

BRUNO BORTOLINI PACHECO

Análise Comparativa de Sistemas Fotovoltaicos com Inversores String e Tecnologias MLPE

Uberlândia – MG
2024

BRUNO BORTOLINI PACHECO

Análise Comparativa de Sistemas Fotovoltaicos com Inversores String e Tecnologias MLPE

Trabalho de Conclusão de Curso da
Engenharia Elétrica da Universidade
Federal de Uberlândia - UFU - Câmpus
Santa Mônica, como requisito para a
obtenção do título de Graduação em
Engenharia Elétrica

Orientador: Prof. Augusto Wohlgemuth
Fleury Veloso da Silveira

Uberlândia – MG
2024

RESUMO

Com o avanço tecnológico e a crescente preocupação com energias sustentáveis, surgem alternativas e otimizações para garantir o fornecimento de energia elétrica. Este trabalho tem como objetivo realizar uma análise comparativa entre inversores string e tecnologias MLPE (Module-Level Power Electronics), com foco especial nos microinversores, em sistemas fotovoltaicos de pequeno porte. A energia solar fotovoltaica tem se destacado como uma alternativa promissora para suprir as demandas crescentes de energia em todo o mundo, especialmente considerando os custos e impactos ambientais associados às fontes de energia convencionais. Os inversores desempenham um papel fundamental na conversão da corrente contínua gerada pelos painéis solares em corrente alternada, adequada para uso doméstico e para alimentar a rede elétrica. A tecnologia MLPE, que inclui os microinversores, permite a individualização dos painéis e opera em baixo nível de tensão, o que contribui para maximizar a eficiência e a segurança dos sistemas fotovoltaicos. Além disso, essa tecnologia oferece vantagens técnicas e econômicas significativas, como maior eficiência na produção de energia, mitigação de perdas devido a sombreamentos parciais e flexibilidade na instalação. Por meio de uma revisão teórica, serão abordadas as definições gerais dos inversores solares, sua evolução ao longo do tempo e os efeitos de mismatch em sistemas fotovoltaicos. A análise comparativa entre inversores string e tecnologias MLPE será realizada considerando aspectos técnicos de desempenho, visando fornecer insights valiosos para a escolha e implementação eficiente de sistemas fotovoltaicos, promovendo assim o avanço do mercado de energia solar no Brasil e em outros contextos similares.

Palavras-chave: *MPLE, Sistemas Fotovoltaicos, Microinversores, Energia, Inversor String.*

ABSTRACT

With technological advancement and growing concerns about sustainable energies, alternatives and optimizations emerge to ensure the supply of electric power. This work aims to conduct a comparative analysis between string inverters and MLPE (Module-Level Power Electronics) technologies, with a special focus on microinverters, in small-scale photovoltaic systems. Solar photovoltaic energy has stood out as a promising alternative to meet the increasing energy demands worldwide, especially considering the costs and environmental impacts associated with conventional energy sources. Inverters play a crucial role in converting the direct current generated by solar panels into alternating current, suitable for domestic use and for powering the electrical grid. MLPE technology, which includes microinverters, allows for the individualization of panels and operates at a low voltage level, contributing to maximizing the efficiency and safety of photovoltaic systems. Moreover, this technology offers significant technical and economic advantages, such as increased energy production efficiency, mitigation of losses due to partial shading, and flexibility in installation. Through a theoretical review, general definitions of solar inverters, their evolution over time, and the effects of mismatch in photovoltaic systems will be addressed. The comparative analysis between string inverters and MLPE technologies will be conducted considering technical performance aspects, aiming to provide valuable insights for the efficient choice and implementation of photovoltaic systems, thus promoting the advancement of the solar energy market in Brazil and in other similar contexts.

Keywords: *MPLE, Photovoltaic Systems, Microinverters, Energy, String Inverter.*

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Matriz Energética Brasileira.....	9
Figura 2 - Funcionamento Sistema Solar On-Grid.....	15
Figura 3 - Irradiação Solar Brasileira.....	16
Figura 4 - Módulos Solares.....	17
Figura 5 - Dopagem da Célula Fotovoltaica.....	18
Figura 6 - Estrutura do Módulo.....	18
Figura 7 - Funcionamento Diodo de Bypass.....	19
Figura 8 - Curva de Funcionamento.....	21
Figura 9 -Estrutura interna do inversor SE33.3K.....	22
Figura 10 - Curva MPPT.....	23
Figura 11 -Inversor Tradicional Growatt.....	25
Figura 12 - Microinversor ApSystems.....	26
Figura 13 - Sombreamento de String.....	27
Figura 14 - Efeito de Mismatch.....	28
Figura 15 – Usina Analisada Inversor Tradicional.....	31
Figura 16 – Usina Analisada MLPE.....	31
Figura 16 – Monitoramento EMA APsystems.....	34
Figura 17 - Monitoramento Fusion Solar (Inversor Tradicional).....	35
Figura 18 - Gráfico Comparativo de Geração.....	37

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Ranking Participação mercado brasileiro.....	10
Tabela 2 – UFV com Inversor String.....	32
Tabela 3 - UFV com Microinversor.....	33
Tabela 4 - Dados de Geração Inversor String.....	35
Tabela 5 - Dados de Geração Microinversor.....	36

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

MLPE	Module-Level Power Electronics
MPPT	Maximum Power Point Tracking
Wp	Watt-pico
UFV	Usina Fotovoltaica
CC	Corrente Contínua
CA	Corrente Alternada
PR	Performance Ratio

SUMÁRIO

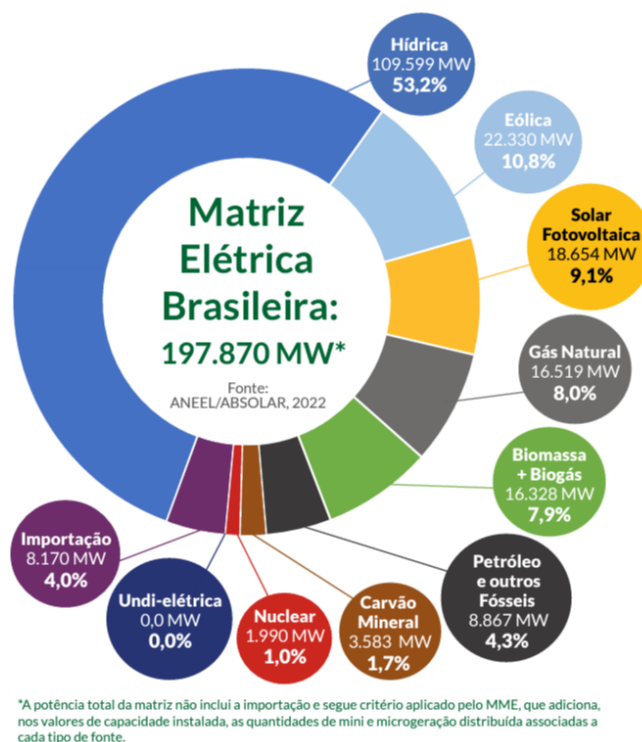
1. INTRODUÇÃO.....	9
1.1 Justificativa.....	11
1.2 Objetivos.....	11
1.2.1 Objetivo Geral:.....	11
1.2.2 Objetivos Específicos:.....	11
2. REFERENCIAL TEÓRICO.....	12
2.1 Contexto Histórico da Descoberta do Efeito Fotovoltaico.....	12
2.2 Desenvolvimento da Tecnologia ao Longo do Tempo.....	12
2.2.1 Crescimento da Energia Solar.....	13
2.3 Energia Solar no Brasil.....	13
2.3.1 Crescimento da Participação Solar na Matriz Energética.....	14
2.3.2 Desenvolvimento das Normativas para o Setor.....	14
2.3.3 Adesão por Parte dos Pequenos Consumidores de Energia.....	14
2.4 Funcionamento do Sistema Solar.....	15
2.4.1 Irradiação Solar.....	16
2.5 Módulo Fotovoltaicos.....	16
2.5.1 Estrutura das Células Solares.....	17
2.5.2 Formação dos Módulos Solares.....	19
2.5.3 Potência de Pico (Wp).....	20
2.5.4 Tensão de Circuito Aberto (Voc).....	20
2.5.5 Corrente de Curto-Circuito (Isc).....	20
2.5.6 Tensão e Corrente no Ponto de Máxima Potência (Vmp e Imp).....	20
2.5.7 Curva Característica I-V.....	21
2.6 Inversor Fotovoltaico.....	21
2.6.1 Função de Conversão CC para CA.....	22
2.6.2 Proteção e Monitoramento.....	22
2.6.3 Conceito de MPPT (Maximum Power Point Tracking).....	23
2.6.4 Eficiência do Sistema com MPPT.....	23
2.6.5 Conceito de String.....	24
2.7 Tipos de Inversores.....	24
2.7.1 Inversor String.....	24
2.7.2 Micro Inversor.....	25
2.8 Fatores que Influenciam na Geração.....	26
2.8.1 Sombreamento.....	27
2.8.2 Mismatch (Desempenho Desigual entre Módulos).....	27
2.8.3 Eficiência do Inversor.....	28
2.9 Métricas para Análise de Desempenho.....	29
2.9.1 Produção Específica (kWh/kWp).....	29

2.9.2 Taxa de Performance (PR - Performance Ratio).....	29
2.9.3 Relação de Capacidade.....	30
3. METODOLOGIA.....	30
3.1 Estudo de Caso.....	30
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	35
4.1 Cálculos Comparativos.....	38
4.2 Retorno Financeiro.....	39
5. CONCLUSÃO.....	40
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	41

1. INTRODUÇÃO

A busca global com interesse na adoção de fontes de energia renováveis, apresenta um crescimento exponencial, impulsionando assim o desenvolvimento e os investimentos na implementação de sistemas fotovoltaicos (FV) ao redor de todo o mundo. Afunilando esta visão para o território brasileiro, este fenômeno se evidencia, por conta do setor fotovoltaico estar experimentando um notável crescimento nos anos recentes. De acordo com dados da Associação Brasileira de Energia Solar Fotovoltaica (ABSOLAR), o Brasil atingiu a marca de 18.654 megawatts (MW) de potência operacional instalada em sistemas solares fotovoltaicos em território nacional até setembro de 2022, demonstrando um aumento significativo se comparado a, com anos anteriores (ABSOLAR, 2022).

