a publicação da nova resolução, foram introduzidas três variações para de ampliar o acesso dos consumidores. Atualmente, abrangendo quatro modalidades distintas: geração junto à carga, autoconsumo remoto, geração compartilhada e empreendimento com múltiplas unidades consumidoras (EMUC).

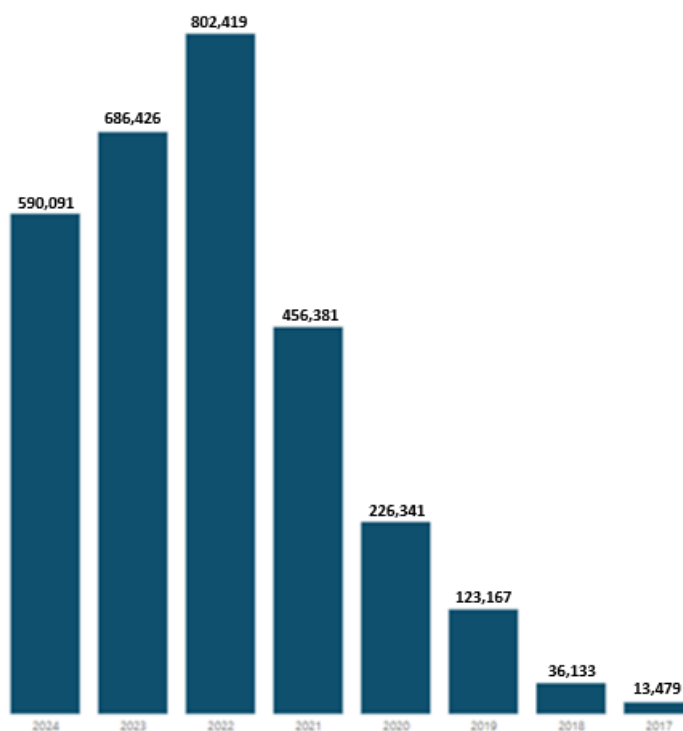
- **Geração Junto à Carga:** É a modalidade mais simples, onde o consumidor instala um sistema de geração de energia elétrica no mesmo local onde a energia deve ser consumida. O sistema compartilha o ponto de conexão com a distribuidora, e apenas a unidade

Figura 12 - Representação da evolução da GD de 2012 até 2022 no Brasil segundo ABGD.



Fonte: Chrispim (2022) - p.40.

Figura 13 - Representação da evolução das conexões de GD no Brasil até outubro deste ano.



Fonte: SIGA ANEEL (2024).

consumidora onde o sistema está instalado recebe os créditos de energia, sem outros beneficiários. Dessa forma, o cliente passa a ser capaz gerar toda a energia que atenda ao consumo da sua residência;

- **Autoconsumo Remoto:** Permite que o consumidor instale sua unidade geradora (UG) em um imóvel diferente da unidade consumidora, desde que estejam sob a mesma titularidade e na mesma área de concessão da distribuidora. Ideal para consumidores com várias unidades registradas no mesmo nome, incluindo matriz e filiais, é a segunda mais utilizada na GD, que aproveita do sistema de créditos de energia;
- **Geração Compartilhada:** Unidades consumidoras dentro da mesma área de concessão compartilham a geração de energia advinda de um único sistema, instalado em um local diferente de onde há o consumo possibilitando a reunião de um grupo de consumidores para compartilhar da geração. Se verifica a formação de cooperativas ou consórcios para investir em uma unidade geradora, que produz energia/créditos distribuídos conforme um contrato pré-definido. Modalidade comum em fazendas solares, onde grupos alugam ou compram painéis fotovoltaicos para economizar nas contas de luz;
- **EMUC:** Consiste em diversas unidades consumidoras em um mesmo local que utilizam energia de forma independente, dessa maneira o consumo é medido separadamente, apesar de compartilharem um único ponto de conexão com a distribuidora. A unidade geradora é instalada em uma área comum do empreendimento e um sistema distribui energia/créditos a partir de um contrato pré-definido. Essa modalidade é comum em propriedades adjacentes, podendo até incluir unidades com diferentes titularidades de CPF e/ou CNPJ, como, por exemplo, moradores do mesmo condomínio.

3.3.1 Geração Solar Fotovoltaica

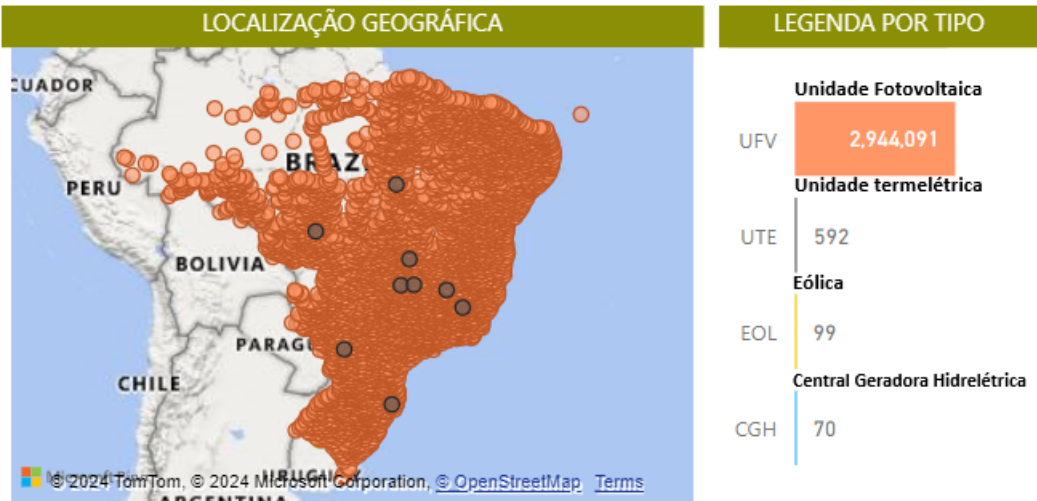
O setor energético segue em busca por maiores níveis de eficiência e participação de fontes renováveis em sua matriz. Devido ao crescente fluxo de informações à sociedade, a energia solar vem ganhando espaço e não somente na geração própria nas residências, mas também em conjunto com a implantação de fazendas solares, uma vez que o grande potencial de geração de energia em países com clima tropical, como o Brasil, promove interesse econômico em diversos níveis.

A conclusão se prova verdadeira uma vez que, ainda com referência aos dados da ANEEL de 2024 e a figura 13 apresentada anteriormente, do número total de conexões registradas em termos de geração distribuída no Brasil, outras unidades geradoras além de fotovoltaicas representam apenas cerca de 0,026%. Composição essa retratada na figura 14.

Há dois anos, segundo Chrispim (2022) a matriz solar, puxada pela geração própria de energia, que responde por cerca de 68% da potência dessa mo-

dalidade, chegou à terceira posição entre as principais fontes de energia em potência instalada no País, com chances reais de alcançar, em breve, a segunda posição, ocupada hoje pela energia eólica.

Figura 14 - Arranjo das conexões de GD no Brasil até outubro de 2024.



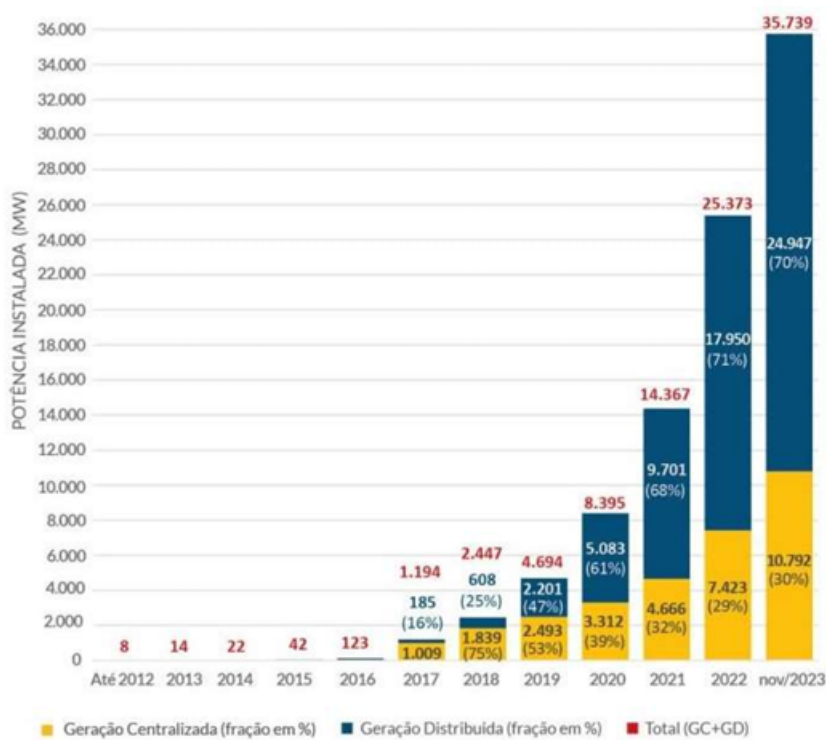
Fonte: SIGA ANEEL (2024).

A partir de 2017, se verificou um crescente avanço nesta área, registrando um aumento em termos de potência instalada de 2022 para 2023 de 6,471 GW em GD, e 3,008 GW em GC, notavelmente maior quando se trata da aplicação em GD (CARVALHO, 2024). A figura 14 tem por objetivo representar os dados descritos em referência à potência instalada em geração fotovoltaica no Brasil.

Tal como mencionado por Pimentel (2022), essa tendência de crescimento acelerado pode ser atribuída a diversos fatores, como a evolução das tecnologias computacionais, que resultam na redução dos custos dos sistemas de controle das operações (INEE, 2001). Ainda, os relatórios do estudo estratégico da Greener para o segundo semestre de 2021 indicaram que o custo global dos equipamentos de sistemas fotovoltaicos, tem diminuído constantemente. Nos últimos cinco anos, houve uma redução de 33% nos custos para sistemas residenciais, tornando-os mais acessíveis.

Neste contexto, o desenvolvimento sustentável no setor elétrico tem sido um tema de discussão há duas décadas, especialmente com a criação do PROINFA pela Lei nº 10.438/2002. Tem ganhado cada vez mais destaque na sociedade, levando o consumidor final a tomar decisões mais ecológicas em relação à geração e consumo de energia. Dessa forma, é possível identificar diversos benefícios na inserção da GD no território nacional (PIMENTEL, 2022).

Figura 15 - Representação da evolução da potência instalada em geração fotovoltaica no Brasil.



Fonte: SIGA ANEEL (2024).

4 SISTEMA DE ARMAZENAMENTO DE ENERGIA POR BESS

Neste capítulo serão apresentadas definições das principais características do *Battery Energy Storage System* (Sistema de Armazenamento de Energia em Baterias) que leva como sigla do inglês BESS, bem como uma análise tecnológica de sua evolução visando introduzir o tema ao próximo capítulo deste trabalho.

4.1 Apresentação do Conceito de Armazenamento de Energia Elétrica em Baterias

O avanço das tecnologias no que diz respeito à produção de energia elétrica, está diretamente associado à busca por formas eficazes de armazenamento desta, tanto no setor elétrico quanto em outros setores comerciais, um exemplo seria a fabricação de carros elétricos. As pesquisas e desenvolvimento de novas tecnologias voltadas especificamente para o armazenamento de energia têm evoluído de maneira considerável, para apresentar as melhores opções de acordo com cada aplicação e para apresentar o menor impacto ambiental possível (SCHIPITOSKI, 2022), alinhando-se com a preocupação global no sentido da redução de danos ao meio ambiente e meios de produção sustentáveis. Segundo IEC (2009, p. 11-22), o armazenamento de energia em banco de baterias tornar-se-á indispensável para mercados com grande expansão de energias renováveis, os quais buscam a redução do CO₂ e a implementação das redes inteligentes.

