

Lucas Augusto Spis Marques

Revisão Bibliográfica Técnico-Científica entre Sistemas Solares On-Grid e Híbridos: Componentes, Eficiência e Aplicações no Contexto Global

Lucas Augusto Spis Marques

Revisão Bibliográfica Técnico-Científica entre Sistemas Solares On-Grid e Híbridos: Componentes, Eficiência e Aplicações no Contexto Global

Trabalho de Conclusão de Curso apresentada à Universidade Estadual Paulista (UNESP),FEC-Faculdade de Engenharia e Ciencia, Rosana, para obtenção do título de Bacharelado em Engenharia de Energia.

Orientador(a): Prof. Dr. Kleber Rocha

S759r

Spis, Lucas

Revisão Bibliográfica Técnico-Científica entre Sistemas Solares On-Grid e Híbridos:
Componentes, Eficiência e Aplicações no Contexto Global / Lucas Spis. -- Rosana,
2025

116 p.

Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado - Engenharia de Energia) -
Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Engenharia e Ciências, Rosana
Orientador: Kleber Rocha de Oliveira

1. Revisão Bibliografica. 2. Sistema On-Grid e Sistemas Híbridos. 3. Armazenamento
de energia por Baterias LiFePo4. 4. Transição Energetica. 5. Sustentabilidade e
Eficiencia Energetica. I. Título.

Lucas Augusto Spis Marques

Revisão Bibliográfica Técnico-Científica entre Sistemas Solares On-Grid e Híbridos: Componentes, Eficiência e Aplicações no Contexto Global

Trabalho de Conclusão de Curso apresentada à Universidade Estadual Paulista (UNESP), FEC- Faculdade de Engenharia e Ciência, Rosana, para obtenção do título de Bacharelado em Engenharia de Energia.

Data da defesa: 24/06/2025

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Kleber Rocha de Oliveira

UNESP – FEC-Faculdade de Engenharia e Ciência - Campus de Rosana

Prof. Dr. Maria Cláudia Costa De Oliveira Botan

Orientada/Unesp Rosana

Prof. Dr. José Francisco Resende da Silva

Orientado/Unesp Rosana

Suplente: Dr Andreia Fatima Zanette

Orientadora/Unesp-Rosana

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer a todos que acreditarem em mim, por crer que eu chegaria aonde cheguei, com muita dedicação e empenho. Gostaria de agradecer ao meu orientador, que me ajudou e guiou, durante o processo disciplinar do meu TCC, além de ter a capacidade de estar me formando em uma faculdade com total excelência, no qual os professores são muitos capacitados, além de toda equipe que compõe o corpo docente da Unesp-Rosana, que conseguem manter uma faculdade de excelência para os alunos terem a melhor condição possível de ensino, sem eles, não seríamos capazes de realizar um estudo com tanta excelência assim.

Além disso, agradeço, a Maria Rita por me dado suporte nesses 2 últimos anos do curso, onde me trouxe um verdadeiro motivo para continuar, também agradeço ao meu pai, que me possibilitou a escolha da faculdade e curso que eu mais queria, sem ele, não seria capaz de estudar tão longe de casa, sem apoio mental e financeiro, então dedico meu trabalho de conclusão de curso à ele, pois não estaria aqui hoje sem o suporte dele.

A importância de amigos que fiz ao longo da faculdade, onde eles, foram uma peça fundamental, para conseguir chegar ao meu último ano de faculdade, pois, sem eles, a faculdade seria sem cor, sem animo, porém eles me deram força para continuar esse caminho acadêmico. Também, agradeço a banca examinadora, por esta dando atenção e confiando no trabalho proposto, lembrando que tenho um carinho enorme, pelos professores da FEC, que puderam me ensinar, tudo o possível e impossível, para me torna um Engenheiro de Energia, comprometido e com conhecimentos técnicos, para ingressar no mercado de trabalho, mais preparado possível.

Queria enaltecer, o Mateus Andrade e a Maria Eduarda Lisboa, que fizeram eu acreditar que fosse possível o término da faculdade com êxito, além de me dar suporte a tudo que eu precisava, sem eles, a faculdade não seria a mesma, e possivelmente não estaria aqui hoje sem eles, sendo dois grandes amigos que eu fiz na faculdade e levarei para o resto da minha vida, eles me fazem acredita que tudo é possível, então dedico especialmente esse TCC a esses dois amigos que eu fiz.

“A energia é a base do desenvolvimento humano. Levar energia limpa e acessível para todos não é apenas uma questão ambiental, mas um imperativo moral.”

— *Bill Gates, fundador da Bill & Melinda Gates Foundation e defensor global da transição energética sustentável.*

RESUMO

Este Trabalho de Conclusão de Curso propõe uma revisão bibliográfica técnico-científica comparativa entre os sistemas fotovoltaicos On-Grid e Híbridos, avaliando seu desempenho, eficiência energética, viabilidade econômica e aplicabilidade prática no contexto do setor elétrico brasileiro. A pesquisa parte do cenário atual de transição energética, no qual a crescente demanda por fontes renováveis, aliada à instabilidade do fornecimento convencional, tem impulsionado a adoção da energia solar como alternativa estratégica, especialmente em países com elevado potencial de irradiação como o Brasil. O estudo adota como metodologia uma revisão bibliográfica abrangente, a análise normativa da Lei nº 14.300/2022 que regulamenta a geração distribuída no país, além da investigação técnica de equipamentos fornecidos por fabricantes de referência, como Deye, Enphase, BOS-G, SE-G5.1 e EVE. A análise aponta que os sistemas On-Grid permanecem como alternativa viável para consumidores com padrão de uso diurno e rede estável, destacando-se pelo menor custo inicial e simplicidade de instalação. No entanto, apresentam maior vulnerabilidade frente à tarifação dinâmica e à interrupção no fornecimento. Em contrapartida, os sistemas híbridos, embora demandem maior investimento inicial, demonstraram melhor desempenho em cenários com consumo noturno, instabilidade elétrica e demanda por autonomia energética, portanto o trabalho presente, mostrará indícios de qual o melhor sistema a ser escolhido, de acordo com as características financeiras e de consumo energético

Palavras-chave: Revisão bibliográfica; Sistemas híbridos; Sistema On-grid; baterias LiFePO₄;

ABSTRACT

This undergraduate thesis presents a comparative technical-scientific literature review of On-Grid and Hybrid photovoltaic systems, assessing their performance, energy efficiency, economic viability, and practical applicability within the context of the Brazilian electric power sector. The research is grounded in the current energy transition scenario, where the increasing demand for renewable energy sources coupled with the instability of conventional supply has accelerated the adoption of solar energy as a strategic alternative, particularly in countries with high solar irradiation potential such as Brazil. The methodological approach involves an extensive literature review, normative analysis of Law No. 14,300/2022 which regulates distributed generation in Brazil and a technical evaluation of equipment supplied by industry-leading manufacturers, including Deye, Enphase, BOS-G, SE-G5.1, and EVE. The findings suggest that On-Grid systems remain a viable option for consumers with predominantly daytime energy consumption and access to a stable grid, offering advantages such as lower initial investment and installation simplicity. However, these systems are more susceptible to challenges related to dynamic tariff schemes and supply interruptions. Conversely, although Hybrid systems require a higher upfront investment, they have demonstrated superior performance under conditions involving nighttime energy usage, grid instability, and a demand for energy autonomy. Ultimately, this study aims to provide a structured foundation for identifying the most suitable photovoltaic system based on the user's financial profile and specific energy consumption patterns.

Keywords: Literature review; Hybrid systems; On-grid system; LiFePO₄ batteries.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Gráfico

| | |
|---|----|
| Gráfico 1 - Relação de irradiância e temperatura com a geração de energia nos painéis fotovoltaicos | 35 |
| Gráfico 2 – Evolução dos preços dos Kits solares | 37 |
| Gráfico 3 - Curva de capacidade em relação aos ciclos | 53 |
| Gráfico 4 – Curva de Eficiência de Temperatura | 53 |

Figuras

| | |
|---|----|
| Figura 1 -Infográfico: Expansão da Matriz Elétrica Brasileira | 20 |
| Figura 2 - Configuração básica do sistema time Shift | 24 |
| Figura 3- Linha do tempo de cobrança da TUSD Fio B, após a Lei 14.300/22 ... | 26 |
| Figura 4 – Modelo de Micro Inversor Enphase IQ 7 +..... | 27 |
| Figura 5 - Estrutura de um painel fotovoltaico..... | 31 |
| Figura 6 – Módulos Fotovoltaicos em serie e paralelo | 33 |
| Figura 7 – Mapa de Irradiação Solar Global Diária no Plano Inclinado | 36 |
| Figura 8 – Bateria BOS-G Bateria de Lítio | 39 |
| Figura 9- Infográfico do projeto de Lei 14.300 | 48 |
| Figura 10- Sistema On-grid..... | 51 |
| Figura 11 - Sistema Híbrido | 52 |
| Figura 12 - Diagrama esquemático da conexão paralela de baterias de sistema de baixa potência | 58 |
| Figura 13 - Diagrama esquemático da conexão paralela das baterias do sistema de alta potência..... | 60 |
| Figura 14 – Funcionamento Painel Bifacial..... | 64 |
| Figura 15 – Etiqueta obrigatória de eficiência para placas solares..... | 67 |
| Figura 16 – Pirâmide de Bancabilidade das placas | 69 |
| Figura 17- Diferença de Micro Inversor e Inversor convencional | 72 |

| | |
|--|-----|
| Figura 18 - Modos de operação do inversor híbrido | 75 |
| Figura 19 – Tarifa branca durante o dia..... | 77 |
| Figura 20 – Sistema OFF Grid..... | 78 |
| Figura 21 – Sistema On-grid e Sistema Híbrido..... | 86 |
| Figura 22- Benefícios da fonte fotovoltaica no Brasil..... | 103 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|---|----|
| Tabela 1 – Componentes dos Sistemas On-Grid e Híbridos | 57 |
| Tabela 2 – Comparativo técnico de módulos de alto desempenho | 66 |
| Tabela 3 – Comparativo técnico de inversores On-Grid..... | 71 |
| Tabela 4 – Comparativo de micro inversores | 73 |
| Tabela 5.– Especificações do inversor Deye SUN-8K-SG04LP1-EU | 80 |
| Tabela 6– Comparação econômica entre On-Grid e Híbrido (2024) | 66 |
| Tabela 7– Ficha Técnica da Bateria de íon-lítio do tipo fosfato de ferro e lítio (LiFePO ₄)..... | 91 |
| Tabela 8 – Indicadores ambientais e reciclabilidade | 94 |

SUMÁRIO

| | |
|--|----|
| 1 INTRODUÇÃO..... | 15 |
| 2. OBJETIVOS..... | 16 |
| 3. DESENVOLVIMENTO | 18 |
| 3.1. Sistema Fotovoltaico On-Grid e Híbrido | 21 |
| 3.2 Sistema Time Shift..... | 23 |
| 3.3 Estruturas das placas do sistema fotovoltaico | 29 |
| 3.4 Configuração do modo de operação | 32 |
| 3.5 Bateria de Fosfato de Ferro Lítio LiFePo4 | 38 |
| 4. ÓRGÃOS REGULATÓRIOS E POLÍTICAS PÚBLICAS DE APOIO À ENERGIA SOLAR .41 | |
| 4.1 Introdução: A Estrutura Institucional da Energia no Brasil e no Mundo | 41 |
| 4.2 ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica | 41 |
| 4.3 Ministério de Minas e Energia (MME)..... | 42 |
| 4.4 ONS – Operador Nacional do Sistema Elétrico | 43 |
| 4.5 CCEE – Câmara de Comercialização de Energia Elétrica..... | 43 |
| 4.6 EPE – Empresa de Pesquisa Energética | 44 |
| 4.7 Organismos Internacionais: ONU, AIE, OCDE e ETTO | 45 |
| 4.8 ONU – Organização das Nações Unidas | 45 |
| 4.9 AIE – Agência Internacional de Energia..... | 46 |
| 4.10 OCDE e ETTO | 46 |
| 4.11 Conclusão Crítica: Interdependência Técnica, Jurídica e Econômica | 47 |
| 5. A Matriz Energética Brasileira e o Papel da Geração Distribuída..... | 47 |
| 5.1 Fundamentos Técnicos dos Sistemas Fotovoltaicos On-Grid e Híbridos..... | 50 |
| 5.2 Regulação, Sustentabilidade e Descentralização | 54 |
| 6. COMPONENTES E TECNOLOGIAS DOS SISTEMAS FOTOVOLTAICOS | 56 |
| 6.1 Estrutura Técnica de um Sistema Solar Fotovoltaico | 56 |
| 6.2 Tecnologias Fotovoltaicas, Eficiência Energética e Impacto Térmico no Desempenho dos Sistemas Solares..... | 62 |
| 6.2.1 Certificações e Garantias: Conformidade Técnica e Confiabilidade a Longo Prazo.... | 66 |
| 6.3 Inversores Híbridos: Flexibilidade, Backup e Inteligência Energética | 73 |
| 6.3.1. Arquitetura e Modos de Operação | 74 |
| 7. COMPARAÇÃO ENTRE SISTEMAS SOLARES ON-GRID E HÍBRIDOS..... | 84 |
| 7.1 Planta Elétrica e Operação do Fluxo de Energia | 85 |
| 7.2 Eficiência Global: Conversão, Armazenamento e Perdas..... | 86 |
| 7.3 Viabilidade Econômica: Investimento, Tarifa e Payback Real | 87 |
| 7.4 Confiabilidade Elétrica e Redundância..... | 88 |
| 7.5 Sustentabilidade, Ciclo de Vida..... | 89 |
| 8 CONCLUSÃO GERAL E RECOMENDAÇÕES TÉCNICAS E ECONÔMICAS | 95 |
| 8.1 Considerações Finais: Um Panorama da Geração Solar no Brasil | 95 |

| | |
|---|-----|
| 8.2 Análise Crítica da Regulação Brasileira e Suas Consequências..... | 96 |
| 8.3 Relevância das Baterias LiFePO ₄ e Inversores Híbridos na Transição Energética | 97 |
| 8.4 Recomendações Técnicas para Consumidores e Projetistas..... | 97 |
| 8.5 Recomendações para Políticas Públicas e Incentivos Fiscais | 101 |
| 8.6 Sustentabilidade e Futuro da Geração Distribuída..... | 102 |
| 8.7 Síntese Final: Contribuições Técnicas e Acadêmicas do Estudo | 104 |
| 9 CONCLUSÃO | 106 |
| 10. REFERÊNCIAS BIBLIOGRAFICAS..... | 112 |

1 INTRODUÇÃO

Durante estes últimos anos, a questão da sustentabilidade, segurança energética e aquecimento global tornou-se ainda mais importante para o desenvolvimento futuro da nossa sociedade, pois com certeza, é considerada em todas as agendas políticas, científicas e tecnológicas em todo o mundo, isso é causado pelas grandes quantidades de combustíveis fósseis que são extraídos e utilizados, que causa emissões de gases do efeito estufa, e por consequência, aumenta a temperatura média da terra, devido a “quebra” da película de proteção natural do planeta, que seria o ozônio, além do fato de que ainda temos aumento na energia proveniente de fontes não renováveis devido ao crescimento exponencial da população mundial, trazendo mais explorações e fabricações desses combustíveis. Tudo isso requer o surgimento de fontes renováveis de energia a fim de fornecer alternativas de geração de energia para a população. Fontes insustentáveis e não renováveis são devastadoras para o meio ambiente, com vários impactos negativos a curto, médio e longo prazo.

Portanto, o cenário da energia solar fotovoltaica vem ganhando força como uma das opções mais interessantes e promissoras, não só pela sua alta disponibilidade, mas também porque pode ser utilizada em vários contextos diferentes, desde pequenos sistemas residenciais até mesmo usinas em larga escala (ONU, 2023; AIE, 2023), sendo uma fonte de energia descentralizada. A eficiência elétrica para potência de um módulo fotovoltaico não é apenas uma função de como estão conectados entre si, mas sim, dependente em grande parte de fatores ambientais relacionados ao clima, como intensidade de irradiação solar e temperatura ambiente, como são dispositivos eletrônicos, eles sofrem com o superaquecimento, assim diminuindo a eficiência de conversão de energia elétrica, portanto está diretamente ligado com a capacidade operacional, pois sabendo que esses dispositivos devem trocar sua temperatura interna com o ambiente para operação em uma determinada faixa de temperatura, para o melhor funcionamento do sistema, assim trocando calor com o ambiente.

Essas variáveis determinarão as relações de corrente e tensão e a potência de saída no módulo, onde terão um impacto significativo em seu desempenho em tempo real sob condições de implantação, já que o módulo só

pode ir de uma temperatura mínima até uma temperatura máxima na qual a tecnologia foi desenvolvida para isso, ou seja, essa variação de temperatura tem que ser proporcional a variação que foi desenvolvida e especificada pelo fabricante. Portanto, a interação entre esses parâmetros é retratada através das curvas características I-V (corrente versus voltagem), mostrando o comportamento do módulo na incidência solar e mudanças de temperatura.

2. OBJETIVOS

Diante disso, este trabalho tem por objetivo realizar uma análise de revisão bibliográfica técnico-científica comparativa entre os sistemas fotovoltaicos On-Grid e Híbridos, com foco nos aspectos de desempenho, eficiência energética, custo-benefício em relação ao consumo energético e sua necessidade em manter os aparelhos eletrônicos em funcionamento constante, e aplicabilidade prática no contexto regulatório energético brasileiro atual. Com isso, podemos verificar as diferenças entre os sistemas, e mostrar qual seria o sistema mais indicado para o consumidor final, pois os dois sistemas são excelente para geração distribuídas, porem possuem finalidades diferentes, apesar de serem sistemas solar, para geração residencial, comercial ou industrial, possuem algumas peculiaridades distintas.

Portanto, esse trabalho tem como objetivo principal, a verificação das bibliografias e estudos acadêmicos, voltados para esses dois sistemas fotovoltaicos, assim trazendo um estudo, para cada tipo de consumo final, por meio de análises bibliográficas e técnicas de cada sistema. Com isso, o trabalho abordara resoluções e aspectos fundamentais para a dissertação e escolha do melhor sistema possível.

Além de mostrar, uma função fundamental do sistema Híbrido, que seria a capacidade de colocar bancos de bateria, especialmente as de fosfato de ferro lítio, que são baterias mais eficientes e amigáveis em relação a sustentabilidade e o compromisso com o meio ambiente, pois quanto melhor for a eficiência dessas baterias, menos fabricação terá que ser feita, e conseqüentemente, menos poluição causado pelo descarte e fabricação do mesmo, por serem baterias com mais de 90% de reciclabilidade, já os sistemas

do tipo On-Grid, conectados à rede elétrica convencional, e os sistemas Híbridos, que tem a possibilidade de armazenamento de energia e com conexão à rede, representa soluções viáveis, tornando-os essenciais para compreender de forma aprofundada as características, os componentes, a eficiência e as aplicações desses dois modelos, o que justifica a realização deste trabalho.

Com objetivo principal desenvolver uma revisão bibliográfica técnico-científica que promova uma análise comparativa entre os sistemas solares On-Grid e Híbridos, considerando os aspectos estruturais, o desempenho energético e as possibilidades de aplicação prática em diferentes contextos geográficos e socioeconômicos. Tal abordagem busca reunir e sistematizar conhecimentos atualizados provenientes de fontes confiáveis, como artigos científicos, manuais técnicos, relatórios de instituições internacionais e normativas regulatórias do setor elétrico.

O trabalho também propõe a investigação detalhada dos principais componentes técnicos de cada sistema, tais como os painéis fotovoltaicos, inversores, baterias, controladores de carga e dispositivos de monitoramento. A eficiência energética constitui outro eixo fundamental da pesquisa, permitindo a comparação do rendimento dos sistemas em diferentes condições operacionais, considerando fatores como irradiação solar, temperatura ambiente e perdas técnicas.

Além disso, busca-se compreender como esses sistemas têm sido aplicados por políticas públicas e incentivos regulatórios na viabilização econômica dessas tecnologias. A discussão proposta ainda pretende problematizar a viabilidade de uso de sistemas híbridos em regiões com redes elétricas instáveis ou inexistentes, demonstrando sua contribuição estratégica para a universalização do acesso à energia e para a redução da dependência de fontes fósseis.

Portanto, ao mostrar uma visão técnica e crítica sobre os sistemas solares On-Grid e Híbridos, o presente trabalho visa contribuir com o debate energético atual, oferecendo subsídios para a tomada de decisão técnica, acadêmica e política no que tange à adoção de soluções sustentáveis no setor

elétrico brasileiro e mundial. Por fim neste trabalho, refere-se a compreende, levantamentos bibliográfico em artigos científicos, dissertações acadêmicas, como os (Zanoni, 2018; Mallmann, 2024; Muñoz, 2023), manuais técnicos de fabricantes de Inversores Híbridos e módulos fotovoltaicos, disponibilizados pela empresa Mitratech WEG Energia Solar e publicações oficiais (ANEEL, MME, ONU, EPE), onde a caracterização técnica dos principais componentes do sistema solar, como painéis, inversores, baterias, micro inversores, sistemas de proteção, monitoramento entre outros, além de mostrar órgãos reguladores da energia fotovoltaica, para entender melhor, como funciona essas regulamentações e como está o desenvolvido da energia solar no Brasil e no mundo

Ao final, do trabalho pretende-se fornecer recomendações fundamentadas para consumidores, projetistas e formuladores de políticas públicas, para que possa contribuir para decisões mais conscientes e alinhadas, com os objetivos da segurança energética, como uma transição energética mais justa, limpa, acessível, trazendo sustentabilidade ambiental, e eficiência econômica, para toda classe brasileira, assim o estudo também propõe a inclusão do armazenamento distribuído como parte essencial da estratégia de transição energética nacional, trazendo uma segurança maior, para regiões, que não possuem acesso a rede elétrica, ou que possuem eventuais quedas de energia, especialmente diante da evolução tarifária e da descentralização da matriz elétrica brasileira, onde a geração híbrida inteligente será a base da energia distribuída do futuro, sendo algo mais técnico, social, acessível e descentralizada (Zanoni, 2018, p. 76)

3. DESENVOLVIMENTO

Nota-se que o crescimento da geração da energia no Brasil passou por marcos históricos significativos, mostrando cenário que diversifica a matriz energética, além dos próprios incentivo que o governo realiza para às fontes renováveis, como a isenção fiscal para exportação de painéis solares, que são maioritariamente feito na china, pois atualmente, o Brasil, não possui uma empresa consolidada que faça a fabricação de painéis solares e os

componentes para os sistemas solares, existem empresas brasileiras como a WEG, que realiza o braidlabel do sistema solar, que seria uma maneira de pegar painéis fabricados na china, e colocar o nome da WEG nos painéis, onde ela, terá a responsabilidade de dar a garantia e oferecer esses painéis e componentes para o sistema solar.

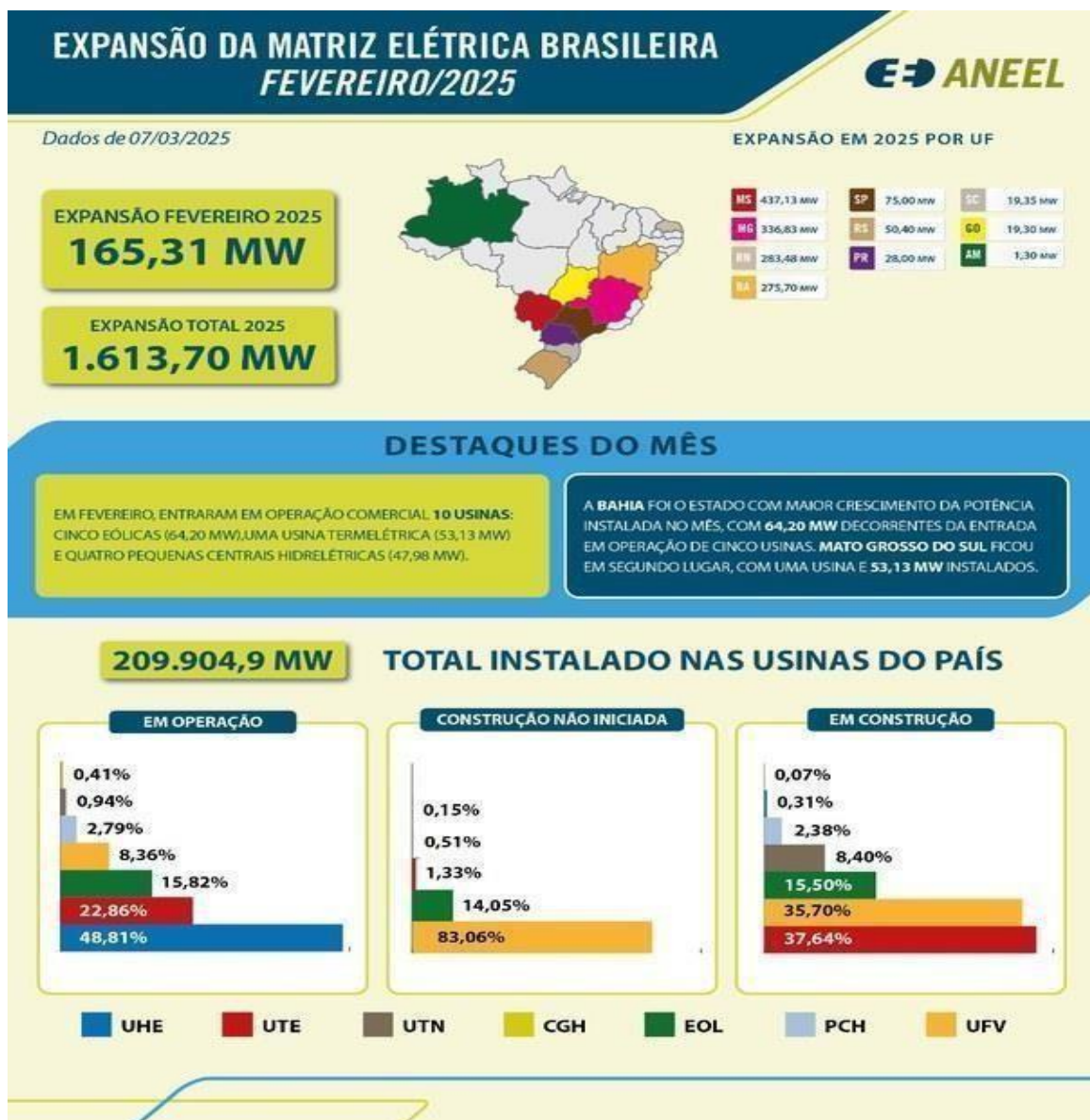
A matriz energética brasileira, é uma das matrizes com mais renováveis, em sua composição, comparada com outras matrizes energéticas globais, assim entre essas fontes, a energia solar, vem tendo um aumento exponencial na matriz energética brasileira, assim consolidou-se como uma das mais promissoras, impulsionada por fatores como disponibilidade natural, avanço tecnológico, incentivos governamentais, possibilidade de instalação residencial, da própria fonte de geração de energia elétrica renovável e conscientização ambiental, assim para compreender a aplicabilidade e a viabilidade dos sistemas solares On-Grid e Híbridos, é fundamental saber a parte teórica que sustenta suas tecnologias, regulação, funcionamento e integração ao sistema elétrico nacional, onde a matriz energética brasileira, tem sido mais diversificada durante os anos e o acréscimo da geração elétrica, através da energia, mostra esse aumento significativo.

Portanto, a matriz energética brasileira, possui uma diversidade considerável, em relação as matrizes energéticas de outros países, isso se da, devido a grande diversidade natural, que o Brasil tem em relação a outros países, como grandes vazões de rios, como o rio Paraná, que possui a Usina de Itaipu, quer é responsável por cerca de 14% da geração de energia elétrica no Brasil, além da grande incidência solar no território brasileiro, que permita a geração fotovoltaica, e ventos convectivos, que ajuda na geração de energia eólica no país, portanto a diversidade natural, ajuda muito na geração de energia, assim devemos aproveita essa riqueza natural, para utiliza-la ao nosso favor, não destrui-la, com poluição e desmatamentos, que ajuda diminuir os recursos naturais e aumentar a degradação antrópica no país.

Porém, o Brasil, possui, diversas usinas termoelétricas, que funciona a partir da queima de combustíveis fosseis, e isso ocorre, quando há crises hídricas no país, que infelizmente, é algo comum, e assim acaba aumentado a

conta de luz para o cliente final, pois ao ligá-las, elas tem um custo de operação muito alta, e como, não podemos ficar sem energia, elas são acionadas, então além do aumento na conta de luz, possui um aumento da poluição devido a queima desses combustíveis fosseis.

Figura 1 -Infográfico: Expansão da Matriz Elétrica Brasileira



Fonte: Agência Nacional de Energia Elétrica(2025)

No mundo, o Brasil ainda possui um dos maiores potenciais e oferta para a geração de energia solar [Atlas Brasileiro de Energia Solar (INPE, 2022)]. Como observado acima, uma parte significativa do território nacional

tem irradiação média superior a 5 kWh/m²/dia, o que aumenta a atratividade da tecnologia de sistemas fotovoltaicos para o país, tanto para projetos de geração centralizada quanto descentralizada, além de diversificar ainda mais a matriz energética brasileira.