Figura 1 - Matriz Energética Brasileira



Fonte: Adaptado de Absolar

Diante do crescimento exponencial da implementação de sistemas fotovoltaicos a nível global, uma evolução marcante foi a implementação das tecnologias de Módulos Fotovoltaicos de Potência Máxima (MLPE), que têm desempenhado um papel crucial na maximização de desempenho dos sistemas solares com a utilização dos microinversores. Segundo a Solar Energy Industries Association (SEIA), os microinversores representaram aproximadamente 63% do mercado residencial de inversores fotovoltaicos nos Estados

Unidos em 2023, evidenciando assim uma tendência crescente na escolha desta tecnologia (SEIA, 2023).

Esta ascensão da preferência pela utilização de microinversores em sistemas fotovoltaicos nos Estados Unidos, demonstra um aumento da confiança dos consumidores e instaladores nas vantagens oferecidas pela tecnologia MLPE ganhando cada vez mais espaço no mercado global se compararmos com os sistemas convencionais que utilizam inversores string.

No Brasil, podemos observar um padrão semelhante de aumento na adoção desta tecnologia, impulsionada na procura por soluções cada vez mais eficientes, confiáveis e adaptáveis às necessidades específicas de cada projeto tendo em vista o aumento da demanda por usinas fotovoltaicas residenciais e comerciais de menor escala onde os benefícios dos microinversores, se destacam em relação ao método tradicional por conta da maior eficiência na produção de energia, a mitigação de perdas devido a sombreamentos parciais, a flexibilidade na instalação e segurança,.

Tradicionalmente, os microinversores eram percebidos como uma opção mais dispendiosa em comparação com os inversores string. No entanto, avanços tecnológicos e economias de escala têm contribuído para a redução dos custos dos equipamentos, tornando-os cada vez mais competitivos visto que a Hoymilis e Apsystems, fabricantes exclusivamente de microinversores, foi apontada em 2022 na 14° e 15° posição respectivamente no ranking dos fabricantes de inversores fotovoltaicos com maior participação no mercado brasileiro (ePowerBay 2022).

Tabela 1 - Ranking Participação mercado brasileiro

Ranking ePowerBay sobre a participação dos fabricantes no mercado brasileiro			
1° Growatt	5° Deye	9° Renovig	13° Canadian
2° Fronius	6° Solis	10° ABB	14° Hoymiles
3° Sungrow	7° Sofar	11° PHB	15° Apsystems
4° WEG	8° Huawei	12° Goodwe	

1.1 Justificativa

Na sociedade contemporânea, já se faz uma realidade a busca incessante pela otimização dos processos e sistemas. Considerando o contexto brasileiro, onde o setor fotovoltaico está em rápido crescimento e há um aumento na demanda por soluções de energia limpa e sustentável, é crucial investigar as novas tecnologias e acompanhar sua constante evolução, especialmente no campo da energia solar, considerada por muitos como a fonte de energia mais promissora do mundo. Este estudo visa contribuir para o entendimento e aprimoramento dessas tecnologias, fornecendo insights importantes para a eficiência e confiabilidade dos sistemas fotovoltaicos em um contexto de geração distribuída contribuindo também para o avanço do mercado de energia solar no Brasil, promovendo a adoção eficiente e sustentável da energia solar em residências, empresas e setores industriais.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo Geral:

O objetivo deste trabalho é realizar uma análise comparativa entre os sistemas fotovoltaicos com inversores string e as tecnologias MLPE (Module-Level Power Electronics), com ênfase nos microinversores, em sistemas fotovoltaicos de pequeno porte. A análise abordará aspectos técnicos, de desempenho, segurança e econômicos, visando identificar e comparar as vantagens oferecidas por cada tecnologia.

1.2.2 Objetivos Específicos:

- Realizar uma revisão bibliográfica abrangente sobre os sistemas fotovoltaicos, incluindo inversores string e tecnologias MLPE, destacando suas características técnicas, princípios de funcionamento e aplicações.
- Coletar dados técnicos e de desempenho de sistemas fotovoltaicos com inversores string e microinversores, a fim de comparar sua eficiência energética, produção de energia e resposta a variações ambientais.
- Avaliar a segurança oferecida pelos sistemas fotovoltaicos com microinversores em comparação com os sistemas com inversores string, considerando aspectos como proteção contra curtos-circuitos, sobrecargas, arcos elétricos e outros problemas elétricos.
- Realizar uma análise econômica comparativa entre os sistemas fotovoltaicos com inversores string e as tecnologias MLPE, levando em conta não apenas os custos

iniciais de aquisição e instalação, mas também os custos de manutenção, operação e os retornos financeiros ao longo do tempo.

- Apresentar conclusões e recomendações baseadas na análise comparativa realizada, fornecendo insights para consumidores, instaladores, pesquisadores e formuladores de políticas interessados na implantação eficiente e sustentável de sistemas fotovoltaicos de pequeno porte.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Contexto Histórico da Descoberta do Efeito Fotovoltaico

O efeito fotovoltaico, que é a base da tecnologia solar, foi primeiramente observado em 1839 pelo físico francês Alexandre-Edmond Becquerel. Ele descobriu que certos materiais geravam eletricidade quando expostos à luz solar. No entanto, foi apenas em 1883 que o inventor americano Charles Fritts criou a primeira célula fotovoltaica prática, utilizando selênio coberto com uma fina camada de ouro. Essa célula apresentou uma eficiência de conversão de energia muito baixa, em torno de 1%.

Durante o século XX, a pesquisa e o desenvolvimento das células solares continuaram. A primeira célula solar de silício foi criada em 1954 por cientistas da Bell Laboratories nos Estados Unidos, resultando em uma célula com eficiência de aproximadamente 6%. Essa inovação levou à criação de painéis solares, que começaram a ser utilizados em aplicações espaciais, como a alimentação de satélites, nos anos 60.

Na década de 1970, com a crise do petróleo, houve um aumento no interesse pela energia solar como uma alternativa viável às fontes fósseis. O desenvolvimento contínuo de tecnologias e a redução dos custos de produção de células solares, especialmente a partir dos anos 2000, impulsionaram o crescimento do setor solar globalmente.

2.2 Desenvolvimento da Tecnologia ao Longo do Tempo

Desde a década de 2000, houve um avanço significativo na eficiência e na redução de custos das células fotovoltaicas. As tecnologias de células solares evoluíram com o desenvolvimento de diferentes tipos de módulos, como:

Células de Silício Cristalino: Estas são as mais comuns e incluem células de silício mono e policristalino, com eficiência variando entre 15% a 22%.

Células de Filme Fino: Incluem tecnologias como CIGS (cobre, índio, gálio e selênio) e CdTe (telureto de cádmio). Embora tenham eficiência menor (10% a 13%), são mais leves e flexíveis.

Células de Perovskita: Uma tecnologia emergente que tem mostrado promessas com eficiências superiores a 25% em laboratório, embora ainda enfrente desafios em termos de durabilidade e produção em larga escala.

A indústria fotovoltaica também se beneficiou do desenvolvimento de novas técnicas de fabricação, como o uso de nanotecnologia e a melhoria dos processos de montagem, contribuindo para uma redução significativa nos custos dos módulos solares e aumentando a acessibilidade da energia solar.

2.2.1 Crescimento da Energia Solar

Nos últimos anos, a energia solar cresceu exponencialmente, impulsionada pela crescente conscientização sobre as mudanças climáticas, a busca por fontes de energia renováveis e os incentivos governamentais. De acordo com a Agência Internacional de Energia (AIE), a capacidade instalada de energia solar globalmente cresceu de aproximadamente 40 GW em 2010 para mais de 1.000 GW em 2020. Este crescimento foi impulsionado por fatores como a redução de custos dos sistemas, políticas de apoio e inovações tecnológicas.

2.3 Energia Solar no Brasil

O Brasil possui um enorme potencial para a geração de energia solar, devido a fatores como:

Alta Irradiância Solar: O país está localizado em uma região tropical com alta incidência de radiação solar, com várias regiões apresentando mais de 2.000 horas de sol por ano.

Extensa Área Disponível: A vasta extensão territorial do Brasil permite a instalação de grandes usinas solares, além de potencial para micro e mini geração em áreas urbanas e rurais.

