

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA
DE MINAS GERAIS - *CAMPUS* IPATINGA
BACHARELADO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

Gustavo Oliveira de Araújo
João Pedro Batista Campos

**ESTUDO DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA: UMA COMPARAÇÃO PRÁTICA
ENTRE MICROINVERSORES APSYSTEMS, TECH POWER, HOYMILES E DEYE**

Ipatinga
2025

GUSTAVO OLIVIERA DE ARAÚJO
JOÃO PEDRO BATISTA CAMPOS

**ESTUDO DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA: UMA COMPARAÇÃO PRÁTICA
ENTRE MICROINVERSORES APSYSTEMS, TECH POWER, HOYMILES E DEYE.**

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao
Curso Bacharelado em Engenharia Elétrica do
Instituto Federal de Minas Gerais - *Campus*
Ipatinga para obtenção do grau de bacharel em
Engenharia Elétrica.

Orientador: Willian Marlon Ferreira

Ipatinga
2025

A663e Araújo, Gustavo Oliveira de; Campos, João Pedro Batista.

Estudo de eficiência energética: uma comparação prática entre Microinversores *Apsystems*, *Tech Power*, *Hoymiles* e *Deye*. Gustavo Oliveira de Araújo; João Pedro Batista Campos. – 2025.

74f.;il.

Orientador: Willian Marlon Ferreira.

Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Elétrica) – Instituto Federal de Minas Gerais. *Campus Ipatinga*, 2025.

1. Microinversores. 2. Eficiência energética. 3. Indicadores de desempenho. I. Ferreira, Willian Marlon. II. Instituto Federal de Minas Gerais – *Campus Ipatinga*. III. Título.

CDD 621.042

Catálogo: Rejane Valéria Santos - CRB-6/2907



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE MINAS GERAIS
Campus Avançado Ipatinga
Rua Maria Silva, n.º 125, Veneza - Ipatinga - MG - CEP 35.164-261
(31) 3829-8615 / (31) 97133-4399 - gabinete.ipatinga@ifmg.edu.br

ANEXO III

ATA DA DEFESA DO TCC

Aos 03 dias do mês de julho de 2025, às 16:30 horas, na sala 216 do IFMG Campus Avançado Ipatinga, foi realizada a defesa do Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) pelo(a)/pelos(as) aluno(a)/alunos(as), sendo aprovados com a nota 68 pela Banca Examinadora, que está condicionada ao cumprimento dos procedimentos pós-defesa do TCC.

O(A)/Os(As) aluno(a)/alunos(as) deverá(ão) apresentar o trabalho com as devidas modificações e no formato solicitado em 04 de agosto de 2025.

O(A)/Os(As) aluno(a)/alunos(as) está(ão) ciente(s) de que, caso não cumpra(m) os procedimentos pós-defesa de TCC até a data estipulada, sua(s) nota(s) será(ão) considerada(s) zero e a sua defesa será anulada. Também está(ão) ciente(s) de que o trabalho de conclusão de seu curso poderá ser divulgado pela instituição através dos seus meios de comunicação.

Observações pertinentes à defesa:

Realizar as correções solicitadas pela banca.

**NOME COMPLETO E ASSINATURA DOS COMPONENTES
DA BANCA E DO DISCENTE ORIENTADO**

Orientador:	<u>William Marlen Ferreira</u>	Assinatura:	<u>Wm</u>
Membro:	<u>Carlos Renato Magalhães Duarte</u>	Assinatura:	<u>Duarte</u>
Membro:	<u>Gabriel Miranda Freitas</u>	Assinatura:	<u>Freitas</u>
Aluno(a):	<u>Gustavo Oliveira do Araújo</u>	Assinatura:	<u>Gustavo Araújo</u>
Aluno(a):	<u>João Pedro Batista Campos</u>	Assinatura:	<u>Campos</u>

Dedico este trabalho aos meus
amados pais, maiores incentivadores
e fontes inesgotáveis de apoio,
amor e compreensão.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradecemos a Deus, pela força, sabedoria e saúde que nos permitiram chegar até aqui, superando desafios e alcançando essa importante conquista.

Aos nossos pais, que sempre nos apoiaram em toda a nossa trajetória, oferecendo amor, orientação e incentivo incondicional para que pudéssemos perseguir nossos sonhos e alcançar nossos objetivos.

Ao Instituto Federal de Minas Gerais, que nos proporcionou uma formação de qualidade, com excelentes profissionais, recursos e um ambiente que nos estimulou a crescer academicamente e pessoalmente. Estendemos nossos agradecimentos a todos os professores, que com dedicação e paciência contribuíram para o nosso aprendizado, especialmente ao professor Willian Marlon, que foi nosso orientador neste trabalho de conclusão de curso e cuja orientação e suporte foram indispensáveis para a realização deste TCC.

Aos nossos colegas, que compartilharam conosco essa jornada, contribuindo com apoio mútuo, aprendizados e momentos que levaremos para sempre em nossas memórias.

Agradecemos também a todos os envolvidos, de alguma forma, que contribuíram para nossa formação acadêmica e profissional, seja por meio de orientações, apoio ou dedicação.

Por fim, deixamos um especial agradecimento à empresa T8M Energia Solar, que gentilmente forneceu os equipamentos necessários para a realização das análises e comparações presentes neste trabalho. Sem esse suporte, seria impossível atingir os resultados obtidos.

A cada um de vocês, nosso mais sincero e profundo agradecimento.

“Nenhuma Engenharia constrói caráter,
mas com caráter se faz os melhores
engenheiros.”

Jordan Lucas

RESUMO

Este trabalho de conclusão de curso apresenta uma análise prática e detalhada sobre a eficiência energética de microinversores fotovoltaicos no mercado brasileiro, com foco nas marcas APsystems, Tech Power, Hoymiles e Deye. Inicialmente, o estudo aborda o referencial teórico, destacando o potencial da energia solar no Brasil, os fundamentos de sistemas fotovoltaicos, a operação de células e módulos fotovoltaicos, bem como a diferença entre inversores e microinversores e os tipos de sistemas (*on-grid* e *off-grid*).

A pesquisa avalia aspectos essenciais dos microinversores, como eficiência de conversão, facilidade de instalação, desempenho, monitoramento integrado, impacto ambiental e geração de energia em condições reais de operação. Durante a análise comparativa, são considerados indicadores como rendimento de referência, índice de produtividade, índice de desempenho e *performance ratio*, além de métricas como *yield*, preço do kWp e tempo de retorno.

A realização do estudo foi possibilitada pelo suporte da empresa T8M Energia Solar, que forneceu os equipamentos utilizados nos testes, e pelos recursos oferecidos pelo Instituto Federal de Minas Gerais. Por fim, este trabalho visa contribuir para a identificação de soluções mais eficientes e acessíveis no setor de energia solar, destacando a importância da análise prática para o avanço da tecnologia fotovoltaica no Brasil.

Palavras-chave: Microinversores. Eficiência energética. Monitoramento. Indicadores de desempenho. Custo-benefício. Sustentabilidade.

ABSTRACT

This course conclusion work presents a practical and detailed analysis of the energy efficiency of photovoltaic microinverters in the Brazilian market, focusing on the brands APsystems, Tech Power, Hoymiles and Deye. Initially, the study addresses the theoretical framework, highlighting the potential of solar energy in Brazil, the fundamentals of photovoltaic systems, the operation of photovoltaic cells and modules, as well as the difference between inverters and microinverters and the types of systems (on-grid and off-grid).

The research evaluates essential aspects of microinverters, such as conversion efficiency, ease of installation, performance, integrated monitoring, environmental impact and energy generation in real operating conditions. During the comparative analysis, indicators such as reference yield, productivity index, performance index and performance ratio are considered, as well as metrics such as yield, capacity factor, kWp price and payback time.

The study was made possible by the support of the company T8M Energia Solar, which provided the equipment used in the tests, and by the resources offered by the Federal Institute. Finally, this work aims to contribute to the identification of more efficient and accessible solutions in the solar energy sector, highlighting the importance of practical analysis for the advancement of photovoltaic technology in Brazil.

Keywords: Microinverters. Energy efficiency. Monitoring. Performance indicators. Cost-benefit. Sustainability.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Conversão de Energia na Célula Fotovoltaica - Junção PN	20
Figura 2 - Diferença Entre Células Fotovoltaicas Policristalinas e Monocristalinas	21
Figura 3 - Comparação entre células fotovoltaicas convencionais monocristalinas (à esquerda) e células PERC (à direita), destacando as inovações no design da célula para melhorar a eficiência.....	21
Figura 4 - Estrutura do Módulo	22
Figura 5 - Parte Elétrica do Módulo <i>Half-cell</i>	23
Figura 6 - Forma de Onda Saída do Inversor	24
Figura 7 - Demonstração de Obstrução da Luz em um Módulo Fotovoltaico Instalado em uma String de um Inversor Tradicional.....	26
Figura 8 - Instalação de um Sistema com Microinversores e Quatro Orientações Diferentes do Telhado	26
Figura 9 - Demonstração de Obstrução da Luz em um Módulo Fotovoltaico Instalado com Tecnologia de Microinversores	27
Figura 10 - Demonstração da ordem e dos principais componentes de um sistema on-grid ...	28
Figura 11 - Demonstração da ordem e dos principais componentes de um sistema off-grid...	29
Figura 12 - Sistema Fotovoltaico Instalado com Módulos Orientados Para Diferentes Orientações.	30
Figura 13 - Microinversor Apsystems Instalado.	31
Figura 14 - Circuito Flyback com Tap Central.....	33
Figura 15 - Circuito Flyback com Conversor Buck-Boost Integrado	34
Figura 16 - Circuito Flyback com Dois Transistores	35
Figura 17 - Circuito Flyback com Retificador de Meia Onda e Inversor de Tiristores.....	36
Figura 18 - Circuito Flyback com Inversor PWM de Alta Frequência	38
Figura 19 - Microinversor Apsystems.....	42
Figura 20 - Microinversor Deye	42
Figura 21 - Microinversor Hoymiles.....	43
Figura 22 - Microinversor Tech Power	44
Figura 23 - Potência e Capacidade de Carga.....	46
Figura 24 - Monitoramento Apsystems.....	48
Figura 25 - Monitoramento Tech Power	49
Figura 26 - Monitoramento Hoymiles.....	49

Figura 27 - Monitoramento Deye	50
Figura 28 - Instalação de Microinversores à Estrutura.....	52
Figura 29 - Temperatura Média do Brasil no Mês de Outubro de 2024.	53
Figura 30 - Irradiação Média em Ipatinga em (kWh/m ² .dia)	53
Figura 31 - Precipitação Média do Brasil no Mês de Outubro de 2024.	55
Figura 32 - Layout de Instalação dos Módulos.	56
Figura 33 - Mapa de Irradiância	56
Figura 34 - Área de Instalação.....	56

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Potência e Capacidade de Carga	44
Tabela 2 – Durabilidade e Proteções Integradas.....	47
Tabela 3 - Emissões de CO ₂ Evitadas.	58
Tabela 4 - Produção Energética Mensal.	61
Tabela 5 - Rendimento de Referência	63
Tabela 6 - Índice de Produtividade.....	63
Tabela 7 - <i>Perfomace Ratio</i>	64
Tabela 8 - Preço kWp	65
Tabela 9 - Economia Ano (R\$).....	65
Tabela 10 - <i>Payback</i>	65

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

- 4G** – Quarta Geração de Redes de Comunicação Móvel
- AM1.5** – *Air Mass 1.5* (Massa de Ar 1.5, referência de irradiância solar padrão)
- CA** – Corrente Alternada
- CAC** – Capacitor
- CC** – Corrente Contínua
- Cdc** – Capacitância de Corrente Contínua
- CDC1** – Capacitor 1
- CDC2** – Capacitor 2
- CEPEL** – Centro de Pesquisas de Energia Elétrica
- CGrid** – Capacitor
- CO₂** – Dióxido de Carbono
- CPV** – Capacitor Conectado ao Pannel Solar
- DAC1** – Diodo 1
- DAC2** – Diodo 2
- DC/AC** – Conversão de Corrente Contínua para Corrente Alternada
- DFLY1** – Diodo Fly 1
- DFLY2** – Diodo Fly 2
- DPV** – Diodo
- DRECT1** – Diodo 1
- DRECT2** – Diodo 2
- DTU** – *Data Transmission Unit* (Unidade de Transmissão de Dados)
- Eac** – Energia em Corrente Alternada (Energia Gerada para a Rede)
- ECU** – *Energy Communication Unit* (Unidade de Comunicação de Energia)
- EMA** – *Energy Monitoring and Analysis* (Monitoramento e Análise de Energia)
- EVA** – *Environmental Value Added* (Valor Ambiental Adicionado)
- IGBT** – *Insulated Gate Bipolar Transistor* (Transistor Bipolar de Porta Isolada)
- INMET** – Instituto Nacional de Meteorologia
- IP65** – Grau de Proteção contra poeira e jatos de água em baixa pressão
- IP67** – Grau de Proteção contra poeira e submersão temporária em água
- IRR** – *Internal Rate of Return* (Taxa Interna de Retorno)
- Href** – Rendimento de Referência
- kWh** – Quilowatt-hora (Unidade de Energia)

kWh/m².dia – Quilowatt-hora por metro quadrado por dia (Irradiação Solar Média)

kWp - Quilowatt-pico (Potência Máxima em Condições Padrão)

LAC – Indutor

LCOE – *Levelized Cost of Energy* (Custo Nivelado de Energia)

LDC – Indutor

LGrid – Indutor

MBB – *Multi Busbar* (Múltiplas Barras Coletoras)

MLPE – *Module-Level Power Electronics* (Eletrônica de Potência em Nível de Módulo)

MMGD – Micro e Mini Geração Distribuída

MOSFET – *Metal Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor* (Transistor de Efeito de Campo Metal-Óxido-Semicondutor)

MPPT – *Maximum Power Point Tracking* (Rastreamento do Ponto de Máxima Potência)

MWh – Megawatt-hora (Unidade de Energia)

Pdc – Potência em Corrente Contínua (Potência de Entrada dos Inversores)

PERC – *Passivated Emitter and Rear Cell* (Célula de Emissor Passivado e Traseira)

PID – *Potential Induced Degradation* (Degradação Induzida por Potencial)

Pn – Potência Nominal

PR – *Performance Ratio* (Índice de Desempenho)

PWM – *Pulse Width Modulation* (Modulação por Largura de Pulso)

ROI – *Return on Investment* (Retorno sobre o Investimento)

SAC1 – Interruptor 1

SAC2 – Interruptor 2

SAC3 – Chaveador 3

SAC4 – Chaveador 4

SDC – Interruptor

SPV – *Solar Photovoltaic* (Fotovoltaico Solar)

STC – *Standard Test Conditions* (Condições Padrão de Teste)

T – Transformador

TOPCon – *Tunnel Oxide Passivated Contact* (Contato Passivado de Óxido Túnel)

Wp – Watt-pico (Potência Máxima de Pico de Módulos Fotovoltaicos)

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	16
1.1	Objetivo Geral	16
1.2	Objetivos Específicos.....	16
1.3	Motivação e Justificativa	16
1.4	Estrutura do Trabalho	17
2	REFERENCIAL TEÓRICO	18
2.1	Potencial de Energia Solar.....	18
2.2	Sistemas Fotovoltaicos	19
2.2.1	<i>Células Fotovoltaicas e Módulos</i>	<i>19</i>
2.2.2	<i>Inversores Fotovoltaico.....</i>	<i>23</i>
2.3	Diferença entre Inversores e Microinversores.....	25
2.4	Sistema <i>off-grid</i> e <i>on-grid</i>	28
2.5	Introdução a Microinversores.....	30
2.6	Algumas Topologias de Microinversor.....	31
2.6.1	<i>Flyback com Tap Central.....</i>	<i>32</i>
2.6.2	<i>Flyback com Conversor Buck-Boost Integrado</i>	<i>33</i>
2.6.3	<i>Flyback com Dois Transistores.....</i>	<i>34</i>
2.6.4	<i>Flyback com Retificador de Meia Onda e Inversor de Tiristores.....</i>	<i>36</i>
2.6.5	<i>Flyback com Inversor PWM de Alta Frequência</i>	<i>37</i>
2.7	Tipos de Microinversores	38
2.7.1	<i>Microinversores Tradicionais</i>	<i>38</i>
2.7.2	<i>Microinversores Integrados</i>	<i>39</i>
2.7.3	<i>Microinversores com Monitoramento Avançado</i>	<i>39</i>
2.7.4	<i>Microinversores Bidirecionais.....</i>	<i>39</i>
2.7.5	<i>Microinversores de Alta Potência.....</i>	<i>39</i>
2.7.6	<i>Microinversores Compatíveis com Baterias</i>	<i>40</i>
3	DESENVOLVIMENTO	41
3.1	Equipamentos que Serão Analisados.....	41
3.1.1	<i>Apsystems.....</i>	<i>41</i>
3.1.2	<i>Deye.....</i>	<i>42</i>
3.1.3	<i>Hoymiles</i>	<i>43</i>
3.1.4	<i>Tech Power</i>	<i>43</i>

3.2	Potência e Capacidade de Carga.....	44
3.3	Capacidade de Expansão e Flexibilidade	45
3.4	Durabilidade e Proteções Integradas.....	46
3.5	Monitoramento	47
3.6	Instalação	50
3.6.1	<i>Requisitos de Espaçamento e Posicionamento.....</i>	50
3.6.2	<i>Facilidade de Instalação</i>	52
3.7	Dados Meteorológicos	52
3.7.1	<i>Temperatura Ambiente.....</i>	52
3.7.2	<i>Irradiação</i>	53
3.7.3	<i>Precipitação</i>	54
3.8	Sombreamento do Local	55
3.8.1	<i>Impacto de Obstáculos Físicos.....</i>	55
3.9	Análise Impacto Ambiental	57
3.9.1	<i>Emissão de CO2 Evitadas</i>	57
3.10	Metodologia.....	58
3.10.1	<i>Rendimento de Referência</i>	59
3.10.2	<i>Índice de Produtividade.....</i>	59
3.10.3	<i>Índice de Desempenho</i>	60
3.10.4	<i>Indicadores Financeiros</i>	60
3.10.5	<i>Dados de Geração Efetivada.....</i>	61
3.11	Estudo de Caso.....	61
3.11.1	<i>Produção Energética Mensal.....</i>	61
3.11.2	<i>Rendimento de Referência</i>	63
3.11.3	<i>Índice de Produtividade.....</i>	63
3.11.4	<i>Índice de Desempenho</i>	64
3.11.5	<i>Preço kWp.....</i>	64
3.11.6	<i>Tempo de Retorno.....</i>	65
4	CONCLUSÃO	66
5	SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS.....	68
	REFERÊNCIAS.....	69

1 INTRODUÇÃO

A busca por fontes de energia sustentável tem impulsionado o crescimento do mercado de sistemas fotovoltaicos, destacando-se o uso de microinversores. A pesquisa explora aspectos como monitoramento, instalação, desempenho, impacto ambiental e custos, além de indicadores de eficiência, como *Yield* e *Performance Ratio*. Essa abordagem busca contribuir para uma melhor compreensão das tecnologias disponíveis e auxiliar na tomada de decisão para projetos de energia solar.

1.1 Objetivo Geral

Este trabalho tem como objetivo analisar a eficiência energética de diferentes modelos de microinversores, comparando marcas disponíveis no mercado brasileiro, como *APsystems*, *Tech Power*, *Hoymiles* e *Deye*.

