

**Universidade Federal do Triângulo Mineiro**  
**Mestrado Profissional em Inovação Tecnológica**

**Leandro Nunes Oliveira**

**Análise experimental comparativa do comportamento de um sistema fotovoltaico de arquitetura com otimizador de potência**

Uberaba - MG

2023

**Leandro Nunes Oliveira**

**Análise experimental comparativa do comportamento de um sistema fotovoltaico de arquitetura com otimizador de potência**

Dissertação apresentada ao Programa Mestrado Profissional em Inovação Tecnológica, da Universidade Federal do Triângulo Mineiro, como requisito parcial para a obtenção o título de mestre.

Orientador: Prof. Dr. David Calhau Jorge

Coorientador: Prof. Dr. Arnaldo José Pereira Rosentino Júnior

Uberaba - MG

2023

**Catálogo na fonte: Biblioteca da Universidade Federal do  
Triângulo Mineiro**

O48a	<p>Oliveira, Leandro Nunes Análise experimental comparativa do comportamento de um sistema fotovoltaico de arquitetura com otimizador de potência / Leandro Nunes Oliveira. -- 2023. 61 f. : il., graf., tab.</p> <p>Dissertação (Mestrado Profissional em Inovação Tecnológica) -- Universidade Federal do Triângulo Mineiro, Uberaba, MG, 2023 Orientador: Prof. Dr. David Calhau Jorge Coorientador: Prof. Dr. Arnaldo José Pereira Rosentino Júnior</p> <p>1. Sistemas de energia fotovoltaica. 2. Geração distribuída de energia elétrica. 3. Potência. I. Jorge, David Calhau. II. Universidade Federal do Triângulo Mineiro. III. Título.</p> <p>CDU 551.521.37:621.31</p>
------	---

**LEANDRO NUNES OLIVEIRA**

**ANÁLISE EXPERIMENTAL COMPARATIVA DO COMPORTAMENTO DE UM SISTEMA FOTOVOLTAICO DE ARQUITETURA COM OTIMIZADOR DE POTÊNCIA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação Profissional em Inovação Tecnológica da Universidade Federal do Triângulo Mineiro como requisito parcial para obtenção do título de mestre..

Uberaba, 11 de dezembro de 2023

**Banca Examinadora:**

Dr. David Calhau Jorge - Orientador  
Universidade Federal do Triângulo Mineiro

Dr. Lucas Pereira Pires  
Universidade Federal do Triângulo Mineiro

Dr. Jefferson Beethoven Martins  
Instituto Federal do Triângulo Mineiro



Documento assinado eletronicamente por **DAVID CALHAU JORGE, Professor do Magistério Superior**, em 11/12/2023, às 15:48, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#) e no art. 34 da [Portaria Reitoria/UFTM nº 165, de 16 de junho de 2023](#).



Documento assinado eletronicamente por **LUCAS PEREIRA PIRES, Professor do Magistério Superior**, em 11/12/2023, às 15:49, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#) e no art. 34 da [Portaria Reitoria/UFTM nº 165, de 16 de junho de 2023](#).



Documento assinado eletronicamente por **Jefferson Beethoven Martins, Usuário Externo**, em 11/12/2023, às 15:54, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#) e no art. 34 da [Portaria Reitoria/UFTM nº 165, de 16 de junho de 2023](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site [http://sei.uftm.edu.br/sei/controlador\\_externo.php?acao=documento\\_conferir&id\\_orgao\\_acesso\\_externo=0](http://sei.uftm.edu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0), informando o código verificador **1146915** e o código CRC **45ADD1AD**.

## **AGRADECIMENTOS**

A Deus, por me proporcionar força, determinação e proteção para superar os desafios.

À minha família, por todo o apoio, compreensão e incentivo durante esse percurso.

Aos amigos, pelo companheirismo e apoio em todos os momentos.

Aos meus orientadores, professores David Calhau Jorge e Arnaldo José Pereira Rosentino Júnior, minha gratidão pela paciência, sabedoria e contribuição.

Aos professores do Programa de Mestrado Profissional em Inovação Tecnológica - PMPIT, que contribuíram para minha formação e preparação no desenvolvimento deste estudo.

À Universidade Federal do Triângulo Mineiro, por possibilitar o desenvolvimento deste mestrado profissional em meu ambiente de trabalho.

Ao Hospital de Clínicas da UFTM, por permitir a realização dos experimentos em suas instalações.

Por fim, a todos que, direta ou indiretamente, me ajudaram nessa pesquisa, meu mais sincero obrigado.

“É preciso sentir a necessidade da experiência, da observação, ou seja, a necessidade de sair de nós próprios para aceder à escola das coisas, se as queremos conhecer e compreender”.

Émile Durkheim

## RESUMO

Nos últimos anos, tem-se observado um crescimento significativo na adoção de fontes de energia renovável, com a geração de energia elétrica fotovoltaica emergindo como uma das principais alternativas, sendo de alta viabilidade no contexto brasileiro. Os sistemas fotovoltaicos típicos adotam predominantemente a topologia de inversor central, composta por um ou mais conjuntos de módulos conectados em série. Esses conjuntos direcionam a energia gerada, sob a forma de corrente contínua, para um inversor fotovoltaico responsável pela conversão em corrente alternada. No entanto, essa topologia de inversor central apresenta uma desvantagem substancial, uma vez que durante o funcionamento, qualquer problema, como sombreamento ou baixa eficiência, em um único módulo pode impactar negativamente o desempenho de todos os outros módulos conectados ao mesmo circuito. Como resposta a esse desafio, os fabricantes desenvolveram a arquitetura com otimizadores de potência, a qual visa assegurar que a baixa produção de energia em uma unidade modular não prejudique o desempenho geral do sistema. Diante deste contexto, realiza-se uma análise de sistemas fotovoltaicos com otimizadores de potência conectados à rede elétrica. Os resultados são apresentados por meio de medições efetuadas em condições diversas de irradiação solar. Para comparar esses resultados com a topologia convencional de inversor central e propiciar diferentes condições de irradiação, são utilizadas mantas de cobertura com diferentes níveis de opacidade. Assim, a pesquisa adota uma tipologia experimental de campo para a seleção das variáveis pertinentes e para a observação dos efeitos de acordo com cada arquitetura fotovoltaica considerada. Por fim, o trabalho apresenta uma pesquisa quantitativa dos resultados relativos à eficiência, viabilidade e qualidade da energia gerada demonstrando melhores resultados de geração de energia no sistema otimizado. Os resultados deste estudo têm o potencial de contribuir para a compreensão e melhoria do desempenho de sistemas fotovoltaicos em condições adversas, bem como para o avanço na escolha de arquiteturas mais eficazes.

Palavras-chave: arquiteturas fotovoltaicas; geração distribuída; otimizador de potência.

## ABSTRACT

In recent years, there has been a significant growth in the adoption of renewable energy sources, with photovoltaic electricity generation emerging as one of the main alternatives. This is highly viable in the Brazilian context. Typical photovoltaic systems predominantly adopt the central inverter topology, consisting of one or more sets of modules connected in series. These sets direct the generated energy, in the form of direct current, to a frequency inverter responsible for converting it into alternating current. However, this central inverter topology has a substantial disadvantage, as during operation, any problem, such as shading or low efficiency, in a single module can negatively impact the performance of all other panels connected to the same circuit. In response to this challenge, manufacturers have developed the architecture with power optimizers, which aims to ensure that low energy production in a modular unit does not affect the overall performance of the system. In this context, an analysis of photovoltaic systems with power optimizers connected to the electrical grid is carried out. The results are presented through measurements made under various solar irradiation conditions. To compare these results with the conventional central inverter topology and provide different irradiation conditions, cover mats with different levels of opacity are used. Thus, the research adopts a field experimental typology for the selection of relevant variables and for observing the effects according to each photovoltaic architecture considered. Finally, the study conducts a quantitative investigation of results related to efficiency, feasibility, and quality of the generated energy, demonstrating superior energy generation outcomes in the optimized system. The findings of this study have the potential to contribute to the understanding and improvement of photovoltaic system performance under adverse conditions, as well as to advancements in the selection of more effective architectures.

Keywords: distributed generation; photovoltaic architecture; power optimizer.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Potencial anual de energia elétrica no Brasil .....	14
Figura 2 - Mapa da média anual do potencial de geração solar no Brasil.....	17
Figura 3 - Composição de um módulo fotovoltaico .....	18
Figura 4 – Esquema dos diodos <i>bypass</i> em um módulo fotovoltaico .....	19
Figura 5 – Diagrama elétrico de um inversor fotovoltaico trifásico.....	20
Figura 6 - Inversor fotovoltaico instalado em campo.....	21
Figura 7 - Microinversor em instalação na planta fotovoltaica.....	21
Figura 8 - Diagrama de blocos da arquitetura de microinversor .....	22
Figura 9 - Diagrama de blocos da arquitetura de sistema otimizado.....	23
Figura 10 - Otimizador de potência.....	23
Figura 11 - Comparativo de desenvolvimento de potência entre as arquiteturas.....	24
Figura 12 - Vista aérea do Hospital de Clínicas da UFTM .....	30
Figura 13 - Vista panorâmica da Unidade Univerdecidade da UFTM.....	31
Figura 14 – Analisador de Energia Fluke 435 Series II .....	32
Figura 15 – Osciloscópio Digital BK Precision 2530B.....	32
Figura 16 – Alicates Amperímetro True RMS Fluke 376.....	33
Figura 17 – Sistema fotovoltaico otimizado com diferentes níveis de mantas de cobertura....	35
Figura 18 – Representação do esquema de sombreamento vertical da célula fotovoltaica.....	36
Figura 19 - Representação do esquema de sombreamento horizontal da célula fotovoltaica ..	36
Figura 20 – Esquema de medição das grandezas elétricas da topologia otimizada .....	37
Figura 21 – Esquema de medição das grandezas elétricas da topologia otimizada .....	37
Figura 22 – Equipamentos conectados para medições no sistema otimizado: a) String box CC; b) Inversor fotovoltaico; c) Quadro de distribuição; d) Analisador de energia; e) Osciloscópio digital; f) Transformador abaixador. ....	38
Figura 23 – Equipamentos conectados para medições no sistema convencional: a) Quadro de distribuição; b) Inversor fotovoltaico; c) Osciloscópio digital; d) Analisador de energia. ....	39
Figura 24 – Gráfico de potências do otimizador em cenários com e sem retenção solar de 30% .....	40
Figura 25 – Gráfico de potências do otimizador em cenários com e sem retenção solar de 50% .....	41
Figura 26 - Gráfico de potências do otimizador em cenários com e sem retenção solar de 80% .....	41