As baterias têm por finalidade dispor de um agrupamento ordenado de componentes que armazenam energia química e a convertem em energia elétrica. Durante esse processo de conversão, são verificadas reações químicas que envolvem o fluxo de elétrons de um eletrodo para outro, por meio de um circuito externo (SCHIPITOSKI, 2022). Já se tratando de um sistema de armazenamento de energia por baterias, segundo Souza (2020a) no contexto da distribuição de energia elétrica, consiste em um conjunto de equipamentos destinados a armazenar a energia produzida para uso posterior com aplicação nos mais diversos objetivos.

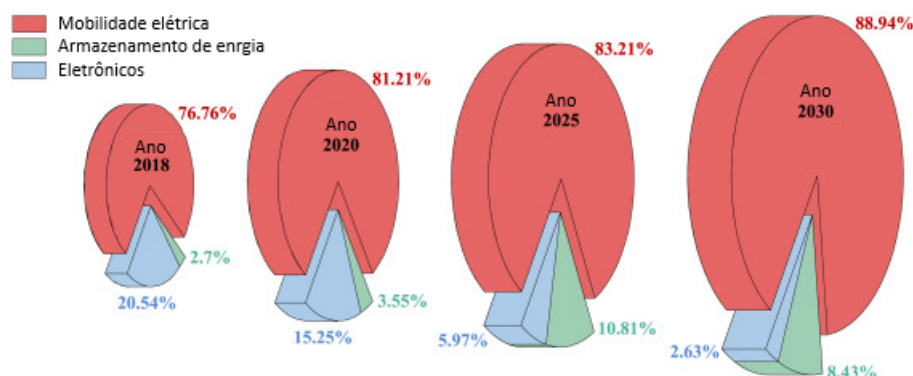
Segundo Schipitoski (2022), tomando como referência a energia solar, o armazenamento é imprescindível em locais remotos ou com restritas opções de geração elétrica, tornando o sistema de baterias uma das únicas opções viáveis para o constante fornecimento de energia por meio da geração fotovoltaica. Assim, elas são empregadas para essa funcionalidade, sendo que seu uso pode ser em sistemas isolados da rede (*off-grid*) ou em sistemas híbridos conectados à rede (*on-grid*).

Entre os vários dispositivos de armazenamento de energia, as baterias, atual-

mente utilizadas em eletrônicos de consumo, representam a principal tecnologia de armazenamento de energia eletroquímica devido à alta densidade energética, principalmente do Lítio, e acessibilidade gama de variabilidade química (AMARAL; SINOHARA, 2022).

Como apontado por Liu, Placke e Chau (2022), as baterias, principalmente de lítio, dominaram dispositivos portáteis e tem vasta aplicação em sistemas de armazenamento de energia estacionários. Na figura 16, é representada a classificação no período de 2018 a 2020, a demanda relacionada à aplicação de baterias em três principais categorias: mobilidade elétrica; armazenamento de energia; e uso em eletrônicos. Ainda, estima um cenário do uso para 2025 e 2030 em percentual, apresentando uma projeção interessante para investidores da área de mobilidade elétrica (veículos elétricos, estações de recarga e tecnologias relacionadas) que demonstra maior dominância na estimativa dos autores.

Figura 16 - Representação da demanda por aplicação de baterias na indústria global.



Fonte: Adaptado de Liu, Placke e Chau (2022).

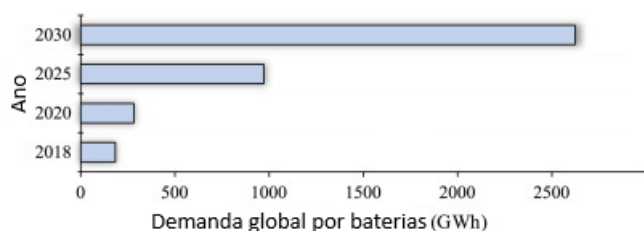
Segundo WEF (2019) entre 2010 e 2018, a demanda por baterias cresceu 30% anualmente e atingiu o volume de 180 GWh em 2018. Tendo este cenário como base, é esperado que o mercado continue crescendo, em uma estimativa de 25% por ano, de maneira a atingir 2,600 GWh em 2030.

Segundo Alliance (2019), a indústria global de baterias está crescendo rapidamente e vai superar 2500 GWh na próxima década como representado pela figura 17, juntamente com a evolução histórica da demanda por baterias globalmente.

4.1.1 Importância do BESS em um Sistema de Energia Elétrica

Uma vez introduzido neste trabalho o sistema de energia elétrica e seu princípio de funcionamento, é possível inteirar a importância de sistemas secundários de fornecimento, tanto relacionada à economia ao cliente através da produção própria, mas também como um item de

Figura 17 - Evolução histórica da demanda globalmente.



Fonte: Adaptado de Liu, Placke e Chau (2022).

segurança ao sistema em caso de falha ou surtos no conjunto principal de geração, transmissão ou distribuição.

Qualquer déficit deve ser compensado para satisfazer a demanda da rede e a demanda de energia (AMARAL; SINOHARA, 2022).

Dessa maneira, torna intrínseco que um sistema de armazenamento pode tanto colaborar como um componente de segurança do complexo energético, mas também evitar o desperdício de qualquer excedente de produção quando não haja demanda o suficiente. Aplicando-se dessa forma em diversas esferas consumidoras, como uma fonte confiável e local.

Segundo IEC (2009), o armazenamento de energia elétrica em banco de baterias pode ser usado para melhorar a confiabilidade e a qualidade da fonte de alimentação, frequência e tensão.

Em referência a Amaral e Sinohara (2022), a evolução da rede elétrica deve exigir um sistema de fornecimento robusto e resiliente. Isto posto, o armazenamento de energia pode desempenhar um papel significativo no alcance deste objetivo, o que inclui a melhoria da capacidade operacional da rede, redução de custos e uma garantia de alta confiabilidade, além de adiar e atenuar a necessidade de novos investimentos em infraestrutura. A retenção de energia em banco de baterias tem potencial para exercer um papel fundamental na preparação para emergências, que se deve à sua capacidade de fornecer energia como reserva, bem como atuar ativamente na estabilização da rede.

4.2 Battery Energy Storage System

Dado um breve contexto a partir da passada, esta seção tem por objetivo desenvolver a definição das principais características do BESS e de forma implícita, sua evolução tecnológica, um sistema cuja função agrupar um conjunto de baterias para apresentar alta capacidade de armazenamento com o intuito de permitir à sua aplicação uma fonte secundária de fornecimento confiável e eficiente quando demandada ao projeto.

Segundo WEG (2023), BESS é um sistema completo de gerenciamento e armazenamento de energia elétrica que pode ser configurado para realizar inúmeras funções, desde a redução da intermitência de fontes renováveis de geração até a execução de serviços auxiliares em subestações de energia.

O sistema consiste em uma solução de controle e gerenciamento de energia que coordena os modos de operação e otimiza seu desempenho, garantindo maior eficiência e melhor aproveitamento dos recursos energéticos, além de proporcionar flexibilidade operacional e confiabilidade no fornecimento de energia (WEG, 2023). Este tipo de solução energética permite o atendimento de consumidores do Grupo A, que estão conectados à alta e média tensão que já fazendo parte ou com intenção de participar do mercado livre de energia, apresentando até 30% de economia mensalmente e ampliando seus benefícios financeiros a partir da implantação (MATRIXENERGIA,).

O BESS é um componente que pode ser incorporado ao conjunto energético desde a geração até a transmissão e distribuição de energia elétrica, com versatilidade para aplicações comerciais ou industriais proporcionando soluções de alguns kWh às centenas de MWh com foco no atendimento aos requisitos do projeto ao qual é implementado. Atua como uma solução de armazenamento de energia em contêiner modular de modo a garantir uma versátil instalação em diversas áreas e condições locais. Um exemplo da tecnologia descrita pode ser encontrado na figura 18.

Figura 18 - Battery Energy Storage System (BESS).



Fonte: WEG (2023).

4.2.1 Principais características

O BESS tem a premissa de corresponder conforme uma fonte de energia segura e constante, superando os problemas do fornecimento energético mesmo durante indisponibilidades

ou eventos climáticos, garantindo dessa maneira, um abastecimento contínuo para os consumidores.

Segundo Amaral e Sinohara (2022), se torna factível a obtenção de uma rede mais dinâmica e confiável por meio da integração da geração por energia renovável com sistemas de armazenamento de energia uma vez que os bancos de baterias possuem versatilidade suficiente para permitir sua utilização em uma vasta gama de aplicações.

4.2.1.1 Eficiência

Em uma de suas diversas aplicações, o BESS deve ser responsável por otimizar o uso de energia elétrica durante o dia para evitar picos de consumo pela carga instalada do usuário, proporcionando uma economia em relação ao custo operacional da instalação. Assim, verifica-se da mesma forma uma redução nos custos com eletricidade ao evitar o consumo direto da rede em horários de pico nos quais a tarifa aplicada pela concessionária é consideravelmente maior.

É descrito como um fator também responsável pelo aumento no interesse por este tipo de conjunto em WEF (2019), a redução em investimentos relacionados à transmissão e distribuição, de modo que este sistema quando conectado na rede apresente uma alternativa a gastos com melhorias da infraestrutura em regiões onde se verifica limitações quando a demanda por capacidade instalada atinge seu limite máximo.

4.2.1.2 Flexibilidade

A modularidade é uma característica fundamental dos sistemas de armazenamento de energia em baterias. Esta propriedade é a que permite à capacidade do sistema ser expandido ou reduzido conforme a necessidade da aplicação, adaptando-se assim às demandas específicas de energia. Em um cenário onde a demanda por energia pode apresentar variações significativas, a capacidade de ajustar a capacidade do conjunto sem a necessidade de substituir toda a infraestrutura é extremamente vantajosa. Se faz possível observar que dessa forma há uma otimização também dos investimentos envolvidos, uma vez que permite adicionar mais componentes conforme for realmente solicitado.

Além disso, a versatilidade do BESS é um de seus pontos fortes. Eles podem ser utilizados em uma ampla gama de aplicações, desde o armazenamento de energia em menores escalas, até grandes instalações industriais e de utilidade pública, aumentando a autossuficiência energética da matriz. Em aplicações industriais e de utilidade pública, a tecnologia ajuda a gerenciar picos de demanda, fornecer energia de reserva e melhorar a eficiência geral da rede elétrica. Essa versatilidade torna os BESS uma solução muito conveniente para os desafios energéticos modernos, promovendo uma rede elétrica mais segura e sustentável. Ainda, se tratando de um

conjunto secundário, caso se verifique uma queda de energia, é possível reiniciar as operações de forma imediata.

4.3 Principais Tecnologias de Baterias

Antes de se analisar as particularidades de cada tipo de bateria, verifica-se a importância dos termos técnicos, pertinentes a este estudo, que as descrevem. Esta seção tem o objetivo de explicar os principais termos técnicos inerentes ao estudo das baterias.