1.2 Objetivos Específicos

- Apresentar quatro microinversores de marcas distintas;
- Analisar a geração em um período dos microinversores;
- Comparar os resultados encontrados;
- Apresentar a viabilidade técnica, financeira e energética dos microinversores.

1.3 Motivação e Justificativa

Com o crescimento do mercado para a geração de energia solar fotovoltaica, muitos equipamentos estão sendo ofertados, bem como diversos fabricantes apresentam soluções nesta área. Por isso, torna-se importante elaborar estudos que abordem esta temática, com o objetivo de gerar conhecimento e incentivar a adoção desse modelo de geração de energia limpa (GARCIA; FUZETI; STROBEL, 2021).

Com a crescente demanda por sistemas fotovoltaicos, observa-se o aumento do interesse em aprimorar as tecnologias deste segmento (BROWDER, 2011). Os microinversores mais modernos possuem vantagens por serem mais leves, ocuparem menor espaço e apresentarem maior eficiência, o que facilita o seu manuseio e instalação.

A motivação para este estudo origina-se do interesse em analisar e comparar diferentes microinversores, visando compreender melhor o desempenho de cada equipamento e verificar se representam um investimento viável. Para isso, foram instalados quatro microinversores de diferentes marcas, cada um conectado a quatro módulos de potência

equivalente, posicionados com a mesma orientação e inclinação no telhado, buscando garantir condições de teste semelhantes entre os modelos.

Durante um período de 32 dias, de 16 de outubro a 16 de novembro, foram monitorados os dados de geração de cada sistema. A partir desses dados, foram aplicados indicadores de desempenho e eficiência energética, como *Yield*, *Performance Ratio* (PR), além da análise da viabilidade técnica, financeira e energética, considerando aspectos como tempo de retorno do investimento (*payback*) e custo por kWp gerado.

Com isso, pretende-se avaliar não apenas o desempenho energético, mas também a viabilidade econômica dos microinversores no cenário brasileiro, proporcionando informações práticas que auxiliem consumidores e integradores solares na escolha de equipamentos mais eficientes e adequados às suas necessidades.

1.4 Estrutura do Trabalho

O presente trabalho está estruturado em cinco capítulos, sendo:

Capítulo 1: É apresentada a introdução do estudo, incluindo os objetivos gerais e específicos, a motivação que impulsionou a realização deste trabalho e sua justificativa, evidenciando a relevância do tema no cenário atual.

Capítulo 2: Consiste no referencial teórico, onde são discutidos conceitos fundamentais relacionados à energia solar fotovoltaica, como células fotovoltaicas, sistemas *on-grid* e *off-grid*, o potencial energético do Brasil para geração solar e introduz os microinversores, explorando as principais topologias disponíveis no mercado

Capítulo 3: Este capítulo apresenta os microinversores e equipamentos analisados, destacando suas capacidades operacionais e funcionalidades de monitoramento, bem como as condições ambientais que influenciam o desempenho do sistema, como clima, sombreamento e impacto ambiental. Também aborda a redução das emissões de CO₂ como benefício associado à geração solar fotovoltaica. Além disso, descreve a metodologia aplicada, os índices de desempenho e indicadores financeiros utilizados, bem como o processo de coleta e análise dos dados de geração. Por fim, traz a análise dos resultados obtidos, considerando tanto o desempenho técnico quanto a avaliação econômica dos microinversores.

Capítulo 4: Aborda as conclusões do estudo apresentando uma síntese dos principais achados e recomendações do trabalho.

Capítulo 5: Apresenta as sugestões para trabalhos futuros.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

A estrutura teórica deste trabalho aborda o potencial da energia solar no Brasil, um dos países com a maior incidência solar do mundo (BMB ENERGY, 2022) proporcionando um potencial de geração através de energia solar gigantesco. Os conceitos básicos de células e módulos de energia solar que convertem a luz solar em eletricidade e o papel dos inversores, responsáveis pela conversão da energia produzida em corrente contínua (CC) pelos módulos, em corrente alternada (CA) (FERNANDES, 2020) são apresentados neste capítulo. A diferença entre inversor tradicional e microinversores é detalhada e destaca as vantagens e as limitações das tecnologias, incluindo eficiência, monitoramento e instalação (NEO SOLAR, 2024a). Além disso, a estrutura teórica descreve as diferenças entre os sistemas de energia solar *on-grid*, que estão conectados à rede elétrica, e *off-grid* que trabalham de forma independente, sem conexão com a rede (PORTAL SOLAR, 2025a). Esses conceitos são fundamentais para entender o desenvolvimento de sistemas de energia solar e sua aplicação no contexto nacional.

2.1 Potencial de Energia Solar

Os sistemas de energia solar tornaram-se uma solução importante para a matriz energética brasileira, pois contribuem para a expansão de fontes renováveis domésticas e industriais (PORTAL SOLAR, 2025a). A fonte solar fotovoltaica consolidou-se como protagonista na geração distribuída (GD) no Brasil em 2023, representando 96,3% da capacidade instalada de micro e minigeração distribuída (MMGD). De acordo com o Balanço Energético Nacional (BEN) de 2024, publicado pela Empresa de Pesquisa Energética (EPE), a capacidade instalada dessa fonte cresceu 54,8% em relação a 2022, enquanto a geração de energia aumentou 68,1% no mesmo período (EPE, 2024).

Além disso, o consumo de eletricidade do Brasil aumentou 5,2% em 2023, principalmente pelo aumento do uso doméstico. Esse aumento mostra a relevância da geração de fontes distribuídas, como a energia solar, para atender a essa demanda crescente (OBSERVATÓRIO DO CLIMA, 2024). O ano de 2023 foi marcado pela conexão de mais de 625 mil novos sistemas de geração distribuída à rede de distribuição brasileira. Esse crescimento acrescentou mais de 7,4 GW de potência em todo o território brasileiro, beneficiando mais de 837 mil unidades consumidoras com excedentes e créditos de energia (HEIN, 2023).

2.2 Sistemas Fotovoltaicos

A energia solar é uma fonte de energia sustentável que usa a luz solar para gerar eletricidade por meio do efeito fotovoltaico. Esse efeito ocorre nas células dos módulos construídas a partir de materiais semicondutores que podem gerar eletricidade quando colocadas diante da irradiação solar. Essas células são compostas por duas camadas de material semicondutor, uma com excesso de elétrons (tipo N) e o outro com falta de elétrons (tipo P). Quando a luz solar atinge as células, os elétrons são estimulados e cria corrente contínua que pode ser movida, usada ou armazenada (VIEIRA, 2020).

Um sistema de geração de energia solar converte energia solar em eletricidade e geralmente é composta de três blocos principais. O primeiro é um bloco gerador, formado por um painel solar e um cabo de conexão, que recebe a luz solar e converte diretamente em corrente contínua (CC) (PASQUALOTTO, 2020). O segundo é o bloco de conversão de energia que é responsável por adaptar essa energia ao consumo da unidade consumidora. Os inversores e outros dispositivos de proteção e controle são usados para converter a corrente contínua em corrente alternada, a transformação é fundamental para que a energia gerada possa ser utilizada por aparelhos, máquinas convencionais. Já o terceiro e último bloco, de armazenamento, é uma opção adicional que pode acumular energia em baterias para garantir o fornecimento de eletricidade, em dias nublados ou em períodos noturnos (PASQUALOTTO, 2020).

Com a organização desses blocos, o sistema de energia solar opera com eficiência e flexibilidade, permitindo o ajuste em várias aplicações. A energia solar não é apenas uma alternativa renovável e limpa, mas também contribui para reduzir as emissões de gases de efeito estufa, pois não depende de combustíveis fósseis e se alinha com ideais de energia mais sustentáveis. (PINHO; GALDINO, 2014).

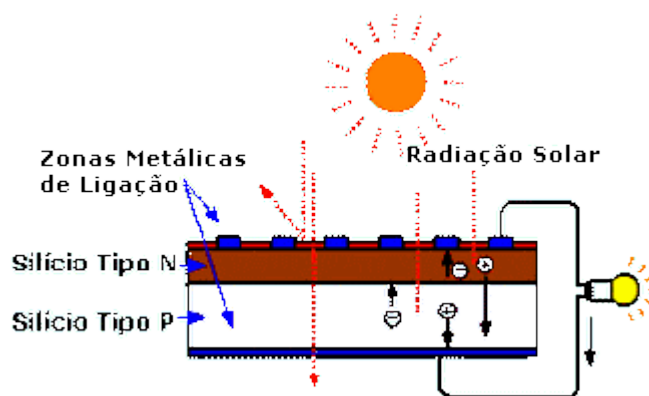
2.2.1 Células Fotovoltaicas e Módulos

Células fotovoltaicas são equipamentos que convertem a luz proveniente do sol em eletricidade através do efeito fotovoltaico. As correntes são geradas a partir da transferência de elétrons entre os materiais semicondutores existentes nas células, geralmente compostos de silício (PINHO; GALDINO, 2014).

Essencialmente, as camadas existentes de material semicondutor consistem em diferentes dopagens (tipo p e tipo n), estabelecendo uma junção PN. Os fótons excitam os elétrons no material semicondutor quando expostos à luz solar, criando um par de elétron-buraco que é separado da interseção do PN produzindo uma corrente elétrica (GREEN, 2003).

A Figura 1 ilustra o processo de conversão de energia solar em eletricidade, mostrando como a radiação solar incide sobre o material semicondutor, composto por silício tipo N e tipo P, criando espaços causados pela junção PN.

Figura 1 - Conversão de Energia na Célula Fotovoltaica - Junção PN



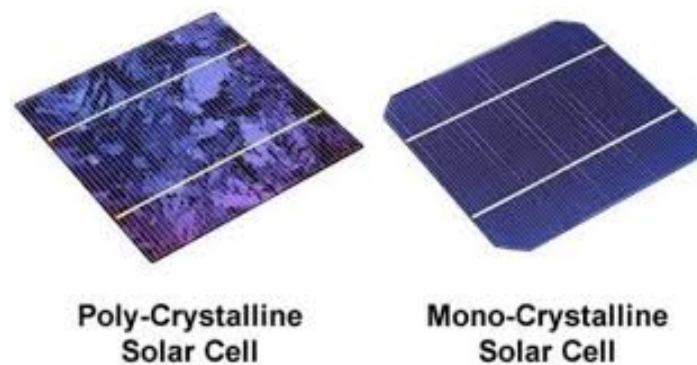
Fonte: (OCA ENERGIA, 2024)

Há uma grande variedade de células fotovoltaicas no mercado, incluindo as monocristalinas, policristalinas e as de filme fino, com diferentes particularidades de eficiência, custos e aplicações. Como mostrado na Figura 2 (direita), as células monocristalinas são conhecidas por sua alta eficiência e durabilidade devido à estrutura uniforme dos cristais de silício. Isso o torna ideal para sistemas de energia solar que requerem maior desempenho e durabilidade. As células policristalinas, representadas na Figura 2 (à esquerda), possuem menor custo, por serem fabricadas a partir de múltiplos cristais de silício, o que resulta em uma eficiência inferior, sendo uma opção popular para aplicações de menor custo (PORTAL SOLAR, 2025c).

Com o desenvolvimento de novas tecnologias a eficiência da célula fotovoltaica está em constante evolução, como exemplo, as células PERC são células de silício cristalino com uma camada apassivadora na parte inferior, capturando luz e reduzindo a recombinação de portadores, a eficiência se eleva para valores entre 22% e 24% (GREEN, 2021). A Figura 3 demonstra a diferença entre uma célula solar monocristalina convencional e uma célula PERC. Isso destaca a camada de passivação e outras melhorias que aumentam a eficiência da iluminação.

Além disso, a tecnologia *TopCon* utiliza uma camada de óxido de túnel entre silício e o metal de contato, melhorando ainda mais a eficiência, minimizando as perdas de recombinação. As células *TopCon* podem obter eficiência de até 26%, indicando o desenvolvimento de células PERC (HAASE, 2018)

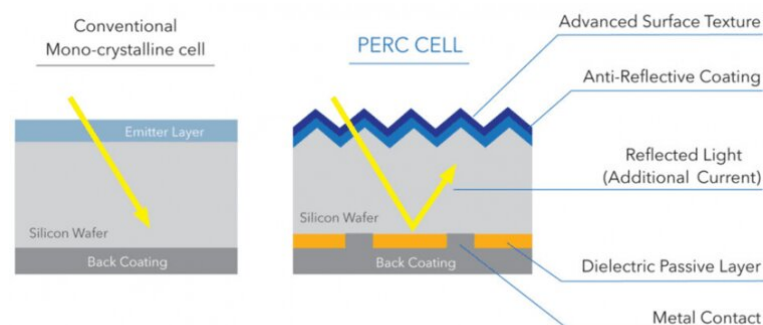
Figura 2 - Diferença Entre Células Fotovoltaicas Policristalinas e Monocristalinas



Fonte: (SOUZA, 2019)

Além disso, a tecnologia *TopCon* utiliza uma camada de óxido de túnel entre o silício e o metal de contato da célula fotovoltaica. Essa camada reduz as perdas por recombinação de elétrons, aumentando a eficiência da conversão de energia. Com isso, as células *TopCon* podem alcançar eficiências de até 26%, representando uma evolução em relação às células do tipo PERC (HAASE et al., 2018). Em aplicações altamente eficientes, células tandem e multijunção que combinam uma variedade de materiais semicondutores, como *perovskitas* e silício, podem capturar uma ampla área de comprimento das ondas solares e aumentar a eficiência da conversão em mais de 30% (HAASE et al., 2018).

Figura 3 - Comparação entre células fotovoltaicas convencionais monocristalinas (à esquerda) e células PERC (à direita), destacando as inovações no design da célula para melhorar a eficiência.



Fonte: Solar Power World, <https://www.solarpowerworldonline.com/2016/07/what-is-perc-why-should-you-care/>

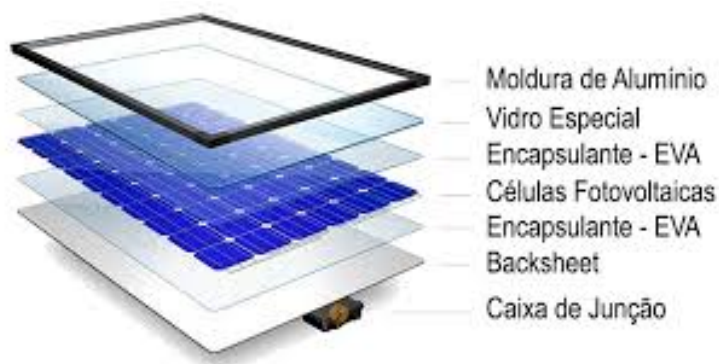
Fonte: (CANAL SOLAR, 2025)

Módulos fotovoltaicos são compostos pela combinação de células solares, onde são interligadas na maior parte das vezes por uma ligação em série. As principais funções do módulo é proteger as células contra efeitos naturais, intempéries e permitir a instalação em

telhados, terrenos ou outras superfícies. Painéis solares são compostos por várias camadas, incluindo uma camada de vidro temperado, uma camada de encapsulamento e uma estrutura de suporte que protege e prolonga a vida útil das células (QUASCHNING, 2016). Na Figura 4 é apresentada de maneira detalhada a estrutura do módulo com as respectivas camadas: moldura de alumínio, vidro especial, encapsulante (EVA), as células fotovoltaicas, *backsheet* e a caixa de junção. A união dessas camadas proporciona alta resistência mecânica e uma melhor eficiência a curto e longo prazo na conversão de energia solar.

A classificação dos módulos fotovoltaicos é feita por sua potência nominal, eficiência, resistência a intempéries e capacidade de resistir a PID (degradação induzida por potencial). A potência dos módulos varia de acordo com o número de células e o tipo de célula utilizada (VIAN et al., 2021).

Figura 4 - Estrutura do Módulo



Fonte: (OCA ENERGIA, 2024)

Diferentes configurações e tecnologias são incorporadas nos painéis fotovoltaicos para aumentar a potência e a eficiência, consequentemente trazem mais resultados em maiores proporções. Como exemplo, na Figura 5 é apresentada a tecnologia *half-cell*, onde o módulo tem suas células divididas em duas partes, reduzindo as perdas de resistência e como resultado aumenta a tolerância ao sombreamento parcial. Essa tecnologia melhora a produção energética em diversas condições (SANTOS; FERREIRA, 2021). A tecnologia de módulos *multi-busbar* (MBB) é outra inovação que utiliza múltiplos barramentos finos, evitando perdas elétricas e aumentando a eficiência elétrica do módulo, além de atribuir mais durabilidade ao sistema (GREEN, 2021).

Na Figura 5, é possível visualmente notar a separação das células e os caminhos otimizados de condução da corrente elétrica, representados pelos barramentos na imagem.

O módulo bifacial é outro avanço importante no quesito eficiência energética, ele apresenta uma camada de vidro em ambas as faces, proporcionando maior durabilidade, resistência à efeitos naturais e um melhor aproveitamento da irradiação.

Figura 5 - Parte Elétrica do Módulo *Half-cell*



Fonte: (FOTUS, 2024)

Esse módulo é especialmente vantajoso para ambientes com alta umidade ou maresia, onde o desgaste dos módulos é um problema significativo (QUASCHNING, 2016).

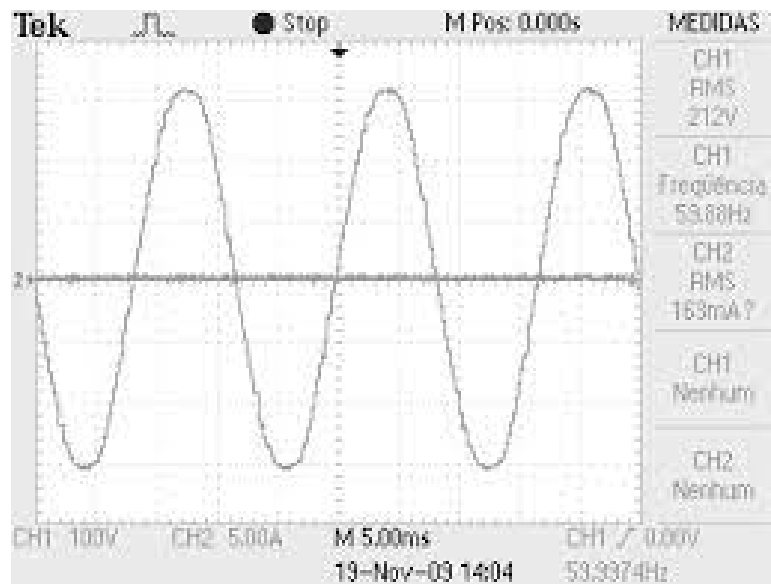
2.2.2 Inversores Fotovoltaico

O inversor fotovoltaico é um dispositivo essencial em sistemas de energia solar, responsável por obter a corrente alternada (CA) através da corrente contínua (CC) gerada pelos módulos fotovoltaicos. A corrente de saída é compatível com a rede elétrica e os equipamentos residenciais e comerciais (PINHO; GALDINO, 2014). Essa transformação possibilita que a energia gerada pelos módulos fotovoltaicos seja utilizada no local, como autoconsumo e em casos que ocorra excedente, é enviada à rede da concessionária, respeitando as exigências de segurança e qualidade de energia determinadas pelos órgãos reguladores (BERTOLINE, 2017). Além dessa conversão de corrente, inversores modernos possuem funcionalidades como o monitoramento do sistema, otimização da produção de energia, visando à máxima eficiência energética e *interface* com sistemas de armazenamento.