Demanda Crescente por Energia: Com a crescente demanda por energia, especialmente em regiões em desenvolvimento, a energia solar se apresenta como uma alternativa viável e sustentável.

2.3.1 Crescimento da Participação Solar na Matriz Energética

Nos últimos anos, a participação da energia solar na matriz energética brasileira cresceu significativamente. Em 2020, a energia solar representava cerca de 1,2% da matriz elétrica do país, com uma capacidade instalada de aproximadamente 10 GW. Este número cresceu exponencialmente desde então, e o setor solar continua a atrair investimentos, com previsões de que a energia solar se torne uma das principais fontes de energia do Brasil nas próximas décadas.

2.3.2 Desenvolvimento das Normativas para o Setor

O desenvolvimento de normativas específicas para o setor de energia solar no Brasil tem sido crucial para o crescimento da energia solar no país. Entre os marcos regulatórios, destaca-se a resolução da ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica) nº 482/2012, que permitiu a micro e minigeração de energia, incentivando a adesão de pequenos consumidores. Essa regulamentação permitiu a compensação de energia, onde consumidores que geram energia solar podem abater a energia produzida de suas contas de luz.

Em 2020, a ANEEL lançou a nova resolução nº 887/2020, que trouxe mudanças significativas para a compensação de energia gerada, impactando o setor e estabelecendo novas regras para a adesão de sistemas de micro e minigeração. Entretanto ainda havia diversas questões tanto de regulamentação dos sistemas e das concessionárias elétricas.

Por esta razão, em 2022 obtivemos a última atualização de normas para o setor de energia solar, a qual foi a N° 14.300. Nela se definiu por completo as regras do sistema fotovoltaico, juntamente com incentivos e a inclusão de impostos na energia injetada pelos sistemas, que ficou comumente conhecido como “Taxação do Sol”.

2.3.3 Adesão por Parte dos Pequenos Consumidores de Energia

A adesão à microgeração de energia solar tem aumentado rapidamente no Brasil, especialmente entre pequenos consumidores, como residências e pequenos comércios. O crescimento do mercado foi impulsionado pela redução dos custos dos sistemas fotovoltaicos, que tornaram a instalação de painéis solares uma opção mais acessível. O financiamento por meio de linhas de crédito específicas e programas de incentivo também tem contribuído para essa adesão.

Em 2021, o Brasil contava com mais de 400 mil sistemas de microgeração conectados à rede, refletindo um aumento considerável na participação de consumidores individuais que optam por gerar sua própria energia. Este movimento não só ajuda a reduzir custos com a

conta de energia, mas também promove uma maior independência energética e contribui para a sustentabilidade

2.4 Funcionamento do Sistema Solar

O funcionamento de um sistema fotovoltaico baseia-se na conversão da energia solar em eletricidade por meio do efeito fotovoltaico. Este fenômeno ocorre quando a radiação solar interage com materiais semicondutores, como o silício, presente nas células solares. A energia dos fótons é transferida para os elétrons do material, fazendo com que eles se movam e gerem uma corrente elétrica. A corrente contínua (DC) resultante é, então, convertida em corrente alternada (AC) por um inversor fotovoltaico para que possa ser utilizada em cargas residenciais ou comerciais, ou injetada na rede elétrica. Esse processo de conversão se dá em etapas: captura da luz solar pelos módulos, geração de energia elétrica em forma de DC, conversão para AC, e, por fim, controle e medição do sistema. Para um funcionamento eficiente, é crucial um bom dimensionamento e posicionamento dos módulos, considerando a inclinação, orientação e a irradiância solar local. A figura 2 a seguir representa este esquema.

Figura 2 - Funcionamento Sistema Solar On-Grid



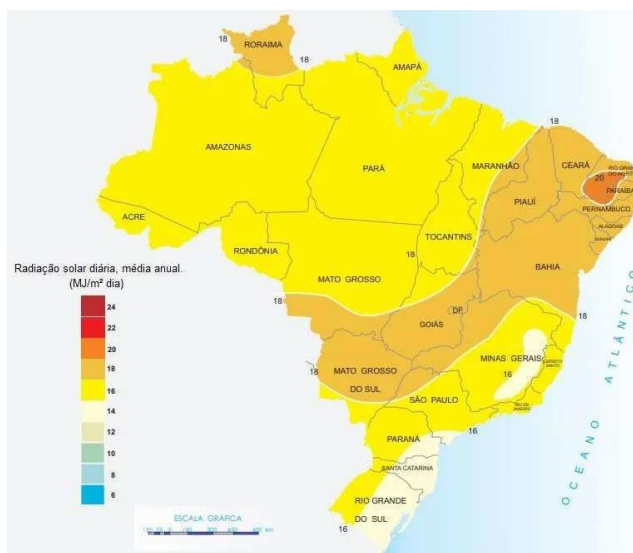
Fonte: Adaptado Luz Solar

2.4.1 Irradiação Solar

A irradiação solar refere-se à quantidade de radiação solar incidente sobre uma superfície por unidade de área, expressa em Wh/m^2 por dia ou kWh/m^2 por ano. Esse parâmetro é fundamental para o dimensionamento e a previsão de desempenho de sistemas fotovoltaicos, pois influencia diretamente a quantidade de energia que o sistema pode gerar. A irradiação solar varia conforme fatores como a latitude do local, a estação do ano, a hora do

dia e as condições atmosféricas. Para projetar sistemas fotovoltaicos com precisão, são utilizados dados históricos de irradiação, que podem ser obtidos por meio de satélites, sensores em solo ou de bancos de dados climatológicos.

Figura 3 - Irradiação Solar Brasileira



Fonte: Adaptado de Atlas Brasileiro de Energia Solar

2.5 Módulo Fotovoltaicos

Os módulos fotovoltaicos, também conhecidos como painéis solares, são compostos por várias células solares conectadas em série e/ou em paralelo para aumentar a capacidade de geração de energia. Cada célula solar, a menor unidade funcional do módulo, é um dispositivo de estado sólido feito de materiais semicondutores, geralmente silício cristalino (monocristalino ou policristalino), ou de filmes finos, como telureto de cádmio (CdTe) ou dissulfeto de cobre-índio-gálio (CIGS).

Na figura 4 abaixo, pode-se observar os modelos mais comuns de painéis encontrados no mercado.

Figura 4 - Módulos Solares



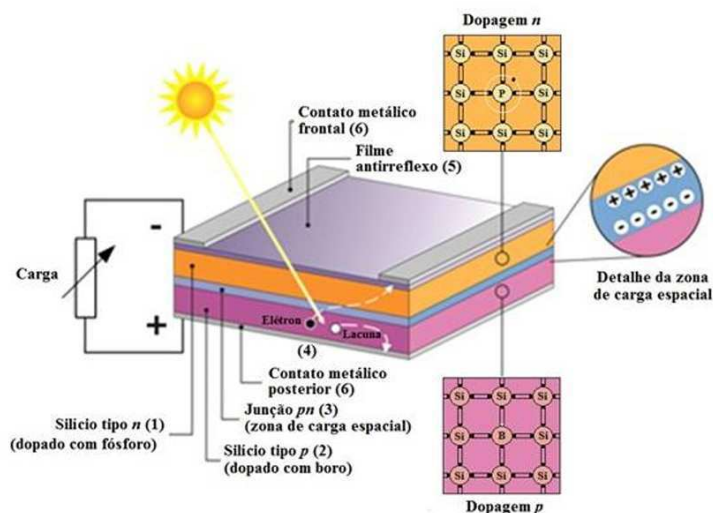
Fonte: Adaptado de Ecori

2.5.1 Estrutura das Células Solares

As células fotovoltaicas são formadas por duas camadas semicondutoras: a camada tipo “p” (positiva) e a camada tipo “n” (negativa), estas por sua vez, dão origem a um campo elétrico e, por ventura a uma diferença de potencial (V_{pn}). Segundo Duffie e Beckman (2013), “a estrutura p-n é fundamental para a criação do campo elétrico que separa os portadores de carga e gera a corrente elétrica”. Quando este recebe energia de uma fonte externa, no caso serão os fótons presentes na luz solar, que ao realizar a excitação dos elétrons, os induzem a passar da camada de valência para a de condução.

Assim, um circuito externo conectado entre as camadas positiva e negativa da célula fotovoltaica permite a geração de uma corrente elétrica, que flui através de condutores e dispositivos interligados aos terminais da célula. Nesse circuito, os elétrons livres gerados na camada tipo n são direcionados pelo campo elétrico em direção à camada tipo p, criando um fluxo de elétrons que é medido como corrente elétrica. A continuidade desse fluxo é garantida enquanto houver incidência de luz solar, possibilitando a conversão da energia solar em eletricidade utilizável.