Figura 27 – Gráfico da influência do sombreamento de 30% na potência das strings.....	42
Figura 28 – Gráfico da influência do sombreamento de 50% na potência das strings.....	42
Figura 29 – Gráfico da influência do sombreamento de 80% na potência das strings.....	43
Figura 30 – Sinais de tensão de saída do otimizador de potência: a) Curva de tensão com retenção solar de 30%; b) Curva de tensão sem retenção solar.....	45
Figura 31 – Gráfico de corrente e tensão na saída do par de módulos da topologia otimizada: a) Curva com sombreamento em um submódulo; b) Curva com sombreamento em três submódulos.....	47
Figura 32 – Gráfico de corrente e tensão na saída do otimizador de potência: a) Curva com sombreamento em um submódulo; b) Curva com sombreamento em três submódulos. ....	48
Figura 33 - Gráfico de corrente e tensão de um módulo de topologia convencional; a) Curva com sombreamento em um submódulo; b) Curva com sombreamento em três submódulos ..	50
Figura 34 – Gráfico da influência na potência das strings na topologia otimizada com sombreamento em um submódulo.....	52
Figura 35 – Gráfico da influência na potência das strings em topologia otimizada com sombreamento em três submódulos.....	53
Figura 36 – Gráfico da influência na potência das <i>strings</i> em topologia convencional com sombreamento em um submódulo.....	53
Figura 37 – Gráfico da influência na potência das strings em topologia convencional com sombreamento em três submódulos.....	54
Figura 38 – Gráfico comparativo da eficiência das topologias com sombreamento em um submódulo .....	55
Figura 39 – Gráfico comparativo da eficiência das topologias com sombreamento em três submódulos.....	56

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO.....</b>	<b>11</b>
<b>2</b>	<b>OBJETIVOS.....</b>	<b>13</b>
2.1	OBJETIVO GERAL .....	13
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	13
<b>3</b>	<b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA .....</b>	<b>14</b>
3.1	MATRIZ ENERGÉTICA BRASILEIRA.....	14
3.2	GERAÇÃO DISTRIBUÍDA.....	15
3.3	ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA .....	17
3.4	MÓDULOS FOTOVOLTAICOS.....	18
3.5	DIODOS DE PROTEÇÃO .....	19
3.6	INVERSORES .....	19
3.7	MICROINVERSORES .....	21
3.8	OTIMIZADOR DE POTÊNCIA .....	22
3.9	CUSTO DA GERAÇÃO DE ENERGIA FOTOVOLTAICA.....	25
3.10	QUALIDADE DE ENERGIA NA GERAÇÃO FOTOVOLTAICA .....	26
<b>4</b>	<b>ESTADO DA ARTE .....</b>	<b>27</b>
<b>5</b>	<b>METODOLOGIA .....</b>	<b>30</b>
5.1	EQUIPAMENTOS UTILIZADOS .....	32
5.2	MEDIÇÕES .....	33
<b>6</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>40</b>
6.1	RESULTADOS COM TELAS DE RETENÇÃO NO SISTEMA OTIMIZADO ...	40
6.2	RESULTADOS DA CURVA DE CORRENTE E TENSÃO COM ENCOBRIMENTO DE CÉLULAS COM TELA TOTALMENTE OPACA.....	46
6.4	RESULTADOS DE POTÊNCIA NAS STRINGS COM ENCOBRIMENTO DE CÉLULAS COM TELA TOTALMENTE OPACA.....	52
6.5	COMPARAÇÃO DE POTÊNCIA EM P.U DAS TOPOLOGIAS COM ENCOBRIMENTO DE CÉLULAS COM TELAS TOTALMENTE OPACAS....	55
<b>7</b>	<b>CONCLUSÃO .....</b>	<b>58</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, houve uma preocupação com o aumento na proporção de energia renovável no cenário nacional. Essa necessidade de expansão se deve tanto às razões ambientais quanto econômicas, demandando, assim, uma ampliação na capacidade da matriz energética do Brasil.

Uma das principais fontes energéticas com recursos renováveis é a energia solar fotovoltaica, que é considerada de alta viabilidade por ser aplicável na maior parte do território brasileiro (Villalva, 2015). O sistema fotovoltaico “graças à sua estrutura modular é, dentre as tecnologias com fontes renováveis, a que oferece maior possibilidade para aplicações com diferentes potências instaladas, que vão desde poucos Watts até vários Megawatts” (Vian, 2021, p.16).

A luz proveniente do sol pode ser utilizada para produzir eletricidade pelo efeito fotovoltaico, que consiste na conversão direta da luz solar em energia elétrica (Villalva, 2015). Essa conversão geralmente é feita a partir de módulos solares instalados em telhados de edificações ou fixados em estruturas de solo, possibilitando assim receber a radiação solar para a geração de energia elétrica.

De acordo com a Associação Brasileira de Energia Solar Fotovoltaica (ABSOLAR, 2023), a energia solar já representa cerca de 15% da matriz energética brasileira. Considerando este expressivo avanço e as projeções de crescimento contínuo para os próximos anos, ressalta-se a importância dos investimentos em pesquisa e desenvolvimento de novas tecnologias que busquem ampliar a eficiência dos sistemas fotovoltaicos.

A arquitetura convencional mais utilizada em sistemas fotovoltaicos é a topologia de inversor central, na qual a instalação é composta por um conjunto de módulos conectados em série, que enviam a energia para um equipamento de eletrônica de potência denominado inversor de frequência que converte a corrente gerada na forma de energia adequada para a conexão com a rede elétrica de residências e indústrias, mediante o controle do fluxo de potência.

O principal problema apresentado na topologia de inversor central é que um único módulo com menor geração de energia por problemas como sombreamento ou baixa eficiência, pode comprometer o funcionamento de todos os demais que estão associados no circuito em série em que é pertencente. Para Vian (2021, p.12) “A previsão da intermitência de produção de energia elétrica pelas centrais fotovoltaicas é objeto, atualmente, de intensas pesquisas, ao combinar aspectos ambientais morfológicos e meteorológicos”.

Neste sentido, “uma forma de melhorar o desempenho do sistema fotovoltaico em condições não uniformes é com o *Maximum Power Point Tracking (MPPT)*” (Souza Silva *et al.*, 2022, p.1). O *MPPT* do inversor monitora os parâmetros elétricos da energia gerada, possibilitando o maior aproveitamento da energia gerada, através do controle individual da potência dos módulos.

Dessa forma, os fabricantes desenvolveram uma arquitetura que expande a aplicação do *MPPT (Máximo Ponto de Potência)* para o nível de módulo fotovoltaico. Essa arquitetura é conhecida como *Module-Level Power Electronics (MLPE)*. Segundo Souza Silva (2020), a maioria das patentes neste campo são americanas, sendo as principais detidas por empresas que desenvolveram a tecnologia ou adquiriram direitos para o seu uso. Esta arquitetura, que incorpora otimizadores de potência, assegura que a baixa produção de energia em um módulo individual não impacte significativamente a eficiência energética do sistema como um todo.

Assim, este estudo tem como objetivo avaliar tecnologias e métodos que aprimorem a geração de sistemas fotovoltaicos em condições não uniformes de irradiância solar, comparando os resultados com a tecnologia de inversor central. Portanto, a pesquisa busca contribuir para o avanço no entendimento dos otimizadores de potência, proporcionando um melhor conhecimento da topologia, e, conseqüentemente, auxiliar na elaboração de projetos para a escolha da arquitetura mais viável.

A dissertação é estruturada em sete capítulos, na apresentação e análise do estudo sobre sistemas fotovoltaicos de arquitetura otimizada. No Capítulo 1, a introdução destaca o crescimento do sistema fotovoltaico, ressaltando a necessidade de estudos de otimização de energia fotovoltaica. O Capítulo 2, cita os objetivos da pesquisa, concentrando-se na avaliação da viabilidade econômica e técnica dos sistemas fotovoltaicos de arquitetura otimizada. No Capítulo 3, a fundamentação teórica é apresentada, fornecendo os conceitos essenciais para embasar o estudo. O Capítulo 4, Estado da Arte, realiza uma revisão bibliográfica, abrangendo pesquisas comparativas de arquiteturas fotovoltaicas. O Capítulo 5 descreve a metodologia aplicada, incluindo as condições e padrões de medição. O Capítulo 6, Resultados e Discussão, destaca a construção das curvas características de potência com base em medições dos parâmetros elétricos, seguida pela comparação em dois cenários experimentais. Por fim, o Capítulo 7, Conclusão, demonstra arquitetura de melhor desempenho em condições adversas e analisando o custo de investimento em relação aos benefícios obtidos.

## **2 OBJETIVOS**

### **2.1 OBJETIVO GERAL**

O objetivo geral desta pesquisa consiste na avaliação da viabilidade econômica e técnica de sistemas fotovoltaicos de arquitetura otimizada, comparando experimentalmente seu desempenho com a topologia convencional.

### **2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

São objetivos específicos deste trabalho:

- Identificar as aplicações de otimizadores de potência em sistemas fotovoltaicos;
- Comparar o desempenho de sistemas fotovoltaicos com otimizadores de potência com os de topologia convencional, por meio da coleta de dados de variáveis como corrente e tensão;
- Avaliar de forma experimental a eficiência dos sistemas de geração fotovoltaica e a qualidade da energia produzida na topologia com otimizadores de potência;
- Analisar a viabilidade econômica dos sistemas fotovoltaicos com arquitetura otimizada em comparação com sistemas tradicionais.

### 3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

#### 3.1 MATRIZ ENERGÉTICA BRASILEIRA

A matriz energética brasileira é composta principalmente pela fonte hidrelétrica, que apesar de ser uma fonte de energia renovável, apresenta grandes impactos ambientais no período de construção e durante a operação. De acordo com o Atlas Brasileiro de Energia Solar (2017), a fonte hidrelétrica é suscetível a períodos de escassez hídrica, o que, somado ao crescimento da demanda de eletricidade, torna indispensável a diversificação da matriz energética brasileira, priorizando as fontes de energia que causem baixo impacto ambiental.