As classificações principais de inversores fotovoltaicos são: auto-comutáveis e comutados (RAMPINELLI; KRENZINGER; ROMERO, 2013). Os inversores auto-comutáveis são capazes de funcionar tanto de maneira *on-grid* quanto *off-grid*, possuem uma saída senoidal com baixo conteúdo harmônico e alto fator de potência. Já os inversores comutados funcionam apenas conectados à rede, são mais baratos, e diferentemente dos auto-comutáveis apresentam maior conteúdo harmônico e menor fator de potência. A transformação do sinal contínuo para alternado ocorre devido aos inversores utilizarem dispositivos semicondutores que executam a comutação em dois momentos, saturação (*on*) e corte (*off*), gerando um sinal alternado de componentes quadradas.

Esse sinal é, posteriormente, convertido na forma senoidal por meio de filtros de potência como pode ser visto na Figura 6. Para que o conteúdo harmônico seja reduzido e o fator de potência seja melhorado, os semicondutores utilizam filtros passivos para comutação em altas frequências. No entanto, essa abordagem pode resultar em maiores perdas de eficiência (RAMPINELLI; KRENZINGER; ROMERO, 2013).

Figura 6 - Forma de Onda Saída do Inversor



Fonte: (URBANETZ JUNIOR; RÜTHER, 2011)

A tecnologia MPPT em inversores modernos permite que eles acompanhem as variações de potência dos módulos fotovoltaicos e operem no ponto de máxima potência para maximizar a eficiência do sistema. Os inversores, também chamados de conversores estáticos, utilizam essa tecnologia para maximizar a produção de energia, adaptando-se automaticamente ao ponto máximo de geração de cada módulo (VIEIRA, 2020). Essa tecnologia se tornou de

grande importância, uma vez que os módulos fotovoltaicos sofrem variações na sua potência de saída ao longo do dia e com as mudanças climáticas.

Atualmente, o desenvolvimento da eletrônica de potência tem otimizado os inversores, reduzindo custos de produção e ampliando sua eficiência. Os modelos mais modernos consideram as especificidades de cada aplicação, diversificando as topologias para melhorar os índices de eficiência (RAMPINELLI; KRENZINGER; ROMERO, 2013).

2.3 Diferença entre Inversores e Microinversores

Os inversores e microinversores exercem um papel de grande importância nos sistemas fotovoltaicos: a conversão da energia gerada pelos módulos fotovoltaicos em energia que pode ser utilizada por equipamentos convencionais ou ser enviada para rede, visando créditos junto à concessionária de energia (PINHO; GALDINO, 2014). No entanto, suas estruturas, formas de instalação e modos de operação diferem significativamente, o que impacta diretamente a eficiência, os custos e a flexibilidade de cada tipo de sistema.

Os inversores tradicionais, ou inversores *string*, conectam-se a um grupo de módulos fotovoltaicos dispostos em série, formando uma “*string*”. Dessa forma, a corrente de todos os módulos é enviada para um único inversor, que realiza a conversão de CC para CA (VOLPATO, 2022). Essa configuração é comumente usada em sistemas de médio a grande porte e em áreas onde há baixa incidência de sombras. Como desvantagem, qualquer sombra sobre um dos módulos pode impactar o desempenho de toda a *string*, reduzindo a eficiência geral do sistema.

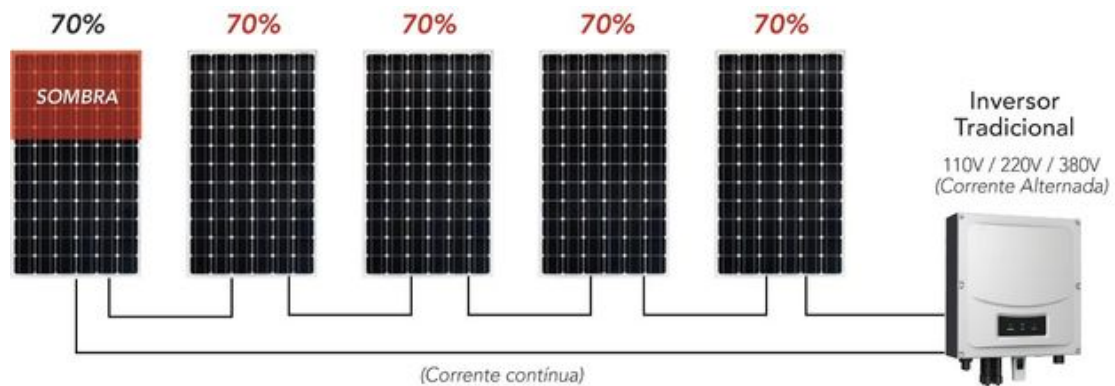
Através da Figura 7, pode-se entender a principal desvantagem do equipamento, demonstrando uma *string* de módulos fotovoltaicos conectados a um único inversor tradicional, onde o sombreamento em um dos módulos prejudica significativamente a produção de energia de toda a *string*. O causador desse fenômeno é a configuração em série dos módulos, que faz com que a corrente máxima da *string* seja determinada pelo módulo sombreado e consequentemente com menor geração, mesmo que os outros estejam recebendo a irradiação total disponibilizada.

Os inversores *string* têm a vantagem de uma instalação centralizada e simplificada, o que reduz custos em sistemas de grande porte.

Os microinversores são equipamentos que podem ser instalados individualmente em cada módulo fotovoltaico ou uma pequena *string* é conectada em entradas individualizadas o que difere dos inversores tradicionais, realizando a conversão de CC para CA já no ponto de

geração. Através dessa tecnologia é possível que cada módulo opere individualmente, se tornando a opção mais atrativa para locais com sombras parciais ou diferentes inclinações.

Figura 7 - Demonstração de Obstrução da Luz em um Módulo Fotovoltaico Instalado em uma String de um Inversor Tradicional



Fonte: (SOL FÁCIL, 2024)

A Figura 8 apresenta uma instalação fotovoltaica distribuída em quatro orientações diferentes do telhado, indicando que a escolha de microinversores oferece maior flexibilidade para instalação. Nesse tipo de configuração, cada módulo trabalha de forma autônoma, sem que o desempenho de um módulo em uma orientação afete a eficiência dos outros.

A maior eficiência energética é justificada por esse motivo quando se trata de cenários onde há diferença de ângulos de inclinação, sombras parciais ou diferentes níveis de radiação solar.

Figura 8 - Instalação de um Sistema com Microinversores e Quatro Orientações Diferentes do Telhado



Fonte: (AUTORES, 2025)

Essa independência operacional dos microinversores maximiza a produção de energia, ao permitir que cada módulo opere em seu ponto de máxima potência,

independentemente das condições dos demais. Além disso, essa tecnologia simplifica o monitoramento do sistema, pois possibilita o acompanhamento individualizado do desempenho de cada módulo, facilitando diagnósticos e manutenções (PINHO; GALDINO, 2014).

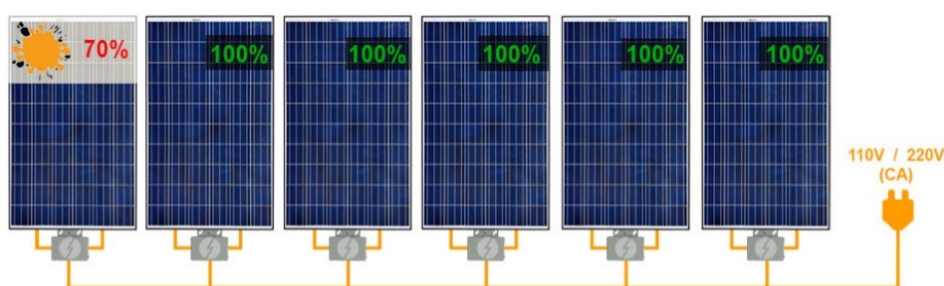
Essa configuração é amplamente utilizada em instalações residenciais e comerciais com telhados complexos ou onde o espaço disponível exige a adaptação dos módulos a diferentes orientações, otimizando o uso da área disponível e a geração de energia.

A eficiência individual de cada módulo em sistemas com microinversores é garantida pela presença do rastreamento de ponto de máxima potência (MPPT) em cada unidade. Isso permite que, mesmo que um módulo seja afetado por sombreamento, os demais continuem operando normalmente, otimizando o desempenho global do sistema (QUASCHNING, 2016).

Além disso, os microinversores oferecem maior flexibilidade e eficiência em sistemas de pequena escala, possibilitando o monitoramento individualizado dos módulos e facilitando o diagnóstico rápido e preciso de falhas (PINHO; GALDINO, 2014).

A Figura 9 ilustra esse benefício, mostrando um cenário em que o sombreamento afeta apenas um módulo do sistema, enquanto os demais continuam operando com 100% de sua capacidade, graças ao controle independente proporcionado pelo MPPT de cada microinversor (RAMPINELLI; KRENZINGER; ROMERO, 2013).

Figura 9 - Demonstração de Obstrução da Luz em um Módulo Fotovoltaico
Instalado com Tecnologia de Microinversores



Fonte: (PORTAL SOLAR, 2025a)

Essa configuração é especialmente vantajosa em locais sujeitos a sombras parciais, como áreas próximas a árvores ou edificações. Além disso, ela possibilita uma análise detalhada do desempenho de cada módulo, facilitando o planejamento de manutenções preventivas ou corretivas (GOSWAMI; KREITH; KREIDER, 2015).

2.4 Sistema *off-grid* e *on-grid*

Os sistemas fotovoltaicos são classificados em *on-grid* e *off-grid*, dependendo de sua conexão com a rede elétrica pública. Cada tipo de sistema possui características específicas que os tornam mais adequados para determinadas aplicações, influenciando diretamente os custos, a viabilidade e a complexidade da instalação.

A Figura 10 ilustra um sistema fotovoltaico do tipo *on-grid*, destacando os principais componentes e o fluxo de energia. O painel solar converte a luz do sol em energia elétrica em corrente contínua (CC), que é enviada ao inversor. O inversor, por sua vez, converte essa energia em corrente alternada (CA), compatível com os dispositivos residenciais e com a rede elétrica. Parte da energia gerada é consumida diretamente pela residência, enquanto o excedente é enviado à rede elétrica pública, medido e registrado para a geração de créditos.

Esse sistema é dependente da infraestrutura da concessionária de energia, permitindo ao usuário utilizar a rede elétrica como *backup* em momentos de baixa geração, como durante a noite ou em dias nublados. Essa característica, somada à ausência de baterias, reduz os custos iniciais de instalação e manutenção (PINHO; GALDINO, 2014). Além disso, a possibilidade de compensação de créditos torna os sistemas *on-grid* vantajosos em termos financeiros, especialmente em áreas urbanas e residenciais.

A Figura 10 evidencia a integração harmoniosa entre geração própria e consumo, além da contribuição para a sustentabilidade e economia no uso da energia. Essa dinâmica tem impulsionado a popularidade dos sistemas *on-grid* no Brasil, especialmente com os incentivos regulatórios vigentes (ANEEL, 2021).

Figura 10 - Demonstração da ordem e dos principais componentes de um sistema *on-grid*



Fonte: (MITRATECH, 2025)

Por outro lado, os sistemas *off-grid* (isolados da rede) operam de forma independente, sem conexão com a rede elétrica. Eles são frequentemente usados em áreas remotas ou em locais onde a conexão com a rede é inviável ou muito cara. Esses sistemas requerem baterias para armazenar a energia gerada durante o dia, garantindo o fornecimento de eletricidade durante a noite ou em períodos de baixa produção solar (PORTAL SOLAR, 2025d).

A Figura 11 ilustra o funcionamento de um sistema *off-grid*, destacando os componentes essenciais e o fluxo de energia. O painel fotovoltaico (1) capta a energia solar e a converte em corrente contínua (CC). Essa energia é gerenciada por um controlador de carga (2), que regula o envio da energia para as baterias (3), responsáveis pelo armazenamento, ou para o inversor DC/AC (4), que transforma a energia para corrente alternada (CA). Por fim, a energia em CA alimenta os aparelhos elétricos da residência.

Diferentemente dos sistemas *on-grid*, os sistemas *off-grid* necessitam de baterias, que representam uma parte significativa dos custos e exigem manutenção periódica. No entanto, oferecem a vantagem de proporcionar autonomia energética total, sendo ideais para locais onde a energia da concessionária não está disponível ou é instável.

A configuração ilustrada na Figura 11 evidencia a robustez e a independência do sistema, embora reforce a complexidade adicional introduzida pelo uso de baterias e controladores de carga. Apesar de apresentarem custos iniciais mais elevados, os sistemas *off-grid* são uma solução viável e sustentável para comunidades isoladas ou aplicações específicas, como em fazendas ou locais de difícil acesso (SILVA, 2019).

Figura 11 - Demonstração da ordem e dos principais componentes de um sistema *off-grid*



Fonte: (NEO SOLAR, 2024b).

A presença de baterias em sistemas *off-grid* representa uma vantagem em termos de autonomia energética, mas também uma desvantagem devido aos custos e à complexidade técnica. Além disso, o uso de baterias impacta a sustentabilidade do sistema, uma vez que as

baterias geralmente têm uma vida útil limitada e requerem substituição periódica. Os sistemas *off-grid* são mais apropriados para regiões isoladas e em aplicações específicas, como abastecimento de equipamentos de telecomunicações em áreas rurais, onde a confiabilidade do fornecimento é essencial (VIEIRA, 2020).

2.5 Introdução a Microinversores

Em instalações onde os módulos fotovoltaicos possuem diferentes orientações, inclinações ou estão sujeitos a sombreamentos parciais, o uso de microinversores proporciona ganhos significativos de desempenho. Diferente dos inversores de string, que centralizam o rastreamento em um único ponto de máxima potência (MPPT), os microinversores otimizam a geração de cada módulo de forma independente (BELISKI; SCARABELLOT; RAMPINELLI, 2018).

A Figura 12 ilustra um exemplo prático desse tipo de instalação, evidenciando como os microinversores atuam para minimizar as perdas em sistemas com condições variadas de instalação (RAMPINELLI; KRENZINGER; ROMERO, 2013).

Os inversores de *string* são geralmente maiores e possuem uma potência mais elevada, pois são projetados para atender a uma série de módulos fotovoltaicos conectados em uma única “*string*” (CRUZ; ISIDORO, 2020). No entanto, uma limitação desse tipo de inversor é que ele tende a ter um número limitado de pontos de máxima potência (MPPTs), o que limita a flexibilidade do sistema. Em um sistema com inversor de *string*, por exemplo, é necessário que os módulos estejam dispostos em uma mesma orientação e inclinação para evitar perdas de eficiência, uma condição que pode ser difícil de cumprir em cenários reais (TONIN, 2017).

Figura 12 - Sistema Fotovoltaico Instalado com Módulos Orientados Para Diferentes Orientações.



Fonte: (T8M ENERGIA SOLAR, 2025)

Os microinversores introduzem uma revolução ao aplicar a tecnologia de Eletrônica de Potência em Nível de Módulo (MLPE). Essa inovação permite que cada módulo solar tenha seu próprio controle de máxima potência (MPPT), assegurando que opere de maneira independente. Com isso, mesmo em condições adversas, como sombreamento parcial ou sujeira, cada painel é capaz de gerar energia de forma otimizada. Essa autonomia no controle maximiza a eficiência do sistema, minimizando as perdas de desempenho, mesmo quando um ou mais módulos enfrentam dificuldades (SOPRANO, 2024). Outro benefício significativo dos sistemas com microinversores é a dispensa de componentes adicionais para seccionamento e proteção entre os módulos, o que reduz os custos de instalação e simplifica a montagem do sistema (NEO SOLAR, 2024b). Essa configuração, ilustrada na Figura 12, exemplifica a fixação do microinversor na estrutura do painel, demonstrando a simplicidade e a praticidade da instalação no ambiente residencial. Eles proporcionam maior eficiência, flexibilidade na instalação e facilidade de monitoramento ao longo da vida útil do sistema, que pode variar entre 20 e 25 anos (WEG, 2024).

Figura 13 - Microinversor Apsystems Instalado.



Fonte: (ECORI, 2024)

2.6 Algumas Topologias de Microinversor

Microinversores possuem vantagens diante a tecnologia de inversores e uma explicação para isso é sua topologia, agregando maior segurança, maior vida útil e garantia (MORAES, 2021). As topologias representam diferentes abordagens de *design* e arquitetura dos circuitos eletrônicos, essas impactam diretamente no desempenho, na eficiência energética e na confiabilidade do sistema fotovoltaico. As configurações são projetadas para atender as diferentes demandas de aplicação, desde pequenos sistemas residenciais até usinas de grande

porte, sendo influenciadas por fatores como custo, eficiência e facilidade de implementação (LI et al., 2022).

Compreender as topologias permite identificar quais delas são mais apropriadas para maximizar a eficiência e a durabilidade de sistemas fotovoltaicos, considerando as especificidades de cada projeto.

2.6.1 *Flyback com Tap Central*

O transformador *flyback* com *tap* central é uma topologia de conversão de energia amplamente usada em microinversores devido à sua eficiência e simplicidade. Ela funciona bem em aplicações de baixa a média potência e oferece boa isolamento entre entrada e saída, uma vantagem para segurança elétrica, especialmente em sistemas solares fotovoltaicos (BARBI, 2012).

No princípio de funcionamento, o transformador com *tap* central no primário ou secundário permite que a energia armazenada na bobina seja liberada em dois estágios alternados, dependendo do semiciclo de operação. O circuito usa uma chave (como um MOSFET ou IGBT) para ligar e desligar a corrente no primário do transformador. Quando a chave é desligada, a energia armazenada no campo magnético é transferida para a carga. Essa topologia permite a operação em alta frequência, o que reduz o tamanho dos componentes magnéticos, tornando o microinversor compacto (LEE ENERGY, 2024).

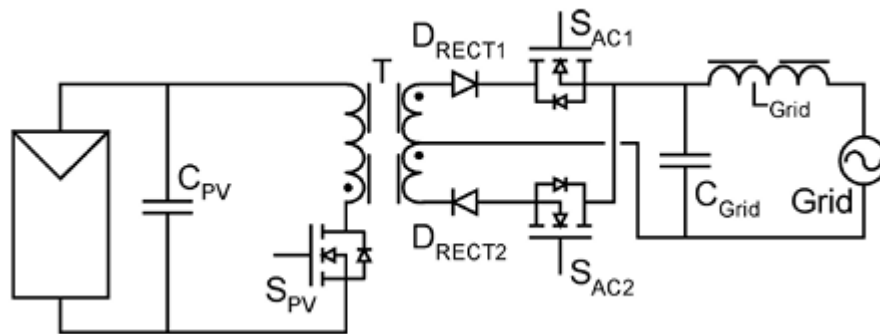
Vantagens do transformador *flyback* com *tap* central incluem maior eficiência, simplicidade estrutural, isolamento entre entrada e saída para segurança e controle preciso da saída para otimizar o MPPT. As desvantagens são a necessidade de controle de chaveamento mais preciso e a limitação na relação de transformação, o que restringe o uso a determinados sistemas (MARQUES, 2020).

Em aplicações de microinversores, essa topologia permite o acoplamento direto ao painel solar, possibilitando a conversão CC-CA eficiente. Microinversores com *flyback* e *tap* central são vantajosos em configurações de baixa potência, onde a eficiência e a integração compacta são essenciais (GAZOLI, 2011).

A Figura 14, demonstra a topologia de um microinversor utilizando um transformador *flyback* com *tap* central, destacando suas principais etapas de conversão de energia.