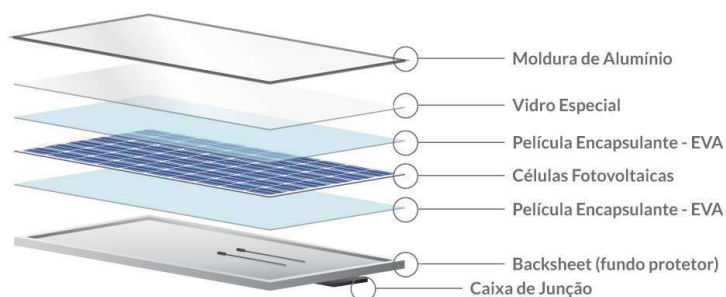
Figura 5 - Ilustração da dopagem da Célula Fotovoltaica



Fonte: Manual de Engenharia

As células solares são cobertas por uma camada antirreflexo para minimizar a perda de luz refletida e maximizam a absorção. Além disso, elas são encapsuladas com materiais transparentes, como vidro temperado, para protegê-las de condições climáticas adversas. Entre as camadas de células e o vidro protetor, há um encapsulante (geralmente EVA - etileno-vinil-acetato) que assegura que a estrutura do módulo seja durável e resistente às intempéries, mantendo a integridade das células e os circuitos intactos ao longo de sua vida útil.

Figura 6 - Estrutura do Módulo



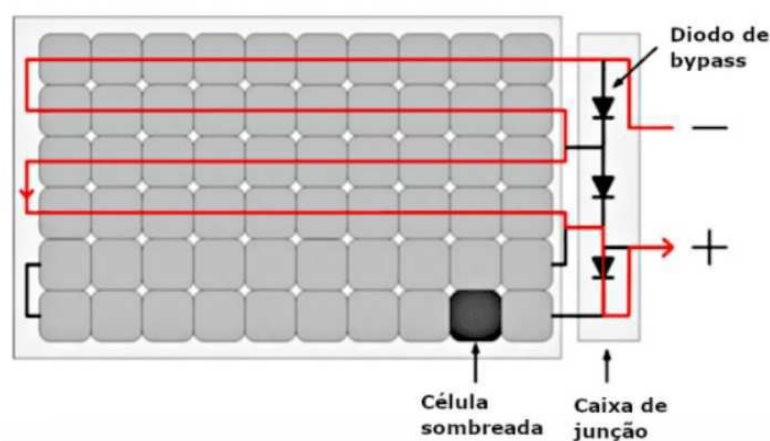
Fonte: Adaptado ABSolar

2.5.2 Formação dos Módulos Solares

Geralmente, um módulo solar padrão contém entre 60 a 72 células solares, embora existam módulos maiores com até 144 células, que são comuns em instalações de grande porte. Pelo grande número destas, as células fotovoltaicas são conectadas em série-paralelo. Isto significa que a corrente elétrica gerada por cada célula deve passar pela célula seguinte, e assim por diante. Caso uma célula em particular seja sombreada ou entre em falha, ela pode atuar como uma resistência adicional na corrente que está fluindo pelo módulo. Essa resistência pode reduzir a corrente total do painel e podendo causar um aquecimento no módulo e a diminuição da geração desta.

O diodo de bypass é instalado em paralelo com algumas células do módulo para lidar com este problema. Seu trabalho é desviar a corrente ao redor da célula ou grupo de células que está tendo problemas. Quando a corrente encontra uma resistência significativa devido a uma célula sombreada ou danificada, o diodo de bypass entra em ação. Ele permite que a corrente elétrica passe por ele, contornando a célula com problemas, e assim o restante do painel solar continua funcionando normalmente. Na Figura a seguir, se demonstra o funcionamento do Diodo, a fim de evitar a célula sombreada.

Figura 7 - Funcionamento Diodo de Bypass



Fonte: Adaptada de Canal Solar

As especificações do módulo, como potência de pico (W_p), tensão de circuito aberto (V_{oc}), corrente de curto-circuito (I_{sc}), tensão no ponto de máxima potência (V_{mp}) e corrente no ponto de máxima potência (I_{mp}), são determinadas em condições padrão de ensaio (STC). Essas características são definidas levando em conta uma irradiância solar de 1.000 W/m^2 e temperatura de célula de 25°C . Com base nessas condições, o módulo solar é classificado pela sua potência máxima (W_p), que é o valor da potência gerada no ponto de máxima potência (PMAX), ou seja, o ponto na curva I-V onde o produto da tensão e da corrente é máximo.

2.5.3 Potência de Pico (W_p)

A potência elétrica de pico de um módulo solar, denominada W_p (Watt-pico), é a potência máxima que ele pode fornecer sob condições ideais. Esse valor é medido nas condições-padrão de ensaio mencionadas (STC), e representa o desempenho ideal do módulo. A potência máxima é o produto da tensão e corrente no ponto de máxima potência da curva I-V, sendo essa potência um indicador importante para o dimensionamento e a avaliação de sistemas solares.

2.5.4 Tensão de Circuito Aberto (V_{oc})

A tensão de circuito aberto é a maior tensão disponível de um módulo solar e ocorre quando não há carga conectada, ou seja, quando a corrente é zero. Ela representa o ponto em que o módulo está gerando a maior diferença de potencial, mas ainda não está fornecendo energia a uma carga. Em uma curva I-V, o V_{oc} é o ponto onde a curva intercepta o eixo de tensão. O valor do V_{oc} é diretamente influenciado pela irradiância e temperatura do módulo: conforme a temperatura aumenta, o V_{oc} tende a diminuir devido à redução da diferença de potencial nos materiais semicondutores.

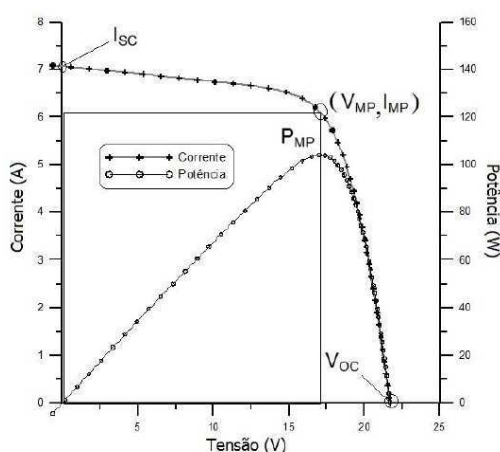
2.5.5 Corrente de Curto-Circuito (I_{sc})

A corrente de curto-circuito é o valor máximo de corrente que o módulo solar pode gerar e ocorre quando a tensão é zero, ou seja, quando os terminais do módulo são conectados diretamente. Na curva I-V, o I_{sc} é o ponto em que a curva intercepta o eixo de corrente. O I_{sc} é diretamente proporcional à irradiância, o que significa que, à medida que a quantidade de luz solar incidente aumenta, a corrente de curto-circuito também aumenta. A corrente de curto-circuito é fundamental para o dimensionamento de sistemas, pois auxilia na determinação dos valores de corrente que os inversores e cabos precisam suportar.

2.5.6 Tensão e Corrente no Ponto de Máxima Potência (V_{mp} e I_{mp})

No ponto de máxima potência, V_{mp} (tensão de máxima potência) e I_{mp} (corrente de máxima potência) são os valores de tensão e corrente onde o produto $V \times I$ é máximo. Este ponto é particularmente importante, pois representa a condição em que o módulo gera a maior quantidade de energia possível. O valor da máxima potência ($P_{m\acute{a}x}$) é dado pelo produto de V_{mp} e I_{mp} , e esse ponto pode ser localizado na curva I-V como o ponto de operação ideal para maximizar a eficiência energética do módulo. Inversores modernos, com tecnologia de rastreamento MPPT, ajustam a resistência da carga para manter o módulo operando nesse ponto, independentemente das condições de irradiância e temperatura.

Figura 8 - Curva de Funcionamento



Fonte: Manual de Engenharia

2.5.7 Curva Característica I-V

A curva I-V de um módulo fotovoltaico mostra a relação entre a corrente (I) e a tensão (V) geradas pelo módulo sob diferentes condições de operação. Em condições ideais de irradiância e temperatura, a curva I-V se aproxima de uma linha que inicialmente é quase horizontal (onde a corrente é constante e próxima ao I_{sc}), até se tornar quase vertical perto do ponto V_{oc} , onde a corrente se aproxima de zero. A área sob a curva I-V representa a potência gerada pelo módulo, e o ponto de máxima potência está localizado onde a área é máxima, correspondente ao produto de V_{mp} e I_{mp} . Essa curva é fundamental para a análise de desempenho do módulo, pois permite prever como o módulo se comportará em diferentes condições.

2.6 Inversor Fotovoltaico

O inversor fotovoltaico é um componente crucial em sistemas de geração de energia solar, responsável pela conversão da corrente contínua (CC) gerada pelos módulos fotovoltaicos em corrente alternada (CA), que é a forma de eletricidade utilizada pela maioria dos aparelhos e sistemas elétricos. Além de realizar essa conversão, o inversor desempenha várias funções adicionais, como sincronizar a saída de energia com a rede elétrica, monitorar o desempenho do sistema, maximizar a geração por meio do controle MPPT (Maximum Power Point Tracking), e proteger o sistema contra falhas elétricas.

Figura 9 -Estrutura interna do inversor SE33.3K



Fonte: Acervo próprio

2.6.1 Função de Conversão CC para CA

A energia gerada pelos módulos solares é em corrente contínua, mas as redes elétricas convencionais e os aparelhos eletrônicos utilizam corrente alternada. O inversor fotovoltaico desempenha a conversão CC-CA por meio de componentes eletrônicos de potência, como transistores e transformadores. Em sistemas conectados à rede, essa conversão é feita de maneira síncrona com a rede elétrica, ou seja, o inversor ajusta a frequência e a tensão da saída CA para coincidir com a rede local (normalmente 60 Hz e 220/380 V no Brasil).