Para possibilitar essa diversificação no Brasil, as duas principais alternativas presentes na matriz energética são a solar fotovoltaica e energia eólica, que são as modalidades com crescente aumento na participação nacional. Nos últimos anos, essas modalidades apresentaram um significativo crescimento, se posicionando respectivamente como a segunda e terceira maior fonte de energia elétrica do Brasil, conforme demonstrado na Figura 1.

Figura 1 - Potencial anual de energia elétrica no Brasil



Fonte: ABSOLAR, 2023

Para o Atlas Brasileiro de Energia Solar (2017, p.13):

Enquanto as termoeletricas e as hidroeletricas são consideradas fontes firmes capazes de garantir o atendimento da demanda de carga típica do sistema, fontes renováveis como a eólica e a solar fotovoltaica são consideradas fontes intermitentes de energia

devido à variabilidade temporal elevada associada às condições meteorológicas presentes no local da planta.

Essas diferenças na composição das fontes de energia podem ser uma boa solução quando utilizadas como forma de compensação, a partir do uso da máxima potência das fontes intermitentes, para possibilitar o armazenamento do potencial de geração das hidrelétricas, poupando água nos reservatórios, diminuindo assim a necessidade de construção de novas usinas baseadas em fontes não renováveis e a redução da utilização das termelétricas em períodos de estiagem (Villalva, 2015).

Portanto, as pequenas usinas de geração distribuída, conectadas à rede elétrica, além de atender ao consumo local, são uma boa alternativa para compor a geração da matriz energética nacional, reduzindo a dependência de níveis satisfatórios de precipitação pluviométrica para atender à demanda de consumo energético do Brasil.

### 3.2 GERAÇÃO DISTRIBUÍDA

A geração distribuída é aquela que não é planejada centralmente pela concessionária de energia, normalmente menor que 50 MW e geralmente ligada ao sistema de distribuição. Para Willis (2000), essa modalidade de geração inclui o uso de pequenos geradores de energia elétrica, seja localizado no sistema da concessionária, em uma unidade consumidora ou em um local isolado, não conectado à rede elétrica.

Pela característica da geração distribuída ser na maioria das vezes de pequena potência e baixa tensão, ela possui a facilidade de conexão na rede elétrica já existente. Assim, de acordo com Willis (2000), pequenos geradores de energia renovável de geração eólica, solar ou hidrelétrica são frequentemente utilizados na geração distribuída, pois são de pequeno porte, o que facilita a conexão em baixa tensão na rede elétrica de distribuição.

Dessa forma, Villalva (2015, p. 30) afirma que “o uso da geração distribuída com fontes alternativas de energia elétrica tem crescido em todo mundo e também no Brasil. As energias solar fotovoltaica e eólica são as fontes alternativas com maior potencial para a geração distribuída de eletricidade”, destacando a energia fotovoltaica por sua instalação ser mais viável em áreas urbanas.

Os sistemas de geração distribuída baseados na energia solar fotovoltaica se adaptam facilmente às diferentes arquiteturas de edificações ou áreas de espaço vazio, sendo muito adequados para a instalação em qualquer local onde haja bastante incidência de luz. Essa

tecnologia demonstra viabilidade prática em praticamente todo o território brasileiro (Villalva, 2015).

De acordo com a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), as classificações de microgeração e minigeração distribuída são definidas para centrais geradoras de energia elétrica que operam com fontes renováveis ou cogeração qualificada, conforme estabelecido pela Resolução Normativa nº 1.031 de 2022. Adicionalmente, a Resolução Normativa nº 1.059 de 2023 especifica que a microgeração distribuída abrange instalações com potência instalada em corrente alternada de até 75 kW, enquanto a minigeração distribuída refere-se a centrais com potência instalada acima de 75 kW. Ambas as categorias devem estar integradas à rede de distribuição de energia elétrica por meio de uma unidade consumidora.

O sistema fotovoltaico pode funcionar de três maneiras:

- Sistema isolado da rede elétrica, denominado como *off-grid*, diferenciam-se por não estarem conectados à rede elétrica convencional. Essa configuração é usualmente composta por um ou mais módulos fotovoltaicos, um controlador de carga, uma bateria e, quando aplicável a cargas alimentadas em corrente alternada, um inversor fotovoltaico (Villalva, 2012).
- Sistema conectado à rede elétrica, conhecido como *on-grid*, opera de forma integrada com a rede da concessionária. O propósito desse sistema é gerar eletricidade para o consumo local, proporcionando a possibilidade de reduzir a dependência da rede pública, além de viabilizar a geração de excedente de energia (WEG, 2023).
- Sistema conectado à rede elétrica, intitulado *grid zero*, no qual o sistema gera a energia necessária para suas operações, equilibrando a produção e o consumo de energia. Sua característica é a operação sem a injeção de energia na rede da distribuidora, sendo possível devido ao uso de um inversor inteligente que controla a geração conforme a demanda (Villalva, 2012).

Assim, a energia solar fotovoltaica se configura em uma boa alternativa de geração distribuída, pois, quando instalada nesse sistema, não depende da etapa de transmissão de energia. Segundo a (ANEEL, 2022), essa etapa tem uma perda média de 4% de energia. Desse modo, a energia solar apresenta uma economia na construção e operação de sistemas de transmissão de energia elétrica.

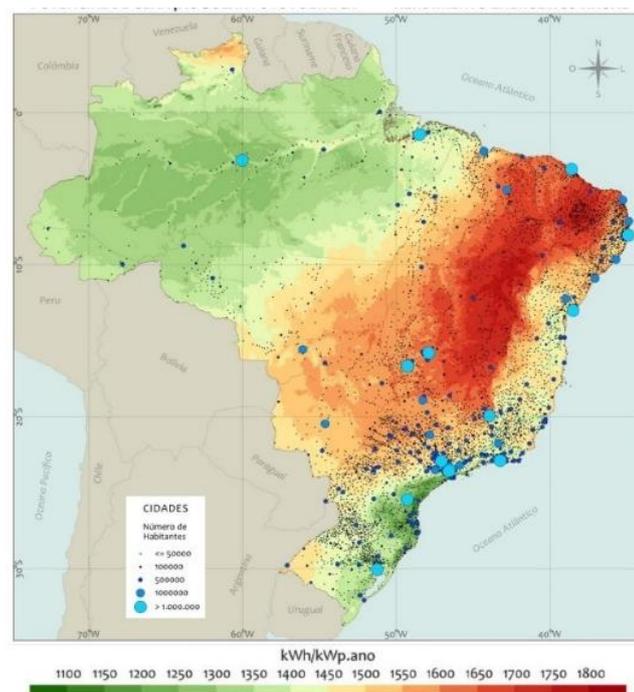
### 3.3 ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA

A energia solar fotovoltaica é gerada a partir da incidência da radiação solar proveniente das reações nucleares no interior do sol, que desencadeiam em emissões para todo o sistema solar, denominada energia solar. Essa radiação, segundo a lei da irradiação com simetria esférica, é transmitida na forma de radiação eletromagnética e pode ser aproveitada como fonte de geração de energia (Vian, 2021).

O efeito fotoelétrico, empregado em dispositivos como fotodetectores, envolve a ejeção de elétrons de um material quando exposto à luz (Saveca, 2021). Já o efeito fotovoltaico apresenta uma abordagem distinta. De acordo com Villalva (2015, p. 41), "O efeito fotovoltaico consiste na transformação da radiação eletromagnética do sol em energia elétrica por meio da criação de uma diferença de potencial, ou uma tensão elétrica, sobre uma célula formada por um sanduíche de materiais semicondutores".

A geração fotovoltaica de energia elétrica tem um grande potencial no Brasil. Mesmo em regiões com menores índices de irradiação, como indica o mapa da Figura 2, pode-se observar um elevado potencial de geração de energia fotovoltaica no país. Segundo o Atlas Brasileiro de Energia Solar (2017), a irradiação global média no Brasil é de 5153 Wh/m<sup>2</sup>.

Figura 2 - Mapa da média anual do potencial de geração solar no Brasil

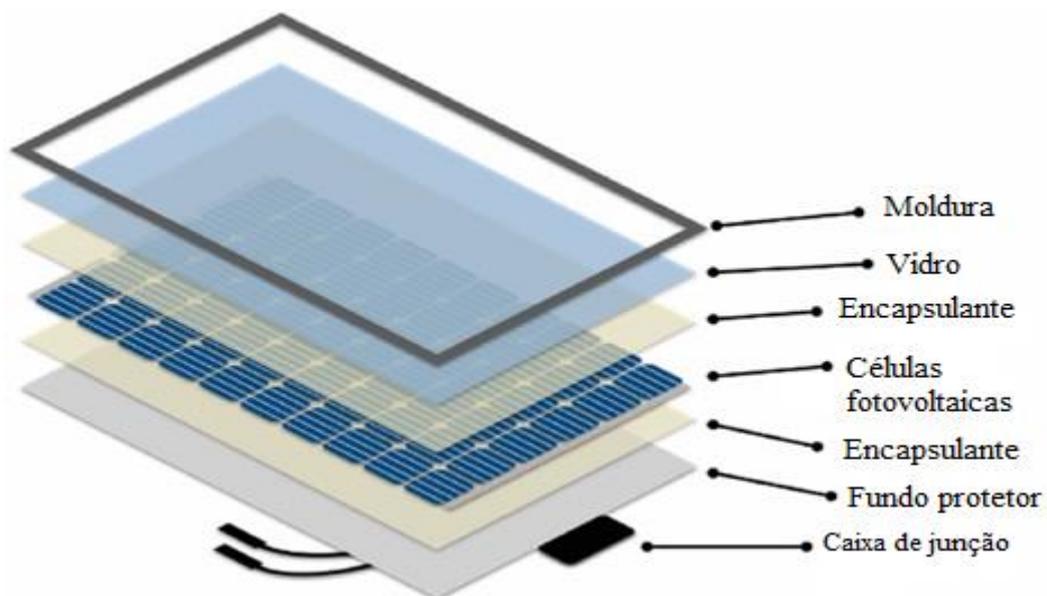


### 3.4 MÓDULOS FOTOVOLTAICOS

Segundo Balfour (2019, p. 172), “As células fotovoltaicas constituem as unidades mais básicas de um sistema fotovoltaico. Essas células transformam a energia do sol em energia elétrica para o consumo humano. Essa conversão da luz solar em energia elétrica chama-se efeito fotovoltaico.”. Este efeito é capaz de gerar energia elétrica a partir dos terminais de uma célula.