Este sistema tornou-se mais popular com a Resolução Normativa nº 482/2012 da ANEEL, e posteriormente REN nº 687/2015, que definiu regras para compensação de energia elétrica. Após este processo, foi autorizada a instalação de um sistema On-Grid conectado à rede pública, onde isso proporcionou ainda mais diversidade e abriu o mercado para que a energia fotovoltaica no varejo e corporativo avançasse, criando empregos diretos e indiretos.

Além disso, temos uma matriz forte em energia hidrelétrica; portanto, no caso de uma crise hídrica, que já ocorreu, é necessário colocar em operação usinas termelétricas a carvão ou combustíveis fósseis. Então, o custo operacional é muito alto porque esse custo precisa recair sobre a conta de luz do brasileiro, aumentando assim a fatura de energia elétrica através da bandeira vermelha ou preta.

3.1 Sistema Fotovoltaico On-Grid e Híbrido

Dentro deste novo contexto energético, dois modelos tecnológicos passaram a serem vista com bons olhos na geração distribuída residencial e comercial, sendo eles, os sistemas fotovoltaicos On-Grid, caracterizados pela conexão direta com a rede fornecida pela concessionária, porém com ausência de armazenamento, ou seja, caso ocorra um apagão causado pela concessionária, o sistema não funciona, porém os sistemas híbridos, que são parecidos com a funcionalidade On-Grid, porém possuem baterias de íon-lítio (LiFePO₄) e módulos de controle inteligente, como inversores híbridos e EMS (Energy Management Systems), portanto, a escolha entre esses modelos, não é algo simples, pois envolve a análise de múltiplas variáveis, como perfil de consumo, regime tarifário, confiabilidade da rede local, segurança energética, viabilidade financeira e metas de sustentabilidade (Munoz, 2023; Zanoni, 2018), o uso do sistema solar, onde certa parte da população, só ouviu falar da

energia solar, por terceiros, ou em propagandas, comércios, ou até mesmo, só olhando as placas instaladas em algum telhado

Do ponto de vista técnico, o avanço recente de inversores híbridos inteligentes, como os modelos Deye SUN-8K-SG04LP1-EU, que são capazes de operar com ou sem rede da concessionária, pelo qual pode alterar automaticamente entre diferentes fontes (solar, rede, bateria, gerador), representa uma revolução significativa na autonomia dos usuários, pois equipamentos como o SE-G5.1 Pro-B e o BOS-G, com células LiFePO_4 , possui uma vida útil superior a 6.000 ciclos e gerenciamento térmico via BMS, elevaram a confiabilidade do armazenamento da energia a patamares industriais (DEYE, 2023; SGS, 2023). Paralelamente, o uso de micro inversores com MPPT individual, como o Enphase IQ7+ e o Hoymiles MI-600, aumentou a eficiência da geração em telhados com sombreamento parcial, diversificando as soluções possíveis, pois com esse micro inversor, é capaz de gerar um sistema “independentes” em relação com o inversor convencional, pois cada micro inversor é ligado em 2 até 4 placas, tendo a capacidade de gerar energia em diferentes ponto, assim, não afetando a string total, caso ocorra falha em uma das placas.

A combinação dessas tecnologias com sistemas de monitoramento remoto, como por exemplo: Solarz, Solarman, Enlighten, Fusion, é algo benéfico, pois você consegue monitorar o desempenho do seu sistema solar, e vê se está condizente com o dimensionamento proposto, e também, a introdução de softwares de simulação de sistemas fotovoltaico, como o HOMER Pro, que são capazes de modelar cenários reais de consumo, armazenamento e tarifa, tornaram o processo de dimensionamento e tomada de decisão, algo mais técnico, racional e tangível, pois essas ferramentas permitem simular o retorno sobre o investimento (ROI), o custo nivelado da energia (LCOE), o tempo de payback e os ganhos econômicos reais em diferentes configurações de sistemas, tornando o investimento algo mais visível, assim facilitando a tomada de decisão do melhor sistema possível, pois cada caso é um caso diferente, assim possível moldar de acordo com a necessidade real.

3.2 Sistema Time Shift

O deslocamento de tempo, uma estratégia bem conhecida, proposta como uma solução inteligente e eficaz para reduzir os efeitos do interesse econômico negativo das tarifas de Tempo de Uso (ToU). Essa abordagem também pode ser descrita como basicamente reutilizar energia (consumindo menos energia a cada dia e depois consumindo a energia total em um horário mais caro) para favorecer a geração de energia em um momento de menor custo e armazená-la (energia) para ser usada posteriormente quando o preço por kilowatt-hora for muito mais alto, especialmente durante os horários do dia em que há mais demanda de energia, como durante as chamadas horas de pico.

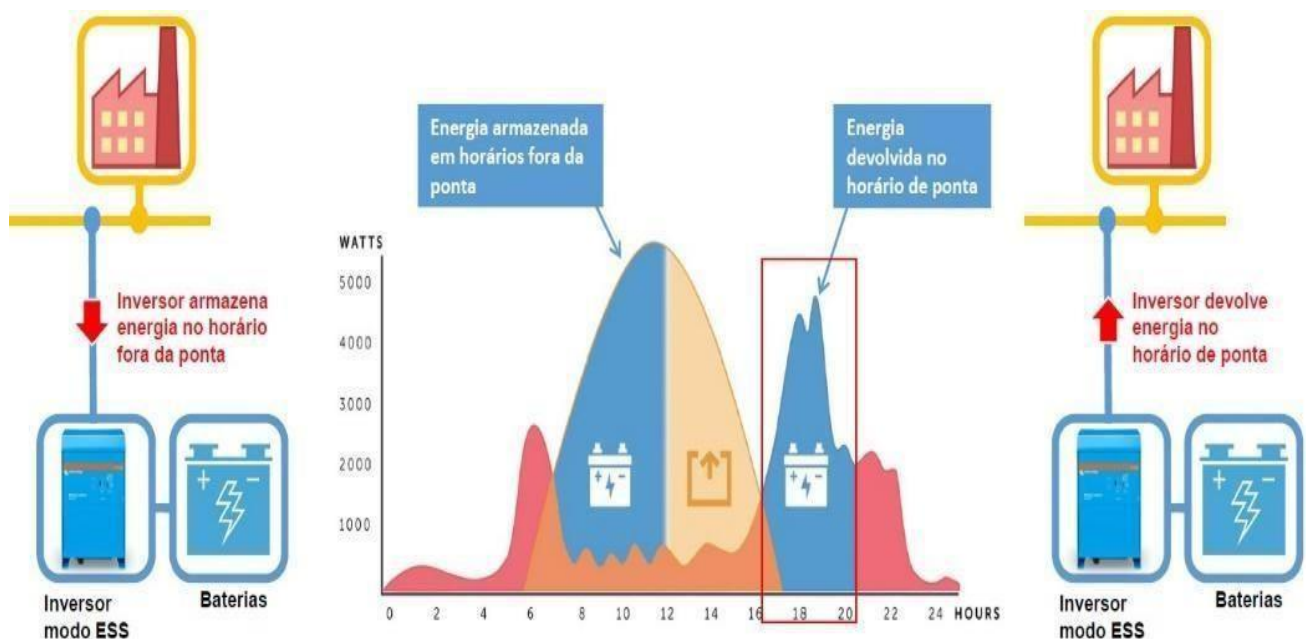
Quando há baixa demanda na rede elétrica e, assim, tarifas baixas de energia (períodos fora de pico), será mais eficiente para o sistema solar armazenar o excesso de energia elétrica nas baterias. Usando um dispositivo de armazenamento, essa energia armazenada é estrategicamente reservada e utilizada apenas quando o custo da energia estiver em seu nível mais alto, ou seja, durante as horas de pico. Utilizando essa energia já armazenada, em vez de usá-la da rede como sempre acontece nesses períodos críticos, o sistema reduz drasticamente o custo mensal da conta, para um uso muito mais sensato e econômico da geração de energia solar.

O uso do deslocamento de tempo é novamente particularmente favorável para residências e empresas que experimentam a tarifa branca, um sistema de tarifas em que a eletricidade pode ter preços diferentes com base na hora em que está sendo consumida. Em tal esquema, as economias do deslocamento do uso de energia solar armazenada podem se traduzir em uma diferença significativa de fluxo de caixa mensal, especialmente se o custo do consumo for ponderado para horas de custo mais alto. Além da redução das economias diretas, esse método ajuda a diminuir o estresse na rede nacional do país durante a demanda de pico, essencialmente tornando o sistema mais relaxado, não cria fluxo reverso e é a favor da capacidade de sustentabilidade energética do país.

De uma perspectiva técnica, a operação eficaz do deslocamento de tempo requer um sistema de gerenciamento de energia inteligente que possa monitorar geração, carga e estado de carga da bateria em tempo real. Inversores híbridos de última geração incluem algoritmos sofisticados que maximizam a utilidade que você recebe de sua energia com base nas tarifas horárias, padrões climáticos e na forma como você usa a energia. Essa inteligência local no sistema permite operação autônoma e precisa e significa que ele pode aproveitar a estratégia de fornecimento e as condições locais de tarifas e energia.

Portanto, o serviço de deslocamento de tempo de sistemas híbridos não é apenas uma característica de otimização técnica, mas um “ativo econômico chave” que os consumidores podem usar para serem não reativos, mas "proativos" diante das mudanças no paradigma da eletricidade como uma medida estratégica e econômica de economia de custos. Ao mover o consumo para tempos mais favoráveis, o sistema então permite ainda mais "eficiência energética", diminui a dependência da rede tradicional e ajuda a construir uma rede de energia mais robusta, distribuída e inteligente.

Figura 2 - Configuração básica do sistema time Shift



Fonte: GREENER (2025)

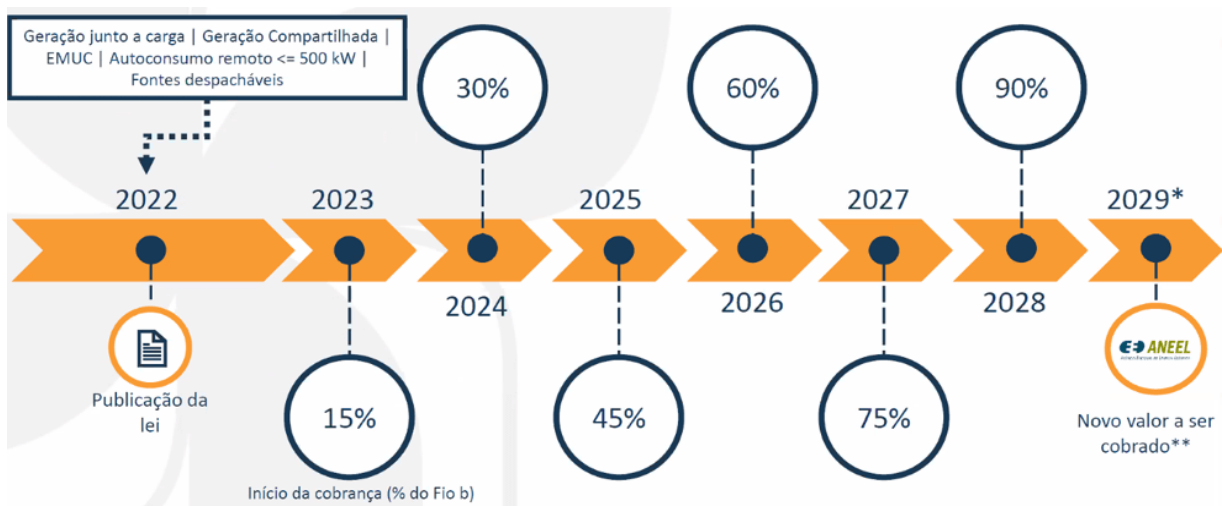
A transição energética global e brasileira, são marcada pela crescente substituição das fontes fósseis por energias renováveis, assim, sendo impulsionado com o desenvolvimento dos sistemas descentralizados de geração elétrica, com destaque para a energia solar fotovoltaica, sendo uma forma de geração de energia mais acessível ao público, portanto neste contexto, a evolução dos sistemas On-Grid e Híbridos tornou-se tema de destaque tanto na literatura científica quanto na formulação de novas políticas públicas.

De acordo, com a Agência Internacional de Energia (AIE, 2023), a geração de energia, através do sol é hoje a fonte de geração de energia elétrica com crescimento mais acelerado no mundo, no qual representa cerca de 50% das novas capacidades instaladas em 2023. O Brasil mostra um acompanhamento nesta tendência, tendo ultrapassado a marca de 37 GW de potência instalada em geração descentralizada até o final de 2024 (ANEEL, 2024), mostrando que essa forma de geração de energia, é algo que tende crescer cada vez mais, onde parte significativa desse avanço se deve à regulamentação estabelecida pela Resolução Normativa nº 482/2012, que permitiu ao consumidor produzir sua própria energia e injetar o excedente na rede em regime de compensação, o que se denomina créditos e posteriormente pela Lei nº 14.300/2022, que criou o marco legal da microgeração e da mineração distribuída.

A literatura técnica destaca que os sistemas On-Grid, conectados exclusivamente à rede elétrica, são os mais difundidos devido à sua simplicidade de instalação, baixo custo inicial e ampla disponibilidade de equipamentos (Mallmann, 2024). No entanto, com a mudança do modelo tarifário, como a cobrança progressiva do uso da infraestrutura da rede (TUSD-Fio B), cresce o interesse por sistemas híbridos, que combinam painéis solares, inversores híbridos inteligentes e bancos de baterias para operar com maior independência e segurança energética, ainda mais para pessoas, que não podem ficar de jeito nenhum sem energia elétrica, como as pessoas que possuem problema de saúde, que precisam de aparelhos elétricos, para estabilidade dos próprios comerciantes, como frigoríficos, sorveteria,

mercados, que se ficarem sem energia elétrica, podem perder sua mercadoria e ter um prejuízo estrondoso.

Figura 3- Linha do tempo de cobrança da TUSD Fio B, após a Lei 14.300/22



Fonte : ABGD

Os sistemas híbridos destacam-se pela capacidade de operar mesmo durante falhas na rede, como apagões ocasionados pela concessionária, rompimento da transmissão de energia entre outra, assim fornecendo energia a cargas críticas por meio de baterias de lítio com gerenciamento inteligente (BMS), onde se recomenda, conectar a bateria em apenas aparelhos críticos, para ter uma maior durabilidade da energia, onde essa funcionalidade, chamada de modo backup, é citada por Zanoni (2018) como essencial para aplicações em zonas rurais, estabelecimentos comerciais e residências com equipamentos sensíveis., pois a combinação de sistemas híbridos com tarifação branca permite ainda a programação estratégica de carregamento e descarregamento das baterias, reduzindo o custo médio do kWh consumido, trazendo uma maior economia para o cliente.

A eficiência operacional é outro fator determinante na escolha entre os modelos, pois inversores string On-Grid, como os da Growatt ou Solis, apresentam eficiência superior a 98% em condições ideais (Growatt, 2023),

mas são sensíveis ao sombreamento parcial, o que pode comprometer a produção se não houver planejamento adequado das strings, pois como estão todos conectados juntos, caso há um sombreamento, isso causa uma perda na geração de energia, porém, por outro lado, micro inversores como o Enphase IQ7+ ou Hoymiles MI-600, que opera módulo a módulo, reduzem perdas por sombreamento e permitem monitoramento individualizado, embora com custo de aquisição mais elevado (Enphase, 2023)

Figura 4 – Modelo de Micro Inversor Enphase IQ 7 +



Fonte: Enphase (2024).

Usando baterias LiFePO_4 , como os modelos SE-G5.1 Pro-B e BOS-G (listados nos manuais e relatórios da SGS (2023)), entregam um dos desempenhos mais altos na história do produto em comparação com as tecnologias anteriores, com até 10.000 ciclos a 80% de DoD. Além disso, possuem eficiência maior que 95% e alta segurança térmica, o que torna os sistemas híbridos mais viáveis para uma operação de longa duração, embora

o custo inicial possa ser mais alto, conforme mostrado em simulações executadas no software HOMER Pro.

Artigos recentes também reforçam a relevância da padronização, uma vez que, conforme estabelecido pela NBR 16690/2020 (que determina os requisitos para um sistema fotovoltaico) e pela Resolução Normativa ANEEL Nº 1000/2021 (que padroniza o processo de conexão à rede), o cumprimento desses requisitos é essencial para obter a autorização para o projeto. Uma vez criado, o projeto é submetido à concessionária local para revisão e, após a conclusão da análise, o projeto é aceito ou rejeitado. Um fluxo reverso de energia entre o transformador e a rede pode impedir a instalação de um sistema solar no local, já que a rede e o transformador não estão preparados para aceitar a energia inserida, possivelmente levando a falhas do transformador e perdas financeiras para a concessionária, especialmente no caso de sistemas híbridos com coexistência de injeção e backup (EPE 2023).

Finalmente, resumimos que a escolha entre aplicações On-grid e híbridas deve se basear não apenas no aspecto financeiro, mas na totalidade considerando vários fatores como a confiabilidade da rede local, o padrão de consumo, intenções de sustentabilidade, flexibilidade de operação e o valor agregado a longo prazo que o sistema traz consigo. De facto, sistemas híbridos são mais caros no início porque o banco de baterias é a parte mais cara do projeto. "O híbrido da geração de eletricidade representa a integração entre a eficiência energética, a segurança do suprimento e a emancipação do consumidor, sendo parte da matriz elétrica futura" (Zanoni, 2018, p. 74).

De acordo, com a revisão da literatura indica que há uma tendência no avanço tecnológico dos sistemas solares e de armazenamento, inteligência operacional e adaptação de tarifas e regulamentações serão cruciais para o sucesso dos projetos de geração distribuída no Brasil, além de trazer maior segurança para o usuário do sistema, a forma física de um módulo fotovoltaico é mais do que um mero transportador para células solares, é o planejamento para uma matriz que fornece décadas de serviço de forma confiável, não apenas produzindo eletricidade a partir da luz solar, mas assegurando a robustez, segurança e resistência ao clima, clima adverso e intempéries

ambientais enquanto converte luz solar em corrente elétrica. Normalmente, você verá a cobertura de garantia dos painéis por 25 anos, apropriada no contexto do período de investimento. A estrutura é composta por várias partes, desempenhando uma função específica e insubstituível de acordo com critérios técnicos estritamente definidos por regulamentos internacionais de alta qualidade e desempenho para uma maior eficiência ao longo da vida útil.

3.3 Estruturas das placas do sistema fotovoltaico

As células fotovoltaicas são conectadas em uma caixa de junção, normalmente montada na parte traseira do painel. É através dela que são estabelecidas as conexões do módulo com o mundo externo, como os cabos DC que levam ao inversor. Esta caixa é feita para proteger contra a penetração de água e chuva e outras partículas sólidas prejudiciais, de modo que sejam adequadas para uso externo e não sejam afetadas por deteriorações do condutor valioso em ambientes mais pesados e corrosivos. Integral à estrutura está o papel primordial do backsheet como uma barreira contra danos físicos, de umidade e térmicos aos componentes internos, apoiando a engenhosidade sustentável para a segurança do painel elétrico e longevidade do dispositivo.

Dentro da carcaça, as células fotovoltaicas são compostas principalmente de silício monocristalino ou policristalino, e então cobertas com materiais cujas propriedades ópticas e térmicas foram cuidadosamente projetadas e equilibradas. Esses encapsulados são fabricados tipicamente de EVA (acetato de vinil de etileno) com o papel principal de proteger as células contra raios ultravioletas e temperatura (e, em menor grau, umidade) todos os fatores ambientais que podem ameaçar tanto a integridade física das células quanto seu rendimento elétrico.

Primeiramente, a camada superior de cobertura é formada de vidro temperado, que serve como uma proteção efetiva para o interior do módulo contra clima e choques, e tem a função de incidência solar, acompanhada por pouca perda de reflexão orientando radiações incidentes para os módulos fotovoltaicos. Trata-se de um vidro que é feito com propriedades anti reflexivas disponíveis que dão maior eficiência ao absorver luz solar de maneira mais

eficiente e, por sua vez, fornece maior conversão de energia. Essa resistência mecânica é indispensável em locais com granizo, ventos fortes ou objetos caindo, destacando novamente a importância de uma especificação adequada na fase de design do sistema não é qualquer vidro que você coloca nos módulos fotovoltaicos, restringindo esse produto devido à sua natureza frágil, ou mesmo tal recurso, uma vez que frágil poderia ser uma propriedade dada a um vidro para que tenha uma melhor conversão energética.

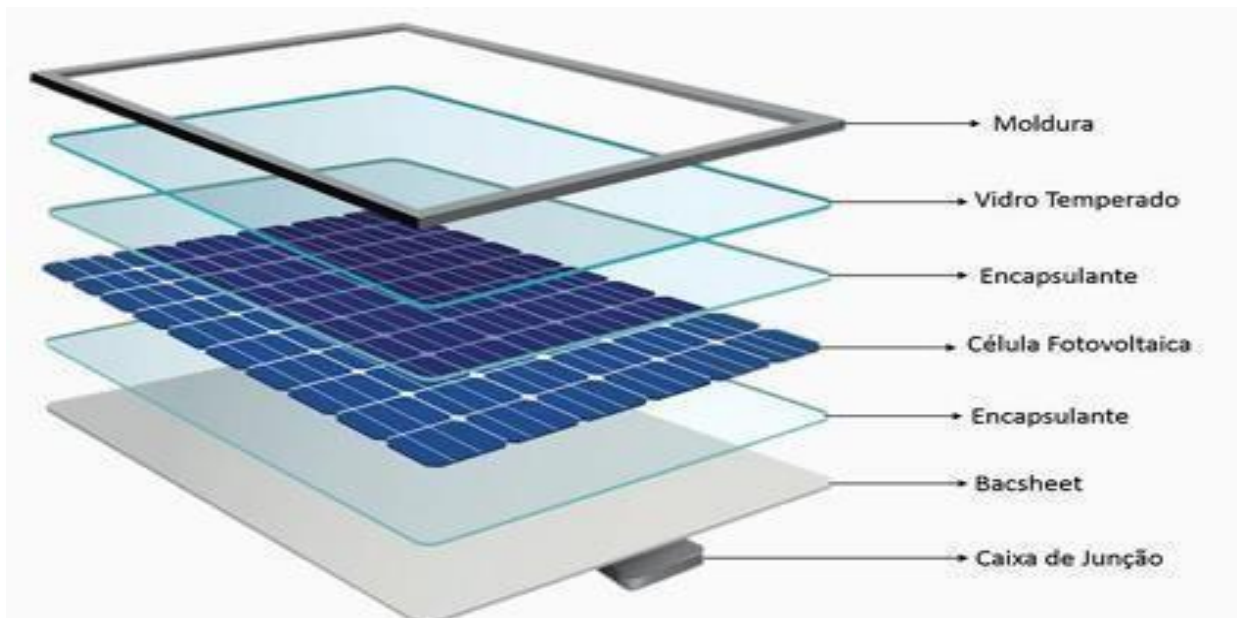
Para integridade estrutural e facilidade de uso, um quadro de alumínio anodizado é adicionado ao painel. Este quadro confere ao painel com uma resistência suficiente, e também atua como um dissipador de calor e permite que os módulos sejam montados com segurança no suporte configurado no telhado, solo ou em um plano vertical de um edifício de acordo com o local de instalação. Também é muito importante que o quadro seja forte e permaneça dimensionalmente estável ao longo do tempo e não sofra desajustes e vibrações causadas pelo vento para que os painéis solares estejam seguros.

Do ponto de vista econômico, a estrutura de custos de um módulo fotovoltaico mostra claramente a necessidade de prestar atenção à seleção das células PV no processo de produção. As células representam aproximadamente 60% do valor deste módulo, enquanto o vidro contribui com cerca de 10%, a caixa de junção cerca de 6% e outros componentes, como o quadro, os encapsulantes e o backsheet, cada um contribuindo com cerca de 8% (Portal Solar, 2021). Esses números indicam que, mesmo que as células sejam essenciais para a eficiência da conversão fotovoltaica, a eficácia e a durabilidade de um painel estão ligadas à capacidade de todos os componentes estruturais de se combinarem sinergicamente e de oferecer um grau mais alto de certeza no sistema e na vida das placas. Também não importa se você tem as melhores células fotovoltaicas, se a estrutura for tão ruim quanto, pode ocasionar uma diminuição da eficiência de todo o sistema.

Saber como cada componente funciona na estrutura do painel é vital para o dimensionamento correto de um sistema fotovoltaico, sendo capaz de escolher os melhores fornecedores e garantir que ele opere em condições ótimas ao longo do tempo de vida útil estimado, que pode ser maior que 25

anos de eficiência garantida. Portanto, não é tão fácil quanto parece, ou seja, apenas juntar algumas coisas para fazer um módulo fotovoltaico.

Figura 5 - Estrutura de um painel fotovoltaico



Fonte : Minha Casa Solar (2019)

O método de produção de eletricidade deve ser adaptado à demanda do cidadão e, como resultado, os módulos fotovoltaicos devem ser organizados de forma adequada com os conjuntos fotovoltaicos. Assim, a estrutura não é aleatória, mas está de acordo com as leis básicas da eletricidade referentes à lógica da conexão série-paralelo, pois cada orientação do módulo apresenta influências diretas no comportamento elétrico do sistema, tanto em tensão, corrente, como na potência total disponível. Portanto, teríamos que analisar isso e dimensionar, pois cada caso de dimensionamento é um pouco diferente, em relação ao outro.

Quando módulos fotovoltaicos, são conectados em série, a tensão elétrica de cada módulo se soma de acordo com as leis da física elétrica e a corrente permanece com o mesmo valor constante. Tal configuração é especialmente vantajosa em sistemas onde é necessária uma maior tensão de entrada para o inversor ou onde existem longas distâncias entre os módulos e o ponto de

conversão, de modo que altas tensões possam minimizar perdas pelo efeito Joule ao longo da fiação. No entanto, há uma maior suscetibilidade ao sombreamento parcial ou mau funcionamento em um módulo único, já que todos os módulos em uma série têm a mesma corrente, ou seja, se um módulo estiver comprometido, todos os outros módulos estarão comprometidos independentemente de estarem sombreados ou com algum problema técnico pois, quando em série, essa falha ocorre na geração de corrente contínua (DC) e isso poderia comprometer toda a cadeia e, portanto, todo o desempenho da instalação, por conta de um único ponto de obstáculo ou defeito.

Por outro lado, o fato de os módulos estarem conectados em paralelo leva à adição da amperagem de cada módulo, enquanto a tensão não se altera em relação à de cada unidade. Isso é útil no caso em que se deseja elevar a potência do sistema mantendo a tensão em um valor constante, e é comum com inversores que operam com baixa tensão ou microinversores, que podem até “ individualizar “ o sistema. Assim, o sistema em conexão paralela é mais ou menos imune ao sombreamento parcial do que a configuração em série, já que a saída de um módulo único não afeta muito o fornecimento final de energia

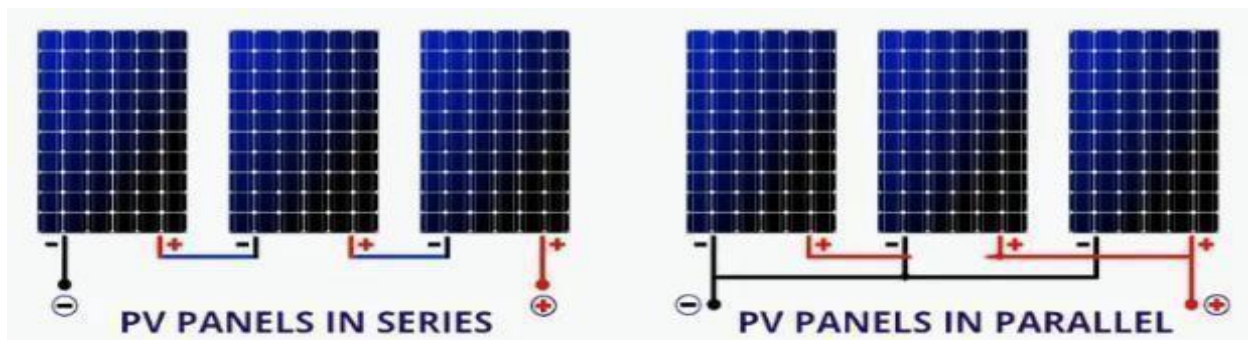
3.4 Configuração do modo de operação

Aplicações fotovoltaicas na prática empregam configurações em série e/ou paralelo para criar os arranjos desejados para cada projeto. Isso é específico para as condições do local e o tamanho do sistema (quantos módulos o espaço permite; quanta potência é desejada; quais condições técnicas o inversor possui e etc.). Se o arranjo fotovoltaico for devidamente dimensionado, o sistema fornece desempenho otimizado, segurança elétrica, bem como boa compatibilidade com outros dispositivos. O tamanho do projeto é projetado adequadamente, e leva em consideração a tensão de circuito aberto (Voc) e a corrente de curto-circuito (Isc) dos módulos para que não excedam o intervalo suportado pelo inversor, mas também aumente a produção durante o dia.