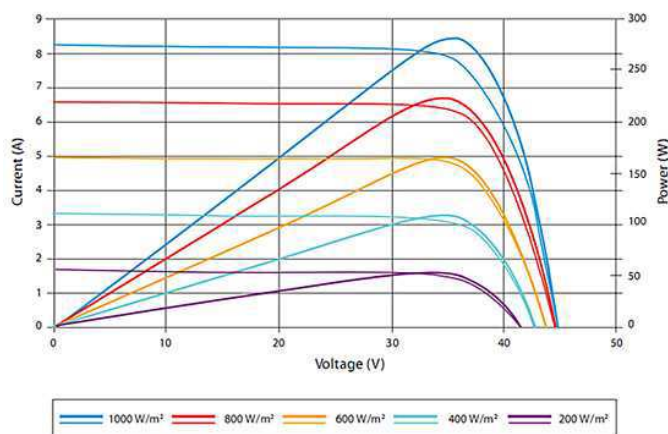
2.6.2 Proteção e Monitoramento

Os inversores fotovoltaicos também são responsáveis por monitorar a operação dos sistemas solares. Eles detectam condições de falha, como desconexões da rede elétrica ou sombreamento extremo nos módulos solares, e podem desligar automaticamente o sistema para evitar danos. Além disso, fornecem dados de desempenho em tempo real, como potência gerada, tensão e corrente, auxiliando no acompanhamento e manutenção da planta solar.

2.6.3 Conceito de MPPT (Maximum Power Point Tracking)

O MPPT é uma técnica eletrônica usada pelos inversores fotovoltaicos para maximizar a extração de energia dos módulos solares. O ponto de máxima potência (P_{MAX}) de um módulo fotovoltaico varia dependendo da irradiância e temperatura, portanto, o inversor precisa continuamente ajustar sua operação para garantir que o sistema esteja sempre operando próximo a esse ponto ideal.

Figura 10 - Curva MPPT



Fonte: Adaptado de Manual de Engenharia Fotovoltaica

A curva característica de um módulo fotovoltaico mostra que, para cada nível de irradiância e temperatura, há uma combinação específica de tensão (V_{mp}) e corrente (I_{mp}) que resulta na maior produção de potência. O rastreamento do ponto de máxima potência é realizado por meio de algoritmos no inversor que ajustam constantemente a carga elétrica vista pelo módulo fotovoltaico, garantindo que ele opere em sua eficiência máxima. Isso é especialmente importante em situações onde a irradiância solar varia, como durante o amanhecer ou entardecer, ou quando o módulo é parcialmente sombreado.

2.6.4 Eficiência do Sistema com MPPT

A eficiência dos inversores que utilizam MPPT depende da precisão e da velocidade com que o inversor consegue rastrear o ponto de máxima potência. Um inversor com um algoritmo MPPT eficiente pode aumentar consideravelmente a geração de energia, especialmente em condições variáveis de iluminação e temperatura. Tecnologias como micro inversores e otimizadores de potência, que trabalham individualmente em cada módulo ou em pequenos grupos, são capazes de gerenciar sombreamento parcial e perdas por mismatch de forma mais eficiente, aproveitando ao máximo o potencial dos módulos.

2.6.5 Conceito de String

O termo "string " em sistemas fotovoltaicos refere-se ao agrupamento de módulos solares conectados em série, formando um circuito de alta tensão. A corrente que percorre todos os módulos em uma string é a mesma, enquanto a tensão total é a soma das tensões individuais de cada módulo. Esse conceito é central no design de sistemas solares de grande porte, onde múltiplas strings podem ser conectadas em paralelo para aumentar a corrente total e otimizar a potência gerada pelo sistema.

A configuração de strings permite que módulos solares sejam conectados de forma eficiente a um inversor centralizado, porém apresenta desafios, especialmente em condições de sombreamento ou diferenças de desempenho entre módulos (mismatch). Uma desvantagem significativa das strings é que o sombreamento parcial em um único módulo pode afetar o desempenho de toda a string, pois a corrente total é limitada pelo módulo com a menor produção. Para mitigar esse efeito, diodos de bypass são frequentemente incorporados aos módulos para permitir que a corrente ignore (ou bypass) módulos afetados pelo sombreamento.

2.7 Tipos de Inversores

2.7.1 Inversor String

Os inversores string são dispositivos que conectam várias strings de módulos solares a um único inversor. Eles são amplamente utilizados em sistemas fotovoltaicos de médio e grande porte devido à sua simplicidade de instalação e capacidade de gerenciar múltiplos módulos solares conectados em série. No entanto, seu desempenho pode ser limitado em cenários onde há sombreamento parcial, sujeidade ou diferenças de orientação entre os módulos, já que todos os módulos de uma string operam sob as mesmas condições impostas pelo inversor.

Figura 11 -Inversor Tradicional Growatt



Fonte: Adaptado de Growatt

Vantagens dos Inversores String:

- Menor custo por watt instalado.
- Simplicidade no design e instalação.
- Boa escolha para locais sem sombreamento ou obstáculos.

Desvantagens:

- Sensível ao sombreamento parcial, pois o desempenho de toda a string é afetado.
- Limitação em sistemas com diferentes orientações ou inclinações dos módulos.

2.7.2 Micro Inversor

Os micro inversores são instalados diretamente em cada módulo solar, convertendo a corrente contínua em corrente alternada individualmente para cada módulo. Essa abordagem oferece diversas vantagens em relação aos inversores string, especialmente em situações onde há sombreamento parcial ou diferenças na orientação dos módulos. Cada módulo opera de forma independente, maximizando a produção de energia, mesmo que um ou mais módulos estejam parcialmente sombreados ou sujos.

Figura 12 - Microinversor ApSystems



Fonte: Adaptado de Ecori

Vantagens dos Micro Inversores:

- Melhor desempenho em condições de sombreamento parcial.
- Monitoramento individualizado de cada módulo.
- Maior flexibilidade em sistemas com diferentes inclinações ou orientações.
- Maior resiliência a falhas (se um micro inversor falha, os outros módulos continuam funcionando).

Desvantagens:

- Custo mais elevado por watt instalado em comparação aos inversores string.
- Instalação mais complexa e maior quantidade de componentes eletrônicos.

2.8 Fatores que Influenciam na Geração

A geração de energia de um sistema fotovoltaico é impactada por diversos fatores externos e internos que podem comprometer a eficiência e o desempenho global. Três dos principais fatores a serem considerados são o sombreamento, o mismatch (desempenho desigual entre os módulos) e a eficiência do inversor. Entender esses fatores é essencial para otimizar o design, operação e manutenção dos sistemas solares.

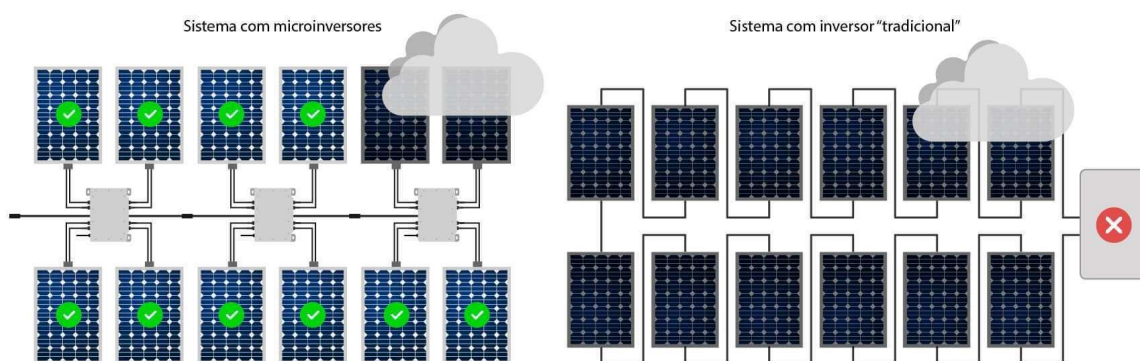
2.8.1 Sombreamento

O sombreamento é uma das principais causas de perda de geração em sistemas fotovoltaicos. Quando a luz solar é bloqueada por obstáculos como árvores, prédios ou até mesmo sujeira acumulada nos módulos, a quantidade de irradiância recebida pelos módulos é reduzida, diminuindo assim a geração de energia.

Em sistemas que utilizam inversores string, o sombreamento parcial em um módulo da string pode reduzir o desempenho de toda a string, pois a corrente total é limitada pelo módulo com a menor produção. Para minimizar o impacto do sombreamento, os módulos solares são equipados com diodos de bypass, que permitem que a corrente ignore (ou bypass) os módulos sombreados. No entanto, o sombreamento contínuo e extenso pode ainda prejudicar seriamente a eficiência de todo o sistema.

Em sistemas com micro inversores, cada módulo opera de maneira independente, o que significa que o sombreamento em um módulo não afeta os demais. Essa independência permite que os sistemas com micro inversores mantenham uma eficiência mais alta em condições de sombreamento parcial, sendo uma vantagem importante em locais onde o sombreamento é inevitável.