No circuito, pode-se observar o painel solar conectado ao capacitor C_{PV} , que atua como um elemento de filtragem, e o chaveador S_{PV} , responsável pelo acionamento controlado do primário do transformador T.

Figura 14 - Circuito Flyback com Tap Central



Fonte: (GAZOLI, 2011)

No lado secundário do transformador, os diodos D_{RECT1} e D_{RECT2} trabalham alternadamente para retificar a energia transferida, enquanto os interruptores S_{AC1} e S_{AC2} modulam a corrente para a rede elétrica. O filtro de saída, composto por L_{Grid} e C_{Grid} , garante que a energia fornecida a rede seja de alta qualidade e conforme os padrões de tensão e frequência.

2.6.2 Flyback com Conversor Buck-Boost Integrado

O conversor *flyback* com *buck-boost* integrado é uma topologia avançada que combina as funções de um transformador *flyback* e de um conversor *buck-boost*. Esse design híbrido permite maior flexibilidade na conversão de tensão, sendo especialmente útil para microinversores em sistemas fotovoltaicos. A topologia permite operar tanto em modo de elevação (*boost*) quanto em redução (*buck*) da tensão, o que a torna adaptável a variações de entrada. Isso é vantajoso em aplicações solares, onde a tensão do painel pode variar significativamente devido a fatores como irradiância e temperatura (REATTI; KAZIMIERCZUK, 2001).

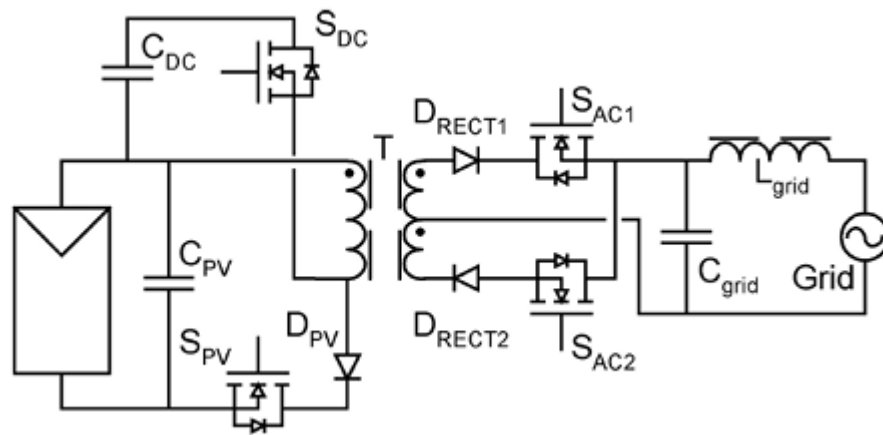
No funcionamento, o conversor *buck-boost* ajusta a tensão de entrada para o nível desejado, e o transformador *flyback* realiza a conversão isolada e fornece a tensão de saída. Essa integração otimiza a eficiência, reduz o número de componentes e permite uma maior densidade de potência no sistema. O controle preciso é essencial nesse tipo de topologia, uma vez que a combinação dos modos de *buck* e *boost*, junto com o *flyback*, exige ajustes rápidos para manter a eficiência máxima (BARBI, 2008).

Entre as principais vantagens da topologia *flyback* com *buck-boost* integrado estão a eficiência, a flexibilidade de operação em diferentes faixas de tensão e a alta densidade de

potência, que possibilita a miniaturização dos microinversores. No entanto, as desvantagens incluem o aumento da complexidade do controle e as possíveis dificuldades na dissipação térmica devido à compactação dos componentes (GAZOLI, 2011)

A Figura 15, ilustra a topologia de um microinversor utilizando um transformador conversor *flyback* com *buck-boost* integrado, destacando suas principais etapas de conversão de energia.

Figura 15 - Circuito Flyback com Conversor Buck-Boost Integrado



Fonte: (GAZOLI, 2011)

O capacitor C_{DC} , o interruptor S_{DC} e o diodo D_{PV} compõem o estágio *buck-boost*. Este ajusta a tensão de entrada do painel solar C_{PV} para um nível ideal, seja reduzindo-a (modo *buck*) ou aumentando-a (modo *boost*), dependendo das condições de operação do sistema. O transformador T realiza a isolação galvânica e a transferência de energia para o lado secundário do circuito. Este estágio opera alternadamente para armazenar e liberar energia, garantindo a conversão *CC-CA* eficiente. Os diodos D_{RECT1} e D_{RECT2} realizam a retificação da energia convertida no secundário do transformador, enquanto os interruptores S_{AC1} e S_{AC2} modulam a corrente para injeção na rede. O filtro L_{Grid} e C_{Grid} asseguram a qualidade da energia fornecida a rede.

2.6.3 Flyback com Dois Transistores

O conversor *flyback* com dois transistores é uma evolução da topologia *flyback* tradicional, onde dois transistores MOSFETs são utilizados para controlar o fluxo de corrente no transformador. Essa configuração permite reduzir as tensões de pico nos transistores, aumentando a eficiência e a confiabilidade do circuito, especialmente em sistemas fotovoltaicos que operam com tensões elevadas (LEE ENERGY, 2024).

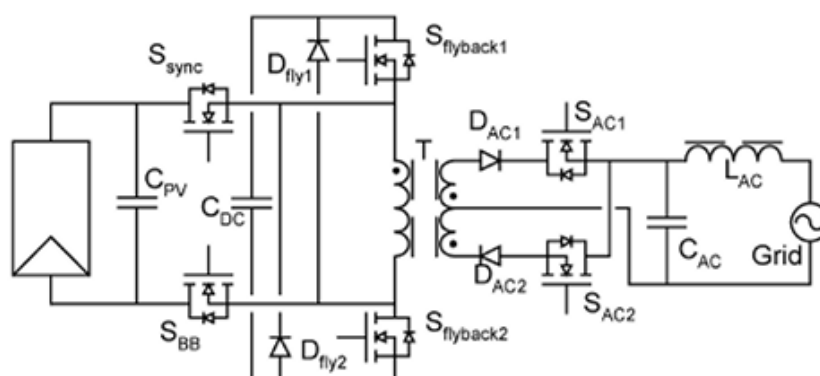
Nesta topologia, cada transistor opera de forma alternada, permitindo que a tensão se divida entre os dois dispositivos, o que reduz a tensão suportada individualmente. Além disso, o circuito de *snubber* tradicional pode ser simplificado ou até eliminado, diminuindo as perdas de energia associadas à dissipação e aumentando a eficiência global (LEE ENERGY, 2024). Esse benefício é especialmente importante em sistemas solares, pois melhora o desempenho sob variações de carga e tensão de entrada.

As principais vantagens do *flyback* com dois transistores incluem a redução das tensões nos transistores, o aumento da eficiência e a melhoria da vida útil do sistema devido à menor tensão de pico. No entanto, a complexidade do controle também aumenta, e o número de componentes é maior comparado ao *flyback* simples, o que pode elevar os custos de implementação (BRITO, 2020).

A Figura 16 demonstra a topologia de um microinversor utilizando um transformador conversor *flyback* com dois transistores, destacando suas principais etapas de conversão de energia.

O chaveador S_{BB} (*Buck-Boost*) e o capacitor C_{PV} ajustam a tensão de entrada do painel solar, possibilitando o controle inicial da energia recebida. O chaveador S_{sync} e o capacitor C_{DC} funcionam em sincronia para suavizar a transferência de energia para o próximo estágio. O transformador T realiza a isolamento galvânica e a transferência de energia. Os diodos D_{fly1} e D_{fly2} , juntamente com os chaveadores $S_{flyback1}$ e $S_{flyback2}$, conduzem o fluxo de energia para os lados primário e secundário de forma alternada. No lado secundário do transformador, os diodos D_{AC1} e D_{AC2} retificam a energia convertida. Os chaveadores S_{AC1} e S_{AC2} , juntamente com os componentes L_{AC} e C_{AC} , garantem a modulação da corrente para a rede elétrica, assegurando conformidade com os padrões de qualidade.

Figura 16 - Circuito Flyback com Dois Transistores



2.6.4 Flyback com Retificador de Meia Onda e Inversor de Tiristores

A topologia *flyback* com retificador de meia onda e inversor de tiristores combina a simplicidade de um retificador de meia onda com o controle robusto de tiristores, sendo ideal para aplicações de baixa a média potência, como microinversores solares. O retificador de meia onda converte corrente alternada (CA) em contínua (CC) de forma econômica e compacta, apesar de ter menor eficiência comparada a retificadores de onda completa (GAZOLI, 2011).

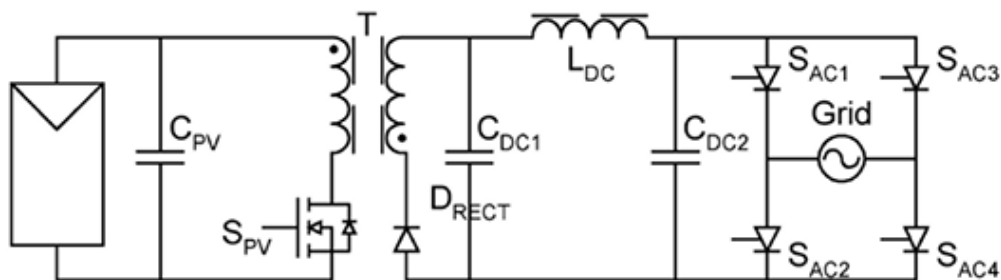
O uso de tiristores no estágio de inversão oferece controle ajustável sobre a saída, permitindo adaptabilidade a variações na entrada e carga — uma necessidade em sistemas fotovoltaicos. O controle preciso dos tiristores melhora a eficiência do sistema e aumenta a durabilidade dos componentes (GAZOLI, 2011). A isolamento galvânica proporcionada pelo transformador *flyback* aumenta a segurança e a confiabilidade do sistema (BARBI, 2012).

Em resumo, essa topologia oferece um design simplificado com controle fino e isolamento, embora tenha eficiência um pouco menor devido ao uso do retificador de meia onda, e exija componentes de proteção adicionais para o controle dos tiristores (BARBI, 2012)

A Figura 17 ilustra a topologia de um microinversor utilizando um transformador conversor *flyback* com retificador de meia onda e inversor de tiristores, destacando suas principais etapas de conversão de energia.

O capacitor C_{PV} armazena e estabiliza a energia coletada do painel solar. O chaveador S_{PV} modula a energia no primário do transformador T , que realiza a isolamento galvânica entre o lado de entrada (painel) e o lado de saída (rede elétrica). No lado secundário do transformador, o diodo D_{RECT} realiza a retificação da energia, convertendo-a para corrente contínua (CC). Os capacitores C_{DC1} e C_{DC2} , juntamente com o indutor L_{DC} , filtram e estabilizam a tensão contínua antes de seu envio ao estágio de injeção.

Figura 17 - Circuito *Flyback* com Retificador de Meia Onda e Inversor de Tiristores



Fonte: (GAZOLI, 2011)

Quatro chaves (S_{AC1} , S_{AC2} , S_{AC3} e S_{AC4}) trabalham em pares para realizar a conversão de corrente contínua para alternada (CC-CA), sincronizando a saída com a rede elétrica. O capacitor C_{DC2} e a indutância da rede ajudam a reduzir as ondulações de tensão, garantindo uma saída limpa e estável para a conexão à rede.

2.6.5 *Flyback com Inversor PWM de Alta Frequência*

O conversor *flyback* com inversor PWM de alta frequência combina a topologia *flyback* com o controle eficiente de modulação por largura de pulso (PWM), operando em altas frequências para aumentar a densidade de potência e reduzir o tamanho dos componentes. O uso de PWM permite um controle preciso da forma de onda de saída, otimizando a eficiência e o desempenho do sistema, especialmente em aplicações como microinversores solares, onde a variação da carga e a entrada de energia podem ser rápidas (GAZOLI, 2011).

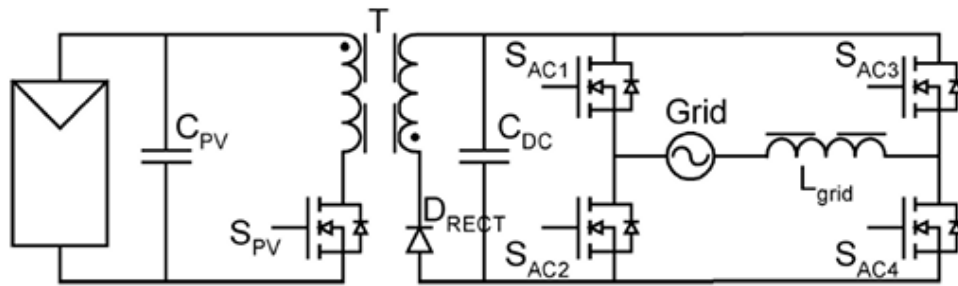
Neste tipo de conversor, a alta frequência de operação reduz o tamanho do transformador e de outros componentes passivos, permitindo um design mais compacto e leve, crucial para aplicações como sistemas fotovoltaicos (REATTI; KAZIMIERCZUK, 2001). A modulação PWM também proporciona um controle fino da tensão de saída, o que é essencial para maximizar a eficiência de conversão e garantir uma adaptação dinâmica à mudança nas condições de carga e irradiância solar.

As vantagens incluem a alta eficiência, o baixo custo de componentes passivos e a capacidade de operar em frequências elevadas, o que reduz a necessidade de materiais volumosos. Por outro lado, a operação em altas frequências pode gerar maiores perdas de comutação e exigir um controle preciso para evitar problemas de distorção na forma de onda (HART, 2011). Além disso, a implementação de PWM de alta frequência requer cuidados com a dissipação de calor devido às rápidas comutações.

A Figura 18 apresenta a topologia de um microinversor utilizando um transformador conversor *flyback* com inversor PWM de alta frequência, destacando suas principais etapas de conversão de energia.

O capacitor C_{PV} estabiliza a energia fornecida pelo painel fotovoltaico. O chaveador S_{PV} controla a transferência de energia do lado primário do transformador T , garantindo isolamento galvânica e segurança do sistema. O chaveador S_{PV} controla a transferência de energia do lado primário do transformador T , garantindo isolamento galvânica e segurança do sistema. O diodo D_{RECT} converte a energia do transformador em corrente contínua (CC). O capacitor C_{DC} armazena e filtra a energia retificada, garantindo uma tensão estável para o estágio final.

Figura 18 - Circuito Flyback com Inversor PWM de Alta Frequência



Fonte: (GAZOLI, 2011)

Os chaveadores S_{AC1} , S_{AC2} , S_{AC3} e S_{AC4} trabalham de forma sincronizada, alternando a condução para converter a tensão contínua em corrente alternada (CA). A indutância L_{grid} filtra a corrente de saída, reduzindo harmônicos e garantindo compatibilidade com os requisitos da rede elétrica.

2.7 Tipos de Microinversores

Para entender sobre características, funcionalidades e aplicações de microinversores, precisa-se primeiramente conhecer sobre os principais tipos de microinversores disponíveis no mercado. Essa abordagem é fundamental para compreender como cada tipo atende às diferentes demandas do setor fotovoltaico, partindo desde instalações de pequeno porte até sistemas comerciais e industriais.

A seguir, são apresentados os tipos de microinversores categorizados em tradicionais, integrados, com monitoramento avançado, bidirecionais, de alta potência e compatíveis com baterias. Essa classificação permite uma visão abrangente das tecnologias disponíveis, suas inovações e como elas podem ser aplicadas para otimizar a geração e o uso da energia solar (CHEN, 2021).

2.7.1 Microinversores Tradicionais

Os microinversores tradicionais são instalados individualmente em cada painel solar e são responsáveis pela conversão de corrente contínua (CC) em corrente alternada (CA). Essa abordagem assegura que o desempenho de um painel não interfira nos demais, sendo especialmente útil em situações de sombreamento parcial, sujeira ou diferentes orientações dos módulos solares (CHEN, 2021). No Brasil, esses microinversores têm ganhado destaque em instalações residenciais, pela flexibilidade e pelo potencial de maximizar a eficiência energética (GOMES, 2018).

2.7.2 Microinversores Integrados

Os microinversores integrados são embutidos diretamente nos módulos fotovoltaicos, proporcionando um design mais compacto e uma instalação simplificada. Por eliminarem a necessidade de microinversores externos, reduzem custos de mão de obra e acessórios, garantindo maior compatibilidade entre os componentes do sistema (SEIA, 2023). Essa tecnologia tem sido introduzida gradualmente no mercado brasileiro, principalmente em projetos residenciais de pequena escala (SANTOS; FERREIRA, 2021).

2.7.3 Microinversores com Monitoramento Avançado

Equipados com sistemas de monitoramento em tempo real, esses microinversores permitem ao usuário acompanhar o desempenho individual de cada painel. Ferramentas como plataformas online e aplicativos otimizam o diagnóstico e a manutenção preventiva, aumentando a eficiência do sistema (LI et al., 2022). No Brasil, fabricantes como *APsystems* oferecem soluções com monitoramento detalhado e relatórios de desempenho para usuários finais e integradores (BRASIL SOLAR, 2022).

2.7.4 Microinversores Bidirecionais

Com capacidade de gerenciar tanto a conversão de energia quanto o armazenamento em baterias, os microinversores bidirecionais são ideais para sistemas híbridos que buscam autossuficiência energética. Essa tecnologia permite armazenar excedentes para uso em horários de baixa geração, como à noite, contribuindo para a estabilidade do sistema (MAHMOUD, 2022). No contexto nacional, iniciativas como o Programa de Desenvolvimento da Geração Distribuída (PROGD) incentivam a adoção desses sistemas em áreas remotas (ANEEL, 2021).

2.7.5 Microinversores de Alta Potência

Projetados para trabalhar com módulos de potência elevada (geralmente acima de 600 W), esses microinversores são amplamente utilizados em projetos comerciais e industriais, onde a eficiência e a densidade energética são fatores críticos. No Brasil, sua aplicação em grandes usinas solares tem mostrado resultados significativos em relação ao retorno sobre investimento e à confiabilidade (CAMPOS, 2022).

2.7.6 Microinversores Compatíveis com Baterias

Esses microinversores oferecem integração direta com sistemas de armazenamento de energia, possibilitando maior controle sobre o consumo e autonomia energética. Essa solução é especialmente relevante para regiões com instabilidade na rede elétrica ou onde a energia gerada precisa ser usada em horários de baixa produção solar (VAN DER MERWE, 2023). Empresas brasileiras como a WEG têm explorado essa tecnologia para ampliar o alcance das soluções fotovoltaicas no país (SILVA; ALMEIDA, 2020).

3 DESENVOLVIMENTO

Neste capítulo, serão apresentados os principais componentes que compõem o estudo e as condições externas que impactam no desempenho dos microinversores analisados. Descrevem-se os equipamentos utilizados, suas características técnicas, capacidades operacionais e funcionalidades de monitoramento, além de aspectos relacionados à instalação. Também são abordadas as variáveis ambientais do local de estudo, como dados meteorológicos, sombreamento e impacto ambiental associado à geração de energia solar, visto que fatores climáticos e características dos equipamentos influenciam diretamente na eficiência e na confiabilidade do sistema (CRESESB, 2022).

Na sequência, apresenta-se a metodologia adotada, com destaque para os indicadores técnicos e financeiros utilizados na análise. Por fim, são expostos os resultados do estudo de caso, detalhando o desempenho energético e econômico dos microinversores avaliados.