Assim, entender os impactos técnicos dos diferentes meios de ligação dos módulos é importante não apenas para projetistas de sistemas, mas também

para investidores e usuários finais que buscam extrair o máximo de um sistema fotovoltaico. A decisão entre conexões em série ou paralelo influenciará diretamente a quantidade de energia que os painéis fotovoltaicos gerarão e deve ser considerada sob condições climáticas locais, sombreamento, azimute e ângulo de inclinação do painel, tipo de inversor e o perfil de consumo do usuário. O entendimento teórico e prático da eletricidade permite que os sistemas fotovoltaicos sejam mais eficientes, duradouros e economicamente viáveis.

Figura 6 – Módulos Fotovoltaicos em serie e paralelo



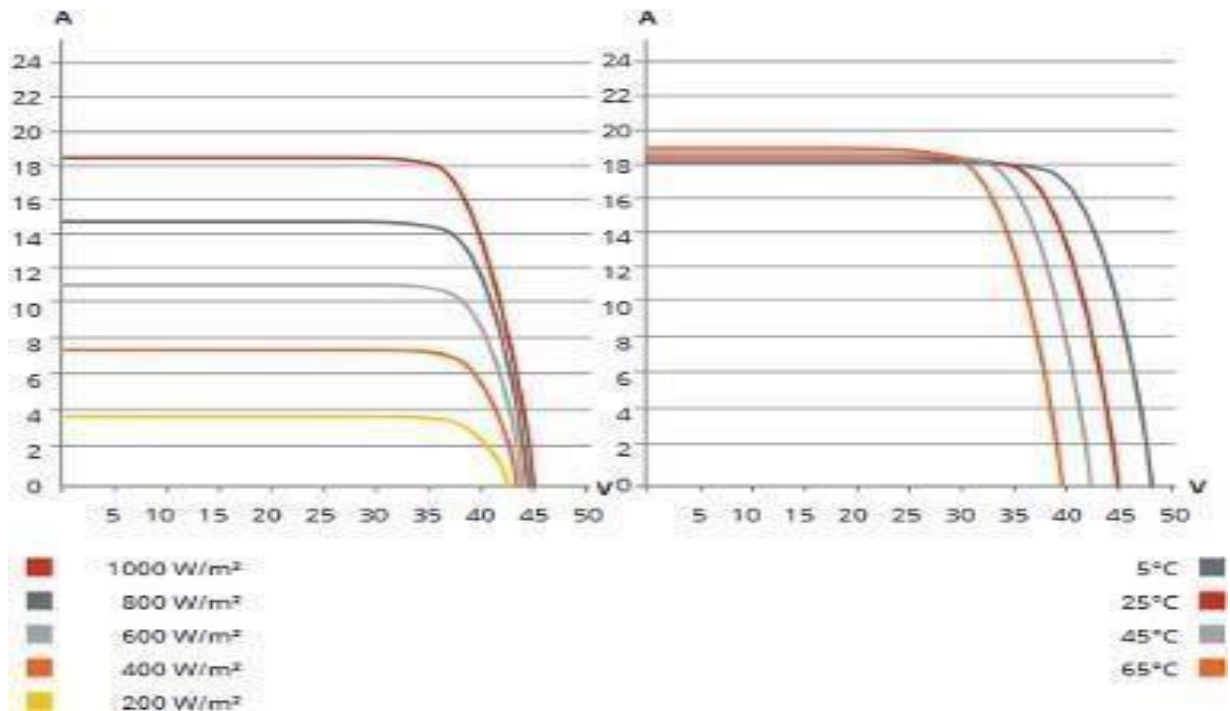
Fonte: Helo Battery

Em alta incidência solar, a corrente produzida pelo módulo aumenta consideravelmente, nessas condições, a quantidade de fótons que se fixam nas células fotovoltaicas é maior, e, por essa razão, também é maior o número de elétrons liberados e, assim, a corrente elétrica que flui, na forma de corrente contínua, esses casos são mostrados por um módulo fotovoltaico na característica I-V, onde níveis mais altos de irradiação deslocam a curva para cima (no eixo de corrente, aumentando a área útil para a produção de energia. No entanto, o fator de temperatura no desempenho do módulo demonstra claramente uma tendência oposta e menos ideal. À medida que a temperatura operacional do painel aumenta, algo comum em países tropicais (o Brasil é um exemplo, uma vez que possui várias regiões com altas temperaturas, como acontece no Nordeste), gradualmente os módulos terão uma diminuição na voltagem de saída.

As características físicas dos semicondutores utilizados na fabricação das células fotovoltaicas, particularmente o silício, um dos materiais básicos utilizados na fabricação dos módulos fotovoltaicos, são a causa desse fenômeno. Em temperaturas mais altas, a maior agitação térmica dos átomos prejudica o potencial do campo eletrostático interno e a voltagem gerada, apesar de manter alta corrente, porém, afeta os inversores, que naturalmente aquecerão porque recebem corrente contínua e a transformam em corrente alternada, assim terá um aumento da temperatura do inversor, que já é prevista no projeto. Essa queda no potencial, por menor que possa parecer, afetará diretamente a potência máxima em Watt-pico que o módulo é capaz de fornecer.

A potência também é medida como volts vezes ampere ($V \cdot I$). Logo, se você reduzir a voltagem, ou a corrente ou ambas, a potência líquida derivada também será reduzida, por serem quantidades inversamente proporcionais. É por isso que fabricantes como a Canadian Solar mencionam esses valores em seus manuais técnicos e fichas de dados sob coeficientes de potência térmica, pois são quase sempre negativos e dão uma boa ideia da degradação esperada por $^{\circ}\text{C}$ acima dos valores STC

Gráfico 1 - Relação de irradiância e temperatura com a geração de energia nos painéis fotovoltaicos.



Fonte : CanadianSolar (2024).

Assim, torna-se evidente, que o dimensionamento e a instalação de sistemas fotovoltaicos devem considerar cuidadosamente as condições locais de irradiação e temperatura, pois cada região de instalação sofre desse problemas, então um bom dimensionamento do sistema solar é fundamental para o melhor aproveitamento das placas, como a orientação e a inclinação dos módulos, a ventilação natural do telhado, o espaçamento entre painéis, a estrutura e o telhado, e também na escolha de equipamentos com baixo coeficiente térmico são estratégias essenciais para maximizar a produção energética e a diminuição desses efeitos negativos do calor sobre a eficiência do sistema, portanto compreender essa interação entre variáveis elétricas, como a escolha dos cabos adequados e ambientais é fundamental para garantir não apenas o desempenho esperado do sistema, mas também sua longevidade e confiabilidade ao longo do tempo.

O Brasil, devido à sua posição geográfica privilegiada e aos elevados índices de irradiação solar que superam 5,5 kWh/m² em grande parte do

território possui um potencial técnico extraordinário para a geração solar descentralizada (EPE, 2023).

Figura 7 – Mapa de Irradiação Solar Global Diária no Plano Inclinado



Fonte : INPE e LABSOLAR (2025)

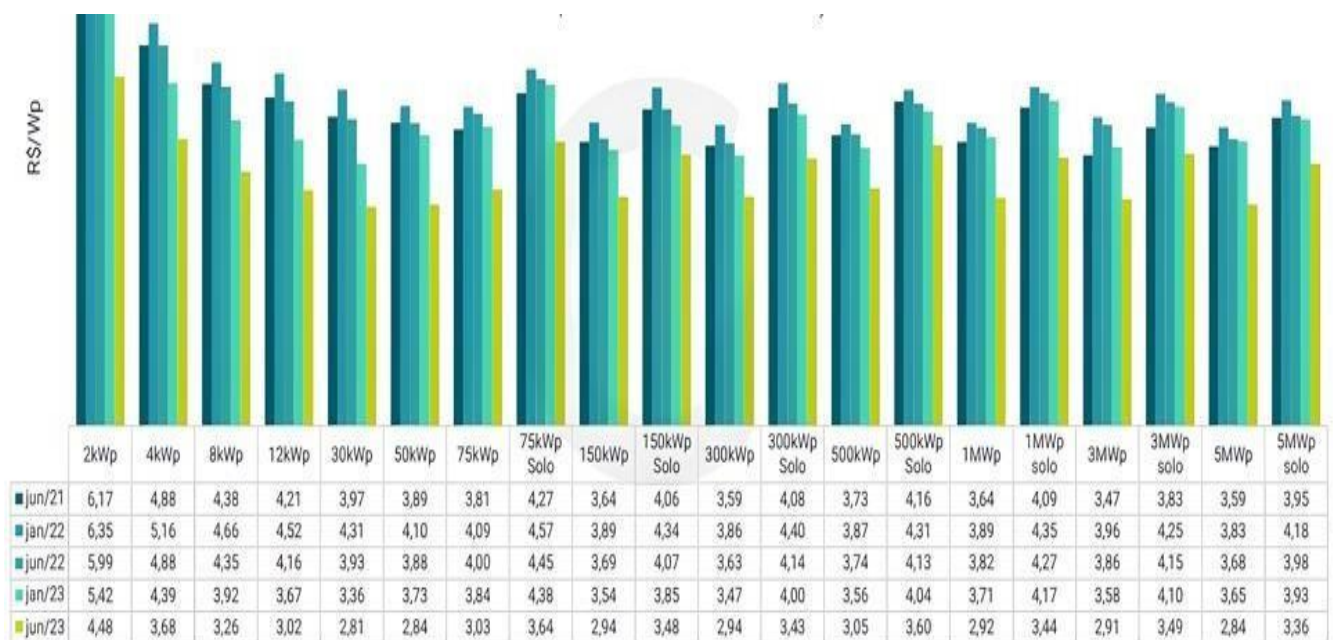
Assim, para regular esse processo, a Resolução Normativa nº 482/2012 da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), seguida pela REN nº 687/2015, estabeleceu a regulamentação para a geração distribuída de micro e mini-geradores no Brasil. Esse modelo regulatório permitiu a compensação de créditos, sendo o excedente de eletricidade produzido pela nossa própria instalação fotovoltaica, possibilitando que todos gerem sua própria energia e injetem qualquer energia "extra" na rede da concessionária.

Isso resulta em uma redução drástica no valor da conta de eletricidade mensal, uma vez que esses créditos se acumulam, ou seja, se um endereço produz energia e acaba consumindo menos do que produz, ele começa a reter

créditos, que o proprietário pode usar para compensar contas futuras ou até mesmo para transferir esses créditos para outra instalação de sua propriedade (regra que o assinante é o mesmo CPF ou CNPJ e que a distribuidora em questão é a mesma do título). E, com a aprovação da Lei nº 14.300/2022, o Marco Legal da Geração Distribuída – LGD, novas regras técnicas e comerciais foram estabelecidas, incluindo a cobrança gradual da Tarifa de Uso do Sistema de Distribuição (TUSD – Fio B) para a energia injetada no sistema, já que, mesmo produzindo sua própria energia, não seria possível quitar completamente a conta de eletricidade da concessionária.

No entanto, essas alterações tiveram repercussões econômicas, especialmente para os sistemas On-Grid e híbridos que trabalham com geração solar e armazenamento por baterias. Nesses sistemas, a geração de eletricidade precisa ser mais autossuficiente e flexível (ANEEL, 2023). Deve-se mencionar que o aprimoramento das tecnologias para o uso da energia solar também faz com que a compra do conjunto solar se torne mais barata e, se considerarmos muitos anos, a tendência de queda de preços com maior tecnologia é realmente notável.

Gráfico 2 – Evolução dos preços dos Kits solares



Fonte: GREENER, 2024

3.5 Bateria de Fosfato de Ferro Lítio LiFePO_4

Os sistemas fotovoltaicos híbridos, por outro lado, são uma inovação tecnológica que combina a injeção de energia na rede com a possibilidade de armazená-la e utilizá-la, posteriormente, as baterias, em particular de íon de lítio (LiFePO_4) com as marcas BOS-G e SE-G5.1, possibilitam aproveitar a energia solar durante apagões, além de permitir que o usuário tenha mais controle sobre seu consumo de energia. Esta abordagem é benéfica em cenários de tarifa branca (onde os preços de eletricidade são diferentes em vários momentos do dia), permitindo que o consumidor atenda à carga com energia descarregada (consumida) durante o período caro. Assim, as baterias de fosfato de ferro lítio, especialmente a da Deye, que está sendo abordado nesse trabalho, verifica uma eficiência muito maior em comparação as baterias de chumbo, que é um metal pesado e extremamente prejudicial para o meio ambiente, portanto a substituição por baterias com maior eficiência e melhor sustentabilidade é algo primordial, pois querendo ou não, já sabemos as três principais formas de utilização da energia, que seria a geração, transmissão e armazenamento de energia, porém, o armazenamento é algo mais difícil de fazer, devido sua complexidade, então buscar forma de armazenamento mais eficiente e menos prejudicial, é fundamental para a transição energética limpa, lembrando que essas baterias são utilizadas em veículos elétricos, portanto mostra a sua confiabilidade e segurança em relação a outras baterias

Figura 8 – Bateria BOS-G Bateria de Lítio



Fonte : Datasheets Deye BOS-G

As características das células de fosfato de ferro e lítio demonstram ser um ajuste excelente para sistemas híbridos de energia solar com tecnologias mais novas, devido ao fato de que as células de fosfato de ferro e lítio possuem alta densidade energética, longa vida útil (superior a 6000 ciclos @ 80% DoD), baixa taxa de autodescarga, alta eficiência de carga/descarga e boa estabilidade térmica.

Os modelos considerados neste trabalho são o BOS-G e o SE-G5.1 Pro-B, que são certificados globalmente (UN38.3, UL1973, CE-EMC), e o sistema de gerenciamento inteligente (BMS), que monitora a temperatura, corrente, tensão, ciclos e protege o sistema em caso de mau funcionamento, tornando o sistema mais seguro, pois é automático.

O inversor híbrido também é uma parte importante dos sistemas híbridos e opera entre os painéis, a rede e as baterias. Alguns modelos, como os estudados neste trabalho com manuais fornecidos pela Mitratech Energia Solar (modelos Deye SUN-8K-SG04LP1-EU e SUN- 25KSG01HP3-EU), têm boa eficiência, acima de 98%, proteção com IP65, comunicação via CAN/RS485 e suportam vários modos de operação. Esses inversores possibilitam ter

equipamentos conectados que não param, ou seja, que não podem ser desconectados por motivo adversos; no gerenciamento de equipamentos essenciais ou refrigeração, pelo qual, não pode estragar nenhum alimento, assim caso, ocorra um apagão as baterias entram em ação, fornecendo energia durante um certo período

Além disso, a evolução dos microinversores (por exemplo, de Enphase-IQ7+ para IQ8) oferece melhorias do ponto de vista da flexibilidade, segurança e monitoramento em nível de painel individual, já que esses tendem a fazer mais sentido onde há telhados com múltiplas inclinações/orientações diferentes ou um certo grau de sombreamento em alguma parte do dia e tais tipos de microinversores que operam independentemente podem maximizar a geração total do sistema (geração de pico dependendo do clima do dia) e, no processo, contribuir para a "eficiência do sistema", bem como para a máxima "geração" possível.

A expansão da geração distribuída e o aumento do uso de sistemas híbridos também estão fortemente relacionados às normas e dados divulgados por instituições como a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), o Ministério de Minas e Energia (MME), o Centro de Pesquisas de Energia Elétrica (EPE), o Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS), além de organizações internacionais como a Agência Internacional de Energia (IEA), ONU, OCDE, ETTO, onde todos eles divulgam relatórios periódicos sobre a matriz energética, padrões de emissão, confiabilidade da tecnologia, demanda futura, entre outros aspectos que se tornam auxiliares para investimentos e formulação de políticas públicas, oferecendo material técnico- científico para escolher o melhor sistema possível.

Resumindo todos esses componentes, pode-se claramente que decidir por um sistema On- Grid ou Híbrido não é apenas uma questão técnica e econômica, mas principalmente de compreensão completa de como todos esses fatores, com suas implicações normativas, progressos tecnológicos disponíveis no mercado e principais equipamentos de ambos os sistemas que podem ser enfatizados com módulos fotovoltaicos, inversores, microinversores, baterias e estrutura de instalação.

4.ÓRGÃOS REGULATÓRIOS E POLÍTICAS PÚBLICAS DE APOIO À ENERGIA SOLAR

4.1 Introdução: A Estrutura Institucional da Energia no Brasil e no Mundo

O setor energético, considerando sua complexidade técnica, assim como importância social e econômica, deve contar com um forte quadro institucional, uma vez que, no Brasil, o desenvolvimento e a regulamentação da energia solar são transmitidos por uma sucessão de entidades que possuem diversos propósitos regulatórios, operacionais, econômicos e de planejamento, precisar haver, uma adequação da criação de novas políticas públicas e incentivos fiscais, para que seja mais atraente instalar esses sistemas

No entanto, em nível global, a Agência Internacional de Energia (AIE), as Nações Unidas (ONU) e a Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico (OCDE) têm um papel-chave na difusão de metas e nos modelos de financiamento para a transição energética, visando uma diversificação energética em escala mundial.

No presente capítulo, temos como objetivo apresentar uma análise crítica sobre os papéis desempenhados pelos principais agentes regulatórios e incentivadores da energia solar, no sentido de compreender como suas diretrizes, metas e programas têm impacto na viabilidade e crescimento dos sistemas Fotovoltaico On-Grid e Híbridos no Brasil e em todo o mundo. Também analisamos os impactos da Lei nº 14.300/2022, o desenvolvimento tecnológico e os obstáculos regulatórios ao desenvolvimento exponencial da geração distribuída.

4.2 ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica

A ANEEL é o principal órgão regulador do sistema energético nacional. Criada pela Lei nº 9.427/1996, tem como atribuições normatizar, fiscalizar e mediar a operação da geração, transporte, distribuição e fornecimento da eletricidade no país, no contexto da geração fotovoltaica, sua atuação é

decisiva, principalmente através da Resolução Normativa nº 482/2012, posteriormente atualizada pelas RENs 687/2015, 786/2017 e complementada pela nova legislação de 2022.

Foi a partir da REN 482/2012 que se estabeleceu o sistema de compensação de energia elétrica vinda da microgeração e minigeração distribuída, assim esta resolução autorizou consumidores a instalarem micro e mini geradores de energia, conectados à rede de distribuição, com a possibilidade de abaterem o consumo com base na energia injetada na própria rede, segundo documento oficial da agência (ANEEL, 2023), “o sistema de compensação permitiu que o consumidor se tornasse protagonista na matriz elétrica nacional, gerando, utilizando e exportando energia limpa, com segurança jurídica e técnica”.

Com a Lei nº 14.300/2022, a ANEEL passou a atuar também como órgão executor da nova sistemática de cobrança da Tarifa de Uso do Sistema de Distribuição (TUSD), especialmente o componente Fio B, que incide progressivamente sobre a energia injetada a partir de 2023, pelo qual impactou diretamente a viabilidade dos sistemas On-Grid, gerando um deslocamento do mercado para soluções híbridas e sistemas com maior autoconsumo local (ZANONI, 2018).

4.3 Ministério de Minas e Energia (MME)

O MME é o órgão central de formulação das diretrizes governamentais relacionadas à área de energia, mineração e recursos combustíveis, onde esse ministério estabelece metas estratégicas e define os planos de desenvolvimento da matriz energética do país, articulando-se com instituições como ANEEL, EPE e ONS.

O documento de planejamento energético de longo prazo (Plano Nacional de Energia PNE) 2050, lançado pelo MME em 2020, projeta que a contribuição da energia fotovoltaica no cenário elétrico nacional poderá alcançar 17% até o ano de 2050, considerando os avanços em armazenamento, barateamento das tecnologias e integração à rede (MME, 2020). O PNE reconhece os sistemas híbridos como elementos fundamentais para garantir a confiabilidade do

suprimento elétrico, especialmente em localidades sujeitas a instabilidades no fornecimento. “A inclusão de mecanismos de armazenamento, aliada à geração fotovoltaica, será um vetor de robustez do Sistema Interligado Nacional (SIN) e redução da dependência hídrica” (MME, 2020, p. 178).

O MME coordena programas de incentivo, como o ProGD (Programa de Fomento à Geração Distribuída de Energia Elétrica), voltado à democratização do uso da energia solar no âmbito residencial e rural

4.4 ONS – Operador Nacional do Sistema Elétrico

O ONS é responsável pela operação da geração e do escoamento da energia elétrica em toda a malha do Sistema Interligado Nacional (SIN), sua função central é assegurar a continuidade operacional, estabilidade e confiabilidade no suprimento energético de forma instantânea. Com o avanço da produção descentralizada de energia, o ONS passou a estudar os impactos da geração intermitente na manutenção do equilíbrio elétrico do sistema, a conexão simultânea de inúmeros microgeradores solares, especialmente em redes de distribuição de baixa tensão, cria novas exigências para o controle da frequência, da tensão e da reversão de fluxo em redes urbanas.

Segundo boletim técnico do ONS (2022), “a ampliação dos sistemas com armazenamento local pode contribuir positivamente para a confiabilidade do SIN, desde que integrados com protocolos de resposta rápida e gestão de carga”.

Os inversores híbridos modernos, como o Deye SUN-8K-SG04LP1-EU, já estão preparados para interagir com comandos externos e participar de programas de resposta à demanda, o que os qualifica para uso em microrredes e futuras redes inteligentes (Deye, 2023).

4.5 CCEE – Câmara de Comercialização de Energia Elétrica

A Câmara de Comercialização de Energia Elétrica (CCEE) é uma instituição privada, sem fins lucrativos, responsável pela contabilização e

liquidação das operações no mercado de energia elétrica no Brasil, atuando como interface entre geradores, consumidores livres, distribuidoras e comercializadoras.

Embora tradicionalmente vinculada ao mercado regulado e livre, a CCEE teve seu papel ampliado com o crescimento da geração distribuída, especialmente a partir da Lei nº 14.300/2022, conforme determina essa lei, a CCEE passou a integrar o processo de contabilização da energia injetada pelas unidades consumidoras com micro e minigeração, inclusive com previsão de ampliação do mercado livre para pequenos consumidores.

Segundo o TCC de Junior Felipe Mallmann (2024), “a atuação da CCEE será cada vez mais estratégica para garantir a rastreabilidade da energia solar gerada e injetada, além da segurança comercial nos contratos de compensação entre consórcios solares e consumidores”.

No contexto dos sistemas híbridos, a CCEE poderá futuramente atuar também como reguladora da venda de excedentes energéticos de sistemas com baterias, o que exige a evolução da regulamentação para contemplar fluxos bidirecionais e registros por blockchain, conforme ensaiado em projetos-piloto citados pela EPE (2023).

4.6 EPE – Empresa de Pesquisa Energética

A EPE tem como atribuição a realização de estudos técnicos que subsidiam as estratégias de expansão da matriz energética brasileira, vinculada ao MME, sua atuação é estratégica na definição de diretrizes governamentais, procedimentos de contratação de energia e projeções de horizonte ampliado.

No relatório “Plano Decenal de Expansão Energética 2032”, a EPE destaca que a energia solar fotovoltaica representará 13% da composição elétrica nacional em 2032, e que o crescimento mais acentuado deverá ocorrer na modalidade de geração distribuída com sistemas de armazenamento (EPE, 2023). O documento afirma que:

“A integração entre sistemas solares e baterias permitirá reduzir os momentos de maior demanda e aliviar pressões sobre a rede, desde que o

arcabouço regulatório incentive o armazenamento descentralizado e a automação inteligente de cargas” (EPE, 2023, p. 112).

Nos arquivos analisados, como o TCC “Estudo Comparativo entre o Dimensionamento de Sistemas Fotovoltaicos” (UNESP, 2020), é citado que a EPE já projeta cenários nos quais as baterias participam ativamente do mercado de capacidade, prestando serviços ancilares à rede, especialmente em horários críticos.

4.7 Organismos Internacionais: ONU, AIE, OCDE e ETTO

A presença de organismos internacionais como a ONU, Agência Internacional de Energia (AIE), OCDE e ETTO tem sido decisiva para o avanço da energia solar, tanto em termos de financiamento quanto de normatização técnica e metas ambientais, assim trazendo diretrizes, para os países seguirem, e bater metas, como as ODS, que fala em uma transição energética mais limpa e acessível, então sistemas solares, se encaixam muito bem nas normas internacionais, pois particularmente qualquer lugar pode ter um sistema solar, basta a região, ter uma incidência solar considerável, ainda mais em regiões remotas, que não possui acesso a rede elétrica, utilizar o sistema híbrido é algo primordial

4.8 ONU – Organização das Nações Unidas

A ONU, por meio dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), especialmente o ODS 7, estabelece como meta o acesso universal à energia limpa, segura e acessível. Em seu relatório “Tracking SDG 7” (2023), a ONU afirma que os sistemas solares com baterias são a principal solução de eletrificação para áreas remotas, e destaca que o Brasil pode ser modelo de referência na América Latina, devido ao seu alto potencial solar e estrutura regulatória avançada. “Soluções híbridas baseadas em solar fotovoltaico e armazenamento são tecnicamente viáveis e financeiramente sustentáveis para comunidades desconectadas e vulneráveis” (ONU, 2023, p. 64)

O documento (“Aplicação de Sistemas Fotovoltaicos Híbridos no Brasil” TCC –2022) reforça que as metas da ONU precisam ser integradas aos

programas nacionais, com incentivo ao uso de microinversores, baterias LiFePO_4 e inversores inteligentes, especialmente em habitações populares e unidades de saúde.

4.9 AIE – Agência Internacional de Energia

A AIE é uma das principais fontes mundiais de dados técnicos e projeções para energias renováveis. Em seu relatório “World Energy Outlook 2023”, projeta-se que, até 2040, a energia solar será a fonte mais barata de geração em 80% do mundo, com custo nivelado inferior a US\$ 20/MWh em regiões tropicais (AIE, 2023).

A AIE também destaca a importância de políticas públicas para facilitar a digitalização dos sistemas híbridos, integrando monitoramento em tempo real, inteligência artificial e internet das coisas (IoT), como é o caso das plataformas Deye Solarman e Enphase Enlighten (manuais técnicos, 2023).

4.10 OCDE e ETTO

A OCDE defende que a transição energética exige mecanismos de precificação de carbono, linhas de crédito para armazenamento e remoção de barreiras regulatórias à geração local, o relatório “Renewable Energy Policies in a Time of Transition” (OCDE, 2023) recomenda que países como o Brasil criem incentivos à manufatura local de módulos, baterias e inversores, com foco em inovação.

Já a ETTO (Organização do Tratado de Cooperação Energética), embora menos conhecida, atua em cooperação técnica entre países em desenvolvimento, financiando projetos de infraestrutura solar descentralizada e promovendo intercâmbio de normas técnicas. Muitos dos padrões seguidos por fabricantes como BOS-G e SE-G5.1 Pro-B têm origem em protocolos harmonizados por tratados ETTO, especialmente em logística e segurança de transporte de baterias (ver: “Classificação e Identificação para Transporte – BOS-G”, 2023).

4.11 Conclusão Crítica: Interdependência Técnica, Jurídica e Econômica

A análise dos órgãos reguladores e institucionais revela que a expansão da energia solar no Brasil e no mundo não se trata apenas de avanços tecnológicos, mas de um ecossistema interdependente que envolve regulação, financiamento, normas técnicas e políticas públicas.

A ANEEL assegura a viabilidade jurídica e técnica da microgeração. O MME define metas e conduz programas de incentivo. A EPE projeta a expansão setorial e propõe cenários. O ONS assegura estabilidade do sistema elétrico. A CCEE contabiliza os fluxos comerciais. E, em escala global, ONU, AIE, OCDE e ETTO orientam as diretrizes sustentáveis, financeiras e normativas. O cruzamento dessas esferas sustenta a transição energética, permitindo que soluções como os sistemas híbridos com baterias LiFePO_4 e inversores inteligentes deixem de ser alternativas marginais e passem a integrar o planejamento central de eletrificação e resiliência. “Sem integração regulatória, não há expansão sustentável da energia solar. O papel dos órgãos reguladores é habilitar o futuro energético distribuído com segurança e inteligência.” (ZANONI, 2018, p. 81).

5. A Matriz Energética Brasileira e o Papel da Geração Distribuída

A geração de energia no Brasil é caracterizada por uma variedade de fontes renováveis, principalmente a energia hidrelétrica e a energia eólica. De acordo com dados da EPE (2024), de toda a eletricidade consumida, 57,7% é gerada a partir de água (hidrelétrica) e 83% é de fonte renovável, combinando eletricidade gerada a partir de água, biomassa, vento e luz solar.

Toda essa energia renovável é positiva, mas vem com algumas complicações, principalmente porque é muito dependente de chuvas: a falta de chuva pode criar escassez de energia. Quando há escassez de água, o Brasil geralmente recorre a usinas termoeletricas a combustíveis fósseis, o que aumenta os preços da energia e emite mais gases que prejudicam o meio ambiente. Isso mostra que não temos diversidade suficiente na nossa energia limpa quando a alternativa está distribuída geograficamente, não dependendo

tanto do clima, etc. A energia solar fotovoltaica parece ser a candidata mais eficaz para isso.