- **Célula:** A célula é a unidade eletroquímica fundamental de uma bateria, responsável por gerar uma tensão característica dependendo dos materiais utilizados. Ela é composta por dois eletrodos (um cátodo e um ânodo) e o eletrólito;
- **Densidade de carga:** Capacidade nominal da bateria, normalizada por volume ou massa;
- **Eletrodo:** Os eletrodos são materiais da célula eletroquímica que possuem a capacidade de conduzir elétrons. Eles também podem fornecer sustentação estrutural para o material ativo e criar uma zona reacional rica em material eletro quimicamente ativo;
- **Material ativo:** Parte da célula de energia, responsável direto na reação de carga e descarga da bateria;
- **Separador:** O separador é um material eletricamente isolante, ele é microporoso e permeável ao fluxo de íons, empregado visando evitar o contato direto entre as placas que formam a célula;
- **Taxas de carga e descarga:** São determinadas pela taxa Coulomb (C). A capacidade de uma bateria é geralmente classificada como 1C, significa que uma bateria totalmente carregada com capacidade de 1Ah deve fornecer 1A durante uma hora. Da mesma forma, se a mesma bateria for descarregada a 0,5C, ela deve fornecer 500mA por duas horas. Já a uma taxa de 2C, ela fornece 2A por 30 minutos.

4.3.1 Bateria de Chumbo-Ácido

Tem por princípio uma tecnologia pioneira que permite à bateria não somente possuir carga armazenada, mas também ser recarregada, por meio da passagem de corrente elétrica em sentido inverso nos terminais dela. Inventada em 1859 pelo físico francês Gaston Planté, esta tecnologia revolucionou os estudos relacionados ao equipamento.

Segundo Rosolem et al. (2016), a bateria de chumbo-ácido é composta principalmente por eletrodos de chumbo, que estão imersos em uma solução aquosa de ácido sulfúrico, o eletrólito.

Os eletrodos, geralmente em forma de placas, são isolados eletricamente e mergulhados no eletrólito dentro de recipientes separados.

Esta tecnologia se mostra capaz de produzir e manter grandes volumes de energia, ela é comumente associada a uma baixa resistência interna, sendo capaz de alimentar vários circuitos por meio de uma única unidade de armazenamento.

Segundo Amaral e Sinohara (2022), o espaço de mercado das baterias de chumbo-ácido deve-se ao fato de serem mais viáveis economicamente que outros tipos de baterias. Apesar das vantagens descritas, esta ainda apresenta um elevado tempo de recarga, diminuição de sua vida útil com descargas completas e não é uma tecnologia sustentável.

Figura 19 - Sistema de armazenamento por baterias de Chumbo-Ácido.



Fonte: (BRASIL, 2023).

4.3.2 Bateria de Sódio-Enxofre

Com ampla utilização datada na Segunda Guerra Mundial para o acionamento de mísseis pelo exército alemão, esta apresenta vantagens em aplicações que exigem tanto uso contínuo e gradual quanto a taxas aceleradas de descarga.

Segundo Batteries International (2018), o tipo mais comum dessa é a bateria cerâmica de sódio fundido, que apresenta divisão em duas categorias: sódio-enxofre e a ZEBRA (*Zeolite Battery Research Africa posteriormente Zero Emission Battery Research Activity*).

Ambos os tipos possuem composição química semelhante: um eletrólito de beta-alumínio que é sólido e um ânodo de sódio puro fundido. Os íons de sódio transitam pelo eletrólito, e a temperatura de operação ótima se verifica em torno de 300 °C. Estas, apresentam variações entre elas no cátodo: na bateria de sódio-enxofre, o cátodo é de enxofre, enquanto na bateria

ZEBRA, o cátodo é um halogeneto de sódio-metálico, geralmente cloreto de níquel (AMARAL; SINOHARA, 2022). Há vantagens e desvantagens desta tecnologia, como a alta densidade de carga (comparável até às de íons de lítio); abundância de ciclos de carga e descarga e vida útil, se resfriada. Em contraposição, leva de 3 a 4 dias para ser resfriada e possui uma membrana de cerâmica bastante frágil que pode sofrer danos durante a operação.

Figura 20 - Sistema de armazenamento por baterias de Sódio-Enxofre.



Fonte: (TECH, 2024).

4.3.3 Bateria de Íons de Lítio

Há registros de experimentos com baterias de íons de lítio desde 1912, porém se verifica de fato interesse comercial nelas na década de 70. Segundo Amaral e Sinohara (2022), o lítio possui características que o tornam um excelente componente para baterias. É a tecnologia que possui menor densidade e maior potencial eletroquímico em relação à energia por peso, além de baixo peso atômico e íons de pequeno tamanho que aceleram sua difusão. Essas baterias foram aprimoradas em 1985 pelo pesquisador Akira Yoshino no Japão, resultando em uma versão recarregável e mais estável do que as baterias de lítio disponíveis na época. Posteriormente, em 1991, a Sony começou a comercializar essas baterias. As baterias de íons de lítio surgiram como uma solução para a instabilidade inerente do lítio, que comprometia a segurança do uso desse tipo de bateria, especialmente durante o carregamento.

Segundo Battery University (2022), esse tipo de bateria requer pouca manutenção e sua autodescarga é menos da metade da de uma bateria à base de níquel. Operando com uma tensão de 3,6 V por célula, ela pode alimentar telefones, tablets e câmeras digitais sem a necessidade de múltiplas células de energia.

Esta, apresenta grande aplicação em aparelhos eletrônicos no geral pois proporciona grande capacidade de armazenamento em unidades muito pequenas de baterias.

Se tratando de seu funcionamento, a bateria utiliza um cátodo (eletrodo positivo), um ânodo (eletrodo negativo) e um eletrólito como condutor. O cátodo é feito de óxido metálico e o ânodo é de carbono poroso. Durante a descarga, os íons fluem do ânodo sofrendo oxidação e perdendo elétrons para o cátodo através do eletrólito e do separador, e, para a carga, os íons seguem a direção inversa, do cátodo em oxidação para o ânodo em redução.

Figura 21 - Sistema de armazenamento por baterias de íons de lítio.



Fonte: (SUPPLIER, 2024).

Elas possuem diversas variações, mesmo com a composição comum por íons de lítio, possui uma grande diversidade quanto à composição do material ativo contido no conjunto. Apresenta vantagens como alta capacidade de carga nas células de energia e de suprimento de cargas; estabilidade durante o carregamento; tempo de recarga pequeno; alto número de ciclos e vida útil. As desvantagens estão relacionadas à perda de eficiência quando opera em altas temperaturas e tensão; há necessidade de circuitos de proteção em cada uma das células; maior custo.

Segundo Battery University (2022), do ponto de vista do armazenamento de energia de fontes renováveis, as baterias de íons de lítio se destacam pela resistência ao comportamento cíclico de carga e descarga em comparação com as baterias de chumbo-ácido. Além disso, elas não precisam estar totalmente carregadas para funcionar de maneira eficiente.

5 ANÁLISE E APLICAÇÃO DO BESS

Neste capítulo, por fim, a partir do estudo disposto pelos itens anteriores a este, é apresentada uma análise da utilização dos BESSs em redes de distribuição de energia elétrica com base em estudos de caso envolvendo o *peak-shaving*, uma aplicação comum do BESS.

A integração de sistemas de armazenamento de energia com energia renovável torna a rede mais dinâmica e confiável, dessa forma, bancos de baterias podem ser amplamente usados em diferentes aplicações. Estratégias de gerenciamento de energia como aumentar o autoconsumo, que depende diretamente do tamanho do sistema gerador do usuário e das perdas causadas pelo cabeamento ou outros componentes. Deve ser levado em consideração a demanda de eletricidade à carga instalada e a quantidade a ser comprada da concessionária durante o período em que a produção própria não atue. A energia produzida pode ser armazenada pelo carregamento em bancos de baterias de forma intermitente para uso posterior em uma diversidade de aplicações.

Como indicado por Ranawera (2014, p. 62), as estratégias de gerenciamento de energia oferecem uma alternativa eficaz para o uso de fontes renováveis e intermitentes, tais como a solar e a eólica. Elas permitem um aproveitamento mais eficiente da energia gerada, para aumentar o autoconsumo e reduzir a demanda de energia das concessionárias. Juntamente com os sistemas de armazenamento de energia fotovoltaica, essas estratégias devem desempenhar um papel crucial no futuro dos sistemas energéticos.

5.1 Conceitos Relevantes

Nesta sub-seção são referenciados e apresentados alguns conceitos pertinentes à compreensão dos trabalhos de referência a este capítulo, destinado ao estudo da aplicação do BESS introduzida, e sua análise.

5.1.1 Gerenciamento pelo lado da Demanda

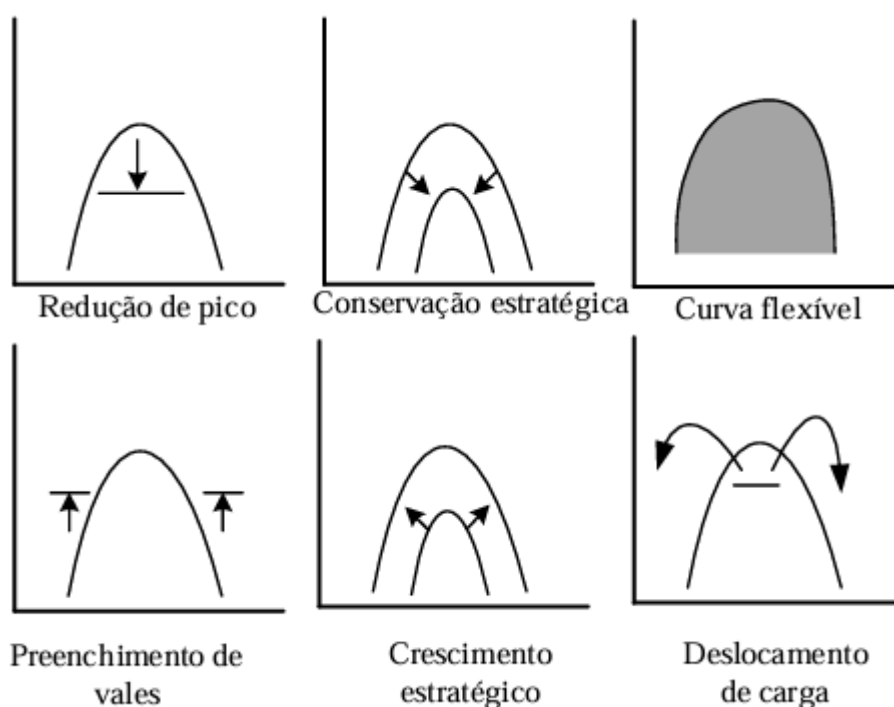
Em torno dos anos da década de 80, ocorreu o surgimento do conceito de GLD, segundo Gellings (1985), foi devido à imprevisibilidade do crescimento da necessidade por energia elétrica. Isso criou um vasto mercado baseado em parâmetros de oferta e procura em tempo real. Assim, a demanda futura dos consumidores deixou de ser tratada de maneira tradicional e passou a ser gerenciada para acomodar as incertezas do futuro. Conforme o autor, isto consiste

no planejamento, implementação e monitoramento de atividades realizadas pela concessionária para influenciar o uso de eletricidade pelos consumidores, o que resulta em alterações na curva de carga do sistema elétrico.

Compreender o conceito implica notar que do ponto de vista das concessionárias, a GLD dispõe sobre a modelagem das cargas consumidas pelos diversos grupos de clientes, uma vez que a demanda é periódica e sazonal. Cada grupo consumidor deve possuir um perfil de consumo diário e deve variar conforme a época do ano, se tratando tanto da estação do ano que gera variação no consumo residencial, quanto dos eventos comemorativos em que há a necessidade de maior produção industrial.

Em Gellings (1985) se dispõe uma série de técnicas de GLD, tais como: redução do pico; preenchimento de vales; deslocamento de carga; conservação estratégica; crescimento estratégico de cargas; curva de carga flexível. Como pode ser verificado no esquema representado pela figura 22.

Figura 22 - Representação das técnicas de gerenciamento pelo lado da demanda.



Fonte: Gellings (1985).