3.1 Equipamentos que Serão Analisados

Para este estudo sobre eficiência energética, foram selecionados quatro modelos de microinversores de diferentes fabricantes: Microinversor *Apsystems* modelo DS3D, Microinversor *Deye* modelo SUN-M200G4-EU-Q0, Microinversor *Hoymiles* modelo HMS-2000-4T e Microinversor *Tech Power* modelo WVC-2000. A escolha desses equipamentos foi baseada em suas técnicas, representatividade no mercado e potencial de comparação em termos de potência, capacidade de carga, eficiência e monitoramento.

Como forma de validar a relevância desses equipamentos no cenário nacional, observa-se que alguns dos modelos analisados figuram entre os principais microinversores recomendados no Brasil, segundo o ranking publicado pela Solar dos Pomares (2025). A publicação destaca marcas como *Hoymiles*, *Deye* e *Apsystems* como líderes de mercado, reconhecidas pela confiabilidade e eficiência de seus equipamentos.

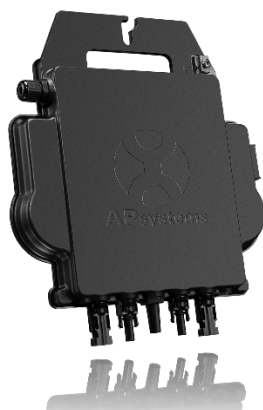
A seguir, será apresentado uma breve descrição das marcas que terão seus equipamentos analisados.

3.1.1 *Apsystems*

A *APsystems* é uma empresa de origem americana fundada em 2010 no Vale do Silício, possui quatro unidades de negócios espalhadas pelo mundo e atende em mais de 100

países, incluindo o Brasil, onde chegou há cerca de 7 anos (APSYSTEMS, 2020). No mercado brasileiro, a *APsystems* é conhecida por oferecer microinversores com alta eficiência, durabilidade e sistemas avançados de monitoramento (ECORI, 2024). Atualmente, a *APsystems* possui uma base significativa de instalações no país, com milhares de sistemas operando em residências e pequenos comércios. Sua expansão no mercado brasileiro é impulsionada pela confiabilidade dos produtos e pela facilidade de integração com sistemas solares residenciais e comerciais de médio porte. A Figura 19 ilustra um modelo de microinversor da *APsystems*, destacando seu design compacto e robusto, características que contribuem para a facilidade de instalação e confiabilidade operacional dos sistemas solares onde é aplicado.

Figura 19 - Microinversor Apsystems



Fonte: (APSYSTEMS, 2020)

3.1.2 Deye

Fundada em 2007 a marca é reconhecida por seu compromisso com a inovação, buscando constantemente aumentar a eficiência e a confiabilidade de seus produtos (DEYE, 2024). A Figura 20 apresenta um microinversor da Deye, evidenciando seu formato funcional e as características construtivas que refletem a proposta da marca em oferecer soluções eficientes e acessíveis para o mercado fotovoltaico.

Figura 20 - Microinversor Deye



Fonte: (DEYE, 2024)

No Brasil desde 2019, a *Deye* tem conquistado espaço no mercado de energia solar ao fornecer microinversores compatíveis com diversos tipos de módulos, com uma proposta de alto desempenho e custo-benefício. Além disso, oferece suporte técnico e treinamento, o que facilita a adoção de suas tecnologias em projetos de energia solar distribuída.

3.1.3 *Hoymiles*

A *Hoymiles*, fundada em 2012 na China, é uma empresa especializada em microinversores que tem se consolidado rapidamente no mercado global, inclusive no Brasil (HOYMILES, 2024). Presente no país desde 2018, a *Hoymiles* se destaca pela inovação tecnológica e pela alta eficiência de seus microinversores. Hoje, a empresa possui uma ampla base de instalações no Brasil, atendendo tanto a residências quanto a comércios de médio porte. A *Hoymiles* também é conhecida pelo suporte técnico atualizado. A Figura 21 mostra um microinversor da *Hoymiles*, evidenciando seu design otimizado e a estrutura que reflete a proposta da marca em oferecer equipamentos de alta eficiência e fácil integração em sistemas solares residenciais e comerciais.

Figura 21 - Microinversor *Hoymiles*



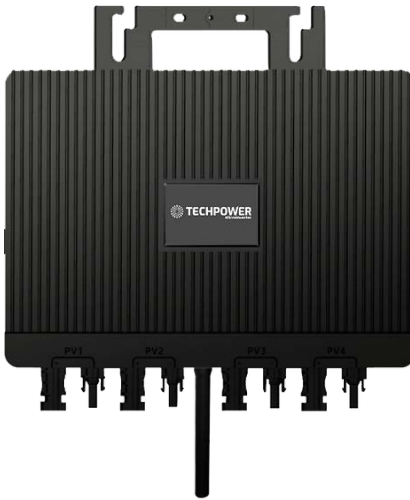
Fonte: (HOYMILES, 2024)

3.1.4 *Tech Power*

A *Tech Power* é uma empresa que vem conquistando espaço no mercado brasileiro de energia solar, principalmente por sua relação custo-benefício. Fundada em 2009 a *Tech Power* oferece microinversores voltados para projetos residenciais e comerciais de pequeno e médio porte (FOTUS, 2024). No Brasil, a marca está presente desde 2011 e, desde então, tem aumentado sua rede de instalações, oferecendo suporte técnico e equipamentos que atendem às normas de eficiência do mercado local. A *Tech Power* é uma opção interessante para projetos

que buscam baixo investimento. A Figura 22 apresenta um microinversor da Tech Power, destacando seu design simples e funcional, alinhado à proposta da marca de oferecer soluções acessíveis e eficientes para sistemas solares residenciais e comerciais de pequeno e médio porte.

Figura 22 - Microinversor *Tech Power*



Fonte: (TECH POWER, 2024)

3.2 Potência e Capacidade de Carga

No contexto de eficiência energética e geração de energia solar, a potência nominal e a capacidade de carga dos microinversores são fatores essenciais para avaliar o desempenho e a compatibilidade com sistemas solares residenciais e comerciais. Foram analisados esses aspectos entre os microinversores: *Apsystems*, *Deye*, *Hoymiles* e *Tech Power* levando em consideração as especificações técnicas e o potencial de geração.

Para iniciar a análise, foram consultadas as plataformas oficiais dos fabricantes e distribuidores para fornecimento das fichas técnicas dos microinversores selecionados. Após a coleta dos documentos técnicos, foram destacados e comparados os seguintes pontos principais: potência, corrente, faixa de potência dos módulos suportados e eficiência de conversão. A Tabela 1 resume as principais especificações técnicas observadas nos microinversores analisados, permitindo uma comparação objetiva entre os modelos.

Tabela 1 - Potência e Capacidade de Carga

Marca	Potência (W)	Corrente(A)	Faixa Potência Módulos	Eficiência (%)
APSYSTEMS	2000	9	315Wp-660Wp+	97
DEYE	2000	9,1	210Wp-700Wp+	96,5
HOYMILES	2000	8,7	400Wp-625Wp+	96,7
TECH POWER	2000	8,7	625Wp+	95

Fonte: (AUTORES, 2025)

Com base nos dados analisados, é possível concluir que, embora os quatro modelos de microinversores apresentem potências de saída iguais, há diferenças relevantes em outros parâmetros que podem impactar sua aplicabilidade e eficiência no uso prático.

Na faixa de potência suportada, observa-se que o microinversor DEYE SUN-M200G4-EU-Q0 se destaca, com uma faixa de 210 Wp a 700 Wp, tornando-se o equipamento mais versátil do conjunto para atender uma maior diversidade de módulos. Em seguida, o *Apsystems* DS3D também apresenta uma boa faixa de potência, de 315 Wp a 660 Wp, conferindo-lhe flexibilidade para a maioria dos módulos disponíveis no mercado. O *Hoymiles* HMS-2000-4T oferece uma faixa de 400 Wp a 625 Wp, enquanto o *Tech Power* WVC-2000 especifica apenas um valor máximo de 625 Wp, limitando sua compatibilidade.

Quanto à corrente máxima, o modelo DEYE SUN-M200G4-EU-Q0 novamente se destaca, com uma corrente de 9,1 A, seguida pelo *Apsystems* DS3D com 9 A, enquanto os *Hoymiles* e *Tech Power* apresentam 8,7 A.

Em relação à eficiência de conversão, o *Apsystems* DS3D se sobressai com um índice de 97%, seguido de perto por *Hoymiles* HMS-2000-4T com 96,7%, *Deye* SUN-M200G4-EU-Q0 com 96,5% e *Tech Power* WVC-2000 com 95%. Essa diferença, embora pequena, pode impactar o desempenho ao longo do tempo, especialmente em projetos de maior escala.

3.3 Capacidade de Expansão e Flexibilidade

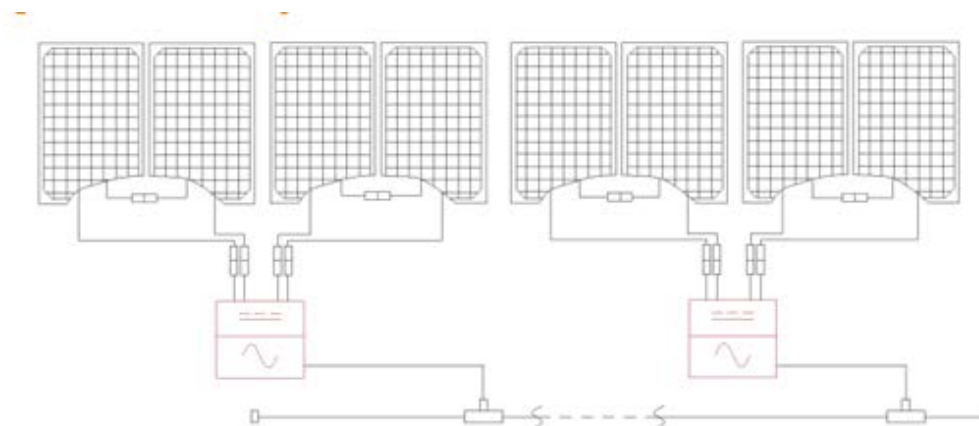
A capacidade de expansão e a flexibilidade de um sistema de geração de energia com microinversores são fatores relevantes, especialmente em projetos que podem crescer ao longo do tempo ou que precisem adaptar-se a novas demandas energéticas. Todos os microinversores analisados - *Deye* SUN-M200G4-EU-Q0, *Tech Power* WVC-2000, *Hoymiles* HMS-2000-4T e *Apsystems* DS3D - possuem características que permitem esse tipo de expansão, mas diferem em pontos essenciais, como o número de MPPTs e a quantidade de módulos e microinversores que podem ser conectados em um mesmo segmento. A Figura 23 ilustra um exemplo de arranjo utilizando microinversores da *APsystems*, demonstrando como os módulos fotovoltaicos e os microinversores podem ser distribuídos em um mesmo segmento elétrico, conforme as diretrizes do manual de instalação do fabricante.

Os microinversores *Deye*, *Tech Power* e *Hoymiles* são equipados com 4 MPPTs, proporcionando maior flexibilidade na instalação, pois permitem adicionar entre 1 a 4 módulos por vez, conforme as necessidades e a disponibilidade de módulos. Isso facilita a expansão gradual do sistema e permite que cada módulo conectado opere em seu ponto de máxima potência, aumentando a eficiência geral do conjunto. Em contrapartida, o *Apsystems* DS3D

possui apenas 2 MPPTs, o que limita sua capacidade de expansão modular para incrementos de 2 ou 4 módulos, não permitindo a adição isolada de um único módulo.

Além da flexibilidade na conexão de módulos, a expansão do sistema como um todo é facilitada com a tecnologia de microinversores, que permite adicionar novos equipamentos ao sistema existente a qualquer momento. Basta instalar um novo microinversor e conectá-lo ao arranjo já existente, ampliando a geração de energia sem grandes adaptações no sistema. Contudo, há limitações de quantidade para conexão em um mesmo segmento ou *string*: tanto o *Apsystems* DS3D, quanto o *Deye* SUN-M200G4-EU-Q0 e o *Hoymiles* HMS-2000-4T permitem a instalação de até 3 microinversores no mesmo segmento. O *Tech Power* WVC-2000, por sua vez, permite até 6 microinversores, conferindo maior flexibilidade em projetos que demandem uma quantidade maior de unidades em uma única linha.

Figura 23 - Potência e Capacidade de Carga



Fonte: (APSYSTEMS, 2020)

3.4 Durabilidade e Proteções Integradas

A durabilidade de microinversores é um fator crítico para a viabilidade econômica e operacional de sistemas fotovoltaicos, especialmente porque se trata de equipamentos elétricos sujeitos a condições ambientais adversas. Embora a vida útil exata seja difícil de prever, a garantia oferecida pelo fabricante ou distribuidor serve como um indicador de durabilidade e confiabilidade. Entre os modelos analisados, a *Hoymiles* oferece uma garantia padrão de 12 anos, com opção de extensão para 25 anos (HOYMILES, 2024). A *Apsystems* fornece 15 anos de garantia, que podem ser estendidos para até 25 anos (APSYSTEMS, 2020).

O *Tech Power* vem com uma garantia de 15 anos, sem possibilidade de extensão, enquanto a *Deye* oferece 10 anos de garantia, também sem a opção de aumento. Essas diferenças

nas garantias podem refletir o nível de confiança de cada fabricante na durabilidade dos seus produtos, oferecendo aos consumidores um parâmetro adicional para tomada de decisão.

Outro aspecto fundamental para a durabilidade dos microinversores é a proteção contra intempéries e contaminantes, geralmente expressa pela classificação IP (*Ingress Protection*). Todos os microinversores avaliados possuem proteção contra poeira e água, mas em diferentes níveis. Os modelos *Hoymiles*, *Apsystems* e *Deye* possuem classificação IP67, enquanto o *Tech Power* é classificado como IP65. Para exemplificar algumas características técnicas relevantes dos microinversores analisados, a Tabela 2 apresenta um resumo comparativo envolvendo a garantia padrão, possibilidade de extensão da garantia e o grau de proteção dos equipamentos selecionados.

Tabela 2 – Durabilidade e Proteções Integradas

Marca	Garantia Padrão (Anos)	Garantia Estendida (Anos)	Grau de Proteção
<i>APSYSTEMS</i>	15	25	IP67
<i>DEYE</i>	10	N/A	IP67
<i>HOYMILES</i>	12	15	IP67
<i>TECH POWER</i>	15	N/A	IP65

Fonte: (AUTORES, 2025)

A diferença entre IP67 e IP65 está relacionada ao grau de resistência dos equipamentos. A classificação IP67 garante que o equipamento é totalmente protegido contra poeira e pode ser submerso em até 1 metro de água por até 30 minutos sem danos, tornando-o altamente resistente a condições ambientais extremas e ideal para uso em instalações externas sujeitas a umidade e poeira. Já a classificação IP65 também assegura proteção total contra poeira, mas a proteção contra água é mais limitada - o equipamento é protegido apenas contra jatos de água em baixa pressão, mas não deve ser submerso. Assim, o microinversor *Tech Power*, com IP65, é adequado para ambientes externos, mas pode requerer uma instalação em áreas menos expostas a chuvas intensas ou umidade excessiva.

3.5 Monitoramento

O monitoramento dos microinversores das marcas *Apsystems*, *Tech Power*, *Hoymiles* e *Deye* oferece abordagens variadas, uma vez que cada fabricante utiliza uma plataforma de software e protocolos de comunicação próprios.

A *Apsystems*, conta com o sistema EMA, acessível tanto por aplicativo móvel quanto por plataforma web. Este sistema permite que o usuário monitore em tempo real a produção de energia e o desempenho dos microinversores, além de acessar históricos e gerar alertas em caso de falhas. A comunicação entre os microinversores e o gateway ECU pode ser feita através de uma conexão *Zigbee*, que proporciona alta confiabilidade e baixo consumo de energia, garantindo uma transmissão eficiente dos dados.

Em seguida, o ECU se conecta à internet, transmitindo as informações para os servidores da *Apsystems*, onde são processadas e disponibilizadas para o usuário. A Figura 24 ilustra a interface da plataforma EMA, utilizada para o monitoramento e controle dos microinversores da *APsystems*.

Figura 24 - Monitoramento Apsystems



Fonte: (APSYSTEMS, 2020)

A *Tech Power* também disponibiliza uma solução de monitoramento que pode ser nativa ou integrada a plataformas de terceiros, dependendo do modelo. A comunicação se dá, geralmente, por meio de um *gateway* que coleta e envia os dados para o servidor via internet, permitindo que o usuário acompanhe a geração de energia de cada módulo de forma detalhada.

Este sistema permite visualizar a produção de energia em tempo real, e, em alguns modelos, apresenta diagnósticos detalhados, facilitando a resolução de problemas e o acompanhamento histórico do desempenho dos microinversores. A Figura 25 ilustra a plataforma de monitoramento da Tech Power, destacando a visualização da geração de energia dos módulos.

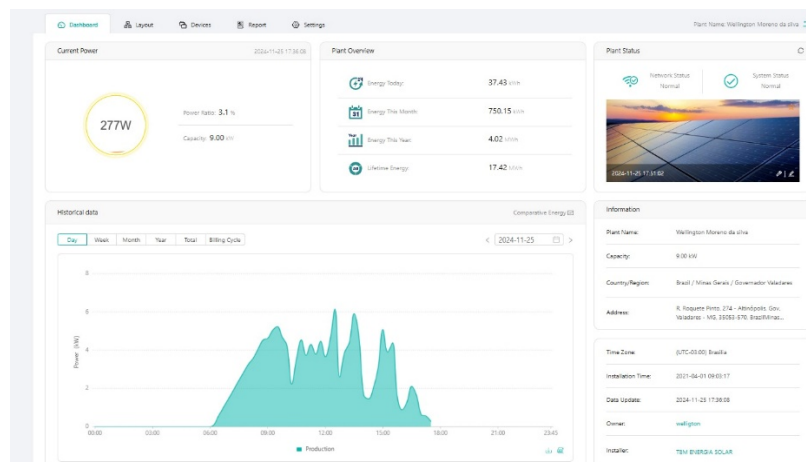
A *Hoymiles* oferece o sistema *S-Miles Cloud*, acessível por dispositivos móveis e via web. Para a comunicação, a *Hoymiles* utiliza um dispositivo DTU, que coleta dados dos microinversores e os transmite ao servidor via Wi-Fi, Ethernet ou até mesmo 4G, dependendo da configuração do sistema.