A fonte de energia que tem sido alvo de atenção recentemente é a fotovoltaica, preferencialmente devido à Resolução Normativa ANEEL N° 482/2012, que definiu o sistema de compensação de energia elétrica, permitindo que um consumidor gere sua própria energia e injete o excedente na rede de distribuição e receba créditos, usados para compensar o consumo em períodos de menor geração do que a demanda.

Este grande avanço para a disseminação generalizada da micro e minigeração distribuída foi seguido pela ratificação da Lei N° 14.300/2022, que introduziu o Marco Legal para a Geração Distribuída.

Figura 9- Infográfico do projeto de Lei 14.300



Fonte: Greener (2024)

Com esta nova lei, a compensação de energia sofreu grandes mudanças, destacando-se a cobrança gradual da Taxa de Uso do Sistema de Distribuição (componente TUSD Fio B) sobre a energia injetada na rede por novos sistemas conectados a partir de janeiro de 2023. Os incentivos econômicos foram reduzidos para o consumo de energia da rede por sistemas conectados, bem

como em comparação com outros impactos, como autoconsumo e redução de pico, por sistemas de armazenamento de energia já estabelecidos (combinando geradores e armazenamento de calor).

Segundo Mallmann (2024), a Lei nº 14.300 representou uma mudança importante no modelo econômico da energia solar doméstica no Brasil, com o aumento da atratividade dos sistemas híbridos para aqueles que consomem mais energia durante a noite, quando não há energia solar. Como o consumo máximo nas residências é para proprietários que consomem eletricidade entre 18h e 22h (ou durante a tarifa mais alta), armazenar energia é uma maneira inteligente de maximizar economias, pois, na maioria das vezes, as pessoas estão voltando do trabalho e indo para casa dormir entre essas horas, e o consumo naturalmente aumenta.

De acordo com uma análise da Agência Internacional de Energia (IEA, 2023), o armazenamento é necessário para que fontes intermitentes, como a solar, se desenvolvam em fontes de suprimento confiáveis. A agência enfatiza que "o armazenamento liga a geração variável à garantia de suprimento, e assim os sistemas híbridos oferecem uma opção para uma transição energética globalmente viável" (IEA, 2023, p. 58).

No Brasil, a energia solar distribuída teve um crescimento incrível. ANEEL afirma que o Brasil já ultrapassa 37 GW de capacidade instalada em geração distribuída no final de 2024, sendo principalmente de sistemas solares instalados em residências e empresas. Também foi inferido que o conjunto de consumidores possuindo sistemas de geração pode ultrapassar 8 milhões até 2030, caso a adesão se mantenha em taxas atuais (CCEE, 2024).

E é a partir disso que a diversificação da matriz energética brasileira, a descentralização da geração e o empoderamento dos consumidores dependem fortemente do estímulo a soluções tecnológicas, como sistemas híbridos, que integram eficiência, cuidado ambiental e garantia de suprimento de energia, além de autonomia, ele destacou. Neste contexto, a geração distribuída não é apenas uma possibilidade de natureza econômica, mas, mais que isso, uma necessidade para que a independência energética no país não seja impedida, tornando-se mais descentralizada.

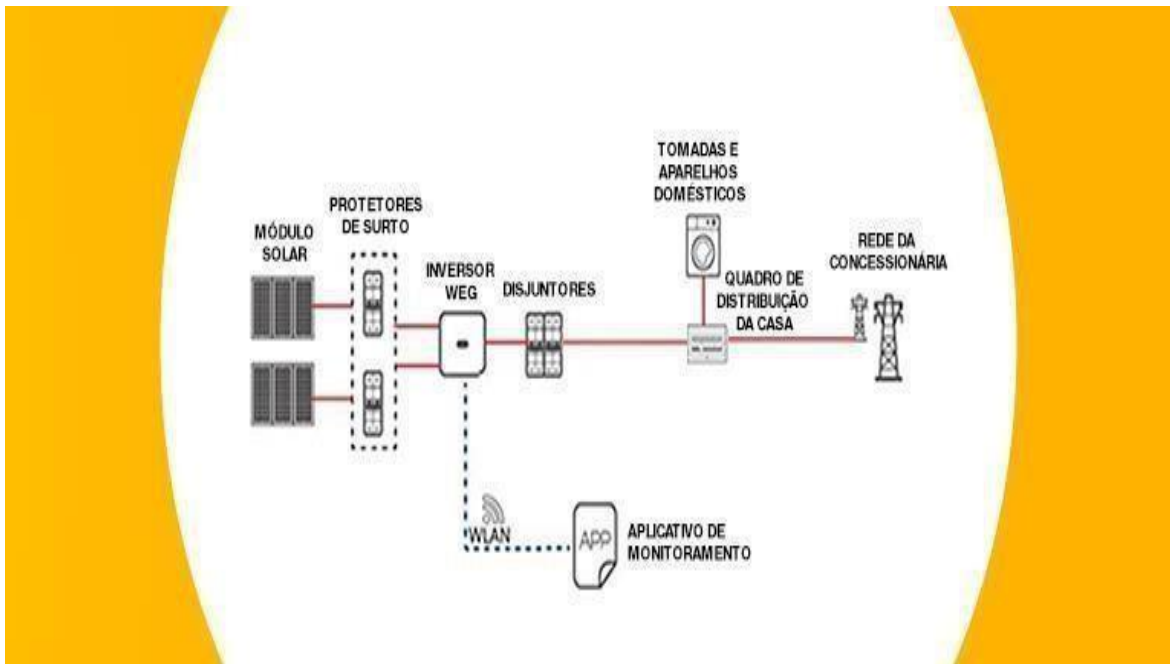
5.1 Fundamentos Técnicos dos Sistemas Fotovoltaicos On-Grid e Híbridos

O conhecimento sobre a operação técnica de sistemas solares On-Grid e Híbridos é necessário para confirmar seu desempenho, adequação e economia. Os dois modelos têm em comum a transformação de energia solar em energia elétrica por meio de módulos fotovoltaicos, mas diferem bastante quanto ao armazenamento, condicionamento e integração à rede.

Sistemas On-Grid estão conectados à rede de utilidade pública. A energia produzida durante o dia é consumida principalmente no local, e qualquer excesso é injetado na rede pública em troca de créditos de energia que podem ser usados para compensação por até 60 meses, sujeito às regras da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL). Este modelo não é alimentado por baterias; portanto, os custos iniciais são baixos e é mais fácil de manter.

On-Grid: O único inconveniente técnico dos sistemas On-Grid é que eles não funcionam quando a rede pública cai. As normas de segurança exigem que os inversores da rede On-Grid sejam desligados quando a rede elétrica falha para evitar o efeito de ilha, que poderia colocar em risco o pessoal de reparo da concessionária de energia (ANEEL, 2023).

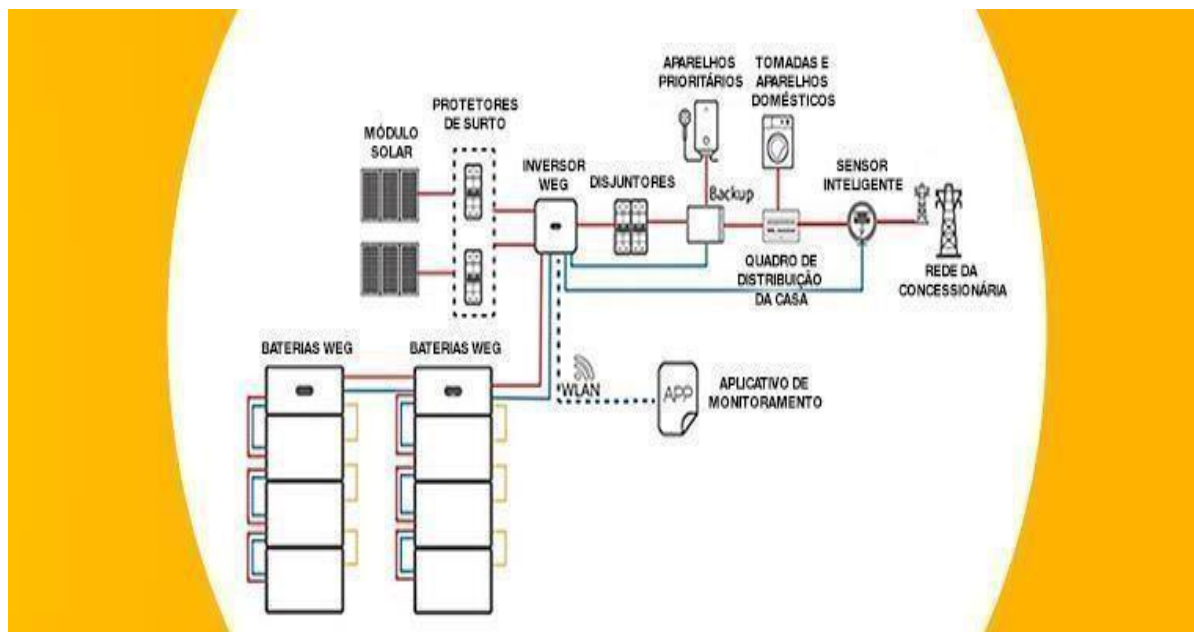
Figura 10- Sistema On-grid



Fonte: WEG 2024

Já os sistemas híbridos representam uma evolução tecnológica ao combinar os benefícios do sistema On-Grid com a capacidade de operar de forma autônoma, mesmo na ausência da rede. Além dos módulos fotovoltaicos, esses sistemas utilizam inversores híbridos equipamentos capazes de gerenciar múltiplas fontes de energia e bancos de baterias que armazenam a eletricidade excedente gerada durante o dia. Essa energia pode ser utilizada posteriormente, especialmente em períodos de maior demanda ou durante falhas no fornecimento da concessionária.

Figura 11 – Sistema Híbrido



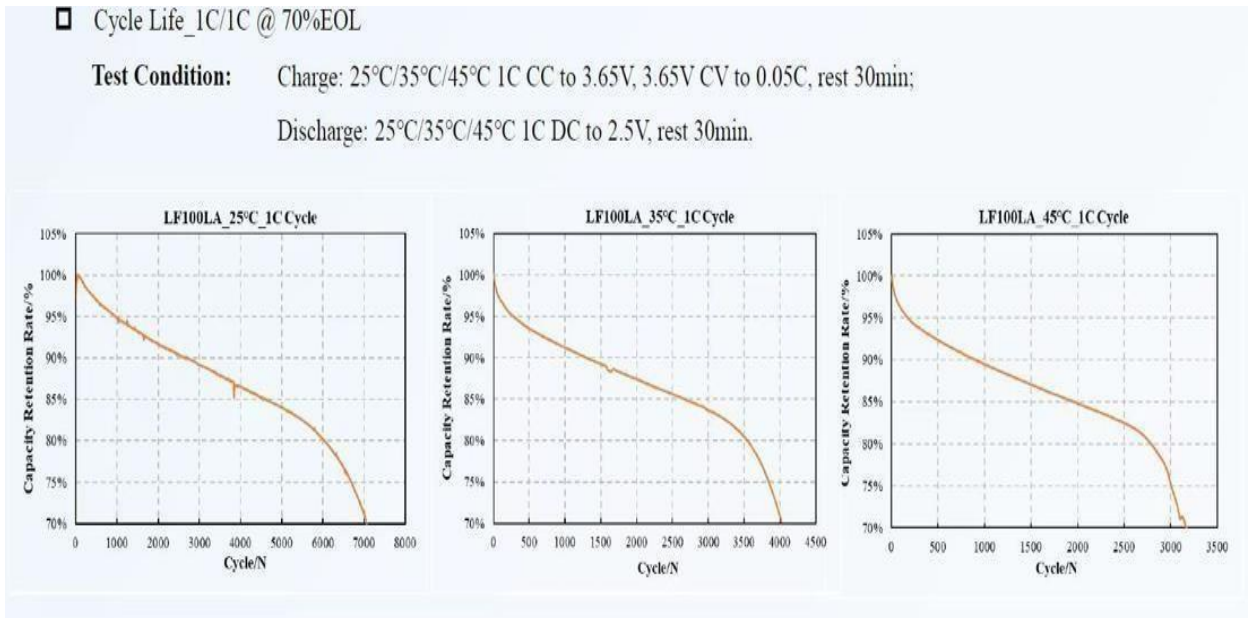
Fonte: WEG 2024

Segundo Zanoni (2018), a maior vantagem dos sistemas híbridos está na sua flexibilidade operacional, que permite priorizar o autoconsumo, garantir energia em horários de tarifa elevada e assegurar o funcionamento contínuo de cargas críticas em casos de apagão. Além disso, ao permitir a programação de carregamento e descarregamento das baterias conforme os horários de tarifa branca, o sistema torna-se uma ferramenta poderosa de gestão energética inteligente.

As baterias que são utilizadas em sistemas híbridos, especialmente as do tipo fosfato de ferro-lítio (LiFePO_4), destacam-se por sua elevada densidade energética, baixa taxa de autodescarga, estabilidade térmica e longa vida útil. Modelos como o BOS-G e o SE-G5.1 Pro- B, por exemplo, são aptos a realizar mais de 6.000 ciclos, por carga com profundidade de descarga (DoD) de até 80%, mantendo eficiência acima de 95% e operando com segurança em temperaturas entre -10°C e 45°C . Essas baterias, segundo relatórios da SGS (2023), também apresentam sistemas avançados de gerenciamento (BMS),

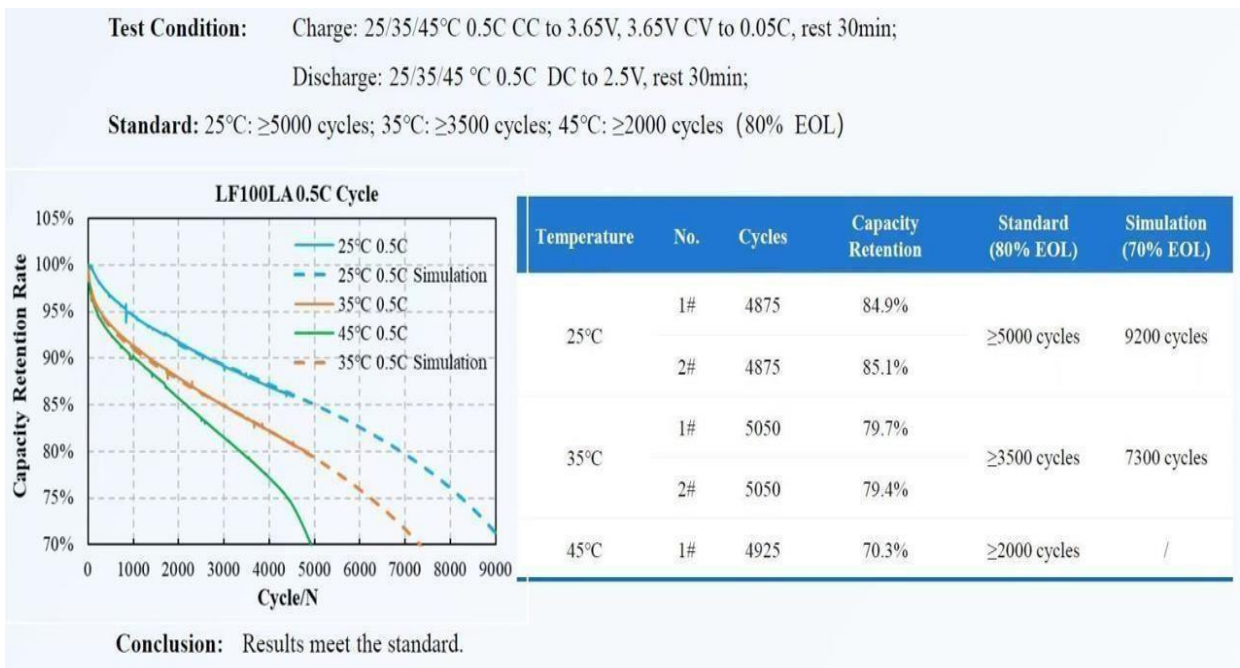
que monitoram parâmetros como tensão, corrente, temperatura e estado de carga, protegendo o sistema contra falhas.

Gráfico 3- Curva de capacidade em relação aos ciclos



Fonte : EVE Labs

Gráfico 4- Curva de Eficiência de Temperatura



Fonte: EVE Labs

A validade e o desempenho de um sistema híbrido estão ligados à maneira como seus elementos se encaixam, pois é fundamental que a voltagem das baterias esteja em conformidade com os controladores de carga e que os inversores híbridos ofereçam variadas formas de operação, alternando rapidamente entre a energia solar, as baterias e a rede elétrica, assim os inversores atuais, a exemplo do Deye SUN-8K-SG04LP1-EU, apresentam uma eficiência acima de 97,6% e compatibilidade com diversos protocolos de comunicação (CAN, RS485), possibilitando a conexão com diversas marcas de baterias inteligentes, e à versatilidade, a inteligência integrada a esses sistemas permite o emprego de algoritmos EMS (Energy Management Systems), que aperfeiçoam a forma como a energia produzida e armazenada é utilizada, torna-se possível efetuar simulações de retorno sobre o investimento (ROI), tempo de retorno e custo nivelado da energia (LCOE), auxiliando os consumidores e projetistas na hora de decidir. Assim, entender os princípios técnicos dos sistemas On-Grid e Híbridos é crucial para calcular o tamanho ideal do sistema, assegurar a segurança no funcionamento e amplificar os benefícios financeiros e ambientais de um projeto de produção distribuída.

5.2 Regulação, Sustentabilidade e Descentralização

O crescente uso de energia solar no território nacional está diretamente associado a boas políticas governamentais, leis saudáveis e à contínua busca por comportamentos ecológicos. A consolidação deste setor, especialmente no modelo de produção descentralizada, necessariamente envolverá regulamentações para oferecer confiança jurídica aos investidores, clareza de preços para o usuário e incentivos tecnológicos para avanços significativos.

A aprovação da Lei nº 14.300/2022, também conhecida como o Marco Legal da microprodução e mini produção descentralizada, foi um marco. Além de atualizar as regras do mecanismo de compensação de energia elétrica, as alterações regulatórias também começaram a ser aplicadas de forma gradual sobre a Tarifa de Uso do Sistema de Distribuição (TUSD) cobrada pelos Sistemas de Distribuição, em relação ao elemento “Fio B” referente ao excedente de energia disponível no Sistema. Isso teve repercussões imediatas

na rentabilidade dos projetos On-Grid, favorecendo a orientação para o autoconsumo e armazenamento local, características-chave para sistemas combinados.

Foi relatado que tal revolução legislativa provocou uma reconfiguração do modelo econômico para a produção solar, tornando os sistemas combinados mais atraentes, especialmente no caso de residências com uso intensivo noturno (Mallmann, 2024). Nesses casos, as economias de energia armazenada em horários de tarifas elevadas são substanciais.

Do ponto de vista ambiental, a energia solar fotovoltaica representa um desafio para a sustentabilidade ambiental, por meio da redução das emissões de gases de efeito estufa. Cada megawatt-hora produzido por sistemas fotovoltaicos evita em média a emissão de 0,45 toneladas de CO₂ em comparação com seus equivalentes baseados em combustíveis fósseis (ONU, 2022). Pode-se economizar cerca de 3 a 4 toneladas de CO₂ por ano com um sistema residencial de 8 kWp o que equivale à quantidade de cerca de 200 árvores plantadas.

Além da responsabilidade ecológica, a produção descentralizada de eletricidade a partir do próprio sistema fotovoltaico é implicada como um instrumento de democratização e diversificação do suprimento elétrico nacional. Organizado até recentemente no modelo grande centralizado e com um amplo sistema de transmissão, o sistema de geração de eletricidade no Brasil está passando por uma transformação baseada na proliferação da microgeração e minigeração distribuídas. Neste novo paradigma, o usuário final torna-se um ator na relação de geração e gestão de energia.

Esta transição proporcionará muitas vantagens, como a redução de perdas no transporte de energia na operação de natureza técnica, redução do excesso de demanda nas redes de distribuição tradicionais e aumento da resiliência do sistema contra emergências, como fenômenos climáticos severos ou picos súbitos de demanda. Soluções descentralizadas eficientes nas quais os geradores são combinados com armazenamento também podem aumentar significativamente a autossuficiência energética regional, o que é

especialmente relevante para populações que vivem em ilhas isoladas e em regiões onde a infraestrutura elétrica é deficiente (2023).

O “Operador Nacional do Sistema Elétrico” (ONS) também tem demonstrado boa vontade em aceitar gradualmente fontes renováveis que têm resposta dinâmica e estrutura modular, característica de sistemas híbridos PV. O ONS sugeriu, em seus relatórios técnicos, que tecnologias de alta operabilidade, capazes de integração a sistemas de supervisão energética inteligente em tempo real, são a principal prioridade, uma vez que isso garante que o fornecimento e a demanda de eletricidade serão geridos de forma otimizada.

A coincidência de uma regulamentação sólida, compromisso ambiental e descentralização técnica aponta os sistemas híbridos não apenas como uma alternativa energética promissora, mas como um grande protagonista na renovação e modernização do cenário elétrico brasileiro. Esta transformação vai além de uma mudança puramente tecnológica e tem implicações econômicas, sociais e ambientais, colocando a produção descentralizada no centro das estratégias globais para avançar em direção a um modelo energético mais sustentável e resiliente.

6. COMPONENTES E TECNOLOGIAS DOS SISTEMAS FOTOVOLTAICOS

6.1 Estrutura Técnica de um Sistema Solar Fotovoltaico

Para que o sistema solar fotovoltaico opere com eficiência, não basta apenas ter módulos solares de boa qualidade, é primordial que todos os seus componentes estejam perfeitamente integrados, seja nos sistemas conectados à rede (On-Grid) ou em sistemas híbridos, a estrutura técnica envolve vários equipamentos que dependem uns dos outros para converter, proteger, armazenar e administrar a energia proveniente luz do sol, como ressalta Muñoz (2023), ao escolher e dimensionar os componentes de um sistema fotovoltaico, é crucial levar em conta critérios técnicos precisos, como a compatibilidade elétrica, a eficiência no funcionamento, a durabilidade, o suporte técnico oferecido e a obediência às normas. O quão bem o sistema funciona como um

todo está diretamente ligado à harmonia entre os seus componentes. Os principais componentes que fazem parte dos sistemas On-Grid e Híbrido, juntamente com as suas respectivas funções técnicas:

Tabela 1 – Componentes dos Sistemas Fotovoltaicos On-Grid e Híbridos

| Componente | Sistema On-Grid | Sistema Híbrido | Função Técnica |
|--------------------------|-----------------|-----------------|--|
| Módulos Fotovoltaicos | Sim | Sim | Convertem a radiação solar em energia elétrica na forma de corrente contínua (CC). |
| Inversor String | Sim | Sim (parcial) | Converte corrente contínua (CC) em corrente alternada (CA) e sincroniza com a rede elétrica. |
| Inversor Híbrido | Não | Sim | Gerencia múltiplas fontes de energia (rede, baterias e solar) e permite operação off-grid. |
| Microinversores | Opcional | Opcional | Operam por módulo individual, otimizando a geração e aumentando a tolerância a falhas. |
| Controlador de Carga | Não | Sim | Controla o fluxo de energia entre os módulos e as baterias, protegendo contra sobrecargas. |
| Banco de Baterias | Não | Sim | Armazena energia excedente para uso em horários sem geração ou em falhas da rede. |
| String Box (CC/CA) | Sim | Sim | Concentra dispositivos de proteção (disjuntores, DPS, seccionadores) para garantir segurança elétrica. |
| Sistema de Monitoramento | Sim | Sim | Realiza o acompanhamento em tempo real da geração, consumo e desempenho energético. |

Fonte: Adaptado de DEYE (2023), BOS-G (2023), Mallmann (2024).

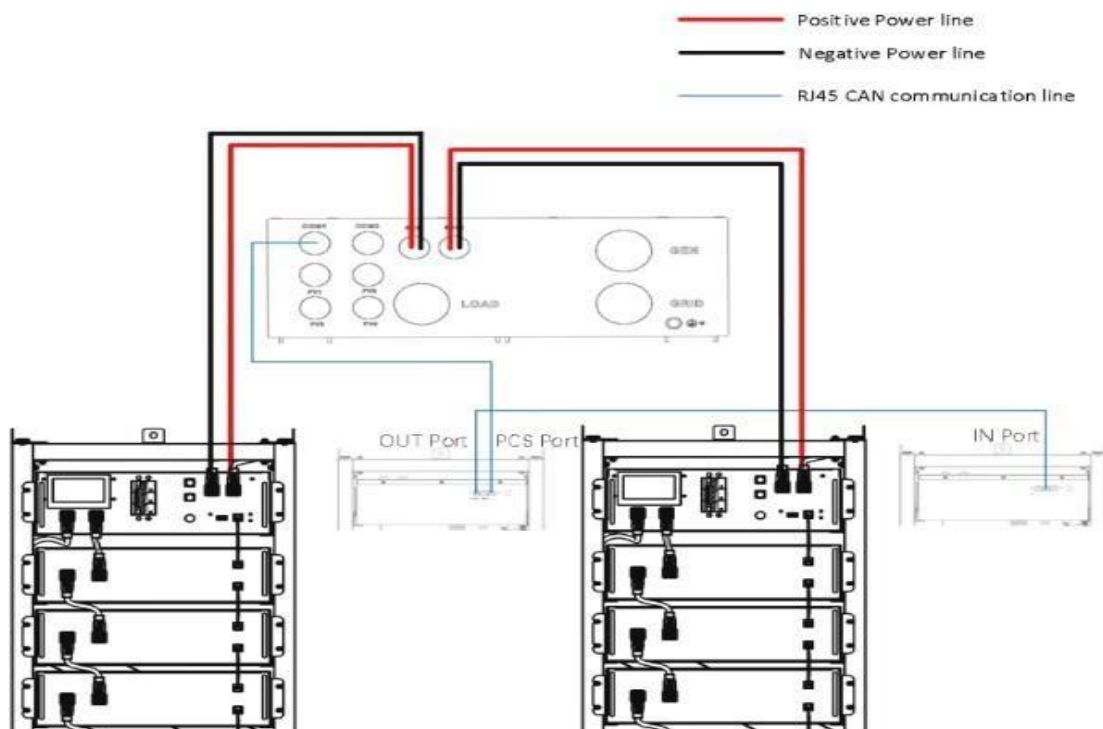
Sistemas On-Grid não possuem baterias e oferecem custos de instalação mais baixos, mas têm menor autonomia de uso. A falta temporária de fornecimento de energia durante cortes de energia na rede está se tornando um risco cada vez mais relevante, especialmente devido às incertezas com os distribuidores brasileiros, como apontado por Mallmann (2024).

Para instalações que integram múltiplas fontes de energia, a complexidade do trabalho é maior devido ao maior número de componentes, mas o sistema pode funcionar de forma mais flexível em diferentes situações, como em apagões e em horários de pico. Um sistema bem projetado será inteligente, escolhendo quando obter energia do sol, da bateria ou da parede, seguindo um cronograma ou padrão de consumo.

A integração de todos esses componentes continua sendo um desafio-chave na realização desses sistemas. A falha em calcular a compatibilidade de tensão ou potência entre painéis, inversores e baterias pode levar à perda de energia, falha do sistema ou dano prematuro do equipamento.

Notas técnicas do fabricante, SE-G5.1 Pro-B (2023) e BOS-G (2023), enfatizam a importância de manter em mente os limites de corrente e tensão e os protocolos de comunicação.

Figura 12 - Diagrama esquemático da conexão paralela de baterias de sistema de baixa potência



Fonte: Manual Deye Bateria LiFePO4

Para sistemas fotovoltaicos híbridos trabalhando com inversores de potência nominal superior a 12 kW, também devem ser usados esquemas paralelos mais robustos e seguros, com o modo paralelo 2 sendo o mais adequado para demandas de alta potência.

Em resposta a uma potência do inversor que excede esse limite, a demanda elétrica no banco de baterias é aumentada, e é necessário um arranjo de conexão que permita o compartilhamento da corrente elétrica entre os módulos de armazenamento de maneira mais uniforme e estável. Isso ocorre porque, no caso de inversores de alta potência, a demanda total de corrente tende a ser muito maior do que a quantidade de corrente que pode ser fornecida por arquiteturas paralelas tradicionais, como as arquiteturas de inversores abaixo de 12 kW.

Portanto, o modo paralelo 2 foi inventado para evitar tal situação em que essa corrente não é distribuída uniformemente entre as baterias, o que pode sobrecarregar uma unidade de bateria, resultando no superaquecimento dos conectores, rápida deterioração dos terminais e, além de tudo isso, a ocorrência de situações sérias, como incêndio ou curto-circuito. Com essa abordagem, os cabos de conexão são dimensionados com uma grande seção transversal, os barramentos são dimensionados para alta corrente e a distribuição de corrente é mais eletricamente simétrica, com menores perdas resistivas e melhor comportamento térmico do sistema.