Visando proporcionar maior base teórica para discussão deste trabalho, é importante discorrer sobre três das mencionadas técnicas, e partir da descrição, relacionar de forma intrínseca que se faz possível por parte do cliente participar da GLD a partir de sistemas tais como o tema deste, conforme indicado por (SERRANO, 2023), na sequência:

- **Redução de pico:** É uma das formas mais simples de gerenciamento da demanda. Geralmente, é considerado como a redução da carga de pico através do controle direto da carga,

ou seja, a concessionária exerce controle direto sobre os equipamentos dos clientes;

- Preenchimento de vales: A gestão de cargas fora do horário de pico otimiza o fator de carga e, conseqüentemente, reduz o custo da energia. Normalmente, isso pode ser alcançado através do armazenamento de energia;
- Deslocamento de cargas: Abordagem clássica de gerenciamento da carga, que envolve o deslocamento da demanda dos períodos de pico para períodos fora de pico, com ou sem o uso de armazenamento de energia.

No sentido da aplicação das técnicas descritas anteriormente, o autor Saini (2004) dispõe sobre os benefícios em relação à GLD:

- Redução no custo da energia para o cliente;
- Redução de investimentos (novas usinas, linhas de transmissão e de distribuição);
- Aumento da competitividade para empresas locais;
- Redução na emissão de poluentes;
- Diminuição na dependência de fontes externas de energia;
- Redução do congestionamento da rede em horários com maior demanda;
- Estímulo ao desenvolvimento econômico;
- Geração de empregos de longo prazo (inovações e novas tecnologias).

Ainda em citação ao mesmo autor, se faz importante adicionar à discussão sua menção de que a confiabilidade do sistema deve ser mantida a todo custo para evitar apagões. Ainda, economicamente, o mercado do setor elétrico deve ser sempre acessível e estável. Portanto, é essencial equilibrar o fornecimento e a demanda de energia elétrica em todos os momentos para garantir um mercado estável e confiável. Esse equilíbrio pode ser alcançado a partir do gerenciamento pelo lado da demanda (SAINI, 2004).

Conforme discutido anteriormente, no capítulo 3 deste, a integração da GD no sistema de distribuição de energia elétrica apresenta além de benefícios, desafios. Segundo Serrano (2023), o uso de tecnologias como energia fotovoltaica, turbinas eólicas e células a combustível pode afetar o fluxo de energia e as condições de tensão nos equipamentos, de consumidores e da própria concessionária. Para mitigar esses impactos e equilibrar a oferta e a demanda de energia, a GLD se apresenta como uma abordagem eficaz. Visando promover a eficiência energética e reduzir o consumo desnecessário, evitando sobrecargas no sistema e diminuindo a necessidade de investimentos em infraestrutura elétrica.

5.1.2 Peak-Shaving

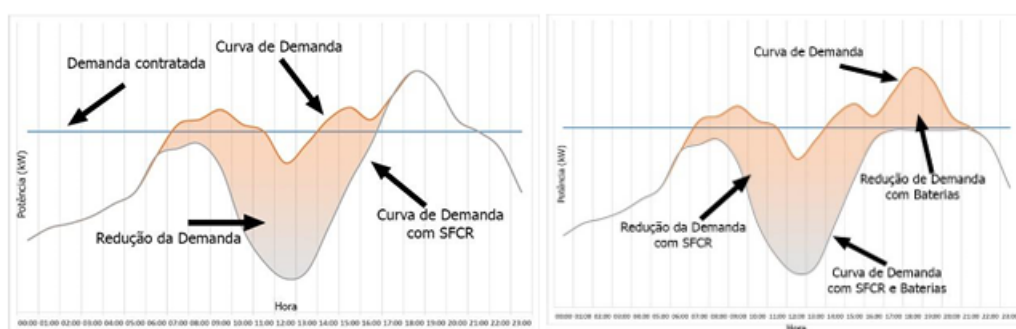
Se tratando de autoconsumo, que se verifica a partir do uso pelos consumidores da energia fotovoltaica advinda da própria instalação de painéis solares para captação, há ocorrência de excedente de produção. Segundo Amaral e Sinohara (2022) excedentes são registrados particularmente durante dias claros de verão por volta do meio-dia e são prejudiciais para a estabilidade da rede elétrica, pois há considerável variação na frequência e tensão do sistema. Esses picos podem ser controlados através do *Peak-Shaving*, ao criar um sistema secundário que faça o deslocamento das cargas para esses períodos.

Segundo Karadimos et al. (2017), o *Peak-Shaving* é uma aplicação que utiliza o BESS para deslocar o consumo pela carga instalada do período de pico para outros horários em que há baixa congestão na rede.

Neste sentido, pode ser descrito como um nivelamento das cargas instaladas, que tem por objetivo primário reduzir picos de demanda de cargas variáveis, gerando economia. Exemplos de instalações que praticam o método são majoritariamente consumidores, e não concessionárias (AMARAL; SINOHARA, 2022).

A aplicação, como um sistema auxiliar que cujo objetivo é diminuir o custo com o consumo de energia elétrica pelas concessionárias atua como representado pela figura 23, em conjunto com o sistema de geração própria do consumidor, que não é capaz de atender a curva de demanda da própria carga em determinados momentos do dia (meio-dia e ao final da tarde).

Figura 23 - Redução da demanda a partir da combinação de um sistema fotovoltaico e aplicação de BESS.



Fonte: Amaral e Sinohara (2022).

A partir da figura 23 (a), é possível verificar que um sistema residencial somente com geração fotovoltaica deve apresentar um bom resultado na redução da curva de demanda da carga por volta do meio-dia, onde há maior produção de energia no dia, mas, ao final da tarde onde a geração começa a tender a zero, a carga ainda ultrapassa a demanda contratada.

Ao implementar um banco de baterias no conjunto, que deve atuar juntamente com o SFCR, o resultado é uma regulação da demanda da carga de forma que não ultrapasse a demanda

contratada em momento nenhum do dia, gerando economia ao evitar as taxas por consumo em horário de pico.

5.1.3 Integração com Fontes Renováveis

Segundo WEF (2019), o setor energético foi responsável por 23% das emissões de gases de efeito estufa em 2017. Com muitos mercados, a combinação de fontes de energia estão fluando para renováveis intermitentes. Em 2030, é esperado que sejam adicionados 380 GW à capacidade de geração renovável da matriz global, enquanto a produção por combustíveis fósseis deve diminuir. Soluções que proporcionem maior equilíbrio e que permitam a geração proveniente de fontes renováveis estar disponível a qualquer momento, quando necessário, vão apresentar grande crescimento em demanda devido a essa natureza intermitente delas. Baterias são componentes ideais para sistemas atenuadores de energia a curto prazo e podem ser utilizadas tanto diretamente em conexão à rede quanto próximas ao usuário. Elas são mais flexíveis do que outras opções, como, por exemplo, bombeamento de água, por não necessitarem de condições geográficas especiais e podem ser instaladas em arranjo tanto com pequena ou larga capacidade de armazenamento.

Tendo disponível uma grande superfície para instalação de painéis solares no telhado de construções comerciais e industriais, a geração fotovoltaica em combinação com soluções de armazenamento apresentam um retorno financeiro atrativo, sendo listado como um fator que colabora com o crescimento na procura por este tipo de tecnologia (WEF, 2019). Segundo notícia publicada por WEG (2021), pela construção e o desenvolvimento de uma microrrede de energia elétrica inteligente, há a disseminação do uso da energia solar e garantia de segurança, qualidade e resiliência no fornecimento de energia elétrica. Também contribui para a redução de impactos ambientais, visto que o consumo de diesel por geradores é eliminado com o uso do BESS.

5.1.4 Contribuição para a Estabilidade da Rede

Segundo Aronne e Soares (2024), nos Estados Unidos, tem contribuído para o armazenamento de energia durante períodos de baixa demanda para seu uso durante picos de consumo, assegurando maior estabilidade da rede e oferecendo uma significativa reserva de energia.

Segundo Carlos Bastos Grillo, Diretor Superintendente de Digital e Sistemas da WEG, a implementação do sistema BESS além de reduzir a dependência de fontes externas de energia, também vai aumentar a resiliência da cidade contra interrupções no fornecimento elétrico durante a alta temporada, e períodos de seca, onde as queimadas acontecem com maior frequência na região (WEG, 2024).

Como soluções flexíveis e estáveis, há a expectativa de dominância por baterias conectadas à rede elétrica em 2030, com uma perspectiva de uma instalação adicional de aproximadamente 220 GWh. De 2015 até 2018, a demanda de baterias para armazenamento de energia apresentaram um crescimento de 60-70% por ano. Apresentando um tempo de resposta muito pequeno, as tornam aptas a medidas de estabilização de rede (WEF, 2019).

5.1.5 Regulação de Frequência e Tensão

O equipamento sob estudo desempenha um papel importante também na regulação da frequência e tensão da rede elétrica, contribuindo significativamente para a estabilidade e a qualidade do fornecimento. Quando há um desequilíbrio entre a geração e o consumo de energia, a frequência da rede pode variar. O BESS pode responder rapidamente a essas variações, fornecendo energia armazenada para elevar a frequência quando a demanda supera a oferta, ou absorvendo o excesso de energia para reduzir a frequência no caso oposto. O baixo tempo de resposta colabora para manter a frequência dentro dos limites desejados.

Segundo Amaral e Sinohara (2022), ao manter o controle sobre a frequência da rede em conjunto com a potência ativa, a tensão da mesma forma deve se manter dentro dos limites previamente estabelecidos para o funcionamento do conjunto. Esta abordagem de regulação de frequências é uma opção particularmente atraente devido ao seu tempo de resposta rápido KJERPESET (2017, p 1-8).

Segundo IEC (2009), uma aplicação essencial deste é a capacidade de manter tensão de alimentação e frequência dentro da tolerância em que se espera para a ótima operação do conjunto em que o mesmo é implementado. Dessa maneira, o BESS atua para controlar a variação da rede elétrica ativamente.

Tratando-se da capacidade em regular a tensão da rede, atua injetando ou absorvendo potência reativa conforme necessário. Particularmente útil em áreas onde a tensão tende a cair devido a altas cargas ou a subir excessivamente. A injeção de potência reativa ajuda a manter a tensão em níveis adequados, enquanto a absorção de potência reativa estabiliza a rede quando a variação é muito superior. As funções de regulação tornam o BESS uma ferramenta útil para a operação eficiente e estável da rede elétrica, promovendo uma maior facilidade na integração de fontes de energia renovável e tornando o sistema mais confiável.

Segundo Reserve (2017, p. 1-22), pelo emprego de bancos de baterias se verifica uma vantagem no fornecimento da energia armazenada, uma vez que é permitida uma resposta de potência ativa com maior precisão à variação da frequência.

5.1.6 Microrredes

Conforme a ANEEL, uma microrrede é uma rede de distribuição de energia elétrica que tem a capacidade de operar de forma independente do sistema principal, alimentada diretamente por uma unidade de GD, (Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), 2015).

É um sistema de energia simples, controlável e independente. Compreende GD, cargas, sistemas de armazenamento de energia (AE) e dispositivos de controle, que se localizam no lado do consumidor de forma interconectada. Uma característica importante de uma microrrede é sua capacidade de apresentar um equilíbrio da geração de energia elétrica e do consumo local, (FUSHENG; RUISHENG; FENGQUAN, 2016).

Segundo Cipolla (2021) estas representam redes de pequenas extensões, que transmitem a energia elétrica de maneira a atender um consumidor específico ou um conjunto de consumidores em condomínios ou cooperativas, em qualquer faixa de tensão, podendo ser interligadas à rede principal, ou isoladas. O início da microrrede deve ser no ponto de conexão com o SDEE, ou seja, tem ponto de acoplamento comum à rede principal. Por estarem energizadas mediante GD, podem otimizar a rede elétrica na totalidade, por intermédio dos controladores, ou seja, possibilitam o controle na injeção de potência ativa e reativa, tensão adequada para equilíbrio com a rede de interligação e até outros elementos que melhorem a qualidade de energia elétrica (QEE) na rede.