No entanto, a energia gerada por uma única unidade fotovoltaica não é suficiente para ser considerada uma fonte de energia capaz de realizar trabalho. A célula fotovoltaica é o dispositivo fotovoltaico básico, e uma única célula produz uma quantidade limitada de eletricidade. Assim, várias células são agrupadas para formar módulos fotovoltaicos (Villalva, 2012). Para Balfour (2019, p. 174) “As células fotovoltaicas se transformam em módulos quando são ligadas em *strings* de células em série e em paralelo. Um módulo fotovoltaico é uma unidade encapsulada contendo uma série de células”.

Figura 3 - Composição de um módulo fotovoltaico



Fonte: Adaptado de Aghaei *et al.*, 2022

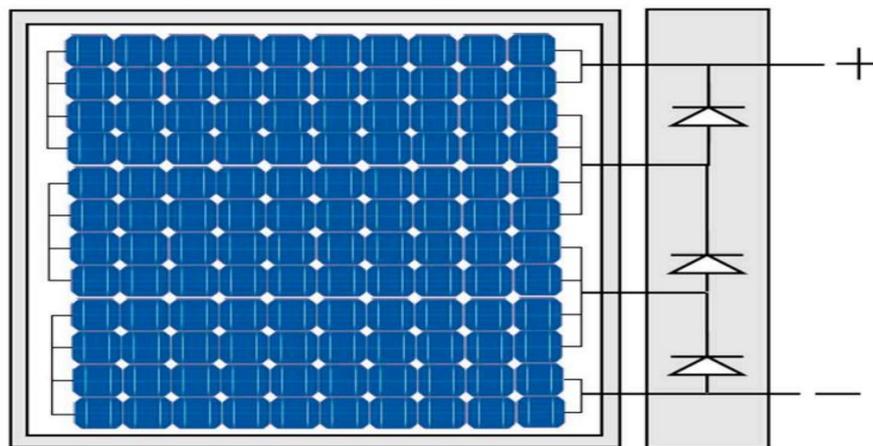
Assim, conforme Balfour (2019, p. 174), “Um módulo consiste em várias células fotovoltaicas interligadas para produzir um intervalo de características de tensão e corrente. As células são interligadas em série ou em paralelo dentro do módulo”. A partir dessa associação de células, é construído o módulo fotovoltaico (Figura 3), com sua estrutura para funcionamento

e proteção mecânica, permitindo a exposição do componente às intempéries presentes nas áreas externas onde são instalados.

### 3.5 DIODOS DE PROTEÇÃO

O diodo de *bypass* ou diodo de passagem é um componente que a indústria incorporou, conectando-o em paralelo com grupos de células fotovoltaicas, conforme representado na Figura 4.

Figura 4 – Esquema dos diodos *bypass* em um módulo fotovoltaico



Fonte: Vieira *et al.*, 2020

A utilização do componente, embora não seja uma solução ideal, atua redirecionando a corrente elétrica em módulos fotovoltaicos, permitindo que, em casos de sombreamento, outras células do módulo continuem gerando corrente elétrica (Villalva, 2015). Isso significa que esses diodos interrompem o funcionamento do módulo ou submódulo afetado, mesmo que ele possua células ainda capazes de gerar energia, a fim de evitar prejuízos para o funcionamento dos demais módulos do sistema.

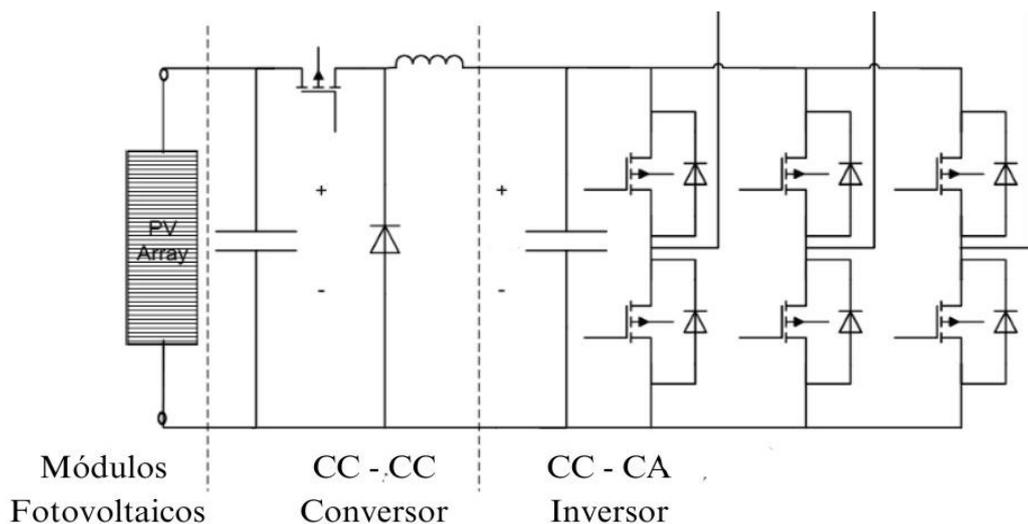
### 3.6 INVERSORES

Um inversor fotovoltaico converte a corrente contínua em corrente alternada, sendo necessário nos sistemas fotovoltaicos. Isso ocorre porque os módulos geram corrente contínua, que precisa ser convertida em corrente alternada para ser compatível com a rede elétrica convencional (Balfour, 2016). Em relação à conversão de energia, há três tipos de sistemas, conforme Balfour (2016, p. 183):

Os sistemas fotovoltaicos que interagem com a rede precisam de inversores capazes de interagir com a rede de distribuição de energia elétrica. Os sistemas fotovoltaicos independentes geralmente precisam de inversores que o integrem com o sistema de armazenamento em baterias. Os sistemas de interação com a rede que possuem armazenamento em baterias precisam de inversores especiais que façam as duas coisas.

A Figura 5 apresenta o esquema elétrico de módulos fotovoltaicos conectados a um inversor fotovoltaico que converte corrente contínua para corrente alternada. No início do diagrama, o conjunto de módulos fotovoltaicos converte a energia solar em eletricidade de corrente contínua, sendo controlados por um *MPPT* para otimização da extração de energia. Em sequência, o inversor converte a corrente contínua gerada em corrente alternada, utilizando *IGBTs* (*Insulated Gate Bipolar Transistor*) para realizar a conversão de energia por meio de comutação em alta frequência.

Figura 5 – Diagrama elétrico de um inversor fotovoltaico trifásico



Fonte: Adaptado de Muljadi, 2014

O inversor fotovoltaico (Figura 6) é preferencialmente instalado próximo ao quadro de distribuição da edificação, se conectando a um circuito específico através de um disjuntor. Isso permite a proteção termomagnética e a conexão ao barramento de distribuição, possibilitando a injeção de energia na rede elétrica. Dessa forma, em uma unidade consumidora com carga instalada compatível com a geração fotovoltaica, não é necessária a realização de ampliações na instalação elétrica existente.

Figura 6 - Inversor fotovoltaico instalado em campo



Fonte: Do autor, 2023

### 3.7 MICROINVERSORES

Microinversores fotovoltaicos são conversores de corrente contínua para corrente alternada utilizados para conectar um ou mais módulos fotovoltaico à rede elétrica (Jung, 2019). Esses equipamentos, como mostra a Figura 7, são de tamanho e potência reduzidas, e são fixados diretamente abaixo dos módulos fotovoltaicos, tornando a instalação mais fácil e rápida (Knabben, 2017).

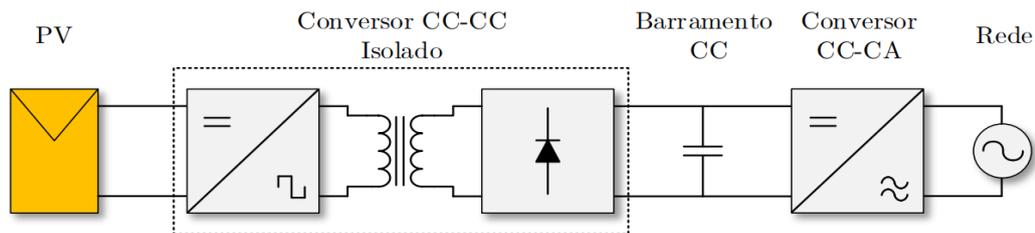
Figura 7 - Microinversor em instalação na planta fotovoltaica



Fonte: Ecori, 2023

De acordo com Jung (2019), devido ao fato de não operar com módulos em strings e, portanto, apresentar uma baixa tensão na entrada, o microinversor deve ser capaz de elevar a tensão entre 10 e 20 vezes, a fim de rastrear o ponto de máxima potência do módulo fotovoltaico e fornecer a tensão necessária para alimentar a rede elétrica. Conforme o diagrama da Figura 8, há um conversor de corrente contínua para elevar a baixa tensão na entrada do equipamento.

Figura 8 - Diagrama de blocos da arquitetura de microinversor



Fonte: Moraes, 2023

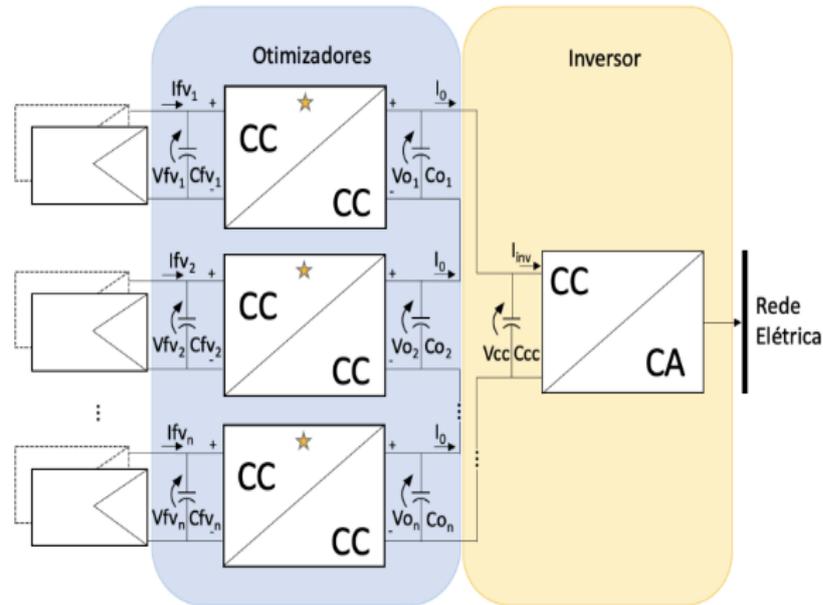
Enquanto os inversores convencionais coletam e convertem a energia de múltiplos módulos de uma vez, os microinversores realizam essa conversão de maneira individualizada, seja para cada módulo ou para pares de módulos. Contudo, é importante salientar que, apesar das vantagens operacionais, os microinversores tendem a ter um custo mais elevado, o que pode torná-los menos viáveis economicamente para grandes instalações.