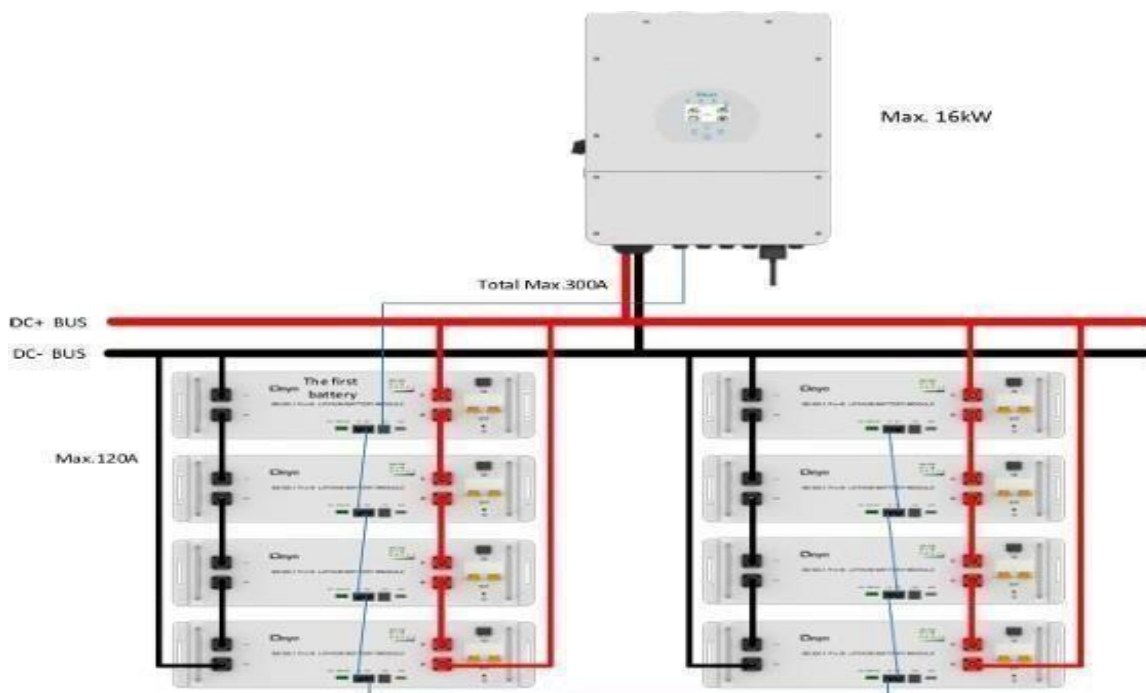
Além disso, como exemplificado pelo modo paralelo 2, precauções de segurança mais rigorosas podem ser adotadas, como disjuntores individuais por bateria, monitoramento constante de tensão e corrente por módulo e sensores térmicos para o banco de baterias. Este recurso avançado não apenas melhora a segurança do sistema e evita o risco de afetar sua estabilidade de longo prazo e vida útil, mas também amplia a vida útil dos componentes, tornando o produto mais durável e confiável.

Em grandes projetos, como podem ser edificações comerciais, sites industriais ou uma fazenda isolada, é obrigatório que se tenha esse tipo de instalação, não por uma necessidade técnica, mas como a maneira natural de lidar com a potência envolvida, devido à sua grandeza.

Consequentemente, para inversores com uma potência > 12 kW, a adoção de uma topologia de modo paralelo 2 é confirmada como a solução técnica mais adequada e segura, que deve ser desenvolvida de acordo com cálculos precisos da corrente máxima, com a escolha adequada do cabo, com conexão reforçada e com plena compatibilidade entre baterias, inversores e sistemas de monitoramento.

Esta preocupação técnica revela uma imagem de qualidade, segurança e sustentabilidade dos sistemas de geração híbrida distribuída no Brasil.

Figura 13 - Diagrama esquemático da conexão paralela das baterias do sistema de alta potência:



Fonte: Manual Deyn Bateria LiFePO4

Nos sistemas híbridos de baixa potência, com capacidade inferior ou igual a 12 kW, a utilização de quatro baterias em conexão paralela tem se mostrado uma solução técnica eficiente e economicamente viável. No entanto, essa configuração requer atenção rigorosa aos limites operacionais do sistema,

especialmente em relação à corrente máxima suportada por cada unidade de armazenamento. Quando quatro baterias são utilizadas nesse arranjo, a corrente máxima que pode circular por cada uma delas não deve ultrapassar os 240 amperes. Este limite não é meramente técnico, mas representa um parâmetro de segurança essencial para a integridade do sistema.

A superação desse valor de corrente implica riscos substanciais. O aquecimento excessivo dos conectores e dos cabos, provocado pela circulação de corrente acima da capacidade nominal, pode comprometer a estabilidade elétrica do sistema, reduzir a vida útil dos componentes e, em situações mais graves, desencadear incidentes de natureza térmica, como derretimento do isolamento dos cabos ou até incêndios. Portanto, respeitar a corrente máxima suportada pelas baterias não se trata apenas de seguir especificações de projeto, mas de adotar uma postura preventiva e responsável diante dos riscos elétricos associados a instalações mal dimensionadas.

Em projetos que utilizam inversores com potência até 12 kW, a correta disposição das baterias e a distribuição equilibrada da corrente entre os módulos de armazenamento são fundamentais para garantir o desempenho ideal do sistema e a segurança operacional a longo prazo. A configuração paralela bem estruturada permite maior flexibilidade, facilidade de manutenção e a possibilidade de expansão futura, desde que os limites elétricos sejam devidamente respeitados e os materiais utilizados estejam em conformidade com as normas técnicas vigentes.

Essa abordagem técnica não apenas assegura o funcionamento estável do sistema híbrido, como também contribui para a preservação da integridade dos equipamentos e, sobretudo, para a segurança dos usuários e do patrimônio envolvido. A responsabilidade no dimensionamento e na execução das conexões de baterias reflete o grau de maturidade e profissionalismo iniciativas voltadas à geração elétrica descentralizada, ao integrarem inovação tecnológica com requisitos de segurança robustos, contribuem significativamente para a consolidação de um modelo energético mais resiliente, sustentável e confiável.

Adicionalmente, torna-se imprescindível selecionar equipamentos que possuam certificações internacionalmente reconhecidas, como CE, IEC e UL,

e que atendam plenamente às exigências normativas brasileiras, a exemplo das ABNT NBR 16149 e NBR 16690. Tais conformidades garantem a integridade operacional do sistema, o desempenho adequado dos dispositivos e a sua aceitação formal pelas concessionárias de energia elétrica.

É igualmente recomendável que os dispositivos adotados estejam alinhados a protocolos de comunicação padronizados e interoperáveis, como CAN Bus e RS485, o que facilita a integração com plataformas avançadas de monitoramento e sistemas modernos de armazenamento de energia, a concepção técnica de uma instalação fotovoltaica deve ser orientada por critérios de engenharia robustos, levando em conta não apenas a eficiência isolada de cada componente, mas o conjunto por inteiro, assim tendo algo mais funcional de todo o arranjo como um sistema coeso e interdependente.

Essa perspectiva integrada é essencial para garantir a longevidade da estrutura, a maximização do rendimento energético e o retorno econômico do capital aplicado em soluções de geração distribuída.

6.2 Tecnologias Fotovoltaicas, Eficiência Energética e Impacto Térmico no Desempenho dos Sistemas Solares

A melhoria tecnológica na energia solar transformou a produção local na última década e abriu opções para residências e empresas. Hoje, os painéis solares à venda oferecem várias soluções de tecnologia solar, sendo o painel solar mais comum no mercado o painel solar policristalino e monocristalino, tanto em sistemas solares conectados à rede quanto em sistemas isolados. Estes agora são comercializados geralmente a diferentes preços, assim como seu valor de geração de energia diária ideal, vida útil, resistência térmica e melhor expansão e versatilidade em termos de várias instalações.

Essas características são essenciais para determinar o desempenho energético, produção mensal e rendimentos, e o período de retorno do investimento feito no sistema solar. Nesse contexto, a tecnologia de silício monocristalino PERC (Célula Emissora Posterior Passivada) consolidou-se como a mais adotada no setor de geração distribuída devido à sua alta eficiência, variando entre 18% e 21% de eficiência média, e devido ao seu bom

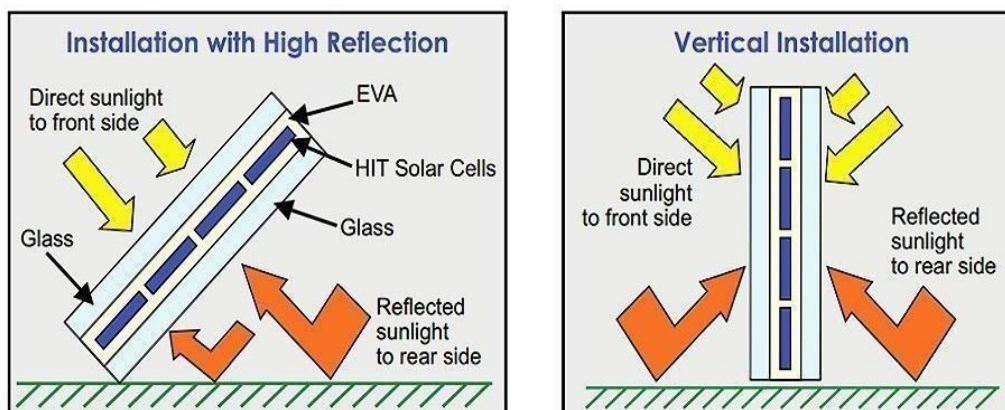
desempenho sob baixa radiação. Em comparação com as células policristalinas, que até meados da última década dominavam o mercado com eficiência variando de 13% a 16% respectivamente, os módulos monocristalinos apresentam menor degradação ano após ano e têm maior densidade de energia por metro quadrado (Ja Solar, 2023).

Essa distinção permite que sistemas montados em pequenas áreas de telhado produzam mais energia, sendo uma escolha favorita em áreas urbanas densas. A estrutura de meia célula usada nos módulos atuais também contribui para o desempenho térmico e elétrico. Essa tecnologia diminui perdas resistivas internas, aumenta a distribuição de corrente e tolera problemas de sombreamento parcial, tornando o sistema mais resistente a variações de desempenho devido a elementos como árvores, tanques de água e antenas (LONGI, 2023).

Enquanto isso, o surgimento dos painéis bifaciais aqueles com duas camadas de vidro e com células que absorvem luz de ambos os lados foi um divisor de águas, particularmente para instalações em solo. O princípio é que a luz (albedo, TRINA SOLAR, 2023) refletida em superfícies claras (por exemplo, areia clara ou concreto) pode utilizar mais energia na parte de trás e aumentar a produção anual em até 30%, dependendo de quão refletiva pode ser a superfície, o chamado albedo

Isso é uma grande vantagem para empreendimentos maiores, compensando o custo ligeiramente mais alto. E existem novas tecnologias, como o TOPCon (Contato Passivado por Óxido de Tunelamento) e HJT (Tecnologia de Heterojunção), que estão à frente do futuro da eficiência solar, tendo sido testadas em células que superam a marca de eficiência de 23%. Essas tecnologias incorporam designs especiais e camadas adicionais que minimizam perdas, mas carregam altos custos por watt de pico, tornando difícil sua ampla instalação no Brasil (IEA, 2023).

Figura 14 – Funcionamento Painel Bifacial



Fonte: Sanyo Energy Corporation

Além da eficiência das células, o desempenho de um sistema solar também depende fortemente das condições ambientais, entre elas a temperatura de operação. Módulos fotovoltaicos, assim como dispositivos semicondutores em geral, são menos eficientes em temperaturas mais altas e seu coeficiente de temperatura de P_{max} (uma medida da variação na eficiência do módulo em resposta à temperatura) é negativo.

A potência do módulo diminui, em média, de 0,35% a 0,40% para cada grau Celsius acima de 25°C (STC - Condições de Teste Padrão). Este efeito térmico pode resultar em perdas superiores a 5% em locais como a região Centro-Oeste do Brasil, com temperaturas dos módulos atingindo até 60°C em telhados expostos ao sol por longos períodos (EPE, 2023). Por isso, medidas como ventilação traseira dos módulos, espaçamento correto e estruturas de inclinação ótimas são importantes para reduzir essas perdas térmicas.

Ao decidir sobre uma tecnologia de módulo, é fundamental avaliar como essa tecnologia se alinha com os outros componentes do sistema, incluindo inversores de string e microinversores, otimizadores de potência, disjuntores, cabos de dupla isolamento, caixas de string, desconectores e protetores de surto.

É importante que a faixa operacional do MPPT do inversor coincida com a tensão geral da string de módulos. Assim, o sistema não se torna ineficiente nem suscetível a sobrecarga. Inversores recentes, como o Growatt MOD 5KTL-

X, apresentam MPPTs que operam independentemente dentro de 150–550 V, permitindo mais flexibilidade na disposição dos módulos (Growatt, 2023).

Por outro lado, microinversores, como o Enphase IQ7+ e o Hoymiles MI-600, processam a energia em cada módulo separadamente. Isso tem a vantagem de que nenhuma potência é perdida devido a diferenças entre strings e uma alta transparência = 99,5% é alcançada durante a fiscalização; mas o custo de criação é maior devido ao custo dos dispositivos extras anexados e o serviço se torna mais complexo (Enphase, 23).

Outro fator essencial para aumentar a eficiência dos sistemas fotovoltaicos atuais é o uso de baterias de íon de lítio inteligentes, como o tipo à base de fosfato de ferro de lítio (LFP) que a SE-G5 é. Um modelo Pro-B e BOS-G que pode ser ciclado mais de 6.000 vezes @ 30% de profundidade de descarga.

Estas baterias têm baixa autodescarga, alta densidade de energia e podem operar com segurança em diferentes variações de temperatura ambiente, devido ao BMS (Sistema de Gerenciamento da Bateria) que é capaz de monitorar alguns parâmetros como tensão, temperatura e corrente em tempo real (SGS, 2023; SE-G5.1 Pro-B, 2023).

Tudo isso, em combinação com inversores compatíveis, baterias inteligentes e uma arquitetura elétrica dimensionada, é o que torna o sistema fotovoltaico bem-sucedido em termos de geração, segurança e economia. Um sistema solar bom vs. ruim não é apenas sobre qual marca do painel você escolhe, mas também sobre a melhor maneira de a tecnologia ser projetada, montada e usada de acordo com regulamentação e operação real na vida prática.

Tabela 2 – Comparativo técnico de módulos de alto desempenho

| Marca | Modelo | Tipo | Potência (Wp) | Eficiência (%) | Coef. Temp. (Pmax) | Garantia Linear |
|----------------|-----------------|---------------------|---------------|----------------|--------------------|-------------------|
| JA Solar | JAM72S30-545/MR | Monocristalino PERC | 545 | 21,1 | -0,35%/°C | 84,8% aos 25 anos |
| Trina Solar | TSM-NEG19R.28 | Bifacial N-Type | 580 | 21,5 | -0,30%/°C | 87,4% aos 30 anos |
| Canadian Solar | CS3W-550MS | Monocristalino PERC | 550 | 20,9 | -0,36%/°C | 83,0% aos 25 anos |

Fonte: JA Solar (2023); Trina Solar (2023); Canadian Solar (2023).

6.2.1 Certificações e Garantias: Conformidade Técnica e Confiabilidade a Longo Prazo

A adoção em grande escala da energia solar, como solução viável para diversificar a matriz energética, necessita não apenas da utilidade eficaz do sistema e do custo, mas principalmente da confiabilidade técnica e da conformidade regulatória dos equipamentos utilizados. Nesse quesito, a certificação dos módulos solares e a garantia oferecida pelos fabricantes constituem elementos fundamentais para assegurar a durabilidade do sistema e a previsibilidade da geração ao longo dos anos e na segurança elétrica do usuário.

No Brasil, a certificação dos módulos fotovoltaicos pelo Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia (INMETRO) é obrigatória para qualquer equipamento comercializado. Essa certificação baseia-se em ensaios padronizados que visam assegurar o desempenho, a segurança e a resistência dos módulos em condições reais de operação. As normas técnicas internacionais mais frequentemente adotadas como referência nos ensaios são a IEC 61215 e a IEC 61730, ambas publicadas pela International Electrotechnical Commission (IEC).

Figura 15 – Etiqueta obrigatória de eficiência para placas solares

| SUN ENERGY | | Energia (Elétrica) | | MÓDULO FOTOVOLTAICO |
|---|-------------|---|------|---------------------|
| Rated Maximum Power (Pmax) | 285W | Fabricante | | |
| Tolerance (Tol) | 0~+3% | Marca | | |
| Voltage at Pmax (Vmp) | 31.11V | Modelo | | |
| Current at Pmax (Imp) | 9.17A | | | |
| Open-Circuit Voltage (Voc) | 37.33V | | | |
| Short-Circuit Current (Isc) | 9.73A | | | |
| Maximum Series Fuse Rating | 15A | | | |
| Maximum System Voltage | 1000VDC | | | |
| Fire Safety Class | C | | | |
| Mechanical Load Tested | 5400 pa | | | |
| Application Class | Class A | | | |
| Cell Technology | Mono-Si | | | |
| Weight (Kg) | 18.60 | | | |
| Dimensions (mm) | 1640×992×40 | | | |
| Technical performance data recorded at Standard Test Conditions (STC) Am=1.5 E=1000 W/m ² TC=25 °C 25 years limited output Guarantee | | Área Externa do Módulo (m ²) | 1,63 | |
| | | Produção Média Mensal de Energia (kWh/mês) | 35,0 | |
| | | Potência nas condições Padrões (W) | 285 | |
| WARNING ELECTRICAL HAZARD THIS UNIT PRODUCES DC ELECTRICITY WHEN EXPOSED TO LIGHT COVER GLASS BEFORE REMOVING TERMINAL JUNCTION BOX LID. | | Requisitos de Avaliação da Conformidade para Sistemas e Equipamentos para Energia Fotovoltaica Instrução e recomendações de uso, leia o Manual do aparelho | | |
| | | IMPORTANTE: A REMOÇÃO DESTA ETIQUETA ANTES DA VENDA ESTÁ EM DESACORDO COM O CÓDIGO DE DEFESA DO CONSUMIDOR | | |

Fonte: INMETRO

A IEC 61215 define requisitos em relação ao desempenho e testes de vida útil acelerada de módulos em exposição solar simulada, ciclismo térmico e carregamento mecânico, e a IEC 61730 aborda a segurança elétrica e durabilidade contra impactos, descargas e falhas internas. Tais requisitos garantem que os módulos vendidos possam suportar tensões ambientais, como temperatura, choque térmico, umidade, pressão do vento, granizo etc. (IEC, 2021).

A estas, devemos adicionar algumas outras certificações internacionalmente aceitas (UL 1703, que é válida especialmente para o continente norte-americano, e que inclui requisitos de inflamabilidade e comportamento em caso de incêndio; e as normas da família ISO 9001 e ISO 14001, que visam à qualidade dos processos de fabricação e à gestão ambiental dos fabricantes). Empresas que possuem estas certificações

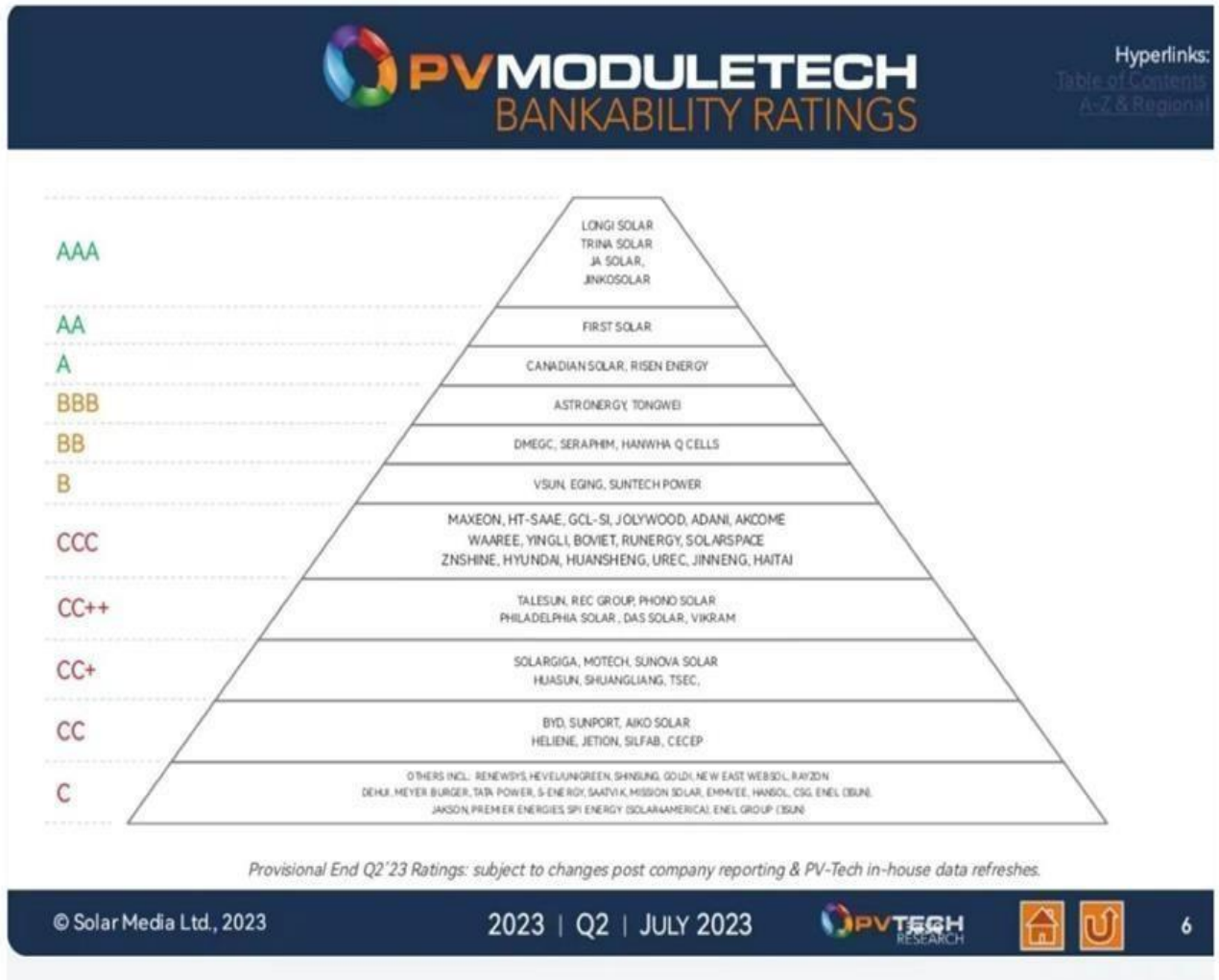
geralmente se beneficiam de um controle mais rigoroso sobre defeitos de produção, redução da frequência de reclamações técnicas e maior rastreabilidade dos lotes, o que resulta em maior confiança por parte do mercado e dos técnicos (INMETRO, 2023).

A confiabilidade dos módulos também está significativamente correlacionada com a natureza da garantia fornecida pelo fabricante, que pode ser classificada em dois principais tipos: garantia de produto e garantia de desempenho. A garantia de produto normalmente é oferecida por 10-15 anos contra defeitos de fabricação, defeitos estruturais e falhas de componentes. A garantia de desempenho, em vez de uma garantia linear, estima a taxa de degradação da eficiência do módulo ao longo do tempo, de modo que o painel funcione com uma porcentagem superior a certo número da potência nominal após 25 anos de uso.

Portanto, é importante saber a confiabilidade que aquele módulo tem, a partir de suas garantias e selos de aprovações, além de conhecer a empresa fabricante dos módulos, pois, como é uma garantia muito longa, é possível que a empresa vá à falência, ou ocorra algum sinistro, que irá deixar o cliente na mão quando for acionar a garantia dos módulos, então existem casos que isso ocorre, onde a fabricante vende o produto e depois de alguns anos acaba tendo problemas financeiro e acaba fechando as portas, porém o cliente ainda está dentro da garantia, então a empresa não dá esse suporte para o cliente final, deixando no prejuízo com uma placa defeituosa, portanto é extremamente importante analisar a empresa e verificar se ela tem uma boa estrutura para arcar com a garantia fornecida.

Há uma pirâmide mostrando a delimitação dos painéis em suas qualidades e confiabilidades, o cerne no topo da pirâmide é realizar um estudo sobre a eficiência dos painéis e a empresa, se tiver respaldo para a garantia, sendo assim:

Figura 16– Pirâmide de Bancabilidade das placas



Fonte: PV Moduletech 2023

Alguns dos fabricantes mais conhecidos, como Trina Solar e LONGi Solar, oferecem garantias de desempenho que asseguram um nível mínimo de capacidade, geralmente 85%, após 25 anos de uso. Portanto, isso é um grande avanço em comparação com os antigos, que apenas garantiam um mínimo de 80% de produção no mesmo período. Essa garantia é possível graças ao uso de materiais de encapsulamento resistentes aos raios UV, painéis de vidro revestidos de silicone que recebem pouco calor solar e conectores de alta qualidade na forma de MC4s. Além disso, processos industriais certificados diminuem defeitos e de laminação ao longo do tempo (Trina Solar, 2023).

A Enphase Energy (2023) observa que a estabilidade a longo prazo do desempenho dos módulos está associada à uniformidade dos materiais, à resistência dos circuitos internos e à integridade das conexões entre células individuais. "A consistência de longo prazo da entrega de energia ao longo dos anos depende da estabilidade dos materiais utilizados, da proteção das camadas de encapsulamento contra os efeitos da exposição à luz solar e da confiabilidade de todos os conectores MC4 (ou similares)" (Enphase, 2023, p. 13). Além das obrigações de garantia nominal, é necessária uma supervisão constante da degradação induzida potencial (PID), um fenômeno em que a capacidade de geração de alguns módulos de silício pode ser degradada sob o efeito de estresse elétrico, térmico e de umidade. Outros testes como o teste IEC 62804 para resistência PID são recomendados para instalações em ambientes adversos (áreas costeiras ou altamente poluídas).

Para garantir a segurança no nível descrito pelos padrões regulatórios brasileiros, como a NBR 5410, aplicável a instalações elétricas de baixa tensão [36], e a NBR 16690, que estabelece padronizações para sistemas fotovoltaicos conectados à rede [37], é necessária a integração adequada de módulos certificados com outros componentes do sistema. Estes consistem em inversores apropriados, caixas string em conformidade com os regulamentos e com disjuntores de curva C com uma interrupção mínima de 6 kA, protetores contra surtos de energia tipo II e cabos de isolamento duplo. A não adesão a esses requisitos pode significar a negação de consentimento por empresas de energia, perda de garantia do equipamento e até mesmo o risco de incêndio e choque elétrico.

Portanto, optar por módulos certificados com garantias e suporte de fabricantes sólidos e instalações que estejam de acordo com um manual técnico (ou norma vigente) não é apenas uma formalidade, mas uma necessidade para que o sistema solar dure, seja seguro e transforme investimentos financeiros em ganhos lucrativos. Em um clima onde o mercado está se tornando mais regulado e competitivo a cada dia, escolher equipamentos que tenham certificação internacional e suporte pós-venda

abrangente não é apenas uma questão de cautela também é uma forma de maximizar o retorno sobre um investimento feito em energia limpa e distribuída.

Tabela 3 – Comparativo técnico de inversores On-Grid

| Marca | Modelo | Potência Nominal (kW) | Eficiência (%) | Número de MPPTs | Faixa de Tensão (V) | Interface de Comunicação |
|---------|---------------|-----------------------|----------------|-----------------|---------------------|--------------------------|
| Growatt | MOD 5000TL3-X | 5,0 | 98,4 | 2 | 160 – 1000 | Wi-Fi / LAN |
| Solis | 6K-3G | 6,0 | 98,3 | 2 | 120 – 600 | Wi-Fi |
| Fronius | Primo 5.0-1 | 5,0 | 97,8 | 2 | 150 – 800 | Wi-Fi / RS485 |

Fonte: Growatt (2023); Solis (2023); Fronius (2022)

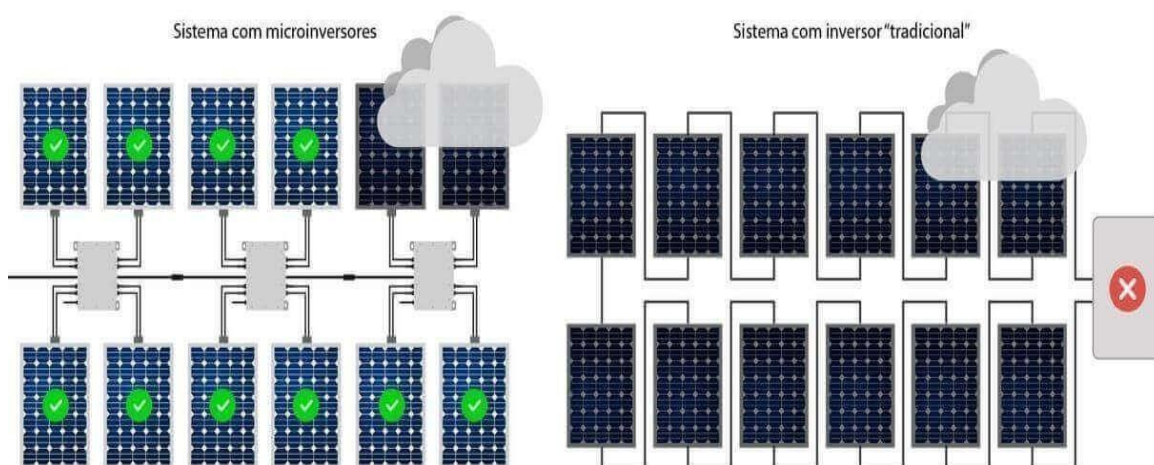
A maioria desses modelos conta com interface de monitoramento via Wi-Fi, permitindo visualização em tempo real da produção e diagnóstico de falhas.