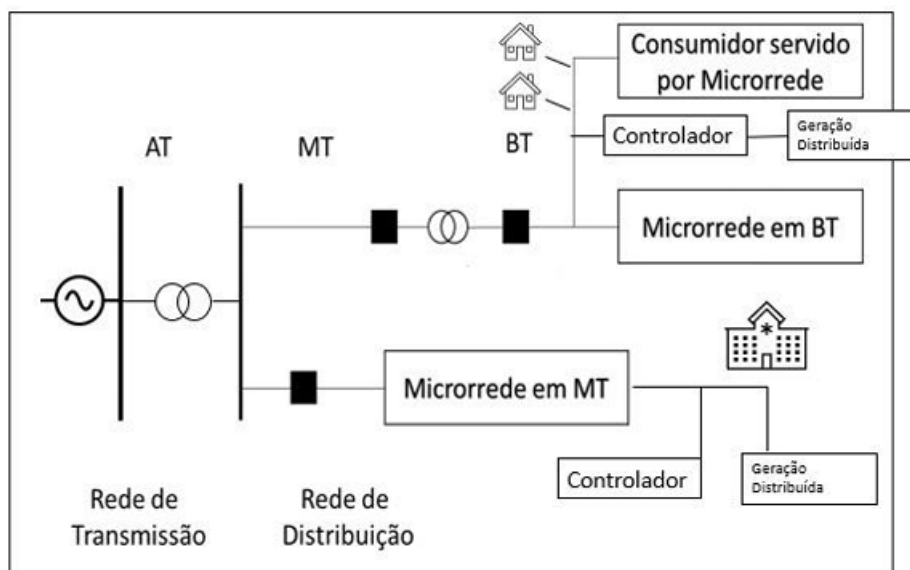
Essas características mostram as Microrredes como um sistema de energia de pequena escala (podendo chegar a 5 MW em conforme os limites das GD's), elas podem ter a capacidade de se autoabastecer, ou seja, em ilha (desconectada da rede principal) podem gerar, distribuir e regular o fluxo de eletricidade para os seus clientes, (CIPOLLA, 2021).

Segundo Hatziaargyriou et al. (2007) dentro da microrrede, elementos como a GD e sistemas de AE se verificam conectados em paralelo na mediação do usuário. Sob a perspectiva da rede elétrica convencional, a microrrede pode ser interpretada como uma célula controlada. Para o consumidor, ela é um elemento crucial que possibilita atender suas demandas específicas, oferecendo menor perda no alimentador e maior confiabilidade local. Assim, possui capacidade de controle autônomo, proteção e gerenciamento, podendo operar paralelamente à rede elétrica principal. Uma representação de conexões em microrredes está proposta pela figura 24.

5.2 Estudos Relacionados

Nesta, é de fato disposta a análise da aplicação do BESS em referência aos estudos conduzidos por Dongol et al. (2018) que propõe a partir de um método MPC (*Model Predictive Control*) o nivelamento de cargas residenciais por BESS em uma rede de distribuição rural como forma

Figura 24 - Representação de conexões que definem uma microrrede.



Fonte: Cipolla (2021).

de reduzir custos com eletricidade e Raveendran e Costa-Castelló (2019), em uma linha semelhante com MPC, mas abordando uma diferente metodologia que considera a minimização da taxa de degradação do BESS e a eficiência da operação da microrrede. Ambos os trabalhos têm foco no autoconsumo a partir de geração fotovoltaica. É disposta ainda uma breve menção aos trabalhos dos autores Henni et al. (2022) e Böttiger et al. (2018) que propõe a aplicação de análise deste capítulo em termos das redes de distribuição no ramo industrial.

A tecnologia de armazenamento de energia leva a premissa de que a eletricidade deve ser consumida simultaneamente à sua geração, e a quantidade gerada deve sempre corresponder à demanda. Um desequilíbrio entre a oferta de energia (geração) e a demanda (consumo) pode resultar em instabilidade no SEE, além de comprometer a qualidade em diversos aspectos, (CALLEJO, 2019).

A geração não determinística por fontes renováveis resultaram na incorporação de sistemas de armazenamento de energia nas redes modernas. O gerenciamento da energia entre diferentes elementos de armazenamento precisam ser feitos de forma ótima, para garantir uma operação eficiente da rede, (RAVEENDRAN; COSTA-CASTELLÓ, 2019).

Segundo Dongol et al. (2018), um sistema fotovoltaico instalado em uma residência permite o uso de energia renovável ao nível local. Uma rede de distribuição com um número distribuído de residências, como descrito, pode ser considerada como equivalente a uma planta FV grande, com uma demanda de carga agregada. Há um desafio à rede de distribuição quando se relaciona a diferença entre a potência gerada e a demanda da carga, uma vez que a rede tem perfil resistivo e a potência retornada das residências em sentido contrário acarreta um aumento da tensão no fim da linha de distribuição. Este tipo de evento pode danificar quaisquer equipamentos

elétricos conectados à rede, como, por exemplo, o transformador de distribuição que tem um valor nominal especificado para entregar a potência da rede de distribuição às casas.

Algumas medidas existentes para mitigar esses efeitos de maneira ativa se encontram disponíveis, mas de acordo os autores em Dongol et al. (2018) isso gera uma perda de energia útil, dessa maneira, um elemento de armazenamento, como uma bateria é utilizado para estocar a produção excedente e aplicar para atender a demanda da carga em um próximo momento.

Já com relação aos impactos causados pela operação do BESS na rede, podem ser avaliados por diversos indicadores, por exemplo, desequilíbrios de tensão e corrente, carregamento da linha, perfis de tensão, entre outros. No caso, perdas de energia são indicadores apropriados para avaliar o impacto no sistema de distribuição, pois, por um lado, reduzir perdas de potência automaticamente apresenta melhora em perfis de tensão e também reduz a sobrecarga em transformadores e circuitos. Entretanto, devem quantificar o montante de energia dissipada que não realiza nenhum trabalho real, (ARIAS et al., 2019).

Seguindo na mesma linha, segundo os autores Arias et al. (2021), o *Peak-Shaving* é apontado como uma estratégia eficiente para atenuar os impactos à rede pela tecnologia deste estudo. De forma similar às aplicações de regulação de frequência, o *peak-shaving* requer uma estratégia para administrar a operação diária do BESS que, em linhas gerais pela manhã (horário em que não há congestionamento) deve carregar o equipamento em até 80% de sua capacidade, após esse período, está apto a promover o *peak-shaving*. Conforme os requisitos de operação do sistema, o nivelamento das cargas instaladas deve ocorrer durante períodos em que a potência ativa da rede, monitorada por um conjunto secundário, ultrapassa um limite pré-estabelecido. Caso contrário, o BESS permanece inativo, aguardando o próximo período de carregamento.

O armazenamento por baterias proporciona a oportunidade de participar do GLD por parte do consumidor, para reduzir o pico de demanda da carga na rede, (DONGOL et al., 2018). O objetivo principal, nesta aplicação, é ajustar a demanda de energia dos consumidores para melhorar a eficiência do sistema elétrico, reduzir custos e minimizar impactos ambientais. Segundo Dongol et al. (2018), com a intenção de atingi-los, o preço da eletricidade sofre variação a partir da demanda da carga, o que permite uma operação programada da bateria no lado do consumidor e reduz a inconformidade entre a geração da concessionária e a demanda da carga. Entretanto, isso iria exigir a participação do mercado de energia e o envolvimento dos operadores da rede, o que geralmente não é praticável no caso de redes de distribuição rurais.

Se tratando do primeiro estudo sob análise, é apresentado em Dongol et al. (2018) uma solução para uma unidade residencial com um sistema FV e baterias conectado a uma rede de distribuição rural, supondo um cenário onde o preço da energia não é variável, para avaliar o uso maximizado do conjunto de armazenamento por meio de um MPC que permite cada unidade conduzir seu próprio GLD de forma autônoma, o que colabora a adiar a necessidade constante por uma variação no preço da energia vindo da concessionária. Segundo o autor, o sistema ao

introduzir o *Peak-Shaving* em conjunto com o sistema de geração FV e a demanda da carga, é benéfico à rede de distribuição ao aliviar o desgaste por tensão.

A solução ótima apresentada no estudo dos autores Dongol et al. (2018) prioriza os picos de produção fotovoltaica e a demanda da carga para a operação da bateria, maximizando ainda o uso dela no sistema. A análise dos benefícios econômicos mostrou que o controle para operação ótima no problema, mostra os mesmos benefícios em relação ao custo operacional que por uma otimização para operar o sistema de maneira mais econômica, em termos do consumo pelo próprio sistema para funcionar. É mencionado que a capacidade nominal da bateria deve ser dimensionada apropriadamente levando isso em consideração. Baseado nesta análise, foram propostos critérios para dimensionamento do BESS, considerando um cenário em que o preço da eletricidade é único.

1. A capacidade nominal da bateria deve ser suficiente para armazenar o pico de produção FV para manter a tarifa de alimentação dentro dos limites permissíveis. Essa condição serve como uma condição de limite inferior. Uma vez que o controle ótimo do problema foi projetado para nivelar os picos de consumo, com este requisito atendido, as componentes são restringidas de forma que permaneçam dentro dos limites estabelecidos;
2. O investimento inicial na bateria deve apresentar benefício no custo operacional ao usuário. No cenário proposto pelo trabalho, a capacidade de armazenamento não deve superar a demanda de energia, o que é descrito como a condição limite superior do problema.

Os autores estabelecem que, se a capacidade de armazenamento do BESS for dimensionada dentro das duas condições limite apresentadas, para o caso de um projeto com sistema de baterias integrado à geração FV, o controle ótimo do problema sempre apresenta o máximo benefício econômico para o consumidor.

Neste caso, o MPC foi projetado para maximizar o uso da bateria ao priorizar os picos de energia fotovoltaica e a demanda da carga num cenário em que a tarifa é única. O que foi atingido por meio de uma função objetivo que controla o problema de forma ótima. Foi descrito pelos autores que caso a estratégia de controle seja aplicada em um sistema FV com baterias pequeno, a energia armazenada seria consumida completamente até o final da tarde do primeiro dia. Porém, a partir do MPC proposto, a descarga da bateria realizada de forma ótima permitiu o nivelamento dos picos de forma geral na demanda da carga desde a tarde até a manhã do dia seguinte.

Se tratando do estudo proposto por Raveendran e Costa-Castelló (2019), foi disposta uma análise diária de um esquema de gerenciamento de energia, que busca minimizar a taxa de degradação e otimizar a eficiência de operação da microrrede. Neste contexto, o trabalho propôs uma função que permite reduzir heurísticamente a taxa de degradação simultaneamente com

indicativos de desempenho que permitiram aos autores quantificar o desempenho da rede. A interação do BESS baseado em fatores de peso foram estudadas em diferentes casos, o que proporcionou o desenvolvimento de um consenso em relação à seleção da penalidade a partir dos pesos escolhidos no problema de otimização.

Uma observação advinda do estudo é que a otimização do problema e os resultados da interação do BESS tendem a ser complementares. O que sugere que enquanto a taxa de degradação é reduzida, a eficiência operacional é reduzida, e vice-versa. De forma conjunta, nas baterias, conforme a utilização de suas células de combustível é reduzida, a utilização de capacitores aumenta, o que resulta na redução da capacidade reserva da rede para sanar variações e intervenções imprevisíveis. O autor descreve que isso permite aos próximos trabalhos relacionados ao tema o uso de técnicas de otimização multi-objetivo, com um sistema de decisão mais aperfeiçoado.