Dessa forma, assim como os otimizadores de potência, os microinversores representam uma inovação no campo dos sistemas fotovoltaicos. Ao permitir uma conversão individualizada de corrente, eles otimizam a produção de energia de cada módulo, oferecendo vantagens significativas, especialmente em situações onde sombreamento ou diferenças de orientação podem afetar a geração do sistema como um todo.

### 3.8 OTIMIZADOR DE POTÊNCIA

O otimizador de potência, é definido conforme Zhang *et al.* (2018, p. 1) “O otimizador ajusta a tensão de saída do módulo fotovoltaico para garantir que cada unidade opere em seu respectivo ponto de potência máxima”. Desse modo, a Figura 9 demonstra a etapa da conversão de corrente contínua, que é posicionada entre o módulo e o inversor fotovoltaico. A arquitetura de sistemas fotovoltaicos com uso de otimizador de potência consiste em um conversor de corrente contínua instalado ou conectado a cada um ou dois módulos fotovoltaicos (Souza Silva *et al.*, 2019).

Figura 9 - Diagrama de blocos da arquitetura de sistema otimizado



Fonte: Souza Silva, 2019

Os dispositivos são desenvolvidos para reduzir as perdas em sistemas fotovoltaicos, garantindo que todos os módulos funcionem com o máximo de eficiência possível, permitindo a extração da potência máxima, sejam de módulos fotovoltaicos individuais, seja de pequenos grupos de componentes (Souza Silva *et al.*, 2019).

Dessa forma, o otimizador de potência (Figura 10), desempenha um papel importante em sistemas fotovoltaicos otimizados, atuando como um conversor de corrente contínua para corrente contínua. Sua função principal é ajustar e regular tanto os valores de corrente quanto de tensão, visando otimizar e incrementar a produção total de energia do sistema.

Figura 10 - Otimizador de potência



Fonte: Página da Ecori Energia Solar, 2023

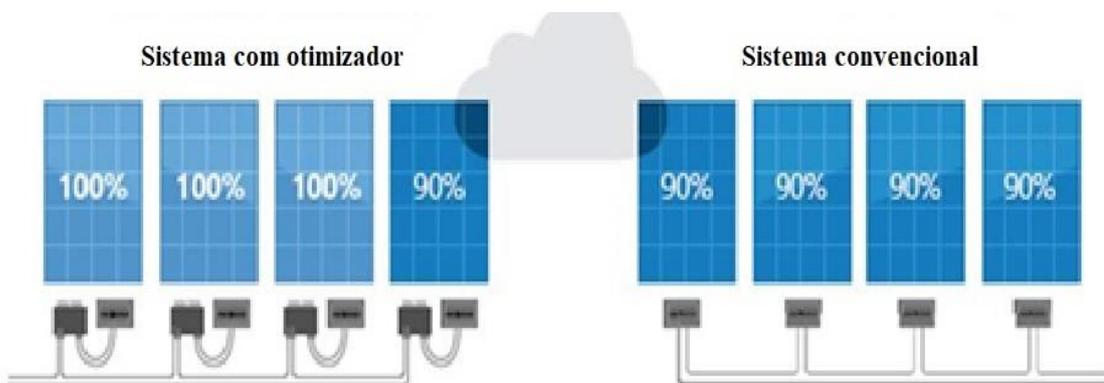
As três topologias de conversores corrente contínua básicas são *buck*, *boost* e *buck-boost*. O conversor *buck* permite reduzir a tensão na carga, o modelo *boost* permite elevar a tensão na carga e o do tipo *buck-boost* é uma opção para elevar ou reduzir a tensão na carga (Souza Silva *et al.*, 2022).

De acordo com Zhang *et al.* (2019), a estrutura *buck* demonstra capacidade de operar eficientemente mesmo sob condições de sombreamento intenso nos módulos fotovoltaicos. Além disso, devido à sua habilidade em funcionar com um intervalo mais amplo de tensões de entrada e ajustá-las para uma tensão de saída consistente, essa configuração pode permitir a conexão de um maior número de módulos fotovoltaicos por *string*, respeitando as limitações de tensão do inversor.

Os sistemas otimizados apresentam um maior número de etapas de conversão de energia, o que eleva os valores de perdas elétricas. No entanto, as perdas de conversão são compensadas pelo ganho na geração de energia proporcionado pelos otimizadores em relação à arquitetura convencional (Souza Silva *et al.*, 2019).

Esse desempenho otimizado pode ser comparado com sistemas convencionais, como observado na Figura 11. Na comparação, destaca-se a capacidade do otimizador em realizar um rastreamento contínuo do ponto de potência máxima (*MPPT*) de cada módulo individualmente. O rastreamento preciso e constante permite que cada módulo fotovoltaico opere em sua máxima potência, garantindo, assim, uma geração de energia individualizada e mais eficaz para todo o sistema.

Figura 11 - Comparativo de desenvolvimento de potência entre as arquiteturas



Fonte: Adaptado de Conectada Energia, 2023

Este equipamento desempenha a função de otimizar a geração de energia de cada módulo, podendo ser conectado individualmente ou em pares. Porém, é importante notar que

ele contribui para aumentar o custo do sistema devido à sua função de realizar o rastreamento o ponto de potência máxima (*MPPT*) individual para cada unidade, o que aumenta o número de componentes no sistema.

Por essa razão, em sistemas fotovoltaicos de maior porte, é uma prática comum conectar dois módulos a um único otimizador, com o objetivo de reduzir custos. Dessa forma, esse par de módulos, embora mantenham suas características individuais, operam de forma conjunta, funcionando como uma única unidade dentro da configuração global da instalação, mesmo que sejam dois módulos distintos.

Os otimizadores de potência também podem ser úteis na melhoria da segurança das instalações fotovoltaicas. Segundo a Solar Edge (2022), dispositivos de proteção contra arcos elétricos reduzem a tensão dos módulos fotovoltaicos para um nível seguro sempre que o inversor ou o sistema de monitoramento detectar uma anomalia ou quando o sistema for desligado.

Além disso, os equipamentos possuem um sistema de monitoramento integrado que permite o acompanhamento do desempenho de cada módulo solar, o que facilita a identificação e a correção de possíveis problemas no sistema. Conforme a Tigo Energy (2023), esses dispositivos têm a capacidade de identificar e reportar quase que instantaneamente possíveis falhas no sistema, sejam elas problemas de isolamento ou inerentes ao próprio módulo.

Dessa forma, ao considerar a característica de variação na geração de energia da fonte fotovoltaica, devido à variabilidade na incidência solar, somada às condições individuais de cada módulo, os sistemas fotovoltaicos com otimizadores de potência podem ser viáveis tanto em pequenas instalações residenciais quanto em grandes usinas fotovoltaicas, sendo uma tecnologia que combina elementos do inversor convencional e do microinversor para melhorar a eficiência global do sistema.

### 3.9 CUSTO DO SISTEMA DE GERAÇÃO FOTOVOLTAICA

Para calcular o custo de um investimento na implantação de usina fotovoltaica é necessário levar em consideração várias etapas. Para Vian (2021, p. 100), “os parâmetros fundamentais para o estabelecimento do custo da energia elétrica produzida por um sistema fotovoltaico são: investimento para instalação; taxa de desconto; custos de operação e manutenção; nível de irradiação solar e rendimento das células solares”.

O custo do investimento é dividido entre os equipamentos, componentes e serviços de instalação (Vian, 2021). Dessa maneira, é necessário fazer a comparação entre o retorno

financeiro da aquisição do sistema com a contratação convencional de energia da concessionária local, a partir da caracterização da vantajosidade da aquisição do sistema fotovoltaico. Haverá também a necessidade de avaliar os custos entre as topologias fotovoltaicas existentes para possibilitar a escolha da composição mais viável.

Uma análise comparativa de custos, conforme apresentada na Tabela 1, foi realizada em dezembro de 2023, explorando os preços de três topologias distintas de sistemas fotovoltaicos: a otimizada, utilizando a marca SolarEdge; a configuração com microinversores, empregando a marca Hoymiles; e a convencional, equipada com inversores da marca Solis. Cada configuração consistiu em 44 módulos fotovoltaicos da marca JA Solar, cada um com uma potência de 535Wp. A pesquisa abrangeu todos os elementos constituintes de um sistema fotovoltaico instalado em telhado de fibrocimento.

Tabela 1: Custo médio de arquiteturas fotovoltaicas

<b>Potência</b>	<b>Comparação</b>	<b>Aumento do Custo</b>
23,54 kWp	Otimizado para Microinversor	7,59%
	Microinversor para Convencional	11,97%
	Otimizado para Convencional	20,47%

Fonte: Elaborado pelo autor, 2023

Os resultados evidenciaram que o custo relacionado ao sistema otimizado, que integra a marca SolarEdge, mostrou-se superior em comparação com as configurações convencional e com microinversor. Isso aponta para implicações relevantes na tomada de decisões relacionadas à escolha de topologias específicas em projetos de sistemas fotovoltaicos.

### 3.10 QUALIDADE DE ENERGIA NA GERAÇÃO FOTOVOLTAICA

Os equipamentos não lineares nas instalações elétricas são responsáveis por distorções nas correntes e, em menor medida, nas tensões. Essas cargas absorvem correntes com formas de onda distorcidas, mesmo quando a tensão de alimentação é perfeitamente senoidal (Lundquist, 2001). Essa característica, que implica uma relação entre a qualidade da energia e o funcionamento de componentes não lineares, ressalta a necessidade de compreender e mitigar distorções para manter a estabilidade e eficiência do sistema elétrico, especialmente considerando que a energia fotovoltaica pode ser uma fonte de distúrbios elétricos na rede, originados pela composição eletrônica do inversor fotovoltaico.