Contudo, os inversores On-Grid têm limitações importantes: não operam durante quedas da rede elétrica, por exigência de segurança contra ilhamento, e não controlam o fluxo de energia para baterias ou cargas críticas, então não possuem essas tecnologias a mais. Porém, o inversor String, não deixa de ser menos importante ou menos tecnológico do que o inversor híbrido, mas sim desempenhado o papel pelo qual foi designado, pois o inversor híbrido, seria mais para consumidores, que realmente necessita de energia elétrica 24h por dia

6.2.4 Microinversores: Independência e Modularidade

Os microinversores surgiram como alternativa mais moderna, sendo instalados individualmente ou em pares por módulo solar. Essa arquitetura elimina o problema de perdas por mismatch (diferença de desempenho entre painéis), pois cada módulo funciona como uma unidade independente.

Figura 17- Diferença de Micro Inversor e Inversor convencional



Fonte: NeoSolar

A Enphase, líder nesse segmento, destaca em seu manual técnico que “o microinversor IQ7+ maximiza a produção em instalações com múltiplas orientações e sombreamento parcial, com rendimento até 8% superior em condições desafiadoras” (Enphase, 2023, p. 15). Além disso, a empresa oferece garantia de 25 anos para seus equipamentos algo incomum em inversores string.

A desvantagem principal dos micro inversores está no custo inicial, que pode ser até 25% maior por watt instalado, e na necessidade de maior número de conexões e cabos, pois como ele trabalha como circuito independente, em estilo paralelo, ele consegue gerar tensões diferentes

Tabela 4 – Comparativo de micro inversores

| Marca | Modelo | Potência por Módulo (W) | Eficiência (%) | Comunicação | Garantia |
|----------|--------|-------------------------|----------------|-----------------------|----------|
| Enphase | IQ7+ | Até 440 | 96,5 | Enlighten / Wi-Fi | 25 anos |
| Deye | M60A | 600 (2 × 300W) | 95,8 | RS485 / Wi-Fi | 10 anos |
| Hoymiles | MI-600 | 2 × entrada 300W | 96,0 | Sub-GHz / App própria | 12 anos |

Fonte: Enphase (2023); Hoymiles (2023); Deye (2023)

6.3 Inversores Híbridos: Flexibilidade, Backup e Inteligência Energética

O cenário energético no Brasil está mais intrincado, impulsionado por novas regras, custos e variações climáticas, o que exige abordagens mais adaptáveis e robustas para a produção e administração de energia, diante disso, os inversores híbridos se destacam como uma das apostas mais versáteis e eficazes na geração distribuída, com a capacidade de funcionar conectados ou independentes da rede elétrica tradicional. Esses inversores combinam, em um único dispositivo, as funções dos inversores On-Grid, que convertem a energia solar e a enviam para a rede pública, e dos controladores de carga OFF-Grid, que supervisionam o carregamento e descarregamento de baterias. Essa união de tecnologias possibilita não só o aproveitamento imediato da energia solar, mas também o seu armazenamento para uso futuro, conferindo ao sistema mais independência, gestão e confiabilidade energética. Segundo Muñoz (2023), a adoção de inversores híbridos é o caminho natural da evolução da geração fotovoltaica descentralizada, pois oferece ao usuário a possibilidade de responder ativamente às oscilações tarifárias, interrupções no fornecimento e mudanças na regulação. Além disso, com o avanço da tecnologia das baterias de lítio especialmente as de fosfato de ferro (LiFePO_4), tornou-se viável economicamente operar sistemas híbridos com elevada eficiência, durabilidade e segurança. “os inversores híbridos são peças-chave para a construção de uma matriz descentralizada, inteligente e

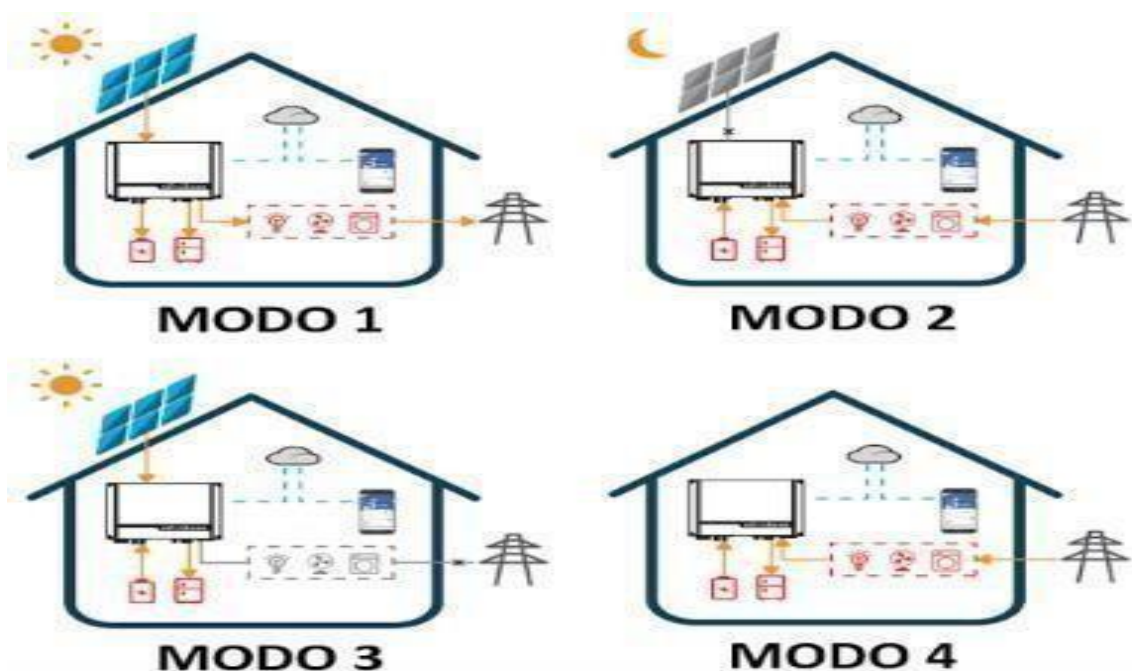
resiliente, ao permitir a integração em tempo real entre fontes distintas e cargas críticas.”(Muñoz, 2023, p. 27)

6.3.1. Arquitetura e Modos de Operação

A configuração tecnológica de um inversor híbrido de última geração representa um salto qualitativo expressivo na convergência entre a produção de energia solar fotovoltaica, o armazenamento energético em baterias e a automação inteligente da gestão de cargas elétricas. Ao contrário dos inversores convencionais utilizados em sistemas conectados à rede (On-Grid), cuja função se restringe essencialmente à injeção de energia excedente no sistema público de distribuição, os inversores híbridos operam com uma arquitetura mais sofisticada, capaz de realizar conexões simultâneas com os módulos fotovoltaicos, a infraestrutura elétrica da concessionária, bancos de baterias de íon-lítio ou chumbo-ácido e, em configurações específicas, até mesmo com fontes geradoras auxiliares, como grupos geradores a combustão.

Essa estrutura versátil confere ao sistema uma elevada capacidade de gerenciamento dinâmico, além de proporcionar autonomia energética e robustez operacional, atributos que consolidam seu papel de destaque no processo de modernização e fortalecimento da geração elétrica descentralizada.

Figura 18 - Modos de operação do inversor híbrido



Fonte: PHB

Sistemas solares híbridos funcionam com base no conceito de diversos modos operacionais que operam de acordo com a condição de energia disponível, carregamento da bateria e injeções da rede. Esse modo inteligente de operações não só permite eficiência energética, como também garante a confiabilidade e segurança do fornecimento, condições padrões de irradiação solar, a energia produzida pelos módulos fotovoltaicos atende ao consumo local da unidade para maximizar o autoconsumo, qualquer produção excedente de energia solar é enviada para recarregar os bancos de baterias, onde é armazenada como eletricidade para uso posterior. Se ainda houver energia extra quando as baterias atingirem a capacidade máxima, ela pode ser devolvida à rede, compensando o proprietário através de um sistema de compensação de energia em forma de créditos na conta.

Quando não há energia solar suficiente produzida, como à noite ou durante um dia nublado, o sistema híbrido torna-se útil de forma complementar, onde ele aciona a reserva de energia armazenada nas baterias para suprir o vazio em conjunto com a energia da rede. Dessa forma, tudo continua funcionando perfeitamente e você não paga mais caro só porque suas

concessionárias geram mais demanda durante o pico noturno, pois você tem um sistema de compensação energética

Na ocorrência de uma queda de rede, o sistema híbrido trocará automaticamente para o modo de segurança, onde as cargas mais importantes são então atendidas pela energia solar disponível e pela energia armazenada nas baterias, pois é importante para evitar perdas devido a cortes de energia.

Além disso, em casos onde a produção solar não atende a todas as demandas simultaneamente, o sistema híbrido também recarregará as baterias com energia da rede, onde o maior nível de controle garante que o usuário possa decidir sobre o método ideal para carregar as baterias para uso futuro, alinhando-o a uma tarifa diferente, se necessário, para explorar plenamente os benefícios financeiros e operacionais do sistema.

A estrutura de modo de operação multimodo dos sistemas híbridos não só indica uma solução técnica madura, mas também é uma resposta prática à demanda energética atual, que garante independência, autossuficiência e previsibilidade, e está se tornando cada vez mais uma ferramenta útil em um ambiente onde o aumento do ICMS, interrupções de fornecimento e o desenvolvimento de geração distribuída são uma realidade no Brasil.

Em termos técnicos, o coração de um inversor híbrido é um conversor CC/CC com tecnologia MPPT para maximizar a energia solar utilizando módulos fotovoltaicos, onde essa energia é estabilizada e depois transformada em corrente alternada (CA) por meio de um inversor bidirecional ou unidirecional (CC/CA), que pode fornecer cargas locais e, em alguns casos, se permitido pela configuração do sistema e regulamentos existentes, alimentar o excedente de energia para a rede. Ele incorpora uma porta de comunicação inteligente que pode controlar valores precisos de tensão, corrente e estado de carga (SOC) para maximizar a vida útil da bateria, desempenho e confiabilidade, o uso de um relé de comutação ultrarrápido torna possível para o sistema fornecer cargas críticas automaticamente no evento de uma falha de rede (reemitindo energia automaticamente para o equipamento dentro de 20 ms) e continuar a operação estável sem interrupções para o usuário.

Em regiões onde a rede elétrica é ausente ou extremamente instável, o modo OFF-grid se mostra indispensável, pois, com este modo, o sistema opera de maneira totalmente autônoma, combinando a energia solar captada em tempo real com a energia armazenada nas baterias, garantindo fornecimento constante mesmo em locais isolados. Para aplicações comerciais ou industriais de maior porte, a operação em paralelo é um recurso fundamental, pois com, inversores híbridos avançados, que são capazes de funcionar sincronizados com até 16 unidades simultaneamente, promovendo uma verdadeira microrrede interna com gerenciamento inteligente de fontes e cargas. Essa capacidade é especialmente útil em condomínios, centros comerciais e instalações agrícolas de médio porte, onde a modularidade e a redundância são essenciais.

Figura 20 – Sistema OFF Grid



Fonte: Trx Solar

Um exemplo concreto que ilustra a versatilidade dessa tecnologia é o modelo Deye SUN- 8K-SG04LP1-EU, analisado detalhadamente neste trabalho com base em seu manual técnico (DEYE, 2023). Este equipamento suporta tensão fotovoltaica de entrada de até 1.000 volts, o que amplia consideravelmente a liberdade no arranjo das strings, reduz perdas resistivas

e facilita a instalação de sistemas maiores, contando com dois rastreadores MPPT independentes, pelo qual permite a conexão de conjuntos de módulos com orientações distintas, o que é vantajoso em telhados de múltiplas águas ou em ambientes parcialmente sombreados, com a sua compatibilidade com baterias de lítio do tipo LiFePO_4 , aliada ao suporte total aos protocolos de comunicação CAN e RS485, garante integração eficiente com baterias inteligentes como os modelos BOS-G, SE-G5.1 Pro-B e Pylontech., onde o fabricante informa que o modelo atinge eficiência de conversão superior a 97,6%, o que o posiciona entre os mais eficientes da categoria. Como destaca o próprio fabricante, "a arquitetura de inversores como o SUN-8K não apenas permite a integração de múltiplas fontes, mas transforma o sistema solar em um centro de gestão energética, operando de forma preditiva e autônoma" (DEYE, 2023). Essa visão reflete o avanço tecnológico que os inversores híbridos representam, sendo mais do que apenas um conversor de corrente, eles se comportam como uma central de inteligência energética, interpretando padrões de consumo, controlando prioridades de carga e interagindo com a rede de forma estratégica.

A crescente sofisticação dessas soluções aponta para um cenário futuro onde os inversores híbridos estarão integrados a outras tecnologias emergentes, como sistemas de mobilidade elétrica com capacidade bidirecional (Vehicle-to-Home – V2H), redes inteligentes (smart grids) e plataformas de gerenciamento energético em nuvem com uso de inteligência artificial, sendo essa convergência não apenas ampliando a autonomia do consumidor, como também consolida o papel da geração distribuída na construção de uma matriz energética mais resiliente, democrática e sustentável (AIE, 2023; ONU, 2023).

Tabela 5.– Especificações do inversor Deye SUN-8K-SG04LP1-EU

| Parâmetro | Valor |
|--------------------------|------------------------------------|
| Potência Nominal AC | 8 kW |
| Tensão Máxima FV | 1000 V |
| Corrente de Entrada MPPT | 11 A × 2 |
| Tensão da Bateria | 48 V |
| Eficiência de Conversão | 97,6% |
| Modos de Operação | Grid-tie, Backup, Off-grid |
| Comunicação | CAN, RS485, Wi-Fi |
| Compatibilidade | LiFePO ₄ , Chumbo-ácido |

Fonte: DEYE (2023), manual do inversor híbrido monofásico

Além disso, o sistema pode priorizar cargas críticas, configurar SOC mínimo para preservação da bateria e operar em condições climáticas extremas com proteção contra sobretensão, curto-circuito e sobrecarga.

6.3.2. Usos e Vantagens do Inversor Híbrido no Mundo Real

Os inversores híbridos desempenham um papel crucial nas instalações modernas de geração distribuída, distinguindo-se não apenas como dispositivos de conversão e condicionamento de energia, mas fundamentalmente por sua capacidade de interagir com múltiplas fontes e cargas. Inversores padrão foram combinados com gerenciamento de baterias e capacidades de backup automático, tornando a tecnologia resultante incrivelmente eficaz em termos de otimização e economia de energia.

Em um país tão diverso em termos de infraestrutura elétrica como o Brasil, seu uso transcende a praticidade e, em muitos casos, se torna uma necessidade técnica e social significativa. Especialmente no uso da tarifa branca (quando o preço da energia depende do horário), os inversores híbridos oferecem vantagens práticas tremendas, como carregamento e descarregamento inteligente das baterias, a energia solar gerada durante o dia pode ser usada para alimentar dispositivos ou armazenada para uso nas horas mais caras, ou seja, das 18h às 22h, onde, essa organização permite reduzir o recebimento mensal de energia, pela rede elétrica da concessionária, bem como o autoconsumo, reduzindo a exposição à tarifa.

Segundo Muñoz (2023), descobriu que sistemas híbridos bem projetados e programados com algoritmos de EMS (Sistema de Gerenciamento de Energia) podem alcançar economias de até 40% na conta final para residências que consomem mais de 500 kWh/mês, apesar da cobrança de Fio B da Lei nº 14.300/2022 (Brasil, 2022), pois lembrando, que a conta de luz, nunca vai chegar a 0, devido, as cobranças mínimas, que a concessionária emprega, como o próprio fio b, iluminação pública, e se sua casa é monofásica, bifásica ou trifásica, o que impacta, diretamente, no valor final da sua conta, sendo segundo a CPFL (2025), “ Para um sistema monofásico, seria equivalente a 30Kwh/mês + iluminação pública + Imposto + TUSD, já para bifásico, seria 50Kwh + iluminação pública + impostos + TUSD, e para o sistema trifásico, seria 100Kwh/mês + iluminação pública + Impostos + TUSD, sendo a cobrança mínima da concessionária, por utilização da rede”

Outra aplicação interessante é em áreas onde a energia elétrica é instável (áreas rurais ou remotas das regiões metropolitanas), por exemplo, para bairros sujeitos a apagões recorrentes e prolongados. A função de backup do inversor híbrido é acionada automaticamente em milissegundos quando a rede falha, fornecendo suprimento contínuo para cargas essenciais, como sistemas de segurança, iluminação, bombas hidráulicas e roteadores. Esse benefício técnico é particularmente atraente para consumidores que possuem equipamentos sensíveis ou que não podem ficar sem operação, como fazendas com dispositivos automáticos de irrigação ou casas com sistemas de suporte à

vida, pois com o rápido tempo de resposta no modo de backup, bem abaixo de 20 ms, conforme detalhado nos manuais técnicos da linha SUN da Deye (2023), fornece uma comutação imperceptível para o usuário.

Por fim, há uma grande oportunidade para inversores híbridos em áreas remotas, populações isoladas e inacessíveis, como na Amazônia e em certas regiões rurais do país onde o modo OFF-grid é obrigatório e garante autonomia completa ao sistema fotovoltaico, operando apenas a partir de geração solar direta e armazenamento em baterias de lítio, como nos modelos SE-G5.1 Pro-B ou BOS-G, que investigamos neste trabalho. A capacidade dessas baterias de trabalhar com alta profundidade de descarga, por mais de 6.000 ciclos de vida, e a alta eficiência energética das mesmas, permitem a previsão de uma solução resiliente, duradoura e segura para consumidores que residem fora do SIN.

Tanto técnica quanto economicamente, os inversores híbridos apresentam uma série de vantagens em comparação aos sistemas solares normais, além do uso diário, sendo uma das mais significativas a independência ajustável, o que significa que os consumidores podem decidir não apenas o momento do uso de energia., mas sim, trazendo uma flexibilidade, pelo qual é importante do ponto de vista do setor energético nacional, onde os preços frequentemente aumentam além da inflação, e em muitos casos, determinar a origem da energia utilizada faz a diferença entre uma estabilidade financeira familiar e o consumo excessivo dessa energia.

Considerando o meio ambiente, os sistemas híbridos também contribuem diretamente para a redução das emissões de gases de efeito estufa, pois evitam a geração de usinas termelétricas baseadas em combustíveis fósseis durante os picos de consumo de energia, assim como se tornam uma forma de produção descentralizada, reduzindo as perdas usuais na transmissão de energia em longas distâncias que no Brasil podem atingir até 15% nas extensas redes de transmissão (EPE, 2023). Assim, a descentralização estimulada pelos inversores solares híbridos não é apenas técnica, mas também política e ecológica, uma vez que aproxima a geração de energia limpa e de boa

qualidade para todos, já que as linhas de transmissão nem sempre alcançam o consumidor final, o que impossibilita o consumo da energia produzida.

Outro ponto válido a ser considerado é o aumento do valor da propriedade devido aos sistemas solares híbridos, que oferecem benefícios intangíveis aos compradores, que sempre consideram casas com sistemas solares híbridos completos, especialmente com as opções de automação, baterias inteligentes e monitoramento remoto, muito mais atraentes do que as demais. Essa conscientização decorre da atratividade sustentável do local e também da sensação de autonomia e redução de custos em perspectiva, que foram mencionadas como características valorizadas por compradores urbanos e rurais (Zanoni, 2018). O efeito mais importante da instalação de sistemas híbridos tem sido a redução da dependência da rede elétrica.

A perda de certeza dos modelos de compensação básica e gratuita na nova regulamentação significa que a rede que fornece informações e conectividade eventualmente se tornará responsabilidade do usuário, que pagará as despesas correspondentes no futuro através de sua conta. Portanto, ao gerar e consumir sua própria energia no local, os usuários se protegem dessas mudanças regulatórias, aprimorando a estabilidade financeira de seu investimento e reduzindo os potenciais impactos de quaisquer aumentos tarifários futuros.

Considerando o uso e os benefícios dos inversores híbridos como um todo, a consideração final é que a decisão de selecionar inversores híbridos é mais do que apenas uma decisão técnica; é uma decisão estratégica para desempenho energético, independência, cuidado ambiental e estabilidade econômica. Atualmente, os inversores híbridos são uma parte fundamental do processo de avançar em direção à energia distribuída, bem como à modernização do setor elétrico brasileiro e ao desenvolvimento de uma geração mais inteligente, resiliente e limpa. "A combinação de gerenciamento de energia inteligente e a flexibilidade operacional dos inversores híbridos coloca essa tecnologia como o alicerce da nova geração de plantas fotovoltaicas descentralizadas" (Muñoz, 2023, p. 31).

Com softwares de monitoramento como Solarman Smart (compatível com a série Deye) e Enlighten (da Enphase), os usuários podem monitorar o desempenho da geração de energia em tempo real, definir parâmetros de operação personalizados, diagnosticar falhas precocemente, reduzir custos de manutenção e melhorar o retorno sobre o investimento, assim a partir desses argumentos, pode-se inferir que os inversores híbridos não devem ser vistos apenas como elementos acessórios ou alternativos, mas como o cérebro dos sistemas solares, capazes de convertê-los em entidades autônomas, economicamente atraentes e resilientes que enfrentarão as próximas décadas de desafios tarifários, regulatórios e climáticos, não deixando seu custo inicial, abalar a decisão do investimento ao longo prazo

7. COMPARAÇÃO ENTRE SISTEMAS SOLARES ON-GRID E HÍBRIDOS

Com a crescente expansão da energia solar fotovoltaica no Brasil, principalmente devido à publicação da Lei nº 14.300/2022, que estabeleceu o marco legal para a geração distribuída, novas perspectivas foram abertas, bem como desafios regulatórios, tecnológicos e financeiros relevantes para o setor elétrico nacional e para os consumidores que buscam alcançar maior autonomia energética por meio da autogeração.

Nesse sentido, uma das principais preocupações está relacionada à escolha estratégica entre sistemas fotovoltaicos conectados à rede pública (soluções On-Grid) ou soluções híbridas, que implicam em diferentes consequências técnicas, econômicas e operacionais. Este capítulo pretende explorar melhor essa comparação usando um método estabelecido, fortalecido por evidências, modelagem computacional, guias técnicos produzidos por fabricantes renomados e estudos aplicados à realidade brasileira, examinando trabalhos científicos já publicados, assim, mostrando qual sistema se encaixa melhor no perfil do consumidor, trazendo um sistema consultivo para o cliente, pois os dois sistemas são excelentes, porém, um dos dois, pode se encaixar mais no perfil de consumo que o outro, principalmente, a necessidade do uso contínuo da energia, assim entra os bancos de bateria que permite manter

alguma horas de energia, caso ocorra um apagão ocasionado pela concessionária, ou apenas, para diminuir o consumo da energia da rede elétrica pública

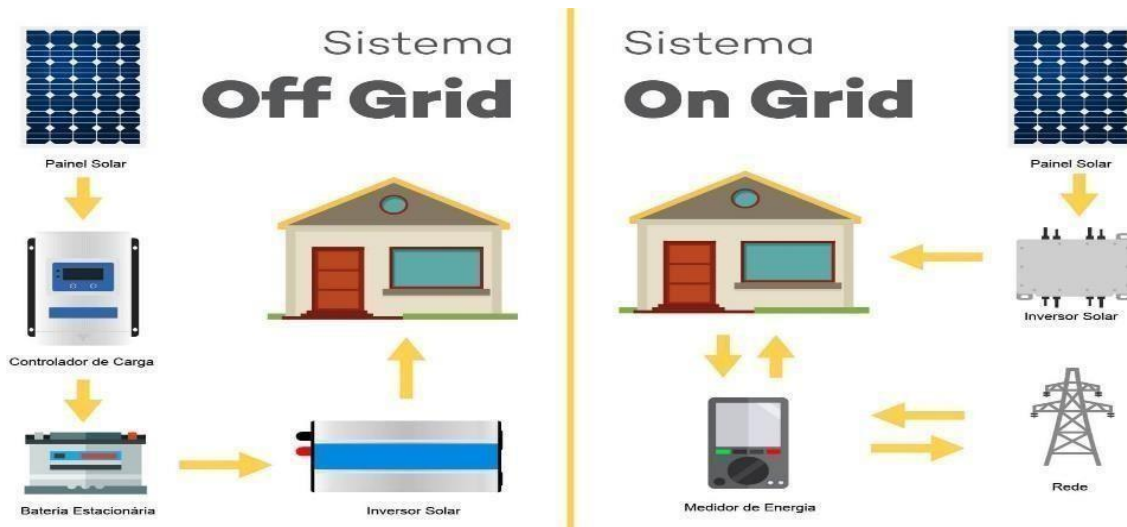
7.1 Planta Elétrica e Operação do Fluxo de Energia

O sistema elétrico da planta solar é como a energia é produzida, transmitida, usada e armazenada, assim como em um caso de sistema de Medição Líquida (On-Grid), a energia solar que se torna corrente contínua a partir dos painéis fotovoltaicos é conectada ao inversor; então, é através do inversor que é transformada em corrente alternada, para uso por aparelhos elétricos, para fins de consumo elétrico ou ser exportada diretamente para a rede elétrica.

Caso seu sistema solar esteja produzindo mais energia do que você consome, ao final do mês gera créditos que podem ser consumidos dentro de um período de até 60 meses. Assim, o sistema sempre depende do funcionamento da rede elétrica, já que a regulamentação da ANEEL (2023) não permite sua operação sem ter a rede e cortar o inversor em caso de falha ou manutenção da rede, porém os sistemas híbridos operam com maior flexibilidade, sempre preferindo a energia gerada por si mesmos, armazenando a superprodução em baterias de lítio (LiFePO_4), para uso subsequente quando houver falha na rede elétrica, ou quando melhor for utilizá-la.

Existem 4 padrões de trabalho para o inversor no modo automático, pode ser por retorno da energia solar, da eletricidade da rede, das baterias, do que o usuário programou e do que é prioridade para consumo (Inversor (2023) Deye SUN-8K-SG04LP1-EU Manual do usuário), assim sendo, um sofisticado gerenciamento de energia pelo qual é visto por Mallmann (2024) como "uma evolução técnica que será necessária para lidar com a complexidade da nova regulamentação e permitir que o cliente controle melhor seu preço de energia."

Figura 21 – Sistema On-grid e Sistema Híbrido “ Off-Grid “



Fonte : NeoSolar

7.2 Eficiência Global: Conversão, Armazenamento e Perdas

A eficiência de um sistema fotovoltaico depende não apenas da qualidade dos módulos solares, mas também da performance dos inversores, perdas por cabeamento, eficiência de carregamento das baterias, comportamento térmico dos equipamentos, e se possui sombreamento, em sistemas On-Grid que operam com média de 88 a 91% de eficiência, segundo dados de campo extraídos dos inversores Solis e Growatt (Fronius, 2023).

Sistemas híbridos, por sua vez, têm eficiência levemente inferior devido às perdas adicionais das próprias baterias, pois o manual da SE-G5.1 Pro-B (2023) informa uma eficiência de 96% no ciclo carga/descarga, enquanto o relatório técnico da BOS-G aponta estabilidade acima de 94% em temperaturas até 40°C (BOS-G, 2023), quando considerado o ciclo completo (conversão → armazenamento → reconversão), a eficiência média do sistema híbrido varia entre 83 a 87%, dependendo da profundidade de descarga (DoD), regime térmico e número de ciclos. “Embora o sistema híbrido tenha eficiência marginalmente inferior, sua vantagem está na capacidade de deslocar o uso da

energia para horários mais caros, o que maximiza a economia final.”(MUÑOZ, 2023, p. 31)

7.3 Viabilidade Econômica: Investimento, Tarifa e Payback Real

A análise econômica entre sistemas On-Grid e Híbridos não deve se restringir ao custo inicial, porém é necessário considerar variáveis como economia mensal, manutenção, regime tarifário (tarifa convencional ou branca), cobrança da TUSD (Fio B) pelo qual se eleva durante o tempo, impostos e tempo de retorno (payback). Além disso, vale lembrar que a comparação entre os sistemas, vai de acordo com a necessidade do consumidor, caso o consumidor não possa ficar de jeito nenhum sem energia, o sistema Híbrido, vai ser a melhor opção possível para esse cliente, então não restringir ao custo inicial, mas sim o custo durante toda vida útil do projeto

A diferença de investimento inicial é compensada, no caso do sistema híbrido, por maior economia futura em contextos com tarifa branca, e por evitar gastos com geradores ou perdas em apagões, sistemas híbridos aumentam o valor do imóvel e oferecem autonomia energética parcial, pois apesar de ter um custo inicial elevado, devido as baterias, o sistema, em si, se paga durante os anos, porém depende de qual finalidade o consumidor final, quer para esse sistema, pois, necessita verificar e realizar um bom dimensionamento do sistema, e entender, se realmente a pessoa necessita de um sistema desse, ou se quer apenas colocar, para ter uma segurança maior, pois, com uma análise preventiva, do uso desse sistema híbrido, podemos verificar, se é economicamente viável e se faz sentido a utilização desse sistema, pois pessoas que pagam uma tarifa menor, não possui tantas quedas de energia na região, e não possui equipamentos tão críticos assim, precisa verificar, se nesse caso compensa ou não o sistema híbrido, mas sim, um sistema on-grid, já suportaria a demanda dele

7.4 Confiabilidade Elétrica e Redundância

A confiabilidade do fornecimento também é um fator que se tornou cada vez mais importante, principalmente devido ao aumento das falhas no Sistema Interligado Brasileiro (SIN). Os sistemas On Grid não funcionam durante apagões, pois os inversores são projetados por razões de segurança para desligar nessas ocasiões, pois talvez uma manutenção na linha esteja sendo realizada e, se não houver desligamento, ela injetará essa energia na linha de transmissão, o que pode dar um choque elétrico na equipe de manutenção, ou também, ocasionados pelo própria apagão em si, porém, não é por que o sistema On-grid, desliga, que é um sistema ineficiente, muito pelo contrario, ele ajuda na redução da conta de luz, além de gerar um energia renovável, ajudando na sustentabilidade do planeta, e na eficiência, de produzir, sua própria energia elétrica.