Figura 25 - Monitoramento Tech Power



Fonte: (AUTORES, 2025)

Figura 26 - Monitoramento Hoymiles



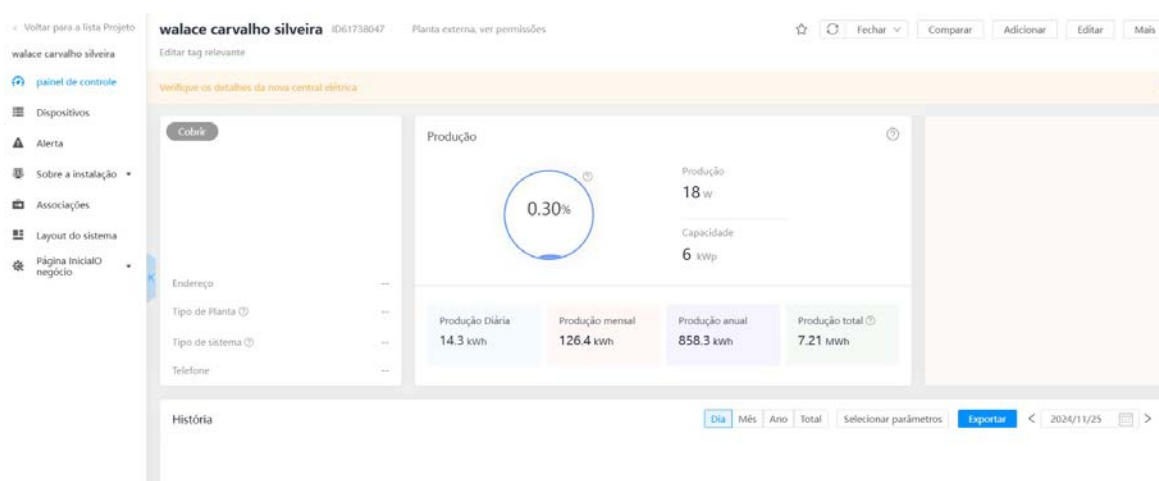
Fonte: (AUTORES, 2025)

O S-Miles Cloud proporciona monitoramento detalhado e em tempo real da geração de cada módulo, e também emite alertas automáticos para falhas, facilitando o diagnóstico remoto de problemas. Além disso, o usuário tem acesso ao histórico completo da produção de energia, o que auxilia na análise e otimização do desempenho do sistema. A Figura 26 ilustra a plataforma S-Miles Cloud, destacando o monitoramento em tempo real e o controle individualizado dos microinversores Hoymiles.

A Deye possui o Deye Portal, que é uma plataforma de monitoramento compatível com aplicativo móvel e acesso web. A conexão é feita através de um *gateway* de comunicação, que pode ser um DTU ou um *Wi-Fi stick*, e permite a transmissão dos dados dos

microinversores para o servidor. No *Deye Portal*, o usuário pode acompanhar a geração de energia em tempo real e acessar o histórico de desempenho de cada microinversor. Assim como as demais plataformas, o sistema da *Deye* permite o envio de alertas para falhas e a realização de diagnósticos, o que facilita a manutenção preventiva e a resolução de problemas no sistema. A Figura 27 ilustra a plataforma *Deye Portal*, destacando o monitoramento em tempo real e os recursos de diagnóstico dos microinversores.

Figura 27 - Monitoramento Deye



Fonte: (AUTORES, 2025)

3.6 Instalação

O processo de instalação é geralmente mais rápido e menos intrusivo, pois os microinversores são compactos e podem ser montados diretamente no módulo fotovoltaico, sem a necessidade de grandes obras ou instalações adicionais. Além disso, por não precisar de um inversor centralizado, o espaço requerido para a instalação é reduzido, o que facilita a adaptação do sistema em locais com limitações de espaço (RAMPINELLI; KRENZINGER; ROMERO, 2013).

3.6.1 Requisitos de Espaçamento e Posicionamento

Boa parte da eficiência e segurança de um sistema fotovoltaico se deve à sua instalação. O primeiro ponto que se deve levar em consideração para a implementação de uma usina fotovoltaica são as possíveis obstruções e pontos para fixação da estrutura.

O manual de instalação da *APsystems* orienta que essa localização deve ser cuidadosamente planejada para evitar qualquer interferência nas conexões e garantir a ventilação adequada. A instalação deve ser realizada utilizando o hardware recomendado pelo

fornecedor da estrutura do módulo fotovoltaico, e o terminal de aterramento do microinversor deve ser posicionado voltado para a estrutura, garantindo a conexão correta com a parte metálica do telhado, o que assegura a segurança do sistema (APSYSTEMS, 2020).

Para um bom funcionamento, permitindo um fluxo de ar adequado e evitar o superaquecimento do equipamento é fundamental garantir um espaçamento mínimo de 1,5 cm entre o microinversor e o teto ou outras superfícies (DEYE, 2020). Outro ponto que garante durabilidade ao equipamento é sua localização, segundo a fabricante *APsystems*, o microinversor não deve ser exposto diretamente ao sol, chuva, mesmo quando posicionado entre os módulos fotovoltaicos. Essa recomendação visa proteger o microinversor contra intempéries, prolongando sua vida útil e garantindo seu funcionamento adequado (APSYSTEMS, 2020). A instalação correta do microinversor, com espaçamento adequado, contribui para a dissipação de calor e otimiza a performance do sistema fotovoltaico, permitindo que o microinversor opere dentro das condições ideais de temperatura (PINHO; GALDINO, 2014).

Um aspecto de grande importância na instalação é o comissionamento da usina e a verificação de toda a fiação de corrente contínua (CC) e corrente alternada (CA), visando encontrar pontos que ocasionam fuga de corrente ou curto-circuito. A fiação errada pode invalidar a garantia do equipamento e comprometer sua operação (PINHO; GALDINO, 2014).

Além disso, a instalação do aterramento dos microinversores deve ser realizada de maneira segura, juntamente com o posicionamento correto dos cabos e conectores, proporciona maior segurança para o sistema e para os usuários evitando risco de choques elétricos entre outros (SILVA, 2019).

Dessa forma, a instalação correta dos microinversores, com atenção aos requisitos de espaçamento, posicionamento e aterramento, assegura não apenas a eficiência do sistema fotovoltaico, mas também a sua segurança a longo prazo (RAMPINELLI; KRENZINGER; ROMERO, 2013). Cada microinversor deve operar de forma independente, o que permite que o sistema se adapte melhor às condições locais de sombreamento e variação de temperatura, otimizando a geração de energia e minimizando a necessidade de manutenção (QUASCHNING, 2016). A Figura 28 mostra a fixação adequada dos microinversores à estrutura do telhado, com espaçamento e organização dos cabos conforme as recomendações técnicas.

Figura 28 - Instalação de Microinversores à Estrutura



Fonte: (CASA DO MICROINVERTOR, 2025)

3.6.2 Facilidade de Instalação

A facilidade de instalação é um ponto em que o microinversor *Apsystems* se destaca. Ele requer apenas um ponto de fixação, preso por um único parafuso, o que simplifica e acelera o processo de instalação. Outros modelos, como o *Deye*, *Hoymiles* e *Tech Power*, exigem dois pontos de fixação, utilizando dois parafusos, o que demanda um pouco mais de tempo e esforço do instalador. Além disso, como o *Apsystems* possui apenas dois MPPTs, a conexão entre os painéis é mais simples do que em modelos com quatro MPPTs, que exigem mais conexões e, portanto, mais trabalho manual durante a instalação.

3.7 Dados Meteorológicos

A análise de dados meteorológicos desempenha um papel importante na avaliação de microinversores, pois variáveis climáticas como irradiância solar, temperatura ambiente, velocidade do vento e condições de sombreamento têm impacto direto no desempenho dos sistemas fotovoltaicos (ECORI, 2024). Para uma comparação precisa, é essencial considerar como essas condições afetam a eficiência de conversão, a estabilidade operacional e a geração de energia ao longo do tempo (CANAL SOLAR, 2025)

Com isso a inclusão de dados meteorológicos se torna um grande pilar na avaliação do desempenho dos microinversores em condições de operação, contribuindo para identificar o equipamento mais eficiente e adequado para cada região. As instituições que fornecem dados confiáveis para esse tipo de análise, o INMET e o CEPEL.

3.7.1 Temperatura Ambiente

Um dos fatores importantes dentro dos dados meteorológicos é a temperatura, uma vez que pode impactar negativamente a eficiência de conversão e a durabilidade dos microinversores. Quanto mais quente a região onde será instalada a usina, maior a necessidade de equipamentos que sejam eficientes na dissipação do calor evitando assim perdas térmicas

Especificamente para o mês de outubro, observa-se uma média de 5,12 kWh/m².dia. Este valor é significativo, pois reflete o potencial energético disponível para a geração fotovoltaica em um dos meses de transição entre o período seco e o chuvoso na região Sudeste do Brasil (INMET, 2024).

Em estudos sobre o comportamento de sistemas fotovoltaicos no Brasil, o mês de outubro é frequentemente destacado como ideal para análises comparativas, devido ao equilíbrio entre alta irradiação e temperaturas ainda moderadas (PINHO; GALDINO, 2014), como observado em Ipatinga. Isso reforça a importância de considerar esses dados para validar o desempenho de diferentes microinversores em condições reais de operação (PEREIRA; SOUSA, 2021).

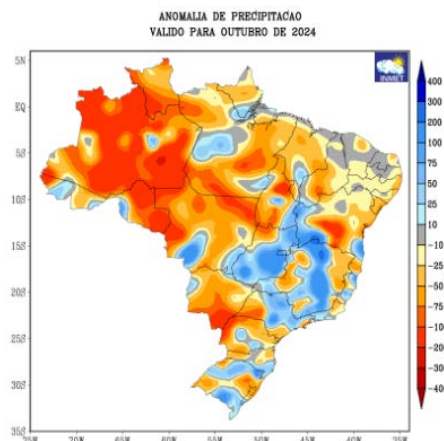
3.7.3 Precipitação

Um dos principais fatores que limitam o desempenho de sistemas fotovoltaicos é a precipitação (INMET, 2024). Isso é justificado pela chegada de nuvens carregadas para que possa chover, ocasionando assim a obstrução da irradiação sobre as placas. Isso ocorre porque as nuvens bloqueiam parte da radiação direta, forçando os microinversores a operarem em condições de menor eficiência, já que a geração depende da radiação difusa (CRESESB, 2014).

A Figura 31 disponibilizada pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), apresenta as anomalias de precipitação no Brasil para o mês de outubro de 2024. Pode-se notar a diferença da precipitação ao longo do território nacional, onde algumas regiões apresentam escassez de chuva enquanto outras apresentam excesso. Em Minas Gerais, onde se encontra Ipatinga, predominam anomalias levemente positivas, sugerindo precipitações acima da média histórica para o mês.

Em Ipatinga, no mês de outubro, a ocorrência de precipitação acima da média implicou em perdas energéticas consideráveis. Além disso, períodos chuvosos mais prolongados podem afetar a estabilidade dos inversores, especialmente em regiões onde a umidade relativa do ar é elevada, destacando a importância de equipamentos resistentes a essas condições ambientais.

Figura 31 - Precipitação Média do Brasil no Mês de Outubro de 2024.



Fonte: (INMET, 2024)

Assim, o estudo da precipitação ao longo do ano é essencial para estimar o impacto das condições climáticas na geração fotovoltaica e identificar as melhores práticas de instalação e configuração dos sistemas (PINHO; GALDINO, 2014).

3.8 Sombreamento do Local

Sombras, sejam elas causadas por árvores, prédios, ou mesmo sujeira acumulada nos módulos, têm um impacto significativo no desempenho de sistemas fotovoltaicos. Como os módulos solares operam conectados em série, a sombra em uma única célula pode reduzir drasticamente a eficiência de todo o sistema, gerando pontos de aquecimento (*hot spots*) que comprometem a durabilidade dos equipamentos (BRITO, 2020).

Além disso, sombras intermitentes podem causar flutuações na potência gerada, prejudicando a estabilidade da operação do microinversor. Sistemas com tecnologia de MPPT (rastreamento do ponto de máxima potência) em nível modular, como os microinversores, conseguem mitigar parcialmente esses impactos, ajustando-se individualmente às condições de cada módulo (CRESESB, 2024)

3.8.1 Impacto de Obstáculos Físicos

A instalação analisada está localizada em um telhado com grande exposição solar, onde os módulos foram posicionados na mesma orientação e na mesma água do telhado, minimizando quaisquer efeitos de sombreamento. Uma análise detalhada foi realizada utilizando o software SolarEdge Designer, uma ferramenta renomada no setor fotovoltaico, que permite simular a incidência solar e calcular a melhor posição para instalação dos módulos, garantindo máxima eficiência energética. Pode ser verificado na Figura 32 o *layout* de

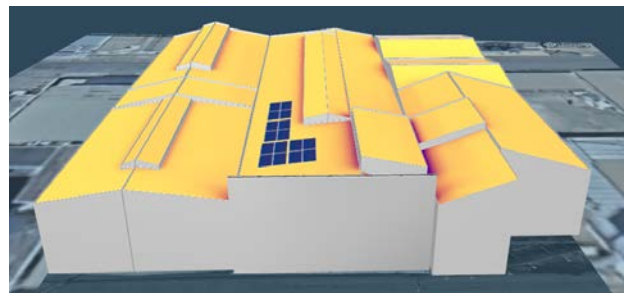
instalação dos módulos e na Figura 33 uma captura do relatório de simulação gerado pelo SolarEdge Designer, que apresenta a análise da trajetória solar e confirma a inexistência de áreas sombreadas ao longo do dia.

Figura 32 - Layout de Instalação dos Módulos.



Fonte: (AUTORES, 2025)

Figura 33 - Mapa de Irradiância



Fonte: (AUTORES, 2025)

A ausência de sombreamento no local foi verificada *in loco* e confirmada por imagens capturadas por drone, bem como pela simulação no *software*. A Figura 34 apresenta a aérea de instalação, capturada por drone, destacando a disposição uniforme dos módulos no telhado, livre de obstruções.

Figura 34 - Área de Instalação



Fonte: (AUTORES, 2025)

3.9 Análise Impacto Ambiental

A fonte fotovoltaica se destaca por ser uma energia limpa e renovável, recebendo atenção no Brasil como útil para fazer energia elétrica. Além disso, se sobressai dentre as outras fontes, por não emitir gases de efeito estufa como o CO₂ (GEE) o que ajuda na luta contra mudanças climáticas (MMA, 2024).

Para cada MWh que é gerado por sistemas solares, evita-se a saída de cerca de 0,7 toneladas de CO₂. Um detalhe muito importante é o acordo que o país fez com o tratado de Paris que fala sobre a neutralidade do clima até o ano 2050 (EPE, 2024).

Mesmo que a solução tenha vários benefícios para o meio ambiente, há problemas ligados à produção dos módulos fotovoltaicos, como o uso de recursos da natureza e a criação de lixo industrial. A retirada e limpeza do silício precisa de altas temperaturas e muito energia, esse é o componente mais importante das células solares.

Outro aspecto ambiental importante, é o uso do solo para a instalação de grandes usinas solares. Em áreas rurais, a implantação de parques fotovoltaicos pode alterar a biodiversidade local e a dinâmica do ecossistema. Entretanto, estudos indicam que o impacto sobre a fauna e flora pode ser mitigado com práticas de manejo sustentável e o uso de tecnologias de monitoramento ambiental (ICMBIO, 2024).

3.9.1 Emissão de CO₂ Evitadas

A adoção de sistemas fotovoltaicos contribui significativamente para a redução das emissões de dióxido de carbono (CO₂) associadas à geração de energia elétrica. Essa economia ocorre porque a energia solar substitui fontes tradicionais, como usinas termelétricas, que utilizam combustíveis fósseis e são responsáveis por altas emissões de gases de efeito estufa (MME, 2024)

Para calcular as emissões de CO₂ evitadas por um sistema fotovoltaico, utiliza-se a equação 1:

$$\text{Emissões evitadas (kgCO}_2\text{)} = \text{Energia G. (kWh)} \times \text{Fator de emissão médio } \left(\frac{\text{kgCO}_2}{\text{kWh}}\right) \quad (1)$$

Energia gerada (kWh): Representa a quantidade de energia elétrica gerada pelo sistema fotovoltaico em um período específico (mensal ou anual).

Fator de emissão médio (kg CO₂/kWh): Corresponde à quantidade média de CO₂ emitida pela matriz elétrica da região ou país para gerar 1 kWh de energia. No Brasil,

considerando a predominância de fontes renováveis na matriz energética, como hidrelétricas, esse valor é mais baixo em comparação a outros países, mas ainda assim relevante para regiões que dependem parcialmente de termelétricas. O fator médio de emissão brasileiro em 2023 foi de aproximadamente 0,07 kg CO₂/kWh (MCTI, 2024).

Na tabela 3, pode ser verificadas as emissões de CO₂ evitadas usando-se os microinversores analisados:

Tabela 3 - Emissões de CO₂ Evitadas.

Marca	Geração no Período (kWh)	Kg CO ₂ Evitado no Período	CO ₂ Evitado (k/20 anos)
APSYSTEMS	235,43	197,76	3.708,02
DEYE	228,55	191,98	3.599,66
HOYMILES	220,55	185,26	3.473,66
TECHPOWER	221,67	186,20	3.491,30

Fonte: (AUTORES, 2025)

A Tabela 3 apresenta os resultados da geração no período de análise e a respectiva quantidade de dióxido de carbono (CO₂) evitada pelos microinversores analisados durante o período de testes. A primeira coluna indica a energia gerada (em kWh) no intervalo monitorado. Na sequência, é apresentado o total de CO₂ evitado em quilogramas (kg) durante esse mesmo período, calculado com base no fator médio de emissão da matriz elétrica brasileira.

Por fim, visando ilustrar o impacto ambiental positivo dos sistemas fotovoltaicos em um horizonte de longo prazo, a última coluna projeta o total de CO₂ que deixaria de ser emitido ao longo de 20 anos de operação, assumindo o mesmo padrão de geração observado no período analisado.

3.10 Metodologia

Inicialmente, foram realizadas leituras de livros e trabalhos como teses, artigos, dissertações, artigos científicos e materiais de fabricantes buscando um melhor entendimento sobre o assunto além da coleta de dados e informações para o trabalho.

Na segunda etapa foi realizado o levantamento de dados dos quatro microinversores, a fim de conseguir apontar as principais características de cada equipamento.

Na terceira e última etapa, após levantamento dos dados necessários, foi possível realizar um comparativo sobre os quatro microinversores com objetivo de apontar a viabilidade deles.

Os indicadores de desempenho são métricas utilizadas para avaliar a eficiência e a eficácia de sistemas fotovoltaicos, como os microinversores, em gerar e converter energia solar.

Eles fornecem uma visão clara sobre o funcionamento de um sistema, ajudando a identificar pontos de melhoria e otimizar o desempenho ao longo do tempo (GAZOLI, 2011).

3.10.1 *Rendimento de Referência*

Uma das métricas empregadas na avaliação da eficiência na conversão de energia em sistemas fotovoltaicos é o rendimento de referência, que é calculado sob condições ideais de operação. Ele relaciona a irradiação no plano dos módulos e a irradiância global no plano horizontal, que possui valor de 1.000 W/m². Portanto, é interpretado como o número de horas na irradiância de 1.000 W/m², ou seja, condição de padrão de teste para irradiação. A finalidade do rendimento de referência é oferecer um padrão para comparações objetivas entre diferentes equipamentos fotovoltaicos, como módulos e inversores (VOLPATO, 2022). Esse indicador é brevemente definido como a relação entre a irradiação solar total incidente e a irradiação de referência padrão de 1000 W/m², é calculado pela seguinte equação:

$$\text{Rendimento de Referência (Yr)} = \frac{\text{Irradiação Incidente (W/m}^2\text{)}}{\text{Irradiação de Referência (W/m}^2\text{)}} \times 100 \quad (2)$$

A eficiência de referência serve como um parâmetro inicial para compreender o rendimento máximo de conversão de energia em um sistema fotovoltaico, enquanto os demais índices de produtividade e desempenho são utilizados para avaliar a eficácia real do sistema durante sua operação.

3.10.2 *Índice de Produtividade*

O índice de produtividade (Yf) é um importante indicador para apontar a eficiência geral do sistema fotovoltaico em relação a incidência de irradiação. Este índice tem o objetivo de relacionar o quanto de energia é efetivamente gerada em relação ao quanto de energia poderia ser gerado se o sistema estivesse em condições de STC para a irradiação incidente presente no local (VOLPATO, 2022). Ele também reflete as perdas decorrentes das operações e os efeitos de fatores externos, como temperatura, sombreamento e eventuais falhas no sistema (SILVA; ALMEIDA, 2020).