Ademais, a característica intermitente da fonte fotovoltaica também pode causar instabilidade no sistema elétrico. Conforme Gandhi (2020), quando a geração fotovoltaica excede a demanda, ocorre o fluxo reverso de potência, o que descaracteriza a operação convencional da rede, visto que foi projetada para energia unidirecional, ou seja, com o fluxo de energia da rede de alta tensão para a rede de baixa tensão.

Conforme o Procedimento de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional - PRODIST – Módulo 8, elaborado pela Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL, destaca-se: “para unidade consumidora ou conexão entre distribuidoras com tensão inferior a 230 kV, o fator de potência no ponto de conexão deve estar compreendido entre 0,92 (noventa e dois centésimos) e 1,00 indutivo ou 1,00 e 0,92 capacitivo, de acordo com regulamentação vigente” (ANEEL, 2021, p. 8).

Existem também padrões definidos para a quantidade de harmônicas que podem ser injetadas na rede elétrica. Segundo a norma ABNT NBR 16149 (2013, p. 4), "A distorção harmônica total de corrente deve ser inferior a 5% em relação à corrente fundamental na potência nominal do inversor".

Portanto, há uma importância na penetração fotovoltaica, que é a capacidade fotovoltaica instalada em uma rede em relação à demanda de carga. Ela é definida como a razão da capacidade fotovoltaica instalada em relação à demanda de carga de pico, ou ainda, a razão da energia total fotovoltaica em relação à energia total consumida (Gandhi, 2020).

Assim, elevadas proporções de energia fotovoltaica injetada em uma rede podem causar perturbações e instabilidade em uma instalação. Uma redução na geração, seja por problemas técnicos ou devido a intermitências causadas por nuvens, pode ter um impacto na geração distribuída. Por isso, níveis de penetração fotovoltaica devem ser considerados no estudo da qualidade de energia.

#### **4 ESTADO DA ARTE**

Neste capítulo é realizada uma revisão bibliográfica de três estudos de comparação de arquiteturas fotovoltaicas. Sendo assim, foram realizadas buscas no portal de periódicos científicos *IEEE-Institute of Electrical and Electronics Engineers*, com os descritores: “arquiteturas fotovoltaicas” e “otimizador de energia”, e restrita às publicações dos últimos 5 anos, sendo analisados os artigos apresentados na Tabela 2.

Tabela 2: Identificação de estudos revisados

Artigo	Autor	Título	Instituição
1	SOUZA SILVA et al.	Estudo de Otimizadores de Energia para Conectados à Rede de Sistemas Fotovoltaicos	Universidade Estadual de Campinas
2	ZHANG. X. et al.	Uma Estrutura de Otimizador de Energia Parcial Redutora para Otimizador de Energia Conectado em Série Fotovoltaica	Universidade de Zhejiang na China
3	REFAAT. A. et al.	Um novo Otimizador de Coletor de Corrente Fotovoltaica para Extrair a Potência Máxima Durante o Sombreamento Parcial ou em Condições de Incompatibilidade	Universidade de Saint Petersburg na Rússia

Fonte: Elaborado pelo autor, 2023

O trabalho de SOUZA SILVA et al. (2019) apresentou um estudo sobre otimizadores, através do *software* PV\*SOL simulado em diferentes cenários e locais, que possibilitou retratar as variáveis que podem interferir no funcionamento de um sistema fotovoltaico, como sombreamento, irradiância e temperatura.

Foram realizadas as simulações com a escolha de 5 cidades brasileiras e foi considerado as diferentes condições de sombreamento e incidência solar, assim o estudo realizou uma análise teórica e, posteriormente, experimental dos otimizadores de potência, analisando o comportamento das variáveis de corrente e tensão.

Após as simulações, sugeriu-se que a arquitetura com otimizadores de potência é viável, para locais com índice solarimétrico baixo e com alta formação de nuvens ou locais mais propícios a sombreamentos em determinados períodos do dia.

O artigo de ZHANG. X. et al. (2018) mostra que o otimizador *step-up* não tem um bom desempenho no sistema otimizador de energia conectado em série, então o artigo propôs uma estrutura de otimização parcial de potência abaixadora, que pode alcançar um bom *MPPT* em condições ruins de irradiância.

Uma simulação e uma plataforma de *hardware* foram construídas para verificar a estrutura proposta e a vantagem em relação ao otimizador de energia convencional, é que a

estrutura proposta precisa processar apenas uma parte da energia fotovoltaica. Assim, o tamanho e o custo do circuito são bastante reduzidos.

O estudo de REFAAT. A. et al. (2019) sugere um novo otimizador de coletor de corrente fotovoltaico para melhorar a potência capturada do painel fotovoltaico em caso de sombreamento parcial ou condições de incompatibilidade. Os módulos fotovoltaicos são colocados em série e conectados à rede elétrica por meio de um inversor, que introduz uma nova topologia de inversor centralizado.

Os resultados da simulação mostram que a topologia apresenta uma boa eficiência, baixa distorção harmônica, bom rastreamento do ponto máximo de potência e um fator de potência próximo ao unitário, assim apresentando valores significativos de eficiência e de qualidade de energia elétrica.

## 5 METODOLOGIA

Segundo Gil (2018), as pesquisas explicativas têm como propósito identificar fatores que determinam ou contribuem para a ocorrência de fenômenos. Assim, o presente estudo se caracteriza como pesquisa explicativa, por experimentalmente observar e analisar o comportamento do otimizador de potência submetido em diferentes condições de funcionamento.

Através de medições de variáveis que têm os valores apresentados classificados como determinantes para a conclusão do estudo de resultados de eficiência, viabilidade e qualidade de energia, o trabalho realiza uma pesquisa quantitativa que de acordo com (Sampieri, 2013) utiliza a coleta de dados para testar hipóteses, baseando-se na medição numérica e na análise estatística para estabelecer padrões e comprovar teorias.

A pesquisa experimental consiste essencialmente em determinar um objeto de estudo, selecionar as variáveis capazes de influenciá-lo e definir as formas de controle e de observação dos efeitos que a variável produz no objeto (Gil, 2018). A partir disso, este estudo utiliza a tipologia experimental de campo por selecionar as variáveis e observar os efeitos de acordo com cada arquitetura fotovoltaica comparada.

O experimento foi realizado no Hospital de Clínicas (Figura 12), que está localizado na avenida Getúlio Guaritá, bairro Abadia, Uberaba-MG, coordenadas:  $19^{\circ}45'20,75''S$ ,  $47^{\circ}55'49,59''O$ , e na Unidade Univerdecidade (Figura 13), que está localizada na avenida Randolpho Borges Junior, 1400, Uberaba/MG, coordenadas:  $19^{\circ}42'37,65''S$ ,  $47^{\circ}57'40,45''O$ , ambas da Universidade Federal do Triângulo Mineiro – UFTM, nos meses de julho e agosto de 2023.

Figura 12 - Vista aérea do Hospital de Clínicas da UFTM



Fonte: Página da UFTM, 2020

Figura 13 - Vista panorâmica da Unidade Univerdecidade da UFTM



Fonte: Página da UFTM, 2022

O Quadro 1 exibe informações técnicas sobre os dois sistemas que foram objeto de avaliação na pesquisa. Estes dados compreendem detalhes gerais sobre a composição, quantidades e especificações de cada unidade analisada.

Quadro 1 – Composição dos sistemas fotovoltaicos analisados

Local do Sistema	Hospital de Clínicas-UFTM	Unidade Univerdecidade - UFTM
Componente	Especificações	
Inversor	Solaredge	Goodwe
Modelo do Inversor	SE27.6K	GW35KLV-MT
Tipo	Trifásico	Trifásico
Tensão de Saída	380 VCA	220 VCA
Potência	26.4 kW	36,0 kW
Tensão por MPPT	750 VCC	200 a 650 VCC
Strings	2 com 32 módulos e 1 com 30 módulos	4 com 14 módulos e 4 com 13 módulos
Módulos Fotovoltaicos	DAH Solar	JA Solar
Modelo do Módulo	HCPP72X9	JAM72S09-385/PR
Células	144 – Policristalino	72 - Monocristalino
Otimizador de Potência	Solaredge	Não possui
Modelo do Otimizador	P-730	Não possui

Fonte: Elaborado pelo autor, 2023

Foram realizadas medições nos terminais de saída dos módulos fotovoltaicos, otimizadores e inversores fotovoltaicos das grandezas de corrente e tensão elétrica, nas duas topologias de forma normalizada em sistema, para analisar os valores de potência aprimorados pelo otimizador em comparação com os números aferidos na topologia convencional.

Portanto, os módulos de ambos os modelos de arquiteturas foram expostos a diversas condições, incluindo variações de temperatura, níveis de irradiância solar, efeitos de

sombreamento. Essas condições foram reproduzidas tanto por meio de mudanças naturais no ambiente, refletindo as flutuações climáticas típicas, quanto por meio de simulações de sombreamento, que foram aplicadas de maneira escalonada nas superfícies dos módulos.

## 5.1 EQUIPAMENTOS UTILIZADOS

- Analisador de energia (Figura 14):

Empregado para efetuar medições abrangendo corrente, tensão, potência ativa, reativa, aparente. Além disso, o equipamento foi utilizado na análise da qualidade de energia, realizando medições das harmônicas, inter-harmônicas e outros distúrbios presentes na rede

Figura 14 – Analisador de Energia Fluke 435 Series II



Fonte: Do autor, 2023

- Osciloscópio digital (Figura 15):

Utilizado para analisar a forma de onda do sinal elétrico na saída do otimizador de energia. Essa análise teve o objetivo de verificar a qualidade de tensão do equipamento, que opera na conversão de corrente contínua. O ajuste de tensão foi configurado para 20 Volts por divisão, enquanto o de tempo foi fixado em 25 nanossegundos por divisão.

Figura 15 – Osciloscópio Digital BK Precision 2530B



Fonte: Do autor, 2023

- Alicate amperímetro (Figura 16):

Aplicado para quantificar as grandezas elétricas de corrente e tensão nas saídas dos módulos e otimizadores de potência dos sistemas fotovoltaicos. Os dados obtidos foram utilizados para analisar as curvas de corrente (I) e tensão (V) em pontos de interesse específicos do sistema durante as simulações de intempéries locais nos módulos analisados.