A partir dos estudos referenciados anteriormente, é verificada a grande gama de aplicações do BESS em redes de distribuição, que, para o caso apresentado se refere ao consumidor residencial, mas demonstra grande flexibilidade para atender também o campo comercial e industrial como dispõe o trabalho do autor Henni et al. (2022), a partir de uma abordagem de previsão probabilística em um sistema de armazenamento por baterias para aplicação em *Peak-Shaving* no campo de consumo industrial. Segundo os autores, um consumidor industrial apresenta um incentivo maior a adotar um plano mais conservador quanto ao dimensionamento da capacidade do BESS para *Peak-Shaving*, uma vez que um único pico de consumo não atendido pelo sistema pode acarretar um grande aumento no custo com energia elétrica pelo parque fabril somente em taxas por consumo em horário de pico. O que limita o potencial do uso de baterias para aplicação em soluções financeiramente atrativas. Os autores afirmam que um projeto que considera uma margem muito grande para o risco disposto por possíveis falhas, pode gerar até 10% de diminuição no desempenho econômico de um BESS, ainda mencionam que um plano que considera riscos somente de forma moderada não gera perdas financeiras geralmente e ainda apresentam melhora na atuação econômica por até 3% em alguns dos casos avaliados no trabalho.

O estudo foi conduzido a partir de dados, de dois anos, do consumo de energia elétrica de cinco empresas industriais alemãs que operam no campo de processamento de metais, indústria madeireira e manufatura. Os autores indicam que os dados para análise de um sistema mais eficaz e assertivo devem incluir um período maior de anos de operação, para que se faça possível prever um sistema ótimo para o ano subsequente de operação. Também mencionam que o retorno econômico pela aplicação do BESS depende significativamente da política de taxas a que cada consumidor está sujeito, influenciando diretamente no retorno apresentado por cada unidade estudada. De forma geral, os autores afirmam que o plano apresentado tem potencial para ser uma estratégia operacional razoável para operações industriais de *Peak-Shaving* com

BESS.

Tratando de aplicações industriais, vale mencionar ainda o trabalho dos autores Böttiger et al. (2018), que descreve o desenvolvimento de um sistema inovador para *Peak-Shaving* que é modular, personalizável e flexível enquanto economicamente viável que a partir da apresentação de resultados dos autores, descreve uma redução de custos totais em torno de 8%.

6 CONCLUSÕES

Neste trabalho de graduação foi disposta a complexidade do SEE, dividido em três partes principais: geração, transmissão e distribuição. Dentre estes, se verificam diversos componentes e etapas, que exigem um preciso nível de gerenciamento por parte das concessionárias para proporcionar ao consumidor final um bem de consumo essencial à sociedade moderna, que está diretamente atrelado ao conforto, meios de produção e evolução tecnológica, a energia elétrica.

Ao se aprofundar nas três partes descritas, a geração de energia elétrica é aquela que engloba todos os passos de conversão de energia. Diversos processos são responsáveis por essa transformação, por meio de fontes renováveis ou não, a geração reúne a produção termelétrica; nuclear; hidrelétrica; eólica; solar dentre outras, em um sistema integrado que vem sendo aperfeiçoado para garantir com segurança ao consumidor que não haja falta, seja por falhas no processo ou por condições climáticas adversas. O conjunto de geração é e deve continuar adicionando diversidade de fontes ao processo, de maneira que seja possível suprir a demanda solicitada.

Neste sentido, o sistema de transmissão atua integrando a geração ao usuário, uma vez que as principais plantas produtoras estão distantes da carga que demanda de seu produto, exerce um papel fundamental quando interliga os submercados de energia elétrica, proporcionando dessa maneira uma equalização das taxas de consumo entre as regiões abastecidas a partir de sistemas de segurança e controle para monitoramento sofisticados.

O sistema de distribuição, que representa os processos mais pertinentes a este trabalho, é o responsável por fazer de fato a conexão do consumidor final com a transmissão, partindo de subestações de distribuição. Este possui uma infraestrutura bastante extensa e complexa, pois deve proporcionar o fornecimento até a demanda onde quer que esteja localizada. O processo exige um planejamento assertivo para definir as características dos conjuntos de distribuição de maneira a executar o atendimento da carga instalada em cada região, levando em conta o comportamento de consumo, nível de tensão, configuração e o fluxo de potência nos alimentadores por parte da concessionária. A estratégia empregada parte da análise dos hábitos de consumo de cada classe consumidora (residencial, comercial, industrial ou serviços públicos). Os dados provenientes de cada classe são divididos em perfis de consumo, descritos como curvas de carga que representam a demanda dos usuários durante o período de um dia completo. Dessa forma, a concessionária é capaz de estimar as necessidades de cada uma das regiões e ajustar o sistema conforme a necessidade específica de cada uma, apresentando soluções de fornecimento confiáveis.

A implementação de um sistema abrangente, seguro e funcional pode ser viabilizada mediante políticas públicas que segmentaram e interligaram o setor elétrico. Nesse contexto, surgem mercados de comercialização e políticas de incentivo às fontes de energia limpa, promovendo a sustentabilidade. Um exemplo próximo é o sistema de compensação de créditos, que permite aos consumidores cativos que geram sua própria energia injetá-la na rede de distribuição.

No âmbito da geração própria, neste trabalho se apresenta o conceito de GD, uma fonte de produção de energia elétrica que se caracteriza primariamente pela proximidade dos geradores com os consumidores, essa que permite a descrição de geração descentralizada, se contrapondo ao modelo tradicional centralizado. Produção e consumo local de energia elétrica é uma premissa da GD, possibilitando ao cliente um fornecimento simultâneo tanto pela rede quanto por seu próprio sistema de geração. Partindo da publicação da Resolução Normativa ANEEL n.º 482/2012, que estabelece condições gerais para o acesso ao sistema de distribuição e dispõe sobre o sistema de compensação. O modelo demonstra incentivo aos consumidores de distintas categorias a produzir sua própria energia; movimenta o setor trabalhista; fomenta o uso de fontes alternativas e limpas de geração; e ainda torna o próprio sistema energético mais eficiente. Se tratando de território nacional, a introdução foi muito bem sucedida, o que resultou em uma potência instalada de 33,01 GW através de 5,555 municípios até outubro do ano deste. Posteriormente foram publicadas resoluções que permitiram uma maior integração desses sistemas com a rede de distribuição, regulamentando e abrindo possibilidades econômicas diferentes aos clientes.

Se tratando de GD e do tema de estudo deste, a geração fotovoltaica se mostra muito presente nos projetos, por se tratar de uma fonte renovável e versátil que possibilita um considerável retorno financeiro em seu investimento. Em termos de geração distribuída no Brasil, outras unidades geradoras além de fotovoltaicas, representam apenas cerca de 0,026% e a tendência deve atingir cada vez mais residências a partir da popularização da tecnologia e do impacto econômico ofertado por sua instalação, já é verificado que nos últimos cinco anos houve redução de 33% nos custos para sistemas residenciais. É importante mencionar também o incentivo global à adesão a um desenvolvimento mais sustentável da sociedade, o que gera grande interesse no tipo de tecnologia descrito anteriormente.

A partir de uma revisão de conceitos pertinentes a análise do SEE, foi disposto um estudo mais específico sobre o armazenamento de energia por BESS neste, a busca por maneiras eficazes em armazenar energia elétrica deu origem a sistemas que utilizam baterias, para alimentar uma carga quando se fizer necessário em um momento posterior, em qualquer que se pense a aplicação. Esta possibilidade permite desde o acesso à energia em locais remotos em que a geração é limitada, até aplicações mais específicas para regulação da rede elétrica, ou projetos complexos cujo objetivo é gerar economia financeira no consumo de uma unidade específica durante horários de pico. O mercado mundial apresenta grande interesse neste tipo de tecnolo-

gia, mostrando crescimento na demanda entre 2010 e 2018 de 30% anualmente, sendo estimado por autores um ritmo de 25% no crescimento anual pela demanda de baterias até 2030, podendo atingir 2,600 GWh.

O BESS demonstra grande importância no sistema de energia elétrica, também como um sistema secundário de fornecimento, atrelado a funções de segurança em caso de falhas ou surtos no conjunto principal. É inerente também concluir que atua ativamente ao evitar desperdícios por geração excedente quando não há demanda suficiente, apresentando grande versatilidade de aplicação. Essa reserva de energia demonstra ainda potencial para ser peça fundamental no planejamento de sistemas de emergência, devido à sua capacidade de fornecer a energia armazenada imediatamente ao ser requisitada.

Os avanços tecnológicos na área descrita promoveram soluções de armazenamento cada vez mais eficazes, o BESS é apresentado como um sistema de gerenciamento e armazenamento completo, controlável e flexível que pode ser implementado em diversos níveis do SEE, desde a geração até a distribuição apresentando soluções a projetos de alguns kWh a centenas de MWh.

Como forma de análise do BESS, foram estudadas suas características, que incluem eficiência ao possibilitar a otimização do uso de energia elétrica durante o dia para evitar picos de consumo pela carga instalada, eficiência também relacionada a economia por parte do consumidor quando evita o consumo diretamente da rede elétrica em horários de pico, em que se verificam taxas maiores por parte da concessionária. O BESS é um sistema flexível, possui por característica a modularidade, permitindo que a capacidade do sistema seja expandida conforme a necessidade de sua aplicação, apresentando vantagens em cenários onde a variação da demanda da carga se mostra significativa. O conjunto é versátil, podendo ser introduzido em uma ampla gama de aplicações, onde os requisitos vão de armazenamento em pequena ou larga escala, para utilização industrial, por exemplo.

A tecnologia propõe ainda uma notável integração com fontes de energia renováveis, em particular a fotovoltaica, que já domina o SEE brasileiro, conforme concluído anteriormente com base nos dados dispostos neste. Um sistema integrado de BESS e geração FV apresenta alta compatibilidade justamente pelo fator intermitente da energia solar, o que proporciona aplicação em sistemas em que há a exigência de controle durante todo o dia. É de grande importância mencionar ainda a contribuição para a estabilidade da rede elétrica ao atuar na regulação da tensão e frequência quando há desequilíbrios entre geração e consumo de energia, o conjunto conta com um rápido tempo de resposta que permite uma reação ativa, fornecendo energia armazenada para elevar a frequência quando a demanda supera a oferta, ou absorvendo o excesso de energia para o controle do caso oposto, exercendo papel semelhante também na regulação da tensão da rede.

Em termos de aplicações específicas do BESS, neste foi disposta uma discussão com base em trabalhos acadêmicos relacionados à aplicação na rede de distribuição, tendo foco na im-

plementação de Peak-Shaving. A proposta da aplicação trata do controle da demanda da carga instalada durante todo o dia, para evitar que o consumidor seja cobrado por ultrapassar a demanda contratada para sua instalação. Conforme apresentado neste, o BESS é posicionado como componente principal no sistema ao armazenar a energia excedente da geração FV durante seu período útil, para então entregar em momentos em que a carga demande mais do que o contratado da concessionária, o que evita ao cliente arcar com a taxa por consumo extra em horários de pico.

A partir da apresentação dos primeiros estudos sob análise no capítulo 5, se conclui que para uma aplicação específica para o BESS com *Peak-Shaving*, o conjunto apresenta ao consumidor a possibilidade em participar do GLD de forma efetiva, ao se tornar capaz de atenuar o pico de demanda de sua própria carga instalada, o que gera economia e por consequência da aplicação ainda colabora para a estabilidade da rede na totalidade. Se faz possível afirmar que o sistema de armazenamento integrado à geração FV em operação para nivelar os picos de carga contribui de forma ativa com a rede de distribuição aliviando desgastes. Se conclui que o dimensionamento do BESS tem influência na otimização da aplicação, demonstrando que dependendo do consumo da carga instalada se faz necessário um maior investimento no sistema em si, que deve proporcionar um retorno econômico gradual, conforme sua operação.