No entanto, em sistemas híbridos que possuem sistemas de bateria LiFePO₄ e BMS inteligente, os inversores de Carvonic Solar para Economia de Energia (ESCS) fornecem uma resposta instantânea e fornecem energia continuamente para cargas prioritárias predefinidas (às quais recomendamos conectar apenas as essenciais), já que essa tecnologia de bateria tem um tempo de operação muito específico, e se conectarmos mais cargas, o tempo de operação será reduzido, pois mais cargas estarão puxando a energia reservada delas.

As baterias BOS-G e SE-G5.1 Pro-B, em sistemas compatíveis com inversores Deye e Growatt, proporcionam uma troca em menos de 20 ms, que é mais rápida do que UPS, assim essas séries fazem a transferência sem falhas, o que significa que não há perda de energia e a transferência é tão rápida, você não precisa reiniciar seus equipamentos, como geladeira, roteadores, PC ou luzes LED, apenas sendo, uma pausa muito curta e ele continua a operar, o que evitará danos aos seus dispositivos elétricos queimando, causados por sobrecarga, ou oscilações de frequência, ou qualquer coisa do gênero, que possa trazer danos aos equipamentos. As funções de deslocamento de carga (priorização de carga) podem ser implementadas no sentido de até mesmos as cargas não essenciais podem ser

desligadas no modo de backup e cargas críticas serem alimentadas, chamando para a aplicação do método em ambientes com equipamentos médicos, vigilância do local, servidores de rede e qualquer equipamento que não deve ser desligado. Resiliência energética não é apenas sobre economizar dinheiro, é sobre manter as coisas funcionando, de forma eficiente, sem prejuízos aos aparelhos eletrônicos, e priorizando as cargas essenciais(Zanoni, 2018, p. 71)

7.5 Sustentabilidade, Ciclo de Vida

Nacionalmente e globalmente, a necessidade de um modelo de energia mais limpo e sustentável tem impulsionado a transição em direção a fontes renováveis e limpas. Portanto, neste cenário de mudança estrutural, as fontes de energia do tipo solar, sejam conectadas à rede elétrica do tipo industrial ou híbrida com armazenamento, também são importantes para a redução das emissões de gases de efeito estufa, e fazem parte diretamente do cumprimento no Brasil para se solidificar em relação aos acordos internacionais de mudanças climáticas, estabelecidos em congressos e convenções, para uma transição energética, mais justa e renovável. Para cada megawatt-hora gerado pelas fontes solares, há, em média, cerca de 0,45 toneladas de CO₂ que não são liberadas no ambiente em comparação com a energia produzida por carvão ou gás natural de energia fóssil (ONU, 2022), assim aplicando essa equivalência a uma residência com uma instalação fotovoltaica de 8 kWp produzindo cerca de 8.500 kWh/ano, isso significa uma redução de aproximadamente 3,8 a 4,2 toneladas de CO₂ por ano. Para colocar isso em perspectiva, é a economia de carbono equivalente a plantar cerca de 190 árvores por ano e demonstra o enorme valor ambiental que a geração solar distribuída oferece no nível residencial, mostrando que se cada residência, contada com esse tipo de sistema, seria uma grande quantidade equivalente de menos emissões de poluentes.

Mas se você estiver indo para sistemas que incluem baterias para armazenamento, é importante considerar as considerações do ciclo de vida completo desses dispositivos, pois os materiais e processos utilizados durante a fabricação do dispositivo, durante o uso prolongado e durante o descarte

inadequado do dispositivo podem representar riscos ambientais significativos se não forem manuseados adequadamente.

As tecnologias de armazenamento precisam ser implementadas levando em consideração que uma redução do impacto ambiental desde a produção até o descarte final deve ser garantida, para permitir que a energia solar continue sendo sustentável, também do ponto de vista do ciclo de vida em todas as fases de sua aplicação. As baterias de fosfato de ferro de lítio (LiFePO_4) são consideradas uma das opções mais ecologicamente corretas com o melhor desempenho e baixa utilização de recursos limitados de acordo com a tecnologia disponível.

Ao contrário do chumbo metálico usado em baterias de chumbo-ácido típicas, chumbo arsênico e outros metais pesados, como cobre, que precisam de descarte adequado devido à sua natureza tóxica, o LiFePO_4 é uma bateria ecologicamente amigável, é mais fácil de armazenar e reciclar, tornando-se uma escolha preferida para ambientes residenciais e urbanos. A literatura recente relatou que mais de 90% dos componentes usados em uma bateria LiFePO_4 (elétrodos, eletrólitos e caixas) são potencialmente recicláveis, conforme testemunhado pelo artigo técnico da SGS (2023). Essa alta eficiência de reciclagem, mais uma vez, confirma a adequação dessas baterias como uma alternativa de desenvolvimento, apoiada pelos princípios da economia circular e da sustentabilidade ecológica.

Tabela 7– Ficha Técnica da Bateria de íon-lítio do tipo fosfato de ferro e lítio (LiFePO₄)

| Parâmetro principal | SE-GS.1 Pro-B | |
|------------------------------------|---|-----|
| Composição química da bateria | LiFePO ₄ | |
| Capacidade (Ah) | 100 | |
| Escalabilidade | Máx. Pacote de 64 unidades (327 kWh) em paralelo (máx. 32 unidades sem configuração externa) | |
| Tensão nominal (V) | 51.2 | |
| Tensão operacional (V) | 43.2~57.6 | |
| Energia (kWh) | 5.12 | |
| Energia utilizável (kWh) [1] | 4.61 | |
| Corrente de carga/ descarga (A) | Recomendação [2] | 50 |
| | Max. [2] | 100 |
| | Pico(2 minutos, 25°C) | 150 |

Fonte : Manual das baterias de íon-lítio do tipo fosfato de ferro e lítio (LiFePO₄)

A Recuperação da bateria, é um processo hidrometalúrgico avançado, pois é usado para recuperar alumínio, cobre, lítio, ferro e outros materiais metálicos valiosos na bateria LiFePO₄ abandonada, e a eficiência geral da recuperação é superior a 80%.

As etapas específicas são as seguintes:

- O processo de recuperação do material do cátodo, onde o coletor de uma folha de alumínio é um metal anfótero, e então a solubilização e a recuperação do alumínio são realizadas, primeiramente dissolvendo o alumínio em uma solução alcalina de NaOH, de modo que o alumínio entre na solução na forma de NaAlO₂, e o filtrado, após o processo de filtração, é submetido a tratamento de neutralização com solução de ácido sulfúrico para precipitar um produto final de Al(OH)₃. A maior parte do alumínio é precipitada quando o valor de pH excede 9,0, e o Al(OH)₃ resultando em uma substância que é quimicamente puro quando testado.

- Em seguida, o depósito no filtro é dissolvido por ácido sulfúrico e peróxido de hidrogênio, de modo que o $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ e Li_2SO_4 do fosfato de ferro-lítio entrem na solução, tornando-se $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ e Li_2SO_4 , e o mesmo é separado do negro de fumo e revestimento de carbono da superfície do fosfato de ferro-lítio.
- O filtrado é ajustado com NaOH e água amônia, e o ferro é primeiramente precipitado como $\text{Fe}(\text{OH})_3$; a solução restante é precipitada com a solução saturada de Na_2CO_3 a 90°C , já que o FePO_4 é ligeiramente solúvel em HNO_3 , e o resíduo de filtro é dissolvido por HNO_3 e H_2O_2 , que é diretamente precipitado com FePO_4 , e as impurezas como o negro de fumo são separadas na solução ácida, e depois o $\text{Fe}(\text{OH})_3$ é respectivamente lixiviado do resíduo de filtro esgotado, e o Li_2CO_3 é precipitado com a solução saturada de Na_2CO_3 a 90°C .

Considerando a simplicidade do processo de recuperação do material do ânodo, a pureza do cobre pode ser superior a 99% após as placas de ânodo serem removidas, o que pode ser usado para a purificação do cobre eletrolítico e, portanto, o material do diafragma é basicamente livre de poluição e sem valor de reciclagem. A estabilidade térmica dessas baterias é outra questão pertinente, tornando-as mais seguras para operação e minimizando a possibilidade de aquecimento excessivo, incêndio ou explosão das baterias, trazendo uma maior segurança, através das variações térmica da bateria

Modelos como o SE-G5.1 Pro-B, mesmo quando demonstrado o desejado funcionamento com uma faixa de temperatura elevada na documentação técnica, têm uma vida útil aprimorada e podem ser geridos inteligentemente com a ajuda de sistemas BMS (Sistema de Gerenciamento de Bateria), que monitoram continuamente a voltagem, temperatura e SOC (SE-G5.1 Pro-B, 2023). Em termos de sustentabilidade, a longa vida das baterias LiFePO_4 é certamente um fator relevante, uma vez que números elevados de ciclos, por

exemplo, mais de seis mil ciclos a 80% de profundidade de descarga (DOD), devem minimizar a necessidade de substituição das mesmas e assim reduzir a quantidade de resíduos químicos descartados a cada ano.

Esta natureza de longa vida se traduz em uma diminuição da pressão dos insumos minerais estratégicos, como o lítio, na cadeia produtiva dos ESSs e, como consequência, assegura o retorno do investimento no armazenamento de energia, em termos econômicos e ambientais, assim tendo uma vida de utilização do equipamento, relativamente alto, em comparação ao tempo de fabricação, uso e descarte da mesma, assim sendo, um período, relativamente melhor economicamente e ecologicamente viável

Através de um estudo completo de avaliação do ciclo de vida (LCA), garante-se que integrar baterias LiFePO_4 em sistemas híbridos amplia efetivamente os benefícios ambientais da energia solar fotovoltaica, através do alinhamento da eletricidade extra produzida durante o dia, onde está fora do horário de pico, e depois descarrega-la com maior demanda de eletricidade, ou com redução do abastecimento da rede pública.

Nesse próprio armazenamento e redistribuição de energia, pode haver uma queda de dependência direta nas plantas de reserva termoelétrica, que são caracterizadas por serem mais poluentes e menos eficientes, promovendo assim uma diminuição do uso no método tradicional e mais estabilidade do sistema em nível nacional da energia elétrica.

Com esse cenário, fica claro que a sustentabilidade dos sistemas híbridos fotovoltaicos está inerentemente relacionada a dois aspectos: a escolha adequada de seus componentes e a presença de instrumentos que incentivem a logística reversa e o fortalecimento de uma cadeia nacional de reutilização e reciclagem de baterias, pois sem o incentivo do governo, com políticas públicas, e incentivos fiscais, além do próprio descarte correto das baterias, não faria sentido, o uso de uma geração de energia, sem esses dois pilares básicos, trazendo algo, economicamente viável e sustentável. Nessa linha, a padronização técnica e a consolidação da indústria de processos de acordo com a simulação de economia circular serão pontos estratégicos a seguir para garantir que as melhorias tecnológicas relacionadas à tecnologia

solar andem de mãos dadas com os critérios de sustentabilidade ambiental conhecidos a longo prazo.

Assim, no Brasil, temos uma oportunidade histórica de sermos protagonistas nesta transição energética, de aderir a uma matriz de geração mais limpa, distribuída e socialmente e ambientalmente responsável, baseada na racionalidade das escolhas tecnológicas que demandam benefícios individuais e os impactos socioambientais de toda a cadeia produtiva dos equipamentos produzidos, pois a matriz energética brasileira, já é uma das mais renováveis do mundo, porém, quanto maior for essa quantidade de energia renováveis menos dependência, vamos ter de fontes não renováveis e poluentes, diminuindo assim, a produção causada por essas fontes e um aumento nas fontes renováveis

Tabela 8 – Indicadores ambientais e reciclabilidade

| Critério | Bateria LiFePO₄ | Bateria Chumbo-Ácido |
|---|-----------------------------------|-----------------------------|
| Emissões Indiretas (kg CO₂/ciclo) | 0,015 | 0,040 |
| Risco de Vazamento de Ácido | Nulo | Alto |
| Reciclabilidade Média (%) | 90% | 70% |
| Vida Útil Média (ciclos) | 6.000 a 10.000 | 400 a 800 |

Fonte: SGS (2023); BOS-G; ONU (2022)

8 CONCLUSÃO GERAL E RECOMENDAÇÕES TÉCNICAS E ECONÔMICAS

8.1 Considerações Finais: Um Panorama da Geração Solar no Brasil

O presente trabalho procurou construir uma análise técnico-científica aprofundada sobre a energia solar fotovoltaica, especificamente comparando dois modelos amplamente adotados no Brasil: os sistemas On-Grid e os sistemas Híbridos. Para isso, adotou-se uma abordagem metodológica que reuniu dados empíricos, simulações computacionais, análise normativa e interpretação crítica de fontes técnicas como manuais de equipamentos (Deye, SE-G5.1 Pro-B, BOS-G), dissertações acadêmicas (Zanoni, 2018; Mallmann, 2024), relatórios internacionais (AIE, ONU), e ferramentas de modelagem energética como o HOMER Pro.

Ao longo da pesquisa, ficou evidente que a discussão entre sistemas On-Grid e Híbridos ultrapassa a mera comparação de eficiência energética ou custo inicial, onde na verdade, de um debate estrutural, que envolve variáveis como a resiliência elétrica, a tarifação dinâmica, o papel do armazenamento, o impacto da regulação (especialmente após a Lei 14.300/2022), e os rumos da transição energética brasileira. Como demonstrado no Capítulo 4, sistemas On-Grid apresentam vantagens como menor investimento inicial, simplicidade de operação e excelente desempenho em locais com consumo diurno.

Contudo, seu modelo de funcionamento depende da rede elétrica e limita-se a compensações que, progressivamente, têm sido desestimuladas pelo novo modelo regulatório (ANEEL, 2023). Os sistemas Híbridos, por sua vez, destacam-se pela autonomia energética, capacidade de armazenamento local com baterias LiFePO_4 e inteligência operacional, ao custo de um investimento inicial mais elevado e maior complexidade técnica. A simulação realizada no Capítulo 5 reforçou esses pontos com dados concretos: embora o sistema híbrido tenha um ROI superior a 7 anos, ele oferece economia total superior, maior aproveitamento da energia local e backup para situações de falha na rede, a integração com softwares de monitoramento (Solarman, Enphase Enlighten) e protocolos inteligentes de comunicação (CAN/RS485)

demonstrou-se essencial para a eficiência e longevidade do sistema. “A análise computacional realizada com base nos parâmetros reais de uso residencial brasileiro mostra que o sistema híbrido é economicamente competitivo e tecnicamente superior quando se considera o longo prazo, a previsibilidade tarifária e a segurança energética” (Muñoz, 2023, p. 36)

8.2 Análise Crítica da Regulação Brasileira e Suas Consequências

A normatização do setor elétrico nacional tem passado por transformações significativas ao longo dos últimos anos, como a sanção da Lei nº 14.300/2022, conhecida como o Marco Legal da Microgeração e Minigeração Distribuída, a estrutura de compensação de créditos energéticos foi reformulada, onde o texto legal manteve o estímulo à geração descentralizada, entretanto impôs a progressiva cobrança da Tarifa pelo Uso da Infraestrutura de Distribuição (TUSD - Fio B) sobre a energia injetada na rede.

Essa medida visa equilibrar os encargos setoriais, mas compromete o apelo econômico dos sistemas On-Grid puros, que dependem da injeção total de excedente para compensar o consumo posterior, então na prática, isso favorece o crescimento de soluções com autoconsumo elevado, como os híbridos. Segundo Mallmann (2024, p. 40), "a mudança no modelo tarifário deverá provocar uma migração do mercado para sistemas com armazenamento e gestão local de eletricidade, nos quais a eficiência não depende da infraestrutura pública".

A atuação da ANEEL, como órgão regulador, tem sido técnica e consistente, mas a transição requer atualização constante das regras, especialmente em relação à classificação de sistemas híbridos, à tributação de energia armazenada, e à conectividade com o ambiente de contratação livre de energia. Documentos produzidos pela EPE (2023) e pelo ONS (2022) já alertam que o avanço da geração elétrica descentralizada exige redes mais flexíveis, protocolos de resposta à demanda e mecanismos de compensação diferenciados para usuários que utilizam baterias.

Ainda é necessário criar uma regulamentação específica para microrredes urbanas com armazenamento, nas quais a energia gerada

localmente abastece grupos de consumidores, principalmente, nas horas de pico. O Brasil segundo a legislação, é proibido que a energia excedente seja para venda gerado a partir de energia armazenada, o que hoje é um entrave para a rentabilização completa de sistemas híbridos com alta capacidade de baterias, como os baseados em tecnologias como a SE-G5.1 Pro-B (Datasheet, 2023).

8.3 Relevância das Baterias LiFePO_4 e Inversores Híbridos na Transição Energética

A revolução dos sistemas fotovoltaicos está diretamente relacionada ao avanço das baterias de íon-lítio de fosfato de ferro (LiFePO_4). A tecnologia oferece segurança térmica, longa vida útil (até 10.000 ciclos com 80% DoD) e alta eficiência energética, com baixíssimas perdas na conversão (cerca de 4% em média, conforme SE-G5.1 Pro-B, 2023), ao contrário das baterias de chumbo-ácido ou níquel-cádmio, as LiFePO_4 são ambientalmente mais seguras, pois não contêm metais pesados nem emitem gases perigosos.

O relatório da SGS (2023) destaca que o modelo BOS-G apresenta estabilidade eletroquímica superior a 95% até o milésimo ciclo, com degradação de apenas 10% da capacidade nominal, onde os inversores híbridos analisados, como o Deye SUN-8K-SG04LP1- EU e seus derivados trifásicos e monofásicos, demonstram capacidade de gerenciar eficientemente fontes solares, banco de baterias e conexão com a rede elétrica. Esses equipamentos suportam protocolos de comunicação como CAN e RS485, essenciais para sincronizar o BMS das baterias e otimizar a curva de carga e descarga. “A sinergia entre baterias LiFePO_4 , inversores híbridos programáveis e softwares de gestão representa o estado da arte da geração distribuída com inteligência energética” (Zanoni, 2018, p. 81)

8.4 Recomendações Técnicas para Consumidores e Projetistas

Com base na análise técnica, normativa e econômica desenvolvida ao longo deste trabalho, é possível delinear um conjunto de recomendações práticas e detalhadas que se aplicam a diferentes perfis de usuários,

consumidores e profissionais do setor de energia solar. A correta seleção do sistema fotovoltaico não deve considerar apenas o investimento inicial ou a eficiência nominal, mas sim um conjunto mais amplo de variáveis, como o perfil de consumo, o regime tarifário, a confiabilidade da rede local, a regulamentação vigente e a capacidade de expansão futura da instalação.

8.4.1 Consumidores residenciais sob tarifa branca

Para residências inseridas no regime tarifário branco onde há variação horária do valor do kWh a recomendação mais tecnicamente adequada é a instalação de sistemas híbridos programáveis, que permitam o carregamento das baterias por energia solar em períodos de baixa demanda (e baixa tarifa) e o uso estratégico dessa energia durante os horários de ponta (geralmente entre 18h e 22h).

Essa abordagem reduz significativamente a dependência da rede elétrica nos momentos de maior custo, maximizando o retorno financeiro sobre o investimento ao longo dos anos, essa estratégia foi validada por simulações realizadas com o software HOMER Pro visto anteriormente, demonstrando que, apesar do custo inicial mais elevado dos sistemas híbridos, a economia mensal acumulada pode ser até 34% superior à de sistemas On-Grid puros.

Além disso, essa prática permite mitigar os efeitos da Lei nº 14.300/2022, que impõe a cobrança do Fio B sobre a energia injetada, tornando a autoconsumo local priorizado com armazenamento a alternativa economicamente mais vantajosa no médio e longo prazo. “A combinação entre tarifação horária e sistemas híbridos representa a próxima fronteira da geração distribuída residencial, tanto em termos econômicos quanto de soberania energética.” (Muñoz, 2023, p. 34)

8.4.2 Consumidores rurais e regiões com instabilidade de rede

Em áreas remotas ou regiões onde a rede elétrica apresenta interrupções frequentes, os sistemas híbridos com função de backup tornam-se não apenas

recomendados, mas essenciais, para esses cenários, pois nesses contextos, a estabilidade no fornecimento de energia é frequentemente comprometida por fatores como baixa capilaridade da distribuição, vulnerabilidade a intempéries e baixa manutenção da infraestrutura pública.

A instalação de inversores híbridos compatíveis com baterias de íon-lítio (LiFePO_4), como os modelos Deye SUN-8K-SG04LP1-EU e SUN-25K-SG01HP3-EU, associados a bancos de baterias como o SE-G5.1 Pro-B ou BOS-G, permite que o consumidor rural tenha autonomia energética por diversas horas ou até dias, em casos de sistemas mais robustos, e de como foi dimensionado, o sistema de baterias. Esses bancos oferecem capacidade de expansão modular, ciclos superiores a 6.000 e integração inteligente com o inversor via protocolo CAN, o que proporciona não apenas desempenho técnico, mas também segurança no uso e durabilidade superior a 15 anos. Além disso, o uso do sistema em modo isolado (“off-grid”) pode ser configurado de forma automática, garantindo alimentação de cargas prioritárias como iluminação, bombas de água, geladeiras e equipamentos de irrigação mesmo durante falhas prolongadas da rede. “O sistema híbrido é o único modelo tecnicamente viável para consumidores em áreas onde a instabilidade da rede compromete o mínimo funcionamento de atividades básicas.” (Zanoni, 2018, p. 72)

8.4.3 Estabelecimentos comerciais, condomínios e pequenas indústrias

Para estabelecimentos com consumo elevado, diversidade de cargas e múltiplos horários de funcionamento, como lojas, padarias, pequenos mercados, clínicas ou edifícios multifamiliares, recomenda-se a adoção de microrredes internas com sistemas híbridos de médio porte. Nesses casos, o uso de inversores trifásicos inteligentes como o SUN-25K-SG01HP3-EU permite a gestão de múltiplas fontes de energia (solar, rede e banco de baterias), bem como o controle seletivo de cargas, com a utilização de painéis com rastreadores individuais (ex: TIGO ou microinversores), é possível manter

a performance mesmo em condições de sombreamento parcial, comuns em áreas urbanas densas.

Além disso, a capacidade de operar em paralelo com outras unidades, distribuir energia entre diferentes pontos internos da rede, e realizar monitoramento remoto por plataformas como Solarman ou Enphase Enlighten torna o sistema altamente eficiente e gerenciável em tempo real, permitindo até mesmo que o condomínio ou empresa estabeleça metas de consumo interno, previsibilidade de faturas e segurança energética durante quedas. A adoção dessas tecnologias também viabiliza a participação futura no mercado de resposta à demanda, uma tendência regulatória prevista pela CCEE e MME para permitir que consumidores ativos contribuam com a estabilidade da rede nacional.

8.4.4 *Projetistas, engenheiros e empresas integradoras*

Para profissionais responsáveis pela elaboração, instalação e manutenção de sistemas fotovoltaicos, torna-se indispensável a atualização constante quanto às normas técnicas e regulamentações vigentes, como:

8.4.4.1 NBR 5410 – Instalações elétricas de baixa tensão

8.4.4.2 NBR 16690 – Sistemas fotovoltaicos – Requisitos gerais

8.4.4.3 Resolução Normativa ANEEL 1000/2021 – Regras gerais para acesso à rede

Além disso, o domínio das exigências das concessionárias, os critérios de homologação de inversores híbridos e microinversores (com certificações INMETRO, CE, SGS), e a capacidade de planejar bancos de baterias com profundidade de descarga controlada (DoD), proteções contra surtos, seccionadoras e stringboxes adequadas à tensão de operação são condições fundamentais para garantir desempenho, durabilidade e segurança das

instalações. O correto dimensionamento de sistemas de monitoramento, curvas de geração, e simulação com softwares como HOMER Pro ou PVsyst deve integrar o escopo mínimo dos projetos, para verificação da exequibilidade do projeto, então a qualidade da engenharia, mais do que o tipo de equipamento, é o fator decisivo para a performance e retorno financeiro do sistema.

8.5 Recomendações para Políticas Públicas e Incentivos Fiscais

A consolidação da energia solar como agente da transição energética no Brasil precisa ocorrer não apenas em nível tecnológico, mas também em termos do estabelecimento de políticas públicas coerentes e descentralizadas, alinhadas com o perfil social, regional e fiscal do país. O recente evento, caracterizado pela aprovação da Lei Nº 14.300/2022, embora tenha estabelecido um marco regulatório estável, também provou que, sem incentivos financeiros e políticas específicas para incluir armazenamento de energia, sistemas híbridos têm dificuldade em criar uma penetração de mercado significativa, devido ao alto custo inicial do projeto.

Um dos maiores obstáculos é que atualmente não existem incentivos fiscais diretamente para sistemas de baterias, o que ocorre diferentemente dos painéis fotovoltaicos isentos de ICMS e PIS/COFINS em vários estados e ao longo da cadeia produtiva os bancos de baterias LiFePO₄ ainda são considerados bens de luxo ou acessórios, e isso eleva sua importação em até 35% acima do custo.

Por exemplo, na Alemanha, Japão e Austrália, a instalação de baterias de autossuficiência é efetivamente subsidiada ou dedutível de impostos, já no Brasil, o governo poderia adotar um crédito fiscal para os contribuintes que instalam sistemas híbridos (com base no desempenho anual) a fim de estimular a implementação desse tipo de solução, especialmente em lares de classe média e em áreas rurais com baixa confiabilidade da rede.

Finalmente, além de tudo que já foi explicado, é necessário um marco legal para microrredes autônomas e grupos híbridos com armazenamento que permitam grupos de consumidores, nos quais uma unidade é compartilhada com armazenamento local. As práticas atuais de geração compartilhada (REN

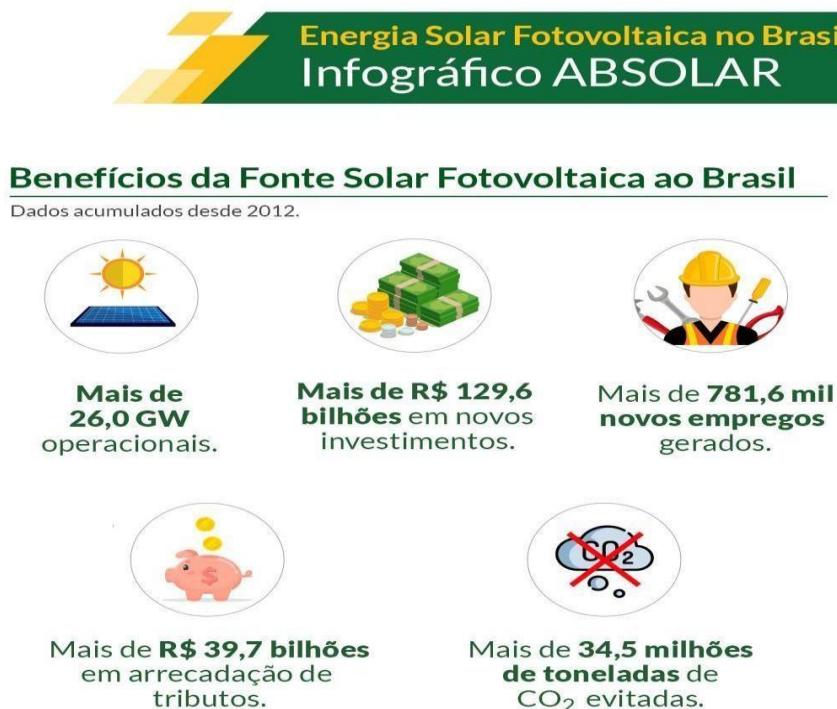
482/2012) não abordam suficientemente o uso compartilhado de baterias, o que impede empreendimentos coletivos de maior inteligência energética.