Figura 16 – Alicate Amperímetro True RMS  
Fluke 376



Fonte: Do autor, 2023

## 5.2 MEDIÇÕES

Em testes conduzidos em campo, surgem várias dificuldades na obtenção de valores de medição precisos. Dentre esses desafios, destacam-se a oscilação de variáveis atmosféricas, influenciadas pelas condições climáticas, tais como irradiação solar, temperatura ambiente, velocidade do vento e a sujidade nos módulos fotovoltaicos. Mesmo quando se segue os protocolos de medição, essas variáveis podem introduzir variações e imprecisões nos resultados. Adicionalmente, as medições enfrentaram limitações devido à ativação dos diodos *bypass*, que isolam o módulo ou submódulo fotovoltaico sob certas condições de retenção solar, restringindo assim o escopo dos testes possíveis durante o experimento.

A execução destes experimentos apresenta diversos desafios, como a complexidade de acesso a áreas situadas em coberturas e telhados. Além disso, conduzir medições elétricas em equipamentos que já estão instalados e operando exige atenção especial para assegurar a proteção contra choques elétricos e para minimizar o risco de interrupções no fornecimento de energia na unidade consumidora.

A metodologia utilizada para esta pesquisa é uma adaptação do procedimento elaborado pelo Laboratório Nacional de Energia Renovável dos Estados Unidos, estabelecido em

colaboração com o Departamento de Energia Americano (Deline *et al.*, 2012). A abordagem visa fornecer um protocolo replicável para simular cenários de sombreamento em condições de irradiação que não são ideais, permitindo a comparação de parâmetros entre sistemas equipados com microinversores e outros dispositivos eletrônicos de potência em relação a sistemas convencionais.

O procedimento de teste teve como base o sombreamento direto, no qual uma condição de sombreamento artificial foi aplicada igualmente aos sistemas otimizado e convencional. A eficiência resultante foi avaliada para identificar as vantagens da eletrônica distribuída. Esse procedimento incluiu duas técnicas:

- Método Normalizado: Avalia o desempenho de cada sistema sob sombreamento, comparando-o com o desempenho sem sombreamento. Para lidar com variabilidades e incertezas, compara registros em dias subsequentes, no mesmo horário, sob irradiação solar plena. (Deline *et al.*, 2012).
- Método de Tabela: Realiza uma comparação quantitativa da geração de energia na ausência de sombreamento entre os sistemas fotovoltaicos durante uma exposição específica à irradiação solar. Aplica um regime de sombreamento artificial igualmente aos dois sistemas. (Deline *et al.*, 2012).

Dessa forma, foram realizados três experimentos com a finalidade de comparar a eficácia da topologia fotovoltaica otimizada em relação à topologia convencional:

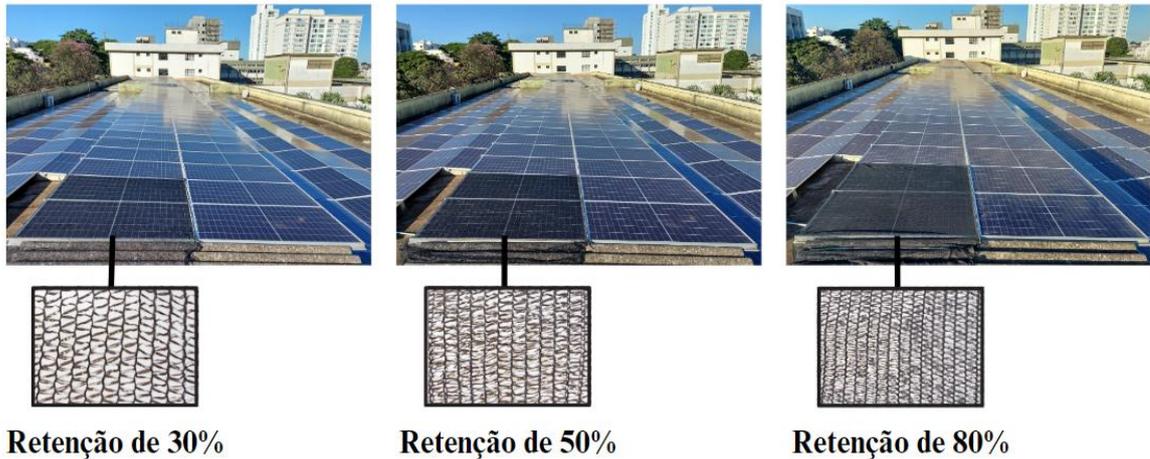
- Experimento 1: Empregaram-se três telas de sombreamento com diferentes níveis de transparência, cobrindo integralmente o par de módulos na arquitetura otimizada.
- Experimento 2: Aplicou-se de recortes de tela inteiramente opaca para sombrear verticalmente, e de forma individual, uma ou múltiplas células do módulo.
- Experimento 3: Utilizou-se também recortes de tela inteiramente opaca para sombrear horizontalmente, e de forma individual, uma ou múltiplas células do módulo.

Em relação ao sistema otimizado, as medições foram conduzidas em dois módulos. Isso se deve ao fato de que, por compartilharem um mesmo otimizador de potência, esse par de módulos opera como se fosse um único módulo fotovoltaico.

No primeiro experimento, foram utilizados três modelos de tela de sombreamento feitos de fios de polietileno de baixa densidade, com opacidades de 30%, 50% e 80%. Essas telas cobriram completamente a superfície de um único módulo no sistema convencional ou de um par de módulos no sistema otimizado, como ilustrado na Figura 17. Cada modelo de tela de retenção foi mantido por 15 minutos e posteriormente removido para permitir a comparação

com o desempenho do sistema sem sombreamento. As medições foram realizadas em um único dia para cada modelo de tela de sombreamento, nos mesmos horários ao longo do dia, sendo às 8h, 10h, 12h, 14h e 16h.

Figura 17 – Sistema fotovoltaico otimizado com diferentes níveis de mantas de cobertura

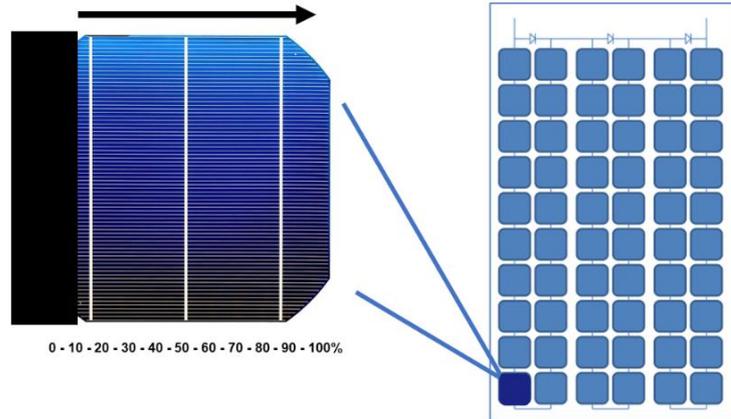


Fonte: Elaborado pelo autor, 2023

Na segunda etapa, foram realizados os experimentos de sombreamento de células fotovoltaicas isoladas, assim, os módulos foram submetidos ao formato de teste que visa garantir que o sombreamento atingisse um ou mais submódulos, levando em consideração que a presença dos 3 diodos de *bypass* faz o módulo ser composto por 3 submódulos individuais na sua configuração.

Conforme ilustrado na Figura 18, adotou-se uma tela de sombreamento completamente opaca, garantindo 100% de retenção da irradiação solar com medições realizadas às 12h. Esta tela foi empregada para cobrir uma única célula de um módulo no sistema convencional e uma célula em cada um dos módulos do par analisado no sistema otimizado, delimitando o experimento ao sombreamento vertical de um módulo. Durante a simulação, executou-se um sombreamento progressivo sobre a célula, com grau de obstrução variando de 0% a 100%, sendo incrementados sequencialmente em 5% para o intervalo de 0 a 50%, e de 10% para o intervalo de 50 a 100%.

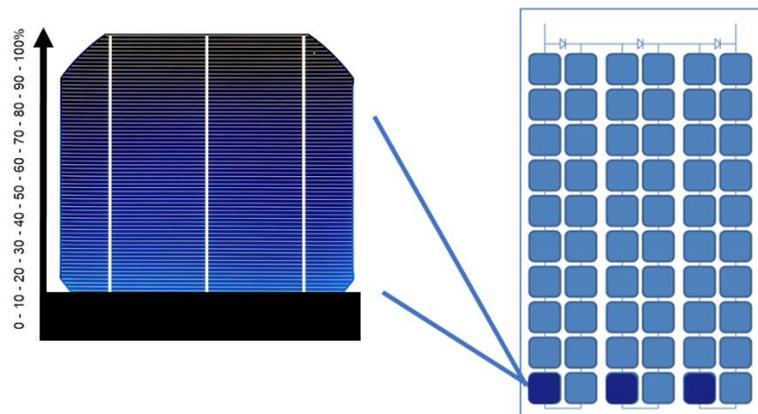
Figura 18 – Representação do esquema de sombreamento vertical da célula fotovoltaica



Fonte: Elaborado pelo autor, 2023

No terceiro experimento (Figura 19), adotou-se uma metodologia similar ao segundo, utilizando a tela de sombreamento completamente opaca e mantendo a sequência de sombreamento progressivo, porém, desta vez, abrangendo três células. Este procedimento permitiu integrar ao experimento os 3 submódulos do módulo do sistema convencional e do par de módulos do sistema otimizado, equivalendo, assim, ao sombreamento horizontal do módulo.

Figura 19 - Representação do esquema de sombreamento horizontal da célula fotovoltaica

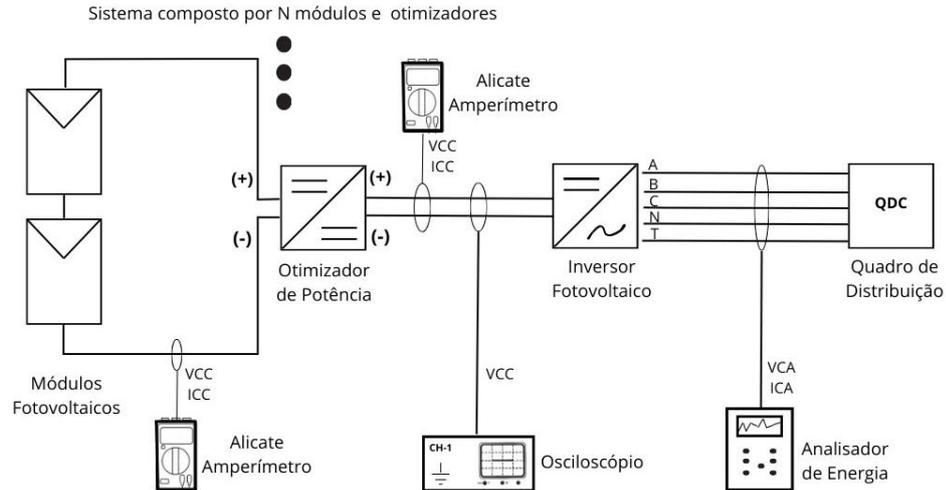


Fonte: Elaborado pelo autor, 2023

O esquema de medição foi organizado para que as grandezas de corrente e tensão fossem registradas na saída dos módulos fotovoltaicos e do otimizador de potência. Isso permitiu acompanhar o processo de conversão pelo otimizador. O sinal de tensão do otimizador de potência foi fornecido ao osciloscópio para visualizar a forma de onda. Por fim, a corrente,

tensão, potência e qualidade da energia foram monitoradas na saída do inversor fotovoltaico, conforme ilustrado no esquema da Figura 20.