Os estudos discutidos permitem afirmar que a aplicação do BESS em redes de distribuição de energia elétrica não se limita somente a um grupo de consumidores. Se tratando de aplicações industriais, a tecnologia demonstra bons resultados em sistemas dos quais falhas no controle geram grandes impactos econômicos no custo operacional da planta, que exigem processos de otimização muito mais complexos e instalação de componentes proporcionalmente maiores para atender o objetivo do cliente. Ainda que em um campo com menor margem para erros, o BESS se demonstra muito bem-sucedido mesmo considerando uma operação com uma grande margem de segurança em sua operação, apresentando melhora na atuação econômica em até 3%.

Não se fez possível neste, avaliar completamente o retorno econômico em relação ao investimento inicial para instalação e operação do conjunto, uma vez que os estudos relacionados em discussão tiveram como proposta a maximização do uso da bateria para priorizar a aplicação. Não foram levados em conta a vida útil nem os desgastes ou perdas pela operação contínua do sistema.

A partir da teoria apresentada neste, se faz importante mencionar que vários aspectos devem ser considerados quanto a operação do BESS, que incluem perdas, temperatura de operação, capacidade da bateria tanto relacionada ao armazenamento em si quanto a capacidade em receber abundância de energia de uma só vez, bem como as taxas as quais cada cliente específico está sujeito. Todos esses aspectos tornam o projeto mais custoso a longo prazo, quando se trata da manutenção do equipamento e de sua eficiência quando em funcionamento. Dessa maneira, se

faz necessário mencionar que cada projeto exige um estudo específico e detalhado para atingir sua operação ótima quando estiver de fato instalado e em funcionamento.

Se conclui como nítida a grande gama de possibilidades para a utilização do BESS em redes de distribuição, que o sistema proporciona tanto ao consumidor final quanto às concessionárias ferramentas para a regulação da rede elétrica gerando não somente economia financeira diretamente a partir de suas aplicações, mas também permite que o SEE continue evoluindo para atender com segurança a crescente demanda por energia elétrica pela sociedade moderna, a qual, baseando-se em todas as projeções dispostas neste, só demonstra tendências de crescimento no futuro.

De forma análoga, se faz necessário adicionar às conclusões por fim, partindo do que discorre este trabalho, a versatilidade da tecnologia estudada. O BESS como sistema modular de armazenamento de energia elétrica promove aos projetos atrelados ao SEE uma notável flexibilidade quanto à sua construção, o que assegura ao projeto alternativas para expansão em módulos, sem a necessidade de trocar todo o conjunto para um de maior capacidade, o que gera economia também quanto a manutenção em caso de falhas. Ainda, se faz importante concluir que a tecnologia se alinha ao objetivo atual pelo consumo sustentável de recursos naturais, também no sentido previamente mencionado. Mas principalmente na integração com fontes renováveis, permitindo uma solução sólida para sua ampla e otimizada utilização.

REFERÊNCIAS

ABSOLAR. *O que é Energia Solar Fotovoltaica*. 2024. Acessado em: 08 de dezembro de 2024. Disponível em: <<https://www.absolar.org.br/mercado/o-que-e-energia-solar-fotovoltaica/>>.

Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL). *Manual de Controle Patrimonial do Setor Elétrico*. 2015. Disponível em: <http://aneel.gov.br/documents/656815/14887121/MANUAL+DE+CONTROLE+PATRIMONIAL+DO+SETOR+EL%C3%89TRICO+-+MCPSE/3308b7e2-649e-4cf3-8fff-3e78ddeb98b>.

AHMED, N. A.; MIYATAKE, M.; AL-OTHMAN, A. Power fluctuations suppression of stand-alone hybrid generation combining solar photovoltaic/wind turbine and fuel cell systems. *Energy Conversion and Management*, v. 49, n. 10, p. 2711–2719, 2008. ISSN 0196-8904. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0196890408001489>>.

ALCÂNTARA, M. V. P. Desafios tecnológicos e regulatórios em rede inteligente no Brasil. *O Setor Elétrico*, v. 66, p. N/D, 2011.

ALFACOMP. *Energia Elétrica*. 2024. Acessado em: 08 de dezembro de 2024. Disponível em: <<https://alfacomp.net/portfolio-item/energia-eletrica/>>.

ALLIANCE, G. B. *A Vision for a Sustainable Battery Value Chain in 2030: Unlocking the Full Potential To Power Sustainable Development and Climate Change Mitigation*. Geneva, Switzerland, 2019. 1-52 p.

ALVES, M. TCC (Graduação), *ENERGIA SOLAR: ESTUDO DA GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA ATRAVÉS DOS SISTEMAS FOTOVOLTAICOS ON-GRID E OFF-GRID*. Ouro Preto: [s.n.], 2019. Orientador: Savio Figueira Corrêa. Disponível em: <https://www.monografias.ufop.br/bitstream/35400000/2019/6/MONOGRAFIA_EnergiaSolarEstudo.pdf>.

AMARAL, D. H. do; SINOHARA, R. Y. TCC (Trabalho de Conclusão de Curso), *Estudo de Caso do Banco de Baterias LiFePO₄ 250kW/500kWh instalada na UHE Sérgio Motta Rosana-SP*. Rosana: [s.n.], 2022. 67 p. Disponível em: <https://repositorio.unesp.br/items/17c4f5d3-a9f5-48e2-b425-f51149d02a15>. Acesso em: 18 de outubro de 2024.

ANEEL. *Capacidade Instalada por Unidade da Federação*. 2024. Acesso em: 10 out. 2024. Disponível em: <<https://dadosabertos.aneel.gov.br/dataset/capacidade-instalada-por-unidade-da-federacao>>.

ARIAS, N. B.; HASHEMI, S.; ANDERSEN, P. B.; TRÆHOLT, C.; ROMERO, R. Distribution system services provided by electric vehicles: Recent status, challenges, and future prospects. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, v. 20, n. 12, p. 4277–4296, 2019.

ARIAS, N. B.; LÓPEZ, J. C.; HASHEMI, S.; FRANCO, J. F.; RIDER, M. J. Multi-objective sizing of battery energy storage systems for stackable grid applications. *IEEE Transactions on*

Smart Grid, v. 12, n. 3, p. 2708–2721, 2021.

ARONNE, R.; SOARES, L. Bess: Regulação e inovação na matriz elétrica brasileira. *GESEL UFRJ*, 2024. Acessado em: 19 de outubro de 2024. Disponível em: <https://gesel.ie.ufrj.br/wp-content/uploads/2024/05/Artigo_BESS.pdf>.

ARRIETA, F. R. P.; NASCIMENTO, M. A. R. D.; MAZURENKO, A. S. Centrais termelétricas de ciclo simples com turbinas a gás e de ciclo combinado. In: LORA, E. E. S. (Ed.). *Gás Natural*. Rio de Janeiro: Interciência, 2004. p. 113.

Batteries International. *Developing a battery consisting of molten sodium was always going to be a challenge. But sodium sulfur and sodium nickel batteries are still around*. 2018. Acesso em: 10 nov. 2024. Disponível em: <batteriesinternational.com/2016/09/22/battery-pioneers-johancoetzer/>>.

Battery University. *How do lithium batteries work?* 2022. Acesso em: 10 nov. 2024. Disponível em: <<https://batteryuniversity.com/article/bu-204-how-do-lithium-batteries-work>>>.

BRASIL, S. *Dimensionamento de Banco de Baterias em Acumuladores de Chumbo-Ácido*. 2023. Acessado em: 08 de dezembro de 2024. Disponível em: <<https://pt.linkedin.com/pulse/dimensionamento-de-banco-baterias-em-acumuladores-chumbo->

BÖTTIGER, M.; PAULITSCHKE, M.; BEYER, R.; NEUMANN, L.; BOKLISCH, T. Modular hybrid battery storage system for peak-shaving and self-consumption optimization in industrial applications. *Energy Procedia*, v. 155, p. 102–110, 2018. ISSN 1876-6102. 12th International Renewable Energy Storage Conference, IRES 2018, 13-15 March 2018, Düsseldorf, Germany. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S187661021831018X>>.

CALLEJO, L. H. *Microrredes eléctricas: Integración de generación renovable distribuida, almacenamiento distribuido e inteligencia*. 1. ed. Madrid: Ibergarceta, 2019.

CARVALHO, G. S. TCC (Trabalho de Conclusão de Curso), *Sistema de compensação de energia elétrica para consumidores de micro e minigeração distribuída solar fotovoltaica*. Ilha Solteira: [s.n.], 2024. 48 p. Disponível em: <https://repositorio.unesp.br/items/ed871e2f-2ab6-403a-ad5b-5309865ab49c>. Acesso em: 15 de outubro de 2024.

CHRISPIM, G. *Geração própria de energia elétrica ultrapassa 14GW e capacidade e supera usina de Itaipu*. 2022. 40-41 p. Acesso em: 19 de outubro de 2024.

CIPOLLA, P. L. M. *Avaliação Técnica, Econômica e Social para a Implantação de Microrredes em Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica*. Dissertação (Dissertação (Mestrado)) — Universidade Estadual Paulista, Sorocaba, 2021. Orientador: Amasifen, Juan Carlos Cebrian; Paredes, Helmo Kelis Morales. Disponível em: <<https://repositorio.unesp.br/items/917bbd01-ff96-49e6-8f8a-b58b3f9f0337>>.

CIÊNCIA, M. da. *Nota técnica*. [S. l: s. n.], 2022.

COMMISSION, E. *Strategic Research Agenda for Europe's Electricity Networks of the Future: European Technology Platform Smart Grids*. [S. l: s. n.], 2007.

DONGOL, D.; FELDMANN, T.; SCHMIDT, M.; BOLLIN, E. A model predictive control based peak shaving application of battery for a household with photovoltaic system in a rural distribution grid. *Sustainable Energy, Grids and Networks*, v. 16, p. 1–13, 2018. ISSN 2352-4677. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352467717302916>>.

DRIEMEIER, L. TCC (Trabalho de Conclusão de Curso), *Geração Distribuída*. Porto Alegre: [s.n.], 2009. Orientador: Luiz Tiarajú dos Reis Loureiro. 76f. Disponível em: <https://lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/24339/000736407.pdf?sequence=1>. Acesso em: 14 de outubro de 2024.

ELETRONUCLEAR. *Sítio contendo informações sobre a empresa e a produção e uso da energia nuclear no Brasil e no mundo*. 2013. Acesso em: 07 out. 2024. Disponível em: <<http://www.eletronuclear.gov.br>>.

ENERGIA, S. d. E. E. Ministério de Minas e. *Geração e Energia Elétrica - Dados Consolidados*. 2024. Acesso em: 10 out. 2024. Disponível em: <<https://antigo.mme.gov.br/web/guest/secretarias/energia-eletrica/acoes-e-programas/acoes/energia/geracao-e-energia-eletrica>>.

ENERGIA, S. d. P. e. D. E. Ministério de Minas e. *Plano Nacional de Energia 2030*. 2007. Acesso em: 10 nov. 2024. Disponível em: <<https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-165/topico-173/PNE>>

FUSHENG, L.; RUIHENG, L.; FENGQUAN, Z. *Microgrid Technology and Engineering Application*. London: Elsevier, 2016.