Para calcular o índice de produtividade, utiliza-se a relação entre a energia efetivamente produzida pelo sistema e a potência instalada (kWp). A fórmula para determinar esse índice é a seguinte:

$$\text{Índice de Produtividade} = \frac{\text{Energia Gerada (kWh)}}{\text{Cap. Nom. do Sistema (kWp)}} H \quad (3)$$

O índice é expresso em horas, sendo que valores mais elevados indicam um melhor aproveitamento da energia solar disponível (PEREIRA; SOUZA, 2021).

3.10.3 Índice de Desempenho

O índice de desempenho, também conhecido como *Performance Ratio* (PR) mede as perdas totais de um sistema fotovoltaico, considerando fatores como ineficiência do inversor, perdas na fiação, conversão de corrente, condições de instalação, sujeira e desligamentos. Esse índice indica a eficiência real do sistema ao comparar a energia efetivamente gerada com a energia solar disponível nos painéis (FUSANO, 2013). Esse indicador é calculado com base na relação entre a energia efetivamente gerada pelo sistema fotovoltaico (índice de produtividade – Y_f) e a energia que seria gerada caso absorvesse toda a energia disponível no plano considerado (produtividade de referência – Y_r) (FUSANO, 2013). A fórmula para o cálculo do índice de desempenho é:

$$\text{Índice de Desempenho} = \frac{\text{Índice de Produtividade } (Y_f)}{\text{Rendimento de Referência } (Y_r)} \% \quad (4)$$

Esse índice é expresso como uma porcentagem, onde valores mais próximos de 100% indicam que o sistema está operando perto de seu rendimento ideal, enquanto valores abaixo disso refletem perdas operacionais (PEREIRA, 2021). O *Performance Ratio* é uma métrica essencial para identificar o impacto de fatores externos e internos sobre o desempenho do sistema permitindo uma comparação justa entre sistemas que possuem potências diferentes, pois deixa os dados equivalentes. Configura-se também como um excelente indicador para comparar diferentes fabricantes de módulos e inversores, diferentes potenciais de módulo e usinas com áreas diferentes (VOLPATO, 2022).

3.10.4 Indicadores Financeiros

Este é um indicador mais comercial e bastante usado por empresas para expor ao cliente de forma simplificada quanto está sendo pago para ele gerar a energia (VOLPATO, 2022). Indicadores como o *Payback* (tempo de retorno do investimento), o Custo Nivelado de Energia (LCOE) e o índice de retorno sobre o Investimento (IRR) são amplamente utilizados. Esses parâmetros permitem avaliar não apenas o custo inicial, mas também a eficiência econômica ao longo da vida útil do sistema (EPE, 2024).

O *Payback* é um dos indicadores mais utilizados, representando o tempo necessário para recuperar o valor investido. Sistemas fotovoltaicos no Brasil têm apresentado, em média,

um *Payback* entre 2 e 5 anos, dependendo de fatores como eficiência dos equipamentos e condições locais de irradiação (ABSOLAR, 2023).

No presente estudo, esses indicadores permitem comparar os microinversores em termos de custo-benefício, considerando tanto os custos de aquisição e instalação quanto a eficiência na geração de energia. Além disso, fatores como manutenção e eventuais perdas energéticas também impactam diretamente a análise financeira (VIEIRA, 2020)

3.10.5 Dados de Geração Efetivada

A análise dos dados de geração de energia é fundamental para avaliar o desempenho de sistemas fotovoltaicos e comparar a eficiência de diferentes microinversores. Em projetos fotovoltaicos instalados no Brasil, como em Ipatinga/MG, os dados incluem a energia total gerada (kWh), que relaciona a geração efetiva com o potencial nominal do sistema (CRESESB, 2024). No caso do sistema instalado, a coleta foi realizada ao longo de 32 dias, utilizando plataformas de monitoramento integradas aos microinversores, garantindo a precisão e confiabilidade dos resultados.

3.11 Estudo de Caso

Neste capítulo, serão apresentados os dados levantados no estudo e realizadas as análises necessárias para traçar os indicadores de desempenho e financeiros. A partir desses indicadores, será feita a conclusão sobre a viabilidade dos microinversores avaliados.

3.11.1 Produção Energética Mensal

A tabela 4 apresenta os valores diários de energia gerada (em kWh) pelos quatro microinversores analisados: *Tech Power*, *APsystems*, *Deye* e *Hoymiles*, ao longo do período de 16 de outubro de 2024 a 16 de novembro de 2024. A última linha apresenta a soma total da energia gerada por cada microinversor no período.

Tabela 4 - Produção Energética Mensal.

	<i>Apsystems</i>	<i>Deye</i>	<i>Hoymilles</i>	<i>Tech power</i>
16/out	7,77	7,92	7,67	8,07
17/out	12,36	10,33	10,08	8,3
18/out	11,72	7,76	7,51	3,8
19/out	6,74	6,52	6,27	6,3
20/out	2,47	4,16	3,91	5,85
21/out	3,60	3,10	2,85	2,6

	<i>Apsystems</i>	<i>Deye</i>	<i>Hoymilles</i>	<i>Tech power</i>
22/out	6,46	5,26	5,01	4,05
23/out	8,00	6,82	6,57	5,64
24/out	11,43	10,15	9,90	8,86
25/out	6,00	8,40	8,15	10,79
26/out	8,50	7,74	7,49	6,97
27/out	6,50	6,93	6,68	7,35
28/out	3,16	3,21	2,96	3,25
29/out	3,95	3,85	3,60	3,75
30/out	6,25	6,15	5,90	6,04
31/out	10,75	10,54	10,29	10,33
01/nov	9,30	9,06	8,81	8,81
02/nov	10,24	10,27	10,02	10,3
03/nov	6,83	7,45	7,20	8,07
04/nov	7,50	7,95	7,70	8,39
05/nov	5,30	5,54	5,29	5,77
06/nov	9,96	10,30	10,05	10,64
07/nov	8,00	5,31	5,06	2,61
08/nov	6,00	6,22	5,97	6,44
09/nov	6,00	5,59	5,34	5,17
10/nov	2,30	1,70	1,45	1,09
11/nov	7,68	8,94	8,69	10,19
12/nov	12,63	11,94	11,69	11,25
13/nov	8,30	7,97	7,72	7,63
14/nov	2,00	3,53	3,28	5,06
15/nov	9,02	9,17	8,92	9,31
16/nov	8,71	8,85	8,60	8,99
	235,43	228,55	220,55	221,67

Fonte: (AUTORES, 2024)

Durante o período analisado, observa-se que o microinversor *APsystems* obteve a maior geração acumulada de energia, com um total de 235,43 kWh, seguido pelo *Deye* com 228,55 kWh, o *Tech Power* com 221,67 kWh, e, por último, o *Hoymiles*, com 220,55 kWh. A diferença entre o maior e o menor valor total de geração foi de aproximadamente 6,7%, e do primeiro para o segundo foi de 3,01% indicando uma variação relativamente baixa entre os equipamentos.

Os dias de maior geração, como 12 de novembro, destacaram a alta eficiência de todos os microinversores, com todos superando os 11 kWh/dia. Por outro lado, em dias de baixa irradiação, como 10 de novembro, as diferenças entre os equipamentos ficaram mais evidentes, com o *APsystems* mantendo um desempenho superior em relação aos demais.

3.11.2 *Rendimento de Referência*

De acordo com os dados fornecidos pelo CRESESB, a máxima irradiação incidente registrada na região é de 1182 W/m². Na Tabela 5, são apresentados os valores calculados para o indicador Yr.

Tabela 5 - Rendimento de Referência

Irradiação Incidente (W/m ²)	Irradiação de Referência (W/m ²)	Rendimento de Referência (%)
1182	1000	118,2%

Fonte: (AUTORES, 2025)

Com base no cálculo apresentado, o rendimento de referência (Yr) obtido foi de 118,2%, considerando a máxima irradiação incidente de 1182 W/m². Dessa forma, sistemas fotovoltaicos que apresentarem índices de produtividade mais próximos desse valor podem ser considerados mais eficientes, indicando menor ocorrência de perdas relacionadas à conversão de energia, aquecimento dos módulos e outros fatores.

3.11.3 *Índice de Produtividade*

Os dados relacionados ao índice de produtividade dos microinversores analisados evidenciam variações na capacidade de cada equipamento em transformar a energia solar disponível em geração efetiva de energia ao longo do mês. Os dados relacionados às grandezas como geração de energia, capacidade nominal e o cálculo do índice de produtividade foram organizados e apresentados na tabela 6:

Tabela 6 - Índice de Produtividade.

	<i>Apsystems</i>	<i>Deye</i>	<i>Tech Power</i>	<i>Hoymiles</i>
Geração (kWh)	235,4	228,6	221,7	220,6
Capacidade Nominal (kW)	2,2	2,2	2,2	2,2
Índice de Prod. (Yf)	107 h	103,9 h	100,77 h	100,27 h

Fonte: (AUTOR, 2025)

O microinversor *APsystems* apresentou o melhor desempenho, com um índice de produtividade de 107 h, destacando-se como o mais eficiente entre os quatro modelos avaliados. Em seguida, o *Deye* alcançou um índice de 103,9h, também apresentando boa produtividade. Já os microinversores *Tech Power* e *Hoymiles* tiveram índices mais baixos, de 100,77h e 100,27h, respectivamente, demonstrando menor aproveitamento da energia disponível.

Esses resultados refletem a eficiência operacional de cada microinversor, considerando a mesma capacidade nominal de 2,2 kW. Pequenas diferenças nos índices de

produtividade podem ser atribuídas à eficiência dos MPPTs, perdas internas, ou características construtivas específicas de cada modelo.

3.11.4 Índice de Desempenho

Os cálculos do *Performance Ratio* (PR) foram realizados utilizando-se o Rendimento de Referência (Yr) e o Índice de Produtividade (Yf) encontrados anteriormente. Esse dado foi fundamental para avaliar a eficiência operacional de cada microinversor em condições reais de funcionamento. Os resultados obtidos estão organizados na tabela 7:

Tabela 7 - *Perfomace Ratio*

	<i>Apsystems</i>	<i>Deye</i>	<i>Tech power</i>	<i>Hoymiles</i>
Geração(kWh)	235,4	228,6	221,7	220,6
Capacidade Nominal (kW)	2,2	2,2	2,2	2,2
Índice de Produtividade (Yf)	107	103,9	100,77	100,27
Rendimento de Referência (Yr)	118,2	118,2	118,2	118,2
Performance Ratio (PR)	90,5%	87,9%	85,3%	84,8%

Fonte: (AUTOR, 2025)

Com base nos dados obtidos, observa-se que o microinversor *APsystems* apresentou o melhor desempenho, com um PR de 90,5%, demonstrando maior eficiência na conversão da energia disponível em geração útil. O modelo *Deye* ficou em segundo lugar, com um PR de 87,9%, seguido pelos modelos *Tech Power* e *Hoymiles*, com 85,3% e 84,8%, respectivamente.

Esses resultados mostram que, embora todos os microinversores operem em níveis satisfatórios, existem diferenças notáveis em termos de eficiência, o que pode ser atribuído a fatores como características dos inversores, perdas térmicas, eficiência do MPPT e condições de instalação.

3.11.5 Preço kWp

A tabela 8 apresenta o custo do kit fotovoltaico de cada marca analisada (*APsystems*, *Deye*, *Tech Power* e *Hoymiles*), bem como o valor do custo por kWp instalado. Considerando que a capacidade instalada para todos os sistemas é de 2,2 kWp, o preço por kWp foi calculado dividindo o custo total do kit pelo valor de potência instalada.

O menor custo por kWp foi observado no kit da *Tech Power* (R\$ 2.174,50), seguido pela *Hoymiles* (R\$ 2.382,10), *Deye* (R\$ 2.481,80) e, por último, pela *APsystems* (R\$ 2.724,10). Essa diferença no valor por kWp reflete diretamente nos custos iniciais de implantação dos sistemas, sendo um fator relevante para a análise de viabilidade econômica de cada solução.

Tabela 8 - Preço kWp

	<i>Apsystems</i>	<i>Deye</i>	<i>Tech Power</i>	<i>Hoymilles</i>
Custo do kit	R\$5.993,00	R\$5.460,00	R\$ 4.784,00	R\$5.240,73
Qtd kwp	2,2	2,2	2,2	2,2
Preço kwp	R\$2.724,09	R\$2.481,82	R\$ 2.174,55	R\$ 2.382,15

Fonte: (AUTORES, 2025)

3.11.6 Tempo de Retorno

O tempo de retorno do investimento, também conhecido como *Payback*, é um dos principais indicadores financeiros utilizados na análise de sistemas fotovoltaicos. Ele representa o período necessário para que a economia gerada pelo sistema compense o custo inicial de instalação. No presente estudo, o cálculo do *Payback* foi realizado com base nos custos dos kits fotovoltaicos e na economia gerada mensalmente por cada sistema. Conforme apresentado na Tabela 9, são detalhados os custos dos kits fotovoltaicos e a economia anual gerada por cada sistema.

Tabela 9 - Economia Ano (R\$).

	<i>Apsystems</i>	<i>Deye</i>	<i>Tech Power</i>	<i>Hoymilles</i>
Preço kWp (R\$)	R\$ 2.724,09	R\$ 2.481,82	R\$ 2.174,55	R\$ 2.382,15
Preço kWh (CEMIG 10/2024) (R\$)	R\$ 1,06	R\$ 1,06	R\$ 1,06	R\$ 1,06
Geração (kWh) - Período	235,43	228,55	221,67	220,55
Economia Ano (R\$)	R\$ 2.807,5	R\$ 2.725,5	R\$ 2.643,4	R\$ 2.630,1

Fonte: (AUTORES, 2025)

Com base nos dados apresentados, os tempos de retorno aproximados podem ser verificados na tabela 10:

Tabela 10 - *Payback*

	<i>Apsystems</i>	<i>Deye</i>	<i>Tech Power</i>	<i>Hoymilles</i>
Custo do kit fotovoltaico	R\$ 5.993,00	R\$ 5.460,00	R\$ 4.784,00	R\$ 5.240,73
Geração anual (kWh)	2685,37	2606,9	2528,42	2515,65
Economia Ano (R\$)	R\$ 2.846,5	R\$ 2.763,31	R\$ 2.680,13	R\$ 2.666,59
<i>Payback</i> (ano)	2,0	1,9	1,7	1,9
<i>Payback</i> (meses)	25	24	21	24

Fonte: (AUTORES, 2025)

O menor tempo de retorno foi observado no sistema da *Tech Power*, refletindo seu menor custo inicial. Já os sistemas da *Deye* e *Hoymiles* apresentaram valores intermediários, enquanto o sistema da *APsystems* apresentou o maior *Payback*, devido ao custo inicial mais elevado.

4 CONCLUSÃO

Os resultados revelaram diferenças significativas entre os equipamentos avaliados. O microinversor *APsystems* destacou-se como o modelo de melhor desempenho técnico, com o maior índice de produtividade (107 h) e *performance ratio* (90,5%), evidenciando maior eficiência na conversão da energia disponível em geração útil. O *Deye* ocupou a segunda posição, com indicadores também elevados, como um índice de produtividade de 103,9 h e *performance ratio* de 87,9%, enquanto os modelos *Tech Power* e *Hoymiles* apresentaram desempenho semelhante, com índices de produtividade de 100,77 h e 100,27 h, respectivamente, e *performance ratios* de 85,3% e 84,8%.

Quanto ao custo, observou-se que o *APsystems* é o equipamento mais caro entre os avaliados, o que reflete seu maior desempenho técnico e facilidade de instalação. O modelo *Tech Power*, por outro lado, apresentou o melhor custo-benefício, combinando um preço acessível com desempenho adequado para sistemas de pequeno e médio porte. Os modelos *Hoymiles* e *Deye* situaram-se em uma faixa intermediária de custo, oferecendo boas alternativas para projetos em que o orçamento permite priorizar eficiência e facilidade de instalação.

Além disso, a instalação do *APsystems* foi considerada a mais simples devido ao seu menor número de pontos de fixação (apenas um) e a quantidade reduzida de MPPTs, facilitando a conexão de placas e diminuindo a possibilidade de falhas. Por outro lado, os demais equipamentos exigiram maior complexidade no processo de instalação, com dois pontos de fixação e quatro MPPTs.

Por fim, a análise prática, realizada com os equipamentos fornecidos pela empresa T8M Energia Solar, confirmou que todos os modelos são viáveis para aplicações em sistemas fotovoltaicos no Brasil, onde a alta incidência solar favorece a geração de energia. Os dados obtidos em condições reais de operação reforçam a importância de considerar não apenas os indicadores de desempenho técnico, mas também o custo inicial e as facilidades de instalação ao escolher o equipamento mais adequado.

A análise ambiental realizada evidencia que a energia fotovoltaica contribui significativamente para a redução das emissões de CO₂. Pelos dados apresentados, a geração mensal de energia pelos microinversores avaliados proporciona a redução anual de aproximadamente 185 a 198 kg de CO₂, totalizando uma mitigação expressiva entre 3.400 e 3.700 kg ao longo de 20 anos de operação. Esses resultados reforçam o papel dos sistemas fotovoltaicos como apoiadores dos cumprimentos das metas climáticas assumidas pelo Brasil.

Em resumo, o microinversor *APsystems* se mostrou mais eficiente, embora tenha um custo elevado, tornando-o ideal para projetos que priorizam desempenho. Já o *Tech Power* se destacou como a melhor opção em custo-benefício, especialmente para aplicações com recursos limitados. O trabalho reafirma a relevância dos indicadores analisados, como *performance ratio* e custos, para uma escolha assertiva e sustentável no setor fotovoltaico.

5 SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS

Com base nos resultados e limitações deste estudo, recomenda-se para trabalhos futuros a ampliação do número de modelos de microinversores analisados, incluindo equipamentos de diferentes fabricantes e faixas de potência, de modo a explorar a diversidade tecnológica e de mercado disponível.

Outra linha de pesquisa relevante, seria realizar uma comparação direta entre microinversores, inversores tradicionais e sistemas baseados em tecnologias MLPE, avaliando aspectos como eficiência energética, custo-benefício, flexibilidade de instalação e impacto no desempenho de sistemas fotovoltaicos.

Adicionalmente, sugere-se expandir a análise para um maior número de sistemas instalados simultaneamente em diversas regiões do Brasil, contemplando diferentes condições climáticas, níveis de radiação solar e perfis de consumo. Essa abordagem possibilitaria uma avaliação mais abrangente, destacando como fatores geográficos e climáticos influenciam o desempenho dos inversores e microinversores.

Por fim, seria interessante desenvolver um estudo com monitoramento de longo prazo, visando avaliar a durabilidade, manutenção e impacto econômico das diferentes tecnologias ao longo de seu ciclo de vida.

REFERÊNCIAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA (ABSOLAR). *Payback* de energia solar cai mesmo com as novas regras da 14.300. 20 set. 2023. Disponível em: <https://www.absolar.org.br/noticia/payback-de-energia-solar-cai-mesmo-com-as-novas-regras-da-14-300/>. Acesso em: 15 maio 2025.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL). Programa de Desenvolvimento da Geração Distribuída (ProGD). Brasília: ANEEL, 2021. Disponível em: <https://www.gov.br/mme/pt-br/arquivos/document-0-896106613761072.pdf>. Acesso em: 14 maio 2025.
- APsystems. Manual de instalação do microinversor YC1000-3 para o Brasil. Versão 1.0. 2020. Disponível em: https://www.ecorienergiasolar.com.br/assets/uploads/ed322-apsystems-microinverter-yc1000-3-for-brazil-user-manual_rev1.0_2020-09-07-2-.pdf. Acesso em: 05 nov. 2024.
- BARBI, Ivo. Eletrônica de potência. 7. ed. Florianópolis: Edição do autor, 2012. 509 p.
- BELISKI, Letícia Mara; SCARABELOTTI, Letícia Toreti; RAMPINELLI, Giuliano Arns. Análise da qualidade de energia elétrica de sistemas fotovoltaicos de geração distribuída em unidades prosumidoras residenciais. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENERGIA SOLAR, 7., 2018, Gramado. Anais [...]. São Paulo: Associação Brasileira de Energia Solar, 2018. p. 1-8. Disponível em: <https://anaiscbens.emnuvens.com.br/cbens/article/view/61/61>. Acesso em: 03 janeiro 2025.
- BERTOLINI, Geysler Rogis Flor. Financiamento de CT&I para geração de energia fotovoltaica aplicável em propriedades rurais. In: SIMPÓSIO INTERNACIONAL DE GESTÃO DE PROJETOS, INOVAÇÃO E SUSTENTABILIDADE (SINGEP), 6., 2017, São Paulo. Anais [...]. São Paulo: SINGEP, 2017. Disponível em: <https://www.singep.org.br/6singep/resultado/54.pdf>. Acesso em: 12 dezembro 2024
- BMB ENERGY. Potencial de energia solar no Brasil é a maior do mundo. 2022. Disponível em: <https://www.bmbenergy.com.br/potencial-energia-solar/>. Acesso em: 14 maio 2025.
- BRASIL SOLAR. Monitoramento avançado de sistemas fotovoltaicos: Tendências no Brasil. Revista Brasil Solar, ed. 12, 2022
- BRITO, Tiago Henrique Azevedo de. Estudo da viabilidade econômica da instalação de energia solar fotovoltaica ligada à rede, no IFPB, campus Princesa Isabel. 2020. 15 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Especialização em Gestão Ambiental de Municípios) – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba, Princesa Isabel, 2020. Disponível em: <https://repositorio.ifpb.edu.br/handle/177683/1606>. Acesso em: 22 novembro 2024.
- BROWDER, J. H. Solar panel with inverter. United States Patent Application US20110036386A1, 17 fev. 2011. Disponível em: <https://patents.google.com/patent/US20110036386A1/en>. Acesso em: 11 dez. 2024.
- CAMPOS, L.; et al. Desempenho de microinversores em usinas solares no Brasil. Revista Energia Renovável, v. 5, n. 3, 2022.
- CANAL SOLAR. Tecnologia PERC: a nova geração de células fotovoltaicas. Disponível em: <https://canalsolar.com.br/tecnologia-perc-a-nova-geracao-de-celulas-fotovoltaicas/>. Acesso em: 11 maio 2025.

CASA DO MICROINVERTOR. Instalação de Microinversores à Estrutura. Disponível em: <https://microinversor.com.br/tag/energia-solar/page/2/>. Acesso em: 15 maio 2025.

CHEN, W.; et al. Optimization and Reliability of Conventional Microinverters in PV Systems. IEEE Transactions on Energy Conversion, v. 36, n. 1, 2021.

CRESESB. Mapa de irradiação solar no Brasil. Rio de Janeiro: CRESESB, 2024. Disponível em: <https://cresesb.cepel.br/>. Acesso em: 20 nov. 2024.

CRESESB – Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio de Salvo Brito. Manual de engenharia para sistemas fotovoltaicos conectados à rede pública de energia elétrica. 4. ed. Rio de Janeiro: CEPEL, 2022. Disponível em: http://www.cresesb.cepel.br/publicacoes/download/Manual_Engenharia_SFV_Conectado_Rede.pdf. Acesso em: 10 jul. 2025.

CRUZ, Fernanda Tátia; ISIDORO, Marcelo Henrique. Descarte, reciclagem e logística reversa: análise do fim de vida útil dos painéis fotovoltaicos. Brazilian Journal of Development, Curitiba, v. 6, n. 9, p. 73294-73309, set. 2020. DOI: <https://doi.org/10.34117/bjdv6n9-693>. Disponível em: <https://ojs.brazilianjournals.com.br/ojs/index.php/BRJD/article/view/17469>. Acesso em: 08 maio 2025.

DEYE INVERTER. Microinversor. Disponível em: <https://pt.deyeinverter.com/product/microinverter-1/>. Acesso em: 10 dez. 2024.

ECORI ENERGIA SOLAR. Sobre nós. Disponível em: <https://www.ecorienergiasolar.com.br/sobrenos>. Acesso em: 15 nov. 2024.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). Caderno de Tecnologias de Geração 2023. Rio de Janeiro: EPE, 2023. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-745/Caderno%20de%20Tecnologias%20de%20Gera%C3%A7%C3%A3o%202023.pdf>. Acesso em: 14 maio 2025.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). Fontes renováveis atingem 49,1% na matriz energética brasileira. 2025. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/imprensa/noticias/fontes-renovaveis-atingem-49-1-na-matriz-energetica-brasileira>. Acesso em: 11 maio 2025.

FERNANDES, Caíque Gonçalves. Estudo comparativo do uso de inversor string e microinversores na geração de energia elétrica em instalações fotovoltaicas. 2020. 98 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2020. Disponível em: <https://locus.ufv.br/bitstream/123456789/38251/1/texto%20completo.pdf>. Acesso em: 14 maio 2025.

FOTUS ENERGIA. Produtos TECHPOWER. Disponível em: <https://fotus.com.br/tech-power/>. Acesso em: 30 out. 2024.

FUSANO, Renato H. Análise dos Índices de Mérito do Sistema Fotovoltaico Conectado à Rede do Escritório Verde da UTFPR. Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, 2013.

GARCIA, Paulo Henrique Volpato; FUZETI, Giancarlo Ferreira; STROBEL, Christian Scapulatempo. Estudo de viabilidade econômica para conversão de usina eólica onshore em usina híbrida eólico-fotovoltaica. Brazilian Journal of Development, Curitiba, v. 7, n. 1, p. 1080-1095, jan. 2021. DOI: <https://doi.org/10.34117/bjdv7n1-073>. Disponível em:

<https://ojs.brazilianjournals.com.br/ojs/index.php/BRJD/article/view/22612>. Acesso em: 03 dezembro 2024.

GAZOLI, Jonas Rafael. Microinversor monofásico para sistema solar fotovoltaico conectado à rede elétrica. 2011. 204 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação, Campinas, 2011. Disponível em: <http://repositorio.unicamp.br/handle/REPOSIP/314517>. Acesso em: 07 janeiro 2025.

GODOI, Rodolfo Rodrigues de. Análise comparativa de desempenho de inversor String e microinversor. 2017. 83 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2018. Disponível em: <https://repositorio.ufu.br/handle/123456789/24118>. Acesso em: 07 jul. 2025.

GOMES, Vanessa Peres Rezende Garcia. Análise de viabilidade econômica da implantação de um sistema de energia fotovoltaico nas residências uberabenses. Revista Produção Online, Florianópolis, v. 18, n. 4, p. 1541-1567, 2018. DOI: <https://doi.org/10.14488/1676-1901.v18i4.2703>. Disponível em: <https://www.producaoonline.org.br/rpo/article/view/2703>. Acesso em: 14 março 2025.

GOSWAMI, D. Y.; KREITH, F.; KREIDER, J. F. Principles of solar engineering. 3. ed. Boca Raton: CRC Press, 2015. 904 p.

GREEN, M. A. Passivated emitter and rear cell (PERC) technology: current advancements. Progress in Photovoltaics: Research and Applications, v. 29, n. 7, p. 693-701, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1002/pip.3381>.

GREEN, M. A. Third generation photovoltaics: advanced solar energy conversion. Berlin: Springer, 2003. 160 p.

GREEN, M. A.; DUNLOP, E. D.; LEWIS, J.; et al. Solar cell efficiency tables (version 58). Progress in Photovoltaics: Research and Applications, v. 29, n. 1, p. 3-15, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1002/pip.3371>.

HAASE, F.; SCHMID, M.; KÖHLER, T.; et al. Silicon heterojunction solar cells: an outlook on the silicon PV roadmap. Solar RRL, v. 2, n. 10, 1800055, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1002/solr.201800055>.

HART, D. W. Power electronics. New York: McGraw-Hill Education, 2011. 608 p.

HEIN, Henrique. Brasil conectou mais de 625 mil sistemas de geração distribuída em 2023. Canal Solar, 04 jan. 2024. Disponível em: <https://canalsolar.com.br/brasil-conectou-mais-de-625-mil-sistemas-de-geracao-distribuida-em-2023/>. Acesso em: 13 maio 2025.

HOYMILES. S-MILES Cloud. Disponível em: <https://www.hoymiles.com/br/products/homeowners-app/>. Acesso em: 25 out. 2024.

INSTITUTO CHICO MENDES DE CONSERVAÇÃO DA BIODIVERSIDADE (ICMBIO). Disponível em: <https://www.gov.br/icmbio/pt-br>. Acesso em: 20 dez. 2024.

INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA (INMET). Avisos meteorológicos. Disponível em: <https://portal.inmet.gov.br/>. Acesso em: 15 nov. 2024.

LEE ENERGY. Microinversores. Disponível em: <https://www.leeenergy.com.br/>. Acesso em: 5 nov. 2024.

LI, X.; ZHANG, Y.; WANG, J.; et al. Real-time monitoring and maintenance in PV systems: advances in microinverter technology. *Solar Energy*, v. 214, p. 1-10, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2020.12.011>.

MAHMOUD, S.; ABD EL-RAHMAN, M.; ALI, M. Bidirectional inverters for PV-battery systems. *Renewable Energy*, v. 180, p. 1-15, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.08.049>.

MARQUES, Fernando Mario. *Energia solar fotovoltaica: um enfoque multidisciplinar*. Rio de Janeiro: Synergia, 2020. 368 p.

MICROINVERSOR. Instalação de microinversores. Disponível em: <https://microinversor.com.br/?v=dc634e207282>. Acesso em: 12 dez. 2024.

MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA E INOVAÇÕES (MCTI). Relatório Nacional de Emissões de GEE. Disponível em: <https://www.gov.br/mcti>. Acesso em: 16 nov. 2024.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA (MME). Sistema Fotovoltaico Conectado à Rede (SFCR ou On-Grid). Projeto EEE - Eficiência Energética em Edificações. Disponível em: <http://www.mme.gov.br/projeteee/equipamento/sistema-fotovoltaico-conectado-a-rede-sfcr-ou-on-grid/>. Acesso em: 29 nov. 2024.

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE (MMA). Energia. Disponível em: <https://antigo.mma.gov.br/clima/energia.html>. Acesso em: 05 dez. 2024.

MITRATECH. Energia fotovoltaica on grid. Disponível em: <https://mitratech.com.br/mitratech-energia-solar-fotovoltaica/>. Acesso em: 03 mar. 2025.

MORAES, Caio. Os 3 tipos de microinversores fotovoltaicos. *Eletrônica de Potência*, 13 dez. 2021. Disponível em: <https://eletronicadepotencia.com/microinversores-fotovoltaicos/>. Acesso em: 29 nov. 2024.

NEOSOLAR. Diferença micro inversor e inversor string. 2024a. Disponível em: <https://www.neosolar.com.br/aprenda/saiba-mais/microinversor/diferenca-micro-inversor-inversor-string>. Acesso em: 11 novembro 2024.

NEOSOLAR. Sistemas de energia solar fotovoltaica e seus componentes. 2024b. Disponível em: <https://www.neosolar.com.br/aprenda/saiba-mais/sistemas-de-energia-solar-fotovoltaica-e-seus-componentes>. Acesso em: 20 nov. 2024.

OBSERVATÓRIO DO CLIMA. Futuro da energia: visão do Observatório do Clima para uma transição justa no Brasil. Construindo uma potência ambiental. Volume 4 – Brasil. São Paulo: Observatório do Clima, 2024. Disponível em: https://energiaeambiente.org.br/wp-content/uploads/2024/10/OC_Futuro-da-Energia_DIGITAL.pdf. Acesso em: 11 novembro 2024.

OCA ENERGIA. Estrutura do módulo. Imagem. 2024. Disponível em: <https://images.app.goo.gl/yC5iSuQB7RCqai58>. Acesso em: 20 dez. 2024.

OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO (ONS). Balanço de energia. Disponível em: <https://www.ons.org.br/paginas/energia-agora/balanco-de-energia>. Acesso em: 28 nov. 2024.

PASQUALOTTO, Bruna et al. A utilização de placas fotovoltaicas como vantagem competitiva. *Brazilian Journal of Development*, v. 5, n. 1, p. 46-66, 2020.

PEREIRA, T.; SOUSA, L. Análise da produtividade de sistemas fotovoltaicos em diferentes condições climáticas. *Revista Brasileira de Energias Renováveis*, v. 10, n. 2, p. 1-12, 2021.

PINHO, João Tavares; GALDINO, Marco Antonio (orgs.). Manual de engenharia para sistemas fotovoltaicos. 2. ed. rev. e atual. Rio de Janeiro: CEPEL/CRESESB, 2014. 324 p. Disponível em: https://cresesb.cepel.br/publicacoes/download/Manual_de_Engenharia_FV_2014.pdf. Acesso em: 21 março 2025.

PORTAL SOLAR. Energia solar no Brasil. 2025a. Disponível em: <https://www.portalsolar.com.br/energia-solar-no-brasil.html>. Acesso em: 11 maio 2025.

PORTAL SOLAR. Energia solar on-grid ou off-grid? 2025b. Qual devo escolher? 2025. Disponível em: <https://www.portalsolar.com.br/energia-solar-on-grid-ou-off-grid-qual-devo-escolher>. Acesso em: 11 maio 2025.

PORTAL SOLAR. Placa solar monocristalinas e policristalinas: veja as diferenças. 2025c. Disponível em: <https://www.portalsolar.com.br/placa-solar-monocristalinas>. Acesso em: 11 maio 2025.

PORTAL SOLAR. Sistema de energia solar off grid: o que é e como funciona. 2025d. Disponível em: <https://www.portalsolar.com.br/sistema-energia-solar-off-grid>. Acesso em: 11 maio 2025.

QUASCHNING, V. Energia solar: tecnologia e prática. 3. ed. São Paulo: Editora Blucher, 2016. 496 p.

RAMPINELLI, Giuliano Ams; KRENZINGER, Arno; ROMERO, Faustino Chenlo. Descrição e análise de inversores utilizados em sistemas fotovoltaicos. *Revista Ciências Exatas e Naturais*, Guarapuava, v. 15, n. 1, p. 25-30, jan./jun. 2013. Disponível em: <https://www2.unicentro.br/revistaexatasenaturais/files/2013/08/03-Descricao-e-analise-de-inversores-utilizados-em-sistemas-fotovoltaicos.pdf>. Acesso em: 14 dezembro 2024.

REATTI, A.; KAZIMIERCZUK, M. K. Flyback converters with buck-boost integrated functions. *Journal of Power Electronics*, v. 1, n. 2, p. 150-157, 2001.

SANTOS, E.; FERREIRA, A. Microinversores integrados: potencial no mercado brasileiro. *Sistemas Fotovoltaicos Magazine*, v. 3, n. 2, p. 45-49, 2021.

SEIA - Solar Energy Industries Association. Integrated microinverter modules: market overview. Washington, DC: SEIA, 2023. Disponível em: <https://www.seia.org/research-resources/integrated-microinverter-modules-market-overview>. Acesso em: 24 abril 2025.

SILVA, M. Energia solar: sistemas e tecnologias. Rio de Janeiro: Editora LTC, 2019. 320 p.

SILVA, R.; ALMEIDA, L. Indicadores de desempenho de sistemas fotovoltaicos: uma revisão. Campinas: Editora Energias Renováveis, 2020.

SOLAR DOS POMARES. Melhores microinversores: conheça as opções mais vendidas e confiáveis no Brasil. Disponível em: <https://solardospomares.com.br/melhores-microinversores/>. Acesso em: 08 jul. 2025.

SOLAR MAGAZINE. Como escolher componentes para usinas solares: fatores técnicos e ambientais. Disponível em: <https://solarmagazine.com.br>. Acesso em: 08 jul. 2025.

SOL FACIL. Microinversor Deye: o que é, vantagens e como escolher. 2024. Disponível em: <https://blog.solfacil.com.br/energia-solar/microinversor-deye/>. Acesso em: 29 nov. 2024.

SOPRANO. Microinversor. Disponível em: <https://www.soprano.com.br/energia/energia-solar/microinversor>. Acesso em: 09 outubro 2024.

SOUZA. Diferença entre células fotovoltaicas policristalinas e monocristalinas. Imagem. 2019. Disponível em: <https://images.app.goo.gl/aaaH8EpgZgjZ4CRV6>. Acesso em: 28 out. 2024.

TECHPOWER. WVC 2000. Disponível em: <https://www.technologypower.com.br/wvc-2000>. Acesso em: 15 nov. 2024.

TONIN, Fabianna Stumpf. Caracterização de sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica na cidade de Curitiba. 2017. 130 f. Dissertação (Mestrado em Sistemas de Energia) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2017. Disponível em: <http://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/handle/1/2946>. Acesso em: 01 dezembro 2024.

T8M ENERGIA SOLAR. Painel fotovoltaico instalado em telhado residencial. Imagem cedida pela empresa. Recebida em: 04 abr. 2025.

URBANETZ JUNIOR, Jair; RÜTHER, Ricardo. Qualidade de energia elétrica e o funcionamento de inversores de sistemas fotovoltaicos conectados à rede. Revista Brasileira de Energia Solar, v. 2, n. 1, p. 17-24, 2011. DOI: <https://doi.org/10.30920/rbes.2011.v2.n1.55>. Disponível em: <https://rbens.emnuvens.com.br/rbens/article/view/55>. Acesso em: 15 novembro 2024.

VAN DER MERWE, A. Battery-integrated microinverters: emerging trends. Journal of Sustainable Energy, v. 12, n. 2, p. 55-62, 2023.

VIEIRA, Toniangelo Costa. Monitoração, produtividade e taxa de desempenho energético de 37 micro e mini sistemas fotovoltaicos instalados em Minas Gerais. 2020. 120 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2020. Disponível em: <https://repositorio.ufmg.br/handle/1843/34843>. Acesso em: 14 fevereiro 2025.

VIAN, Ângelo; TAHAN, Carlos Marcio Vieira; AGUILAR, Guido Javier Rostegui; GOUVEA, Marcos Roberto; GEMIGNANI, Matheus Mingatos Fernandes. Energia solar: fundamentos, tecnologia e aplicações. São Paulo: Blucher, 2021. 129 p. ISBN 9786555500592. Disponível em: <https://openaccess.blucher.com.br/article-list/9786555500592-493/list/>. Acesso em: 25 fevereiro 2025.

VOLPATO, Evandro Luis. Análise do rendimento na conversão de energia solar em energia elétrica, de quatro tecnologias de células fotovoltaicas, na cidade de Campo Mourão – Estado do Paraná. 2022. 139 f. Dissertação (Mestrado em Inovação Tecnológica) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campo Mourão, 2022. Disponível em: <https://riut.utfpr.edu.br/jspui/handle/1/30337>. Acesso em: 09 março 2025.

WEG. Produtos. Disponível em: <https://www.weg.net/solar/br/produtos/>. Acesso em: 14 nov. 2024.