Figura 13 - Sombreamento de String



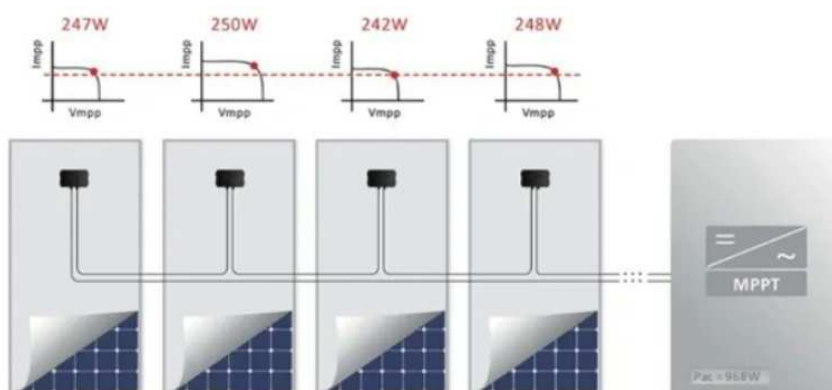
Fonte: Adaptado de Blog Enphase Energy

2.8.2 Mismatch (Desempenho Desigual entre Módulos)

O mismatch refere-se à variação de desempenho entre módulos solares em uma mesma string. Esse fenômeno pode ocorrer devido a diferenças de orientação, inclinação, variações de fabricação entre os módulos, degradação, ou mesmo sujeira localizada em um ou mais módulos. Em uma string de módulos conectados em série, todos os módulos operam na mesma corrente, de modo que um módulo com desempenho inferior limita a corrente total da string.

O mismatch afeta principalmente os sistemas com inversores string, onde todos os módulos precisam operar de maneira sincronizada. Em contrapartida, os micro inversores mitigam o impacto do mismatch ao permitir que cada módulo opere em seu ponto ótimo de geração de energia. Assim, mesmo que um módulo apresente variações, os outros módulos não são afetados, aumentando a eficiência geral do sistema.

Figura 14 - Efeito de Mismatch



Fonte: Adaptado de OneSol

2.8.3 Eficiência do Inversor

A eficiência do inversor é definida pela capacidade do dispositivo de converter a corrente contínua (CC) proveniente dos módulos solares em corrente alternada (CA) com o mínimo de perdas. A eficiência nominal de um inversor é geralmente informada pelo fabricante e pode variar de 95% a 98% para inversores de alta qualidade. No entanto, a eficiência do inversor não é constante e varia conforme a carga do sistema e a temperatura de operação.

Além da eficiência nominal, o desempenho do inversor também é afetado pela eficiência de rastreamento MPPT, que define a capacidade do inversor de localizar e operar no ponto de máxima potência dos módulos. Inversores com MPPT mais avançados são capazes de extrair mais energia dos módulos, especialmente em condições de irradiância variável.

Os micro inversores geralmente apresentam uma eficiência de conversão ligeiramente menor que os inversores string, mas essa diferença é compensada pela capacidade de cada micro inversor de operar de forma independente e maximizar a geração de cada módulo. Por outro lado, inversores string centralizam o controle, o que permite uma maior eficiência em condições ideais, mas são mais sensíveis ao sombreamento e ao mismatch.

2.9 Métricas para Análise de Desempenho

As Métricas para Análise de Desempenho são essenciais para avaliar a eficiência e eficácia dos sistemas fotovoltaicos. Elas fornecem uma visão detalhada de como o sistema está operando em relação ao seu potencial e ajudam a identificar áreas para melhoria e permitem uma comparação objetiva entre diferentes configurações de sistemas, auxiliando na tomada de decisões para o planejamento e otimização de instalações fotovoltaicas. Abaixo, exploramos algumas das principais métricas usadas para essa finalidade:

2.9.1 Produção Específica (kWh/kWp)

A Produção Específica é uma métrica que quantifica a energia gerada por unidade de potência instalada de um sistema fotovoltaico em um período específico. Medida em kWh/kWp, ela permite a comparação entre sistemas de diferentes tamanhos e é uma indicação direta da eficácia da instalação.

$$\text{Produção Específica (kWh/kWp)} = \frac{\text{Energia Gerada (kWh)}}{\text{Potência Instalada (kWp)}}$$

Equação 1

Essa métrica é útil para avaliar o desempenho do sistema em termos de capacidade instalada, permitindo identificar se o sistema está operando próximo ao seu potencial ideal.

A Produção Específica é extremamente importante, pois ela ajuda a comparar o desempenho entre diferentes sistemas, locais ou configurações. Por exemplo, sistemas instalados em locais com diferentes níveis de irradiância solar podem ter uma produção específica distinta, refletindo a influência das condições ambientais.

2.9.2 Taxa de Performance (PR - Performance Ratio)

A Taxa de Performance (PR) é uma métrica que representa a eficiência global do sistema fotovoltaico, levando em conta as perdas relacionadas a fatores como sombreamento, temperatura, eficiência do inversor e condições climáticas. A PR é expressa como uma porcentagem e indica a proporção entre a energia real gerada e a energia que seria gerada em condições ideais, considerando a irradiância solar disponível.

$$PR = \frac{\text{Energia Real Gerada (kWh)}}{\text{Irradiância Total Recebida (kWh/m}^2\text{) * Potência Instalada (kWp)}} \quad \text{Equação 2}$$

Onde a Irradiância Total Recebida é medida em unidades de energia por área e depende da localização e inclinação dos módulos. Se tratando da PR, esta varia entre 0% e 100%, onde valores mais altos indicam maior eficiência. Um sistema bem projetado e operado normalmente tem uma PR acima de 75%, enquanto valores significativamente inferiores podem sugerir problemas como sombreamento excessivo, defeitos nos módulos ou perdas elétricas.

2.9.3 Relação de Capacidade

A Relação de Capacidade é a razão entre a potência média gerada por um sistema e a sua potência nominal ao longo de um período específico, refletindo a proporção de operação do sistema em relação ao seu potencial máximo. Essa métrica é frequentemente utilizada em estudos comparativos para avaliar o comportamento do sistema em condições de operação reais versus as condições ideais.

$$\text{Relação de Capacidade} = \frac{\text{Potência Média Gerada}}{\text{Potência Nominal do Sistema}} \quad \text{Equação 3}$$

Essa medida pode ser monitorada continuamente, fornecendo um indicador claro da eficiência operacional em diferentes momentos do dia. Sendo essencial para compreendermos o desempenho diário, mensal e anual do sistema, permitindo identificar possíveis quedas de

eficiência, tendências sazonais e o impacto de fatores ambientais e operacionais ao longo do tempo.

3. METODOLOGIA

3.1 Estudo de Caso

Neste estudo de caso, foram analisados dois sistemas fotovoltaicos instalados na cidade de Uberlândia, com mínimas diferenças na orientação e inclinação do telhado para avaliar as diferenças de desempenho entre um sistema com micro inversores e outro com inversor string. A proposta é examinar como cada sistema responde a condições ambientais, como sombreamento e mismatch, e quais impactos as características dos inversores, em especial a quantidade de MPPTs, têm sobre a produção de energia.

Os critérios para a seleção das usinas consideraram a potência dos sistemas, características, dos módulos e inversores, localização, condições de conservação e irradiação solar. Segue abaixo a imagem dos dois sistemas analisados.

Figura 15 – Usina Analisada Inversor Tradicional



Fonte: Acervo Próprio

Figura 16 – Usina Analisada MLPE



Fonte: Acervo Próprio

O sistema com inversor string é composto por oito módulos da marca CANADIAN SOLAR, do modelo CS6U-335, com uma potência total de 2,68 kWp, conectados a um inversor WEG SIW2000. Os dados técnicos dos equipamentos e os parâmetros de projeto do sistema fotovoltaico são mostrados a seguir na Tabela 2.

Tabela 2 – UFV com Inversor String

Item	Dados
Módulos	8 x Canadian CS6U-335W
Tecnologia das células fotovoltaicas	Silício Policristalino
Potência Ativa pico do sistema	2680Wp
Vmp	37,4 V
Imp	8,96 A
Valor Médio do Equipamento	R\$600,00
Inversor	1 x WEG SIW2000
Potência Nominal dos inversores	2000W
Faixa de operação Vcc	80V-600V

Faixa de frequência	55 a 65Hz
Número de MPPT	2
Valor Médio do Equipamento	R\$3.000,00

A configuração é dividida em duas strings de quatro módulos cada, orientados ao norte. Com dois MPPT, este sistema exige que as condições de irradiância sejam uniformes para maximizar a eficiência. Além disso, a conexão bifásica limita a resposta do sistema em ambientes onde a variabilidade de sombreamento é uma preocupação, já que qualquer fator externo que impacte uma string afetará o desempenho de toda a string. Além disso, somando ambos os equipamentos, o sistema possuiria um valor aproximado de R\$ 7.800,00

O segundo sistema utiliza oito módulos DAH de 330 Wp, totalizando 2,64 kWp, com micro inversores Apsystems QS1, com cotação de valor total do sistema somando R\$8.360,00. Os dados técnicos dos equipamentos e os parâmetros de projeto do sistema fotovoltaico são mostrados a seguir na Tabela 3.