Um esforço conjunto entre MME, ANEEL, BNDES e estados pode criar linhas de financiamento dedicadas a tecnologias sustentáveis que tenham maior conteúdo nacional, incluindo, por exemplo, evolução das células de baterias EVE (LiFePO_4), inversores híbridos com BMS integrado, sistemas de monitoramento e software de automação de carga, projetos como o ProGD deveriam ser ampliados e inseridos no que serão as diretrizes do Plano Nacional de Energia (PNE 2050), já reconhecendo o armazenamento como um pilar futuro estratégico de resiliência energética (EPE, 2023). “O poder público não pode mais tratar baterias e híbridos como opções secundárias. Eles têm que ser o coração da política energética brasileira para os próximos 20 anos” (Zanoni, 2018, p. 84).

8.6 Sustentabilidade e Futuro da Geração Distribuída

A geração distribuída fotovoltaica não representa apenas uma inovação técnica ou uma alternativa econômica, ela constitui, na prática, como modelo descentralizado de cidadania energética, no qual o consumidor passa a ter papel ativo na matriz elétrica, contribuindo para a descarbonização da economia, a resiliência comunitária e o uso eficiente dos recursos locais, além disso, o consumidor tem a visão de onde, esta sendo gerado a sua energia, pelo qual é um forma renovável e sustentável, comparadas com outras fontes de energia, além de utilizar um lugar que não é ocupado, geralmente nos telhados, assim, não tirando um lugar físico, para a montagem desses painéis, assim consegue gerar sua própria energia, e verificar o quanto ele está gerando e o quanto esta gastando com a energia puxada da rede pública, tendo um controle melhor dos seus gastos energéticos, além da grande expansão exponencial da energia solar no Brasil

Figura 22- Benefícios da fonte fotovoltaica no Brasil



Fonte : Absolar 2025

Nesse contexto, os sistemas híbridos com armazenamento energético têm importância estratégica, ao reduzir a injeção de picos na rede, diminuem os investimentos em infraestrutura de transmissão, além de permitir o aproveitamento da energia solar durante a noite ou em dias nublados, o que melhora o fator de capacidade global do sistema solar residencial. Estudos da AIE (2023) indicam que países com alta penetração de híbridos apresentam menor variação de frequência no sistema elétrico, menor acionamento de termelétricas e maior previsibilidade na gestão de carga, já no ponto de vista ambiental, a geração distribuída híbrida com LiFePO₄ evita emissões, elimina o uso de combustíveis fósseis em geradores emergenciais e reduz o risco de apagões em regiões críticas, como zonas rurais e periféricas urbanas. As baterias atuais, conforme comprovado nos testes SGS com modelos BOS-G e SE-G5.1 Pro-B, já apresentam desempenho sustentável e reciclabilidade superior a 90%.

A longo prazo, espera-se que a convergência entre energia solar, mobilidade elétrica e automação residencial crie um novo ecossistema energético, no qual as baterias de veículos elétricos também atuem como unidades de armazenamento domiciliar (conceito V2H – Vehicle to Home), e os sistemas híbridos passem a ser parte da infraestrutura crítica de escolas, hospitais e serviços essenciais. A Geração distribuída não é apenas um modelo técnico, ela redefine as relações entre sociedade, energia e território, exigindo novo pensamento urbano, ambiental e econômico”(MUÑOZ, 2023, p. 40)

8.7 Síntese Final: Contribuições Técnicas e Acadêmicas do Estudo

Este trabalho buscou promover uma reflexão aprofundada sobre os sistemas fotovoltaicos On-Grid e Híbridos no contexto brasileiro, estabelecendo uma análise técnico-científica que apresenta aspectos tecnológicos, regulatórios, econômicos e sociais, pois ao logo desse trabalho, mostrou que, foram identificadas diversas contribuições relevantes, tanto para o campo acadêmico quanto para a prática profissional no setor energético.

A primeira contribuição refere-se à comparação técnica entre os dois sistemas de geração solar distribuída, explorando desde o desempenho energético e as perdas operacionais até a integração entre os diversos componentes, como inversores, baterias e sistemas de monitoramento, mostrando que a análise se fundamentou em dados técnicos atualizados de fabricantes e em normas brasileiras e internacionais aplicáveis (ABNT, 2020; IEC, 2021), permitindo uma avaliação criteriosa da eficiência de cada arquitetura tecnológica ao longo do tempo. Conforme apontado por Muñoz (2023), a flexibilidade operacional dos sistemas híbridos confere uma vantagem estratégica para consumidores em contextos de instabilidade elétrica e tarifa dinâmica.

Em seguida, a utilização do software HOMER Pro como ferramenta de simulação consolidou a segunda grande contribuição do trabalho, pois mostrou algo mais tangível, invés de ser algo mais técnico, assim a partir da modelagem de um perfil real de consumo residencial, foi possível verificar indicadores como

o tempo de retorno sobre investimento (payback), o custo nivelado da energia (LCOE) e a influência de variáveis climáticas e tarifárias sobre o desempenho econômico dos sistemas, mesmo diante de um custo inicial mais elevado, os sistemas híbridos apresentam desempenho superior em termos de autonomia e economia acumulada ao longo dos anos resultados que condiz com o estudo do Mallmann (2024).

No plano regulatório, a pesquisa promoveu uma leitura crítica e atualizada das diretrizes estabelecidas por órgãos como a ANEEL, o MME, a EPE, bem como instituições internacionais como a ONU, a OCDE, a IEA e o ETTO, permitindo compreender como a evolução normativa, especialmente após a promulgação da Lei nº 14.300/2022, influencia diretamente a viabilidade dos sistemas solares no Brasil, pois a inovação tecnológica e ampliação da geração distribuída ficou evidente, demonstrando que os avanços técnicos devem caminhar em sintonia com o aprimoramento das políticas públicas (Brasil, 2022; ANEEL, 2023).

Outro ponto de destaque foi a exploração das tecnologias mais recentes aplicadas ao setor solar, como os microinversores com rastreamento individual (MPPT), os inversores híbridos de operação inteligente e as baterias de lítio ferro fosfato (LiFePO_4) com BMS avançado. Essas soluções não apenas ampliam a eficiência dos sistemas, como também garantem maior segurança, monitoramento detalhado e resiliência operacional, como o Deye SUN-8K-SG04LP1-EU e o SE-G5.1 Pro-B que demonstraram, em manuais técnicos, sua capacidade de operar em diversos modos (On-grid off-grid e backup), otimizando o aproveitamento da energia conforme o perfil tarifário e climático regional (DEYE, 2023; SGS, 2023).

A descentralização, aliada à flexibilidade e ao uso de armazenamento inteligente, configura-se como um passo essencial para a construção de um sistema elétrico mais resiliente e sustentável, conforme apontado por relatórios da Agência Internacional de Energia (IEA, 2023) e da Organização das Nações Unidas (ONU, 2022).

9 CONCLUSÃO

O presente trabalho objetivou realizar uma análise bibliográfica e técnico-científica comparativa entre os sistemas fotovoltaicos On-Grid e Híbridos, com ênfase em seus aspectos operacionais, econômicos, regulatórios e tecnológicos, com uma abordagem metodológica que integrou revisão bibliográfica, dados oficiais, e análise normativa, foi possível construir um panorama abrangente sobre as potencialidades e limitações de cada modelo frente às atuais demandas do setor energético brasileiro. A investigação demonstrou que os sistemas On-Grid, por sua simplicidade de instalação, menor custo inicial e ampla disponibilidade de equipamentos no mercado nacional, seguem como uma alternativa viável, especialmente para consumidores de perfil urbano com acesso a uma rede elétrica estável, porém os efeitos da Lei nº 14.300/2022 particularmente no que se refere à cobrança progressiva da TUSD (Fio B) alteraram significativamente o retorno financeiro desses sistemas, exigindo um redimensionamento das análises de viabilidade, principalmente para consumidores que consomem mais energia em horários de pico.

Nesse contexto, os sistemas híbridos seria uma solução mais moderna, com capacidade de operar de forma autônoma em caso de falhas na rede, associada ao uso inteligente de baterias de íon-lítio (LiFePO_4) com sistemas de gerenciamento avançado (BMS), oferece uma robustez operacional e uma flexibilidade tarifária do que os sistemas convencionais não são capazes de proporcionar, pois os inversores híbridos Deye SUN-8K-SG04LP1-EU e baterias como a SE- G5.1 Pro-B destacaram-se tanto por sua eficiência energética quanto por sua compatibilidade com as exigências normativas nacionais e internacionais (Deye, 2023).

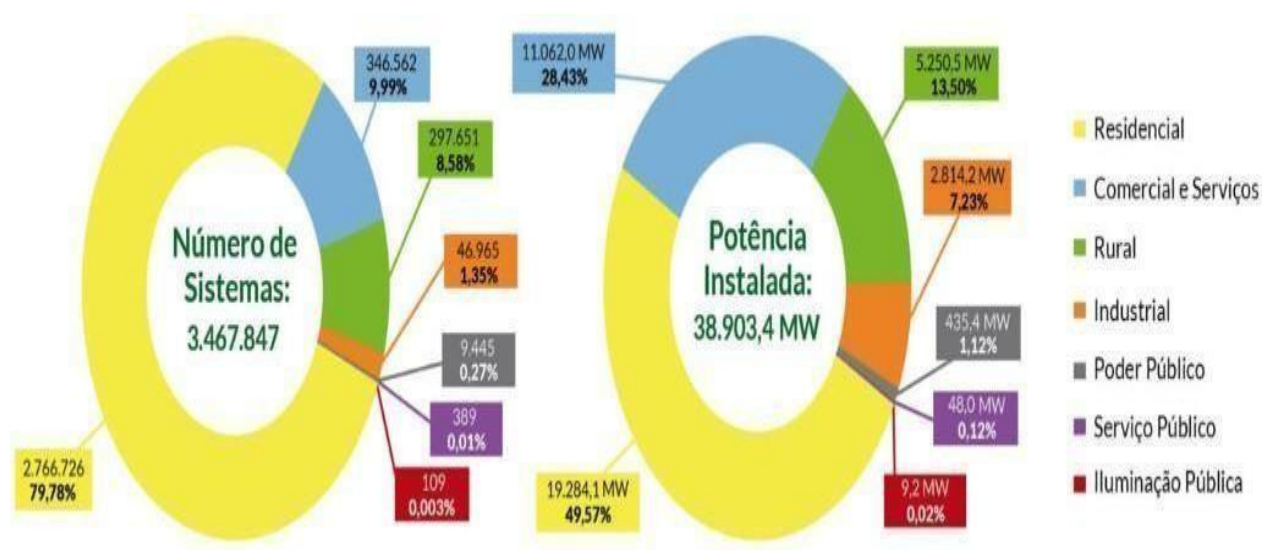
Aspectos técnicos e econômicos, o trabalho evidenciou o papel fundamental das instituições reguladoras e dos organismos internacionais na consolidação da geração distribuída no Brasil, assim Órgãos como a ANEEL, a CCEE, o MME e a EPE, bem como entidades internacionais como a AIE, a ONU e a OCDE, têm contribuído com diretrizes, normas e projeções que orientam o avanço do setor de forma sustentável e democrática, entre

regulação, inovação tecnológica e participação ativa da sociedade civil se revela indispensável para que a transição energética ocorra de maneira justa e eficiente (IEA, 2023; ONU, 2022; Brasil, 2022). No campo acadêmico, este estudo contribui ao oferecer uma síntese técnica e normativa atualizada, de propor caminhos possíveis para a evolução da política energética brasileira, com informações técnicas e econômicas em uma linguagem acessível, pelo qual se destina a auxiliar consumidores, projetistas, empreendedores e formuladores de políticas públicas em suas decisões.

A principal conclusão do trabalho é que os sistemas híbridos representam a solução mais tecnicamente robusta, economicamente viável e ambientalmente sustentável para o contexto energético brasileiro atual, pois a capacidade de combinar eficiência, autonomia e adaptação tarifária permite que o consumidor assuma um papel mais ativo na gestão de sua energia, ao mesmo tempo em que contribui para a diversificação e descentralização da matriz elétrica nacional.

Ao analisar os sistemas solares no Brasil, percebemos uma grande capacidade instalada e um possível aumento dessa capacidade ao longo do tempo, pois a tendência é os sistemas ficarem mais viáveis, e com mais incentivos governamentais, assim tendo mais adesão do público geral, para obtenção de energia descentralizada, assim desafogando a geração centralizada, onde toda classe brasileira, pode ter esse sistema, claramente, a escolha do sistema On grid ou sistema Híbrido, se deriva, pelo perfil de consumo e a necessidade da utilização da energia elétrica, onde quem precisa exclusivamente da energia elétrica 24h por dia, como comércios e talvez indústrias, o sistema híbrido vai ser a melhor escolha possível de geração. Sendo uma geração mais autônoma e menos dependente da concessionária de energia, e de suas possíveis interrupções, seja por causa de intempéries, ou quebra de algum equipamento, que causa os famosos “apagões”, assim tendo a possibilidade do uso da energia para algumas horas a mais

Figura 24 - Geração distribuída de FV no Brasil por classe de consumo



Fonte: Aneel/Absolar 2025

Portanto, este trabalho de conclusão de curso apresentou um estudo comparativo entre sistemas fotovoltaicos On-Grid e Híbridos, equilibrando a situação dentro da energia brasileira, que provoca uma busca intensificada por fontes renováveis, os efeitos da crise climática e um futuro com crescente conscientização social sobre a ideia de autonomia energética, ou seja, a menor dependência de terceiros para produzir e usar essa energia. Como as tecnologias solares são limpas, abundantes e modulares, elas se tornaram a alternativa mais promissora para sistemas de energia descentralizados na rede nacional (IEA, 2023).

Nesse contexto, este trabalho foi concebido como uma análise bibliográfica comparativa limitada, com base em análises técnicas, econômicas, ambientais, regulatórias e de gestão entre essas duas categorias de sistema de geração solar distribuída, essa abordagem foi realizada principalmente por meios teóricos, incluindo uma pesquisa bibliográfica com os autores mais significativos no assunto, além das informações técnicas obtidas

diretamente dos fabricantes como Deye, Enphase, BOS-G e SE-G5.1, e de trabalhos técnicos e científicos sobre o assunto. Isso permitiu a imersão na linha do tempo da energia solar no Brasil, dos primeiros avanços regulatórios como a ANEEL Resolução Normativa nº 482/2012 até a recente Lei nº 14.300/2022, enfatizando a cobrança progressiva TUSD Fio B, e revelando os incentivos e desafios da microgeração no país, como apontado pela própria ANEEL (2023). Este período de desregulamentação está forçando consumidores e integradores a adotarem novos processos de planejamento energético.

Os sistemas híbridos se tornaram relevantes do ponto de vista técnico, do valor das propriedades e da estratégia, à medida que utilizam o potencial de armazenamento das baterias LiFePO_4 com inversores inteligentes, o que permite uma melhor intimidade e otimização dos fluxos de energia, bem como o manejo de cargas críticas e o uso prioritário durante tarifas favoráveis. Tais baterias, como BOS-G e SE-G5.1 Pro-B, são recicláveis até 90%, possuem excelente estabilidade térmica e podem durar mais de 6.000 ciclos a 80% de profundidade de descarga. Graças a essas características, são definitivamente adequadas para uso doméstico e comercial de maneira sustentável e segura.

Do ponto de vista ambiental, os dois sistemas investigados ajudam a reduzir a emissão de gases de efeito estufa. As Nações Unidas (ONU 2022) informam que uma média de 0,45 toneladas métricas de CO_2 é economizada por megawatt-hora de energia solar produzida. No entanto, os sistemas híbridos ampliam esse benefício, pois em momentos de alta demanda (e usando fontes elétricas mais poluentes, como usinas termelétricas ligadas em crise hídrica), menos eletricidade é retirada da rede para alimentar o sistema híbrido, essas baterias também podem ser programadas para colocar essa energia no sistema em um momento específico, economizando ainda mais na conta de energia. Os sistemas híbridos apoiam o cumprimento dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) das Nações Unidas e aumentam a resiliência energética das unidades consumidoras, tornando-as mais autossuficientes em relação à sua concessionária de energia.

A pesquisa também abordou as implicações sociais e políticas da democracia energética, já que a energia é um bem comum e acessível a todos os contribuintes, fazendo com que as pessoas sofram bastante sem energia elétrica nos dias de hoje. Tornando-os cada vez mais dependentes dessa fonte de energia, como resultado, o desenvolvimento da geração distribuída, particularmente híbrida, independente e de tipos inteligentes, pode ser uma alternativa para a inclusão energética, desenvolvimento regional e equidade tarifária, acima de tudo para comunidades isoladas ou sensíveis a cortes no fornecimento de energia elétrica. Em alguns casos, a energia é uma necessidade essencial que não pode ser evitada, como o caso de um consumidor que precisa de aparelhos elétricos para sobreviver ou um negócio que precisa de uma semana de trabalho de 168 horas de energia ininterrupta. Isso significa que é necessário que políticas públicas estimulem não apenas a instalação de sistemas solares, mas também a instalação de baterias usando linhas de crédito, subsídios, isenções fiscais e concessão de empréstimos para tecnologias limpas, como já fazem alguns estados brasileiros e países da UE (OCDE, 2023). Com baterias, o sistema terá mais independência, embora ainda não acessível para a maioria das pessoas, já que as baterias são consideradas uma tecnologia cara no momento.

Ao longo do desenvolvimento deste Projeto de Conclusão de Curso, queríamos expandir e ser críticos ao avanço sobre os aparelhos tecnológicos que estão mudando a matriz elétrica. Entendemos que a decisão entre um sistema conectado à rede ou híbrido não é apenas uma decisão financeira, mas uma definição estratégica que se baseia em várias variáveis, como perfil de consumidor, geografia, forma de tarifas, legislação vigente, infraestrutura local e, principalmente, os objetivos de longo prazo do consumidor. Isso prova que os sistemas fotovoltaicos são de fato uma opção para a diversificação da matriz energética brasileira, promovendo maior independência energética, assim as reflexões não se limitam a números ou esquemas, mas também se voltam para o campo da sustentabilidade, soberania energética e cidadania ambiental, trazendo uma energia mais sustentável e renovável.

De acordo com os resultados da investigação, pode-se inferir que o sistema híbrido é a alternativa mais confiável e flexível para satisfazer a demanda energética brasileira no futuro, apesar de seu alto investimento inicial. Mas ele também tem incontestavelmente seu lugar, sendo capaz de "ilhamento", "resiliência" e "inteligente" em si mesmo, combinado com o fato de ser bom para o meio ambiente e pela independência do usuário, faz com que seja cada vez mais recomendado.

Com a eletricidade doméstica sendo menor, uma perspectiva segura, a TOU e a transição energética se tornando mais reais, também se evitam problemas que as interrupções tendem a causar, incluindo aparelhos danificados, a questão é se podemos garantir que esses avanços tecnológicos sejam acompanhados por políticas regulatórias que sejam inclusivas e eficazes com apoio do governo para que o sol que brilha para todos realmente gere energia para todos, tornando o uso de energia mais estável e justa.

Assim, este trabalho contribui com uma variedade de pontos de vista entre aqueles analisados aplicados aos dois sistemas fotovoltaicos, sendo possível demonstrar o que melhor se adapta a cada perfil de consumidor e verificar o melhor sistema para cada perfil, dado que cada cliente tem um perfil de custo e financeiro diferenciado. É interessante notar que dos dois sistemas, o sistema híbrido é um sistema mais confiável e isolado da concessionária, o que é mais vantajoso para o cliente final, mas, para consumidores que não gostam de desembolsar muito dinheiro em um investimento único, o sistema On-Grid é ideal.

10. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABSOLAR. **Infográficos do mercado de energia solar no Brasil**. Disponível em: <https://www.absolar.org.br/mercado/infografico/>. Acesso em: 10 maio 2025.

ALMEIDA, T. H. S.. **Dimensionamento de um sistema fotovoltaico grid-tie e off-grid para alimentação de energia elétrica do Laboratório Hidráulico do CCTA/UFCG**. 2018. Disponível em : <http://dspace.sti.ufcg.edu.br:8080/jspui/handle/riufcg/4375>. Acesso em : 08 de maio de 2025

BARBOSA FILHO, W. P.; AZEVEDO, A. C. S. **Geração distribuída: vantagens e desvantagens**. Disponível em: <https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/secretarias/sntep/quem-e-quem/sociedade-civil-1/inee>. Acesso em: 29 maio 2025.

BENEDITO, R.; MACEDO, W. N.; ZILLES, R. A produção de eletricidade com sistemas fotovoltaicos conectados à rede: barreira econômica, pontos de conexão e mecanismos de incentivo. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENERGIA SOLAR, 2., 2008, Florianópolis. **Anais** [...]. Florianópolis: ABENS, 2008.

BENEDITO, Ricardo da Silva. **Caracterização da geração distribuída de eletricidade por meio de sistemas fotovoltaicos conectados à rede, no Brasil, sob os aspectos técnico, econômico e regulatório**. 2009. Tese (Doutorado em Energia) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009. Disponível em: <http://www.iee.usp.br/sites/default/files/biblioteca/producao/2009/Artigos%20de%20Periodicos/beneditocaracterizacao.pdf>. Acesso em: 10 maio 2025.

BRASIL. **Brasil 2045: o futuro da energia**. São Paulo: Observatório do Clima, 2024. Disponível em: https://monitor2045.oc.eco.br/wp-content/uploads/2024/12/Brasil2045_Futuro_Energia.pdf. Acesso em: 12 maio 2025.

BRASIL. Agência Nacional de Energia Elétrica. **Nota técnica sobre o impacto da GD no sistema de distribuição**. Brasília: ANEEL, 2023.

BRASIL. Agência Nacional de Energia Elétrica. **Resolução Normativa nº 482, de 17 de abril de 2012**. Estabelece as condições gerais para o acesso de microgeração e minigeração distribuída aos sistemas de distribuição. Disponível em: <https://www.aneel.gov.br>. Acesso em: 10 maio 2025.

BRASIL. **Lei nº 14.300, de 6 de janeiro de 2022**. Institui o Marco Legal da Geração Distribuída. Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, 7 jan. 2022.

CÂMARA DE COMERCIALIZAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA. **Manual de procedimentos operacionais da CCEE**. São Paulo: CCEE, 2023.

COMPANHIA ENERGÉTICA DE MINAS GERAIS. **Mapa de disponibilidade de geração distribuída**. Disponível em: <https://geo.cemig.com.br/mca>. Acesso em: 10 maio 2025.

CENTRO DE REFERÊNCIA PARA ENERGIA SOLAR E EÓLICA SÉRGIO BRITO. **Módulos fotovoltaicos**. 2022. Disponível em: http://www.cresesb.cepel.br/index.php?section=com_content&lang=pt&cid=331.

Acesso em: 4 fev. 2022.

DEYE. **Manual técnico**: inversor híbrido SUN-8K-SG04LP1-EU. China, 2023.

DIAS, M. V. X.; BORTONI, E. C.; HADDAD, J. Geração distribuída no Brasil: oportunidades e barreiras. **Revista Brasileira de Energia**, v. 11. Disponível em: <https://sbpe.org.br/index.php/rbe/article/view/181>. acesso em 18 maio de 2025.

ENPHASE. **IQ7+ Microinverter Datasheet**. Califórnia: Enphase Energy, 2023.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Plano decenal de expansão energética 2032**. Brasília: MME/EPE, 2023.

FADIGAS, A. F. A. **Energia solar fotovoltaica**: fundamentos, conversão e viabilidade técnico-econômica. São Paulo: USP, 2018.

GREENER. **Análise do Marco Legal da Geração Distribuída**: lei 14.300/2022. Disponível em: <https://www.greener.com.br/estudo/estudo-estrategico-geracao-distribuida-2022-mercado-fotovoltaico-2-semester/>. Acesso em: 10 maio 2025.

GREENER. **Estudo estratégico**: armazenamento de energia 2025. Disponível em: <https://www.greener.com.br/categoria-estudos/armazenamento/>. Acesso em: 10 maio 2025.

GREENER. **Estudo estratégico**: geração distribuída 2023. Disponível em: <https://www.greener.com.br/estudos/landing-page-analise-do-marco-legal-da-geracao-distribuida-2023/>. Acesso em: 10 maio 2025.

GROWATT. **Manual MOD 5KTL-X**. Shenzhen, China: Growatt New Energy, 2023.

HOYMILES. **MI-600 Microinverter technical specification**. Hangzhou: Hoymiles Power Electronics Inc., 2023.

IEEE. Energia solar fotovoltaica de terceira geração. In: ELY, F. (org.). **Energia no Brasil: desafios e perspectivas**. Brasília: Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação, 2014.

INSTITUTO NACIONAL DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA. **Geração distribuída e conexão ao sistema elétrico**. Disponível em: <https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/secretarias/sntep/quem-e-quem/sociedade-civil-1/inee>. Acesso em: 29 maio 2025.

JA SOLAR. **Datasheet JAM72S30-545/MR**. Pequim, China, 2023.

LANA, L. T. C. *et al.* Energia solar fotovoltaica: revisão bibliográfica. **Engenharias On-line**, v. 1, n. 2, p. 21–33, 2016.

SILVEIRA, Rafaela Dizaró. **Análise comparativa entre sistemas fotovoltaicos multifuncionais de único e duplo estágios de conversão de energia**. 2019. 149 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Cornélio Procópio, 2019

MENEZES, R. M. **Sistema de armazenamento de energia utilizando baterias para melhoria da geração de energia de usina fotovoltaica**. 2022. Trabalho de

Conclusão de Curso (Especialização) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2022. Disponível em:
<https://bdta.abcd.usp.br/directbitstream/81b31e0f-f41a-4a61-86c3-ca3c95709d22/RaissaMendesMenezes.pdf>. Acesso em: 11 jul. 2025.

MONTEIRO, D. F. C. S. **Dimensionamento de um sistema de armazenamento de energia para edifícios residenciais utilizando energia solar fotovoltaica**. 2017. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade de Coimbra, Coimbra, 2017. Disponível em : <https://hdl.handle.net/10316/83051>. Acesso em: 16 de maio 2025.

MUÑOZ, A. **Análises económico de consumo eléctrico de um sistema solar fotovoltaico on-grid híbrido**. Sevilla: Universidad de Sevilla, 2023.

NAKABAYASHI, R. K. **Microgeração fotovoltaica no Brasil: condições atuais e perspectivas futuras**. 2014. Dissertação (Mestrado em Energia) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2014. Disponível em:
http://www.iee.usp.br/lfs/sites/default/files/Dissertacao_Renno_vfinal.pdf. Acesso em: 10 maio 2025.

OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO. **Relatório de estabilidade do SIN com geração distribuída**. Rio de Janeiro: ONS, 2022.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS. **Tracking SDG 7: the energy progress report**. New York: United Nations, 2023.

CENTRO DE REFERÊNCIA PARA ENERGIA SOLAR E EÓLICA SÉRGIO BRITO. **Potencial solar: Sundata V 3.0**. 2021. Disponível em:
http://www.cresesb.cepel.br/index.php#localidade_1303. Acesso em: 4 maio. 2025.

DEYE SE-G5.1 PRO-B. **Manual técnico da bateria de lítio SE-G5.1 Pro-B**. 2023. SGS – SOCIÉTÉ GÉNÉRALE DE SURVEILLANCE. Relatório de conformidade técnica – BOS-G e SE-G5.1. Hamburgo: SGS, 2023.

BRASIL. Agência Nacional de Energia Elétrica. Superintendência de Gestão Tarifária. **Ranking das tarifas**. [S. l.]: ANEEL, 2019. Disponível em:
<http://www.aneel.gov.br/ranking-das-tarifas>. Acesso em: 20 jun. 2019.

TIBA, L. G. **Projeto de um sistema de energia solar fotovoltaico para aplicação em residência**. 2013. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia de Controle e Automação) – Instituto de Ciência e Tecnologia, Universidade Estadual Paulista – Câmpus de Sorocaba, Sorocaba, 2013. Disponível em:
<https://www.sorocaba.unesp.br/Home/Graduacao/EngenhariadeControleeAutomacao/galdenoro1906/galdenoro-tcc-luiz-gustavo-tiba-tguniversidade-estadual-paulista-julio-de.pdf>. Acesso em: 10 maio 2025.

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA. **Estudo comparativo entre o dimensionamento de um sistema fotovoltaico convencional e híbrido**. Guaratinguetá: Faculdade de Engenharia da UNESP, 2020.

VILLALVA, M. **Energia solar fotovoltaica: conceitos e aplicações**. 2. ed. São Paulo: Érica, 2015.

WEG. **Sistema fotovoltaico on-grid e off-grid**: saiba as diferenças e as vantagens de cada tipo. Disponível em: <https://www.weg.net/solar/blog/sistema-fotovoltaico-on-grid-e-off-grid-saiba-as-diferencas-e-as-vantagens-de-cada-tipo/>. Acesso em: 10 maio 2025.

ZANONI, N. **Sistema fotovoltaico híbrido para abastecimento de cargas críticas com autonomia**. 2018. Dissertação (Mestrado) – Universidade de Caxias do Sul, Caxias do Sul, 2018.