GELLINGS, C. W. The concept of demand-side management for electric utilities. *Proceedings of the IEEE*, IEEE, v. 73, n. 10, p. 1468–1470, 1985.

GWEC. *GWEC | GLOBAL WIND REPORT 2023*. [S.l.], 2023.

HATZIARGYRIOU, N.; ASANO, H.; IRAVANI, R.; MARNAY, C. Microgrids: An overview of ongoing research, development, and demonstration projects. *IEEE Power Energy*, p. 78–94, August 2007.

HENNI, S.; BECKER, J.; STAUDT, P.; vom Scheidt, F.; WEINHARDT, C. Industrial peak shaving with battery storage using a probabilistic forecasting approach: Economic evaluation of risk attitude. *Applied Energy*, v. 327, p. 120088, 2022. ISSN 0306-2619. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261922013459>>.

(IAEA), I. A. E. A. *Nuclear Technology Review 2015*. 2015. Acesso em: 10 nov. 2024. Disponível em: <<https://www.iaea.org/sites/default/files/ntr2015.pdf>>.

IEC. *Executive Summary. Electric Energy Storage White Paper*. [S.l.], 2009. v. 39, 11-22 p.

IEC; FISE. *Electrical Energy Storage – White Paper*. [S.l.], dezembro 2011. 92 p.

INSTITUTE, E. P. R. *Report to NIST on the Smart Grid Interoperability Standards Roadmap Manager*. [S. l: s. n.], 2019.

IRNE. *Renewable capacity statistics*. Abu Dhabi, 2023.

JABIR, H.; TEH, J.; ISHAK, D.; ABUNIMA, H. Impacts of demand-side management on electrical power systems: A review. *Energies*, v. 11, 04 2018.

KARADIMOS, D. I. et al. Techno-economic analysis for optimal energy storage systems placement considering stacked grid services. In: *14th International Conference on the European Energy Market (EEM)*. Dresden, Germany: [s.n.], 2017. p. 1–6.

LIU, W.; PLACKE, T.; CHAU, K. Overview of batteries and battery management for electric vehicles. *Energy Reports*, v. 8, p. 4058–4084, 2022. ISSN 2352-4847. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352484722005716>>.

MATRIXENERGIA.

Ministério de Minas e Energia/Empresa de Pesquisa Energética. *BEN - Balanço Energético Nacional 2020 - Relatório Síntese*. Brasília: [s.n.], 2020. 73 p. Disponível em: https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-601/topico-588/BEN_S%C3%ADntese_2020_PT.pdf. Acessado em: 14/10/2024.

NASCIMENTO, M. A. R. Geração termelétrica: planejamento, projeto e operação. In: *Geração termelétrica: planejamento, projeto e operação*. Rio de Janeiro: Interciência, 2004. v. 2, cap. 12, p. 1296.

NEOENERGIA. *Sistema de transmissão de energia no Brasil: o que é e como funciona*. 2024. Disponível em: <<https://www.neoenergia.com/w/como-funciona-o-sistema-de-transmissao-no-brasil>>.

NIST. *NIST Framework and Roadmap for Smart Grid Interoperability Standards, Release 1.0: Smart Grid Cybersecurity Guidelines and Interoperability Standards (with DVD)*. [S. l: s. n.], 2010.

PANKOVE, J. *Optical Processes in Semiconductors*. Dover, 1975. (Dover books explaining science and mathematics). ISBN 9780486602752. Disponível em: <<https://books.google.com.br/books?id=HHM9Vo0DYZAC>>.

PENG, Q.; LIU, W.; SHI, Y.; DAI, Y.; YU, K.; GRAHAM, B. Multi-objective electricity generation expansion planning towards renewable energy policy objectives under uncertainties. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 197, p. 114406, 2024. ISSN 1364-0321. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032124001291>>.

PIMENTEL, J. P. TCC (Trabalho de Conclusão de Curso), *Análise do marco legal da geração distribuída*. Ilha Solteira: [s.n.], 2022. 45 p. Disponível em: <https://repositorio.unesp.br/items/157b26b8-4021-4625-8857-567df706d4cc>. Acesso em: 15 de outubro de 2024.

RAVEENDRAN, U.; COSTA-CASTELLÓ, R. An analysis of energy storage system interaction in a multi objective model predictive control based energy management in dc microgrid. In: *IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation*. [s.n.], 2019. p. 739. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/8869474>>.

REIS, L. B. d. *Geração de energia elétrica*. 2. ed. Barueri: Manole, 2011.

ROSA, L. P. Geração hidrelétrica, termelétrica e nuclear. *Estudos Avançados*, Instituto de Estudos Avançados da Universidade de São Paulo, v. 21, n. 59, p. 39–58, 2007.

ROSOLEM, M. d. F. N. C.; PINTO, D. R.; BECK, R. F.; BET, I.; GAIDZINSKI, P. Estado da arte de baterias avançadas para sistemas fotovoltaicos. *Anais Congresso Brasileiro de Energia Solar - CBENS*, p. 1–8, dez. 2016. Disponível em: <<https://anaiscbens.emnuvens.com.br/cbens/article/view/1447>>.

RUBBIA, C. Today the world of tomorrow—the energy challenge. *Energy Conversion and Management*, v. 47, n. 17, p. 2695–2697, 2006. ISSN 0196-8904. 12th International Conference on Emerging Nuclear Energy Systems. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0196890406000483>>.

SAINI, S. Conservation v. generation: The significance of demand-side management (dsm), its tools and techniques. *Refocus*, v. 5, p. 52–54, 05 2004.

SANTOS, J. A. F. d. A.; LUNA, M. A. R.; CUNHA, F. B. F.; SILVA, M. S.; TORRES, E. A. Geração distribuída no brasil: Análise de sua evolução e aspectos regulatórios. *X Congresso Brasileiro de Regulação - 4 Expo ABAR*, 2017. Disponível em: <https://repositorio.ufba.br/bitstream/ri/35634/1/ABAR-2017_GeraoDistribuida.pdf>.

SCHIPITOSKI, K. TCC (Trabalho de Conclusão de Curso), *ESTUDO COMPARATIVO DE TECNOLOGIAS DE ARMAZENAMENTO DE ENERGIA PRODUZIDA A PARTIR DE FONTES RENOVÁVEIS*. Sorocaba: [s.n.], 2022. 41 p. Disponível em: <https://repositorio.unesp.br/items/7f3123c7-ead0-47c8-97f6-cad53df975eb>. Acesso em: 18 de outubro de 2024.

SERRANO, H. de O. M. *Gerenciamento de capacidade nas modernas redes de distribuição de energia elétrica*. Tese (Tese (Doutorado)) — Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2023. Orientador: Jonatas Boas Leite. Disponível em: <<https://repositorio.unesp.br/items/5ffb32b2-65b5-44e9-be20-93c44dbc4dc2>>.

SHORT, T. A. *Electrical Power Distribution Handbook*. [S.l.]: CRC Press, 2004.

SIMONE, L. F. C. *Inserção da micro e mini geração distribuída solar fotovoltaica: impactos na receita das distribuidoras e nas tarifas dos consumidores*. 148 p. Dissertação (Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica)) — Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2019.

SOUZA, J. Dissertação (Mestrado), *Análise de sistemas de armazenamento de energia com baterias em uma rede real de distribuição de energia em média tensão*. Belo Horizonte: [s.n.], 2020. Orientador: Wallace do Couto Boaventura. Disponível em: <<https://jaolsbdfoaubdso>>.

SOUZA, L. F. de. TCC (Trabalho de Conclusão de Curso), *Os impactos da geração distribuída no custo operacional das concessionárias de distribuição*. Bauru: [s.n.], 2020. 65 p. Disponível em: <https://repositorio.unesp.br/items/f50c2278-b9eb-4b90-b04a-744369c09ffa>. Acesso em: 15 de outubro de 2024.

SUPPLIER. *Soluções para Microrredes de Energia - Banco de Baterias*. 2024. Acessado em: 08 de dezembro de 2024. Disponível em: <<https://www.supplier.ind.br/produto/solucoes-para-microrredes-de-energia/17/banco-de-baterias/145>>.

TECH, P. *Sponsored: NGK's NAS Sodium-Sulfur Grid-Scale Batteries In-Depth*. 2024. Acessado em: 08 de dezembro de 2024. Disponível em: <<https://www.pv-tech.org/interviews/sponsored-ngks-nas-sodium-sulfur-grid-scale-batteriesin-depth>>.

TEIXEIRA, F. N.; LORA, E. E. S. *Geração termelétrica: planejamento, projeto e operação*. Rio de Janeiro: Interciência, 2004.

TERMELÉTRICAS, A. B. de G. *A Importância da Participação da Geração Térmica a Carvão Mineral, nos Leilões A-5*. 2011. Acesso em: 10 nov. 2024. Disponível em: <https://antigo.aneel.gov.br/web/guest/audiencias-publicas-antigas?p_id=participacaopublicaWARparticipacaopublicaportletpplifecycle=2pstate=normalp_pmode=viewp_pcacheability=cacheLevelPagep_pcol_id=column-2p_pcol_pos=1p_pcol_count=2pparticipacaopublicaWARparticipacaopublicaportletideDocumento=25566pparticipacaopublicaWARparticipacaopublicaportletitipoFaseReuniao=faseparticipacaopublicaWARparticipacaopublicaportletjspPage=>

TOLMASQUIM, M. T. *Geração de energia elétrica no Brasil*. Rio de Janeiro: Interciência : CENERGIA, 2005.

TOLMASQUIM, M. T. *Energia Termelétrica: Gás Natural, Biomassa, Carvão, Nuclear*. 1. ed. Rio de Janeiro: EPE, 2016.

VASCONCELOS, F. M. d. *Geração, transmissão e distribuição de energia elétrica*. 1. ed. Londrina: Editora e Distribuidora Educacional S.A, 2017.

WEEDY, B.; CORY, B.; JENKINS, N.; EKANAYAKE, J.; STRBAC, G. *Electric Power Systems*. 5. ed. [S.l.]: Wiley, 2012.

WEF. *A Vision for a Sustainable Battery Value Chain in 2030*. [S.l.], setembro 2019. 52 p. Acesso em: 19 de outubro de 2024. Disponível em: <<https://www3.weforum.org/docs/WEFAVisionforasustainableBatteryvaluechainin2030Report.pdf>>.

WEG. *WEG fornece Sistemas de Armazenamento de Energia inéditos para Copel*. 2021. Disponível em: <<https://www.weg.net/institutional/BR/pt/news/produtos-e-solucoes/weg-fornece-sistemas-de-armazenamento-de-energia-ineditos-para-copel>>.

WEG. *BESS - Battery Energy Storage System*. 2023. Acesso em: 18 de outubro de 2024. Disponível em: <https://www.weg.net/catalog/weg/US/en/Battery-Energy-Storage/Utility-Scale/BESS—Battery-Energy-Storage-System/p/MKT_WDC_GLOBAL_PRODUCT_SYSTEM_BESS_UTILITY_SCALE>.

WEG. *WEG Fornece Sistema de Armazenamento de Energia por Baterias (BESS) para Cidade de Aspen, no Colorado*. 2024. Disponível em: <<https://www.weg.net/institutional/BR/pt/news/produtos-e-solucoes/weg-fornece-sistema-de-armazenamento-de-energia-por-baterias-bess-para-cidade-de-aspen-no-colorado>>.

ZHANG, W.; SUN, C.; LIU, K.; SHEN, W.; WU, Y.; YAO, L.; ZHANG, Q.; ZHANG, W.; WANG, L. Technical challenges of space solar power stations: Ultra-large-scale space solar array systems and space environmental effects. *Space Solar Power and Wireless Transmission*, 2024. ISSN 2950-1040. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2950104024000178>>.