Tabela 3 - UFV com Microinversor

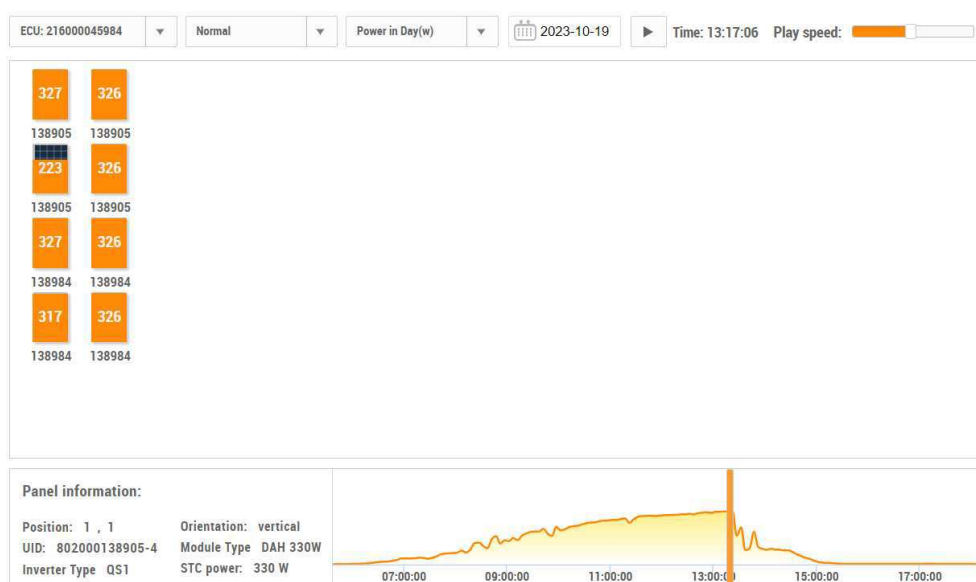
Item	Dados
Módulos	8 x DAH DHP72-330W
Tecnologia das células fotovoltaicas	Silício Policristalino
Potência Ativa pico do sistema	2640Wp
Vmp	37,3 V
Imp	8,85A
Valor Médio do Equipamento	R\$ 520,00
Inversor	2 x Apsystems QS1
Potência Nominal dos inversores	1200W
Faixa de operação Vcc	160V-278V
Faixa de frequência	55 a 65Hz

Número de MPPT	4
Valor Médio do Equipamento	R\$ 2.100,00

Com as características técnicas dos sistemas estabelecidas, ao longo de três anos (2021 a 2023), foram coletados dados de produção de energia para ambos os sistemas, com monitoramento de parâmetros como kWh gerados, tensão e corrente dos módulos, e temperatura dos módulos. Fatores climáticos, como irradiância e temperatura ambiente, também foram observados, pois influenciam diretamente o desempenho dos sistemas. A avaliação se baseou em métricas como Performance Ratio (PR), eficiência dos inversores, taxa de perda diária e sazonalidade da produção.

A tecnologia MLPE (Module Level Power Electronics) empregada nesses micro inversores também proporciona uma capacidade de monitoramento individual de cada painel, o que permite a identificação em tempo real de problemas específicos, como mau funcionamento, sombreamento parcial, sujeira ou defeitos. Esse monitoramento detalhado possibilita uma intervenção rápida e eficaz para resolver problemas antes que eles afetem o desempenho geral do sistema, contribuindo para a otimização e maximização da produção de energia ao longo do tempo.

Figura 16 – Monitoramento EMA APsystems



Fonte: Acervo Próprio

Em contraste, o sistema com inversor string possui apenas verificação por string, sem a capacidade de monitoramento individualizado de cada módulo. Esse sistema, portanto, fornece apenas dados gerais de geração por string ou MPPT, o que reduz a precisão na supervisão e limita a capacidade de identificar problemas específicos de cada módulo. Essa limitação pode impactar o desempenho geral do sistema, já que a resolução de problemas se torna menos eficiente e menos precisa, afetando potencialmente a produção de energia ao longo do tempo.

Figura 17 - Monitoramento Fusion Solar (Inversor Tradicional)



Fonte: Aplicativo Fusion Solar (2024)

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Para que fosse possível a comparação dos sistemas se utilizaram as plataformas, FusionSolar, na qual é responsável pelo monitoramento do sistema em modelo string, e o EMA App, que se faz responsável pelo sistema MLPE. Ao longo do período de coleta de dados, a geração de energia de cada sistema, foram registradas respectivamente, nas tabelas 4 e 5.

Tabela 4 - Dados de Geração Inversor *String*

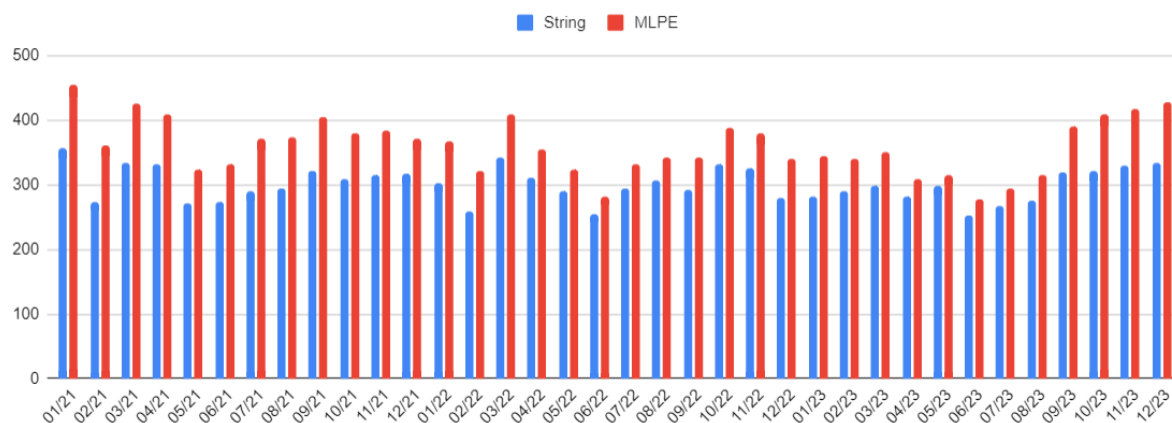
Mês 2021	Energia gerada (kWh)	Mês 2022	Energia gerada (kWh)	Mês 2023	Energia gerada (kWh)
Janeiro	357,17	Janeiro	302,59	Janeiro	281,25
Fevereiro	273,01	Fevereiro	258,18	Fevereiro	289,86
Março	333,42	Março	342,28	Março	299,15
Abril	330,66	Abril	310,36	Abril	282,54
Maio	272,13	Maio	290,46	Maio	299,13
Junho	273,40	Junho	253,60	Junho	253,32
Julho	290,53	Julho	294,11	Julho	266,75
Agosto	294,45	Agosto	305,89	Agosto	276,06
Setembro	320,89	Setembro	292,46	Setembro	318,62
Outubro	308,94	Outubro	332,16	Outubro	320,27
Novembro	314,74	Novembro	324,57	Novembro	329,78
Dezembro	317,14	Dezembro	280,28	Dezembro	334,04
Total	10,824.19 kWh				

Tabela 5 - Dados de Geração Microinversor

Mês 2021	Energia gerada (kWh)	Mês 2022	Energia gerada (kWh)	Mês 2023	Energia gerada (kWh)
Janeiro	455,62	Janeiro	366,81	Janeiro	343,36
Fevereiro	360,32	Fevereiro	320,56	Fevereiro	340,51
Março	425,83	Março	409,69	Março	350,33
Abril	407,96	Abril	353,99	Abril	307,99
Maio	322,79	Maio	323,20	Maio	314,42
Junho	330,94	Junho	282,09	Junho	278,21
Julho	371,83	Julho	331,41	Julho	294,33
Agosto	373,72	Agosto	341,53	Agosto	315,15
Setembro	404,96	Setembro	342,16	Setembro	389,89
Outubro	379,40	Outubro	388,48	Outubro	409,06
Novembro	384,47	Novembro	379,14	Novembro	416,17
Dezembro	371,09	Dezembro	340,15	Dezembro	427,17
Total	12.955,71 kWh				

Com o intuito de facilitar, e explicitar os dados coletados nas plataformas. Foi elaborado o gráfico abaixo, realizando o comparativo das duas usinas, demonstrando claramente o funcionamento dos sistemas, juntamente com suas respectivas gerações totais.

Figura 18 - Gráfico Comparativo de Geração



Fonte: Acervo Próprio

Realizando uma análise simplória, se faz notável que o sistema com micro inversores mostrou-se consistentemente mais eficiente que o sistema com inversor string. O sistema de micro inversores produziu uma média anual de 4.318 kWh, enquanto o sistema com inversor string gerou 3.608 kWh, em média. A análise do PR mostrou que o sistema com micro inversores teve uma média de 0,84, enquanto o sistema com inversor string obteve 0,70. Essa diferença é em grande parte atribuída à flexibilidade que os MPPTs independentes proporcionam, permitindo que cada módulo funcione no ponto máximo de potência de maneira individual.

4.1 Cálculos Comparativos

Segue abaixo, os cálculos do PR dos modelos string e MPLE, respectivamente, Considerando que a Irradiância total seja a média do ano registrada em Uberlândia-MG, na qual será $5,24 \text{ kWh/m}^2$:

$$0,70 = \frac{9,88 \text{ kWh}}{5,24 \text{ kWh/m}^2 * 2,68 \text{ kWp}} \quad \text{Equação 4}$$

$$0,84 = \frac{11,83 \text{ kWh}}{5,24 \text{ kWh/m}^2 * 2,64 \text{ kWp}} \quad \text{Equação 5}$$

O sombreamento teve um impacto notável, especialmente no sistema com inversor string. Nos períodos de maior sombreamento, observou-se uma queda considerável na eficiência, uma vez que o sistema depende de duas fontes de MPPT para otimizar a produção de energia de todos os módulos. Já o sistema com micro inversores conseguiu compensar essas perdas ao ajustar os pontos de operação de cada módulo individualmente. Essa capacidade de operação independente permitiu que o sistema mantivesse uma produção mais elevada, mesmo sob condições adversas.

Em termos de eficiência dos inversores, o sistema com micro inversores se mostrou mais robusto em condições variáveis de irradiância e temperatura. Devido à orientação oeste, o sistema com micro inversores frequentemente lidava com sombreamento parcial, mas a resposta rápida e individual de cada MPPT contribuiu para uma eficiência superior ao longo do tempo. O sistema com inversor string, por outro lado, enfrentou desafios com a variação de irradiância ao longo do dia, já que qualquer perda em um módulo impactava a produção de toda a string.

A análise sazonal revelou que o sistema com micro inversores manteve uma taxa de perda anual de aproximadamente 1,5%, comparado aos 2% observados no sistema com inversor string. Além disso, o sistema com micro inversores apresentou uma performance mais estável ao longo das estações do ano, enquanto o sistema com inversor string experimentou uma maior variação de produção entre o verão e o inverno. Isso se deve em parte à capacidade dos micro inversores de mitigar os efeitos de temperatura sobre os módulos, mantendo uma geração mais uniforme. Utilizando a equação da Relação de Capacidade, supracitada no documento, podemos alcançar os seguintes resultados de cada UFV:

$$\text{Relação Capacidade String} = \frac{300,67 \text{ kWh/mês}}{2,68 \text{ kWp}} \Rightarrow 112,19 \text{ kWh} \quad \text{Equação 6}$$

$$\text{Relação Capacidade MLPE} = \frac{359,88 \text{ kWh/mês}}{2,64 \text{ kWp}} \Rightarrow 136,31 \text{ kWh} \quad \text{Equação 7}$$

Os dados deste estudo indicam que, enquanto o sistema com inversor string pode ser uma opção econômica para locais com irradiância uniforme e baixa ocorrência de obstáculos, o sistema com micro inversores é mais adequado para instalações onde o sombreamento é variável e o mismatch é uma preocupação. A análise das métricas de desempenho, como o PR e a taxa de perda anual, destaca que os micro inversores oferecem uma solução mais eficiente e resiliente para ambientes urbanos e áreas com condições de iluminação menos previsíveis.

4.2 Retorno Financeiro

Pelos dados apresentados neste documento, se faz notável os ganhos de geração com o MLPE. Porém, para uma análise completa, se faz necessário analisarmos a questão financeira e monetária, comparando o sistema solar como um investimento a ser feito. Portanto foram realizados os seguintes cálculos, para se descobrir em quantos meses a Usina Solar, passará a gerar lucro para o comprador.

Para estes, foram utilizados os dados de valores totais dos sistemas supracitados, juntamente com a adição da geração mensal de cada usina, e aproximando o valor da tarifa do kW na Cemig, como R\$1,00.

$$\text{Retorno Financeiro String} = \frac{R\$7.800,00}{300,67 \text{ kWh/mês}} \simeq 26 \text{ meses} \quad \text{Equação 8}$$

$$\text{Retorno Financeiro MLPE} = \frac{R\$8.360,00}{359,88 \text{ kWh/mês}} \simeq 23 \text{ meses} \quad \text{Equação 9}$$

Portanto, além da capacidade de maximizar a geração do sistema, por conta da individualização de potências dos módulos. O retorno financeiro, do Valor do sistema, dividido pela geração mensal, acarreta num *payback* menor no caso do MLPE.

5. CONCLUSÃO

A análise comparativa entre os sistemas com o método de strings e MLPE revelou diferenças significativas no desempenho, custo-benefício e segurança. O sistema com micro inversores apresentou vantagens substanciais em termos de eficiência, especialmente em condições de sombreamento variável, devido à operação independente de cada módulo, possibilitada pelos MPPTs individuais. Isso resultou em uma taxa de perda anual inferior e um Performance Ratio (PR) superior em comparação ao sistema com inversor string. Esse desempenho robusto e mais constante ao longo das estações torna os micro inversores uma escolha atraente para instalações urbanas e ambientes onde a uniformidade de irradiância não é garantida.

Além disso, os micro inversores demonstraram vantagens significativas em relação à segurança, pois operam em níveis de tensão mais baixos do que os inversores string, reduzindo o risco de choques elétricos durante a instalação e manutenção, além de minimizar

a probabilidade de incêndios devido a falhas no sistema. Essa característica torna o sistema com micro inversores uma opção mais segura e confiável para usuários e instaladores.

Do ponto de vista econômico, embora o custo inicial dos micro inversores seja mais elevado, sua superioridade em eficiência operacional e a redução dos custos de manutenção ao longo da vida útil do sistema oferecem um retorno sobre o investimento mais consistente e robusto a longo prazo. Esse fator é crucial para consumidores que buscam um sistema fotovoltaico com baixo custo total de propriedade ao longo dos anos.

Essas conclusões têm implicações relevantes para consumidores, instaladores, pesquisadores e formuladores de políticas. Ao considerar a implantação de sistemas fotovoltaicos, é essencial avaliar não apenas o custo inicial, mas também a eficiência, segurança e o custo de manutenção a longo prazo. Assim, a escolha entre inversores string e micro inversores deve levar em conta as especificidades de cada instalação, as condições ambientais e os objetivos de desempenho do sistema.

Em última análise, o estudo contribui para o avanço da energia solar como uma solução viável e benéfica para o fornecimento de energia limpa e renovável. Ao fornecer informações detalhadas sobre o desempenho e as características de diferentes tecnologias de inversores, este trabalho apoia decisões mais informadas, promovendo a adoção sustentável e eficiente de sistemas fotovoltaicos.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Associação Brasileira de Energia Solar Fotovoltaica (ABSOLAR). Relatório Anual de Energia Solar no Brasil. 2022. Disponível em: <https://www.absolar.org.br>. Acesso em: 14 de abril de 2024.

ePowerBay. Ranking de Fabricantes de Inversores Fotovoltaicos no Brasil. São Paulo, 2022. Disponível em: <https://www.epowerbay.com.br>. Acesso em: 14 de abril de 2024.

SOLAR ENERGY INDUSTRIES ASSOCIATION (SEIA). 2023 U.S. Solar Market Insight. Washington: SEIA, 2023. Disponível em: <https://www.seia.org>. Acesso em: 14 de abril de 2024.

Portalsolar. Energia Fotovoltaica. Disponível em: <https://www.portalsolar.com.br/energia-fotovoltaica.html>. Acesso em: 14 de abril de 2024.

OLIVEIRA, Ana. "**Análise Comparativa entre Sistemas Fotovoltaicos com Inversores String e Tecnologias MLPE**". Revista Brasileira de Energias Renováveis, São Paulo, v. 8, n. 2, p. 45-57, jul. 2023.

SOUZA, Carlos. "**Eficiência de Sistemas Fotovoltaicos com Microinversores em Comparação com Inversores String**". In: Congresso Brasileiro de Energia Solar, 15., 2022, Rio de Janeiro. Anais do Congresso Brasileiro de Energia Solar... Rio de Janeiro: Editora Solar, 2022. p. 112-125.

DA SILVA PINHEIRO, M. A. **Análise de desempenho e viabilidade econômica entre inversores do tipo string e otimizadores de potência instalados em sistemas fotovoltaicos sob diferentes condições de operação**. 2021. 97f. Monografia (especialização). Universidade de Minas Gerais. Curso de Especialização em Fontes Renováveis: Geração, Operação e Integração, Belo Horizonte, 2021. Disponível em: <http://hdl.handle.net/1843/37308>. Acesso em: 14 de abril de 2024.

Zhang, Z., Margolis, R., Shurtz, J., et al. **Adoption of Microinverters in Utility-Scale Photovoltaic (PV) Plants: A Review**. In: IEEE Xplore, 2019. DOI: 10.1109/PVSC40753.2019.8980877.

Ecori Energia Solar. **Tecnologia MLPE - Como os microinversores se tornaram referência no mercado fotovoltaico**. Disponível em:

<https://www.ecorienergiasolar.com.br/artigo/tecnologia-mlpe---como-os-microinversores-se-tornaram-referencia-no-mercado-fotovoltaico>. Acesso em: 14 de abril de 2024.

Canal Solar. **Minimização de Perdas por Mismatch com Otimizadores de Potência.**

Disponível em:

<https://canalsolar.com.br/minimizacao-de-perdas-por-mismatch-com-otimizadores-de-potencia/>. Acesso em: 14 de abril de 2024.

KREITH, Frank; KREIDER, Jan F. *Principles of Solar Engineering*. 3. ed. Boca Raton: CRC Press, 2016.

DUFFIE, John A.; BECKMAN, William A. *Solar Engineering of Thermal Processes*. 4. ed. Hoboken: Wiley, 2013.

J. T.Pinho e M. A. Galdino. “**Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos**”. CEPTEL - CRESEB, Rio de Janeiro, março de 2014.