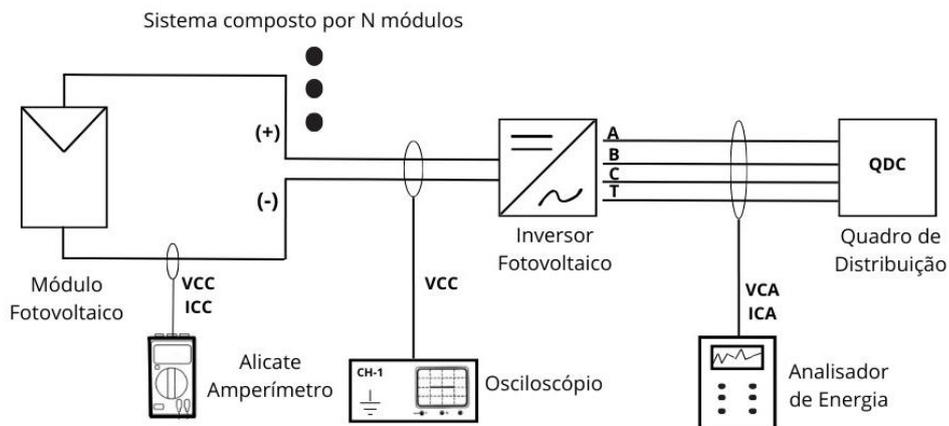
Figura 20 – Esquema de medição das grandezas elétricas da topologia otimizada



Fonte: Elaborado pelo autor, 2023

As medições realizadas em corrente contínua na arquitetura convencional foram restritas à saída do módulo fotovoltaico, onde foram utilizados um alicate amperímetro e um osciloscópio. Isso se deve ao fato de que esse sistema não possui um otimizador de potência. Por outro lado, as medições de corrente alternada seguiram o mesmo esquema da topologia otimizada, utilizando um analisador de energia como equipamento de medição, conforme representado na Figura 21.

Figura 21 – Esquema de medição das grandezas elétricas da topologia otimizada

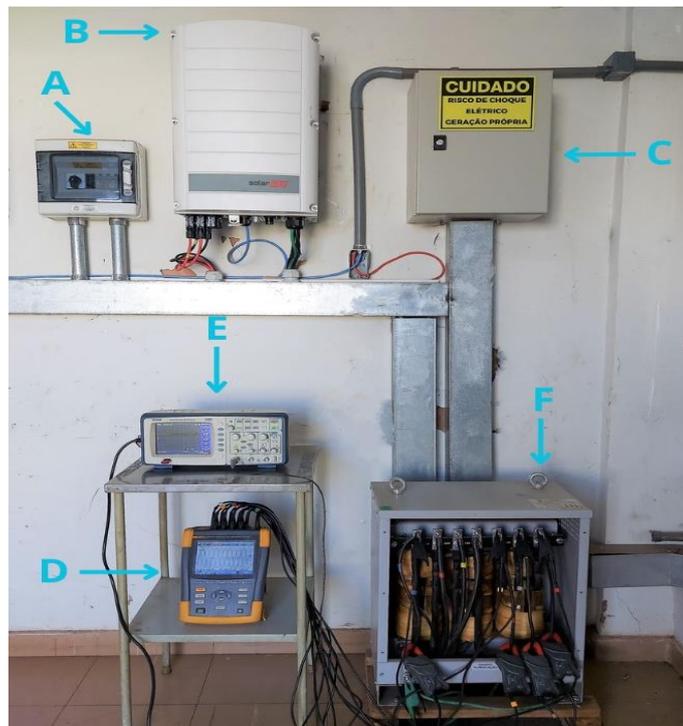


Fonte: Elaborado pelo autor, 2023

A Figura 22 apresenta os detalhes das conexões do quadro de distribuição, inversor de frequência e otimizador de potência conectados para as medições no sistema com topologia

otimizada. Se observa que como entrada do transformador abaixador é compartilhada com a saída do inversor fotovoltaico, esse ponto foi escolhido para a conexão do analisador de energia devido à facilidade de conexão dos cabos para medição. Além disso, a figura mostra o osciloscópio digital, que recebe o sinal do otimizador de potência a distância de 15 metros por meio de um cabo de extensão. Isso permitiu que o equipamento fosse acomodado em um local protegido das intempéries externas.

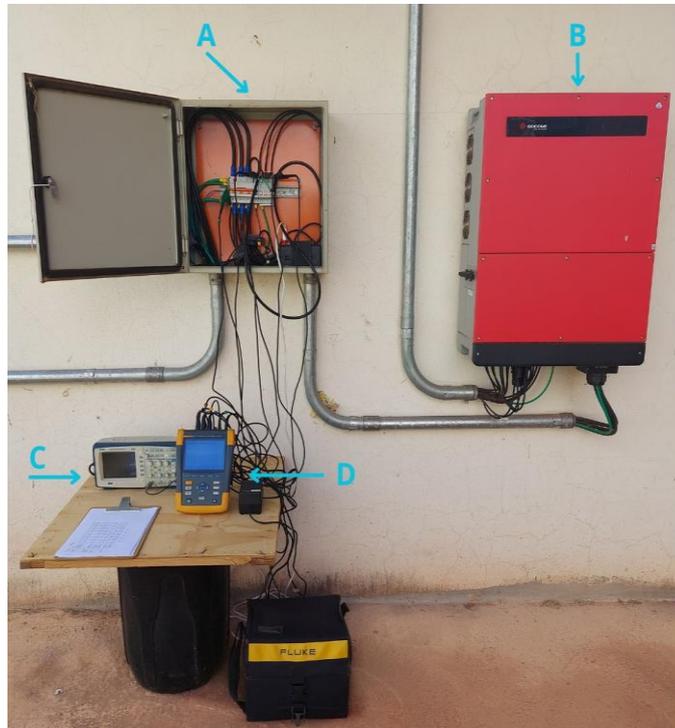
Figura 22 – Equipamentos conectados para medições no sistema otimizado: a) *String* box CC; b) Inversor fotovoltaico; c) Quadro de distribuição; d) Analisador de energia; e) Osciloscópio digital; f) Transformador abaixador.



Fonte: Do autor, 2023

Na Figura 23 é demonstrado os detalhes das conexões do quadro de distribuição, inversor fotovoltaico e otimizador de potência, que são conectados para as medições no sistema com topologia convencional. O analisador de energia foi conectado nos terminais e cabos dos disjuntores do quadro de distribuição. O osciloscópio digital foi posicionado da mesma forma que no modelo da topologia otimizada, recebendo o sinal do otimizador de potência a distância de 15 metros por meio de um cabo de extensão.

Figura 23 – Equipamentos conectados para medições no sistema convencional: a) Quadro de distribuição; b) Inversor fotovoltaico; c) Osciloscópio digital; d) Analisador de energia.



Fonte: Do autor, 2023

Para ambas as instalações os alicates amperímetros foram utilizados próximos aos módulos fotovoltaicos. Assim, para os demais instrumentos de medição, o posicionamento estratégico do analisador de energia e osciloscópio digital não só assegura a integridade dos equipamentos, como também facilita a realização das medições.

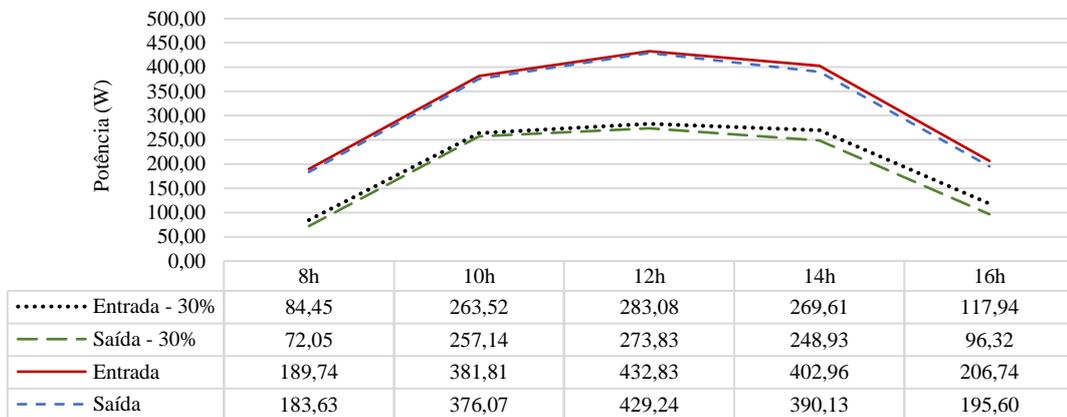
## 6 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na avaliação do desempenho do sistema fotovoltaico em condições de sombreamento, foram construídas as curvas características de potência com base em medições dos parâmetros elétricos, como corrente e tensão. Posteriormente, essas medições foram comparadas em dois cenários experimentais: sombreamento parcial e ausência de sombreamento.

### 6.1 RESULTADOS COM TELAS DE RETENÇÃO NO SISTEMA OTIMIZADO

A partir do primeiro experimento, e analisando a Figura 24, que representa a potência do otimizador sob uma condição de retenção solar de 30%, podemos observar uma diferença entre a potência de entrada e saída em diferentes momentos do dia. A curva demonstra que, apesar do consumo intrínseco do otimizador representar uma fração significativa da potência gerada em momentos de menor irradiância solar, durante os picos de irradiância, esse consumo torna-se irrelevante para o sistema.

Figura 24 – Gráfico de potências em Watts (W) do otimizador em cenários com e sem retenção solar de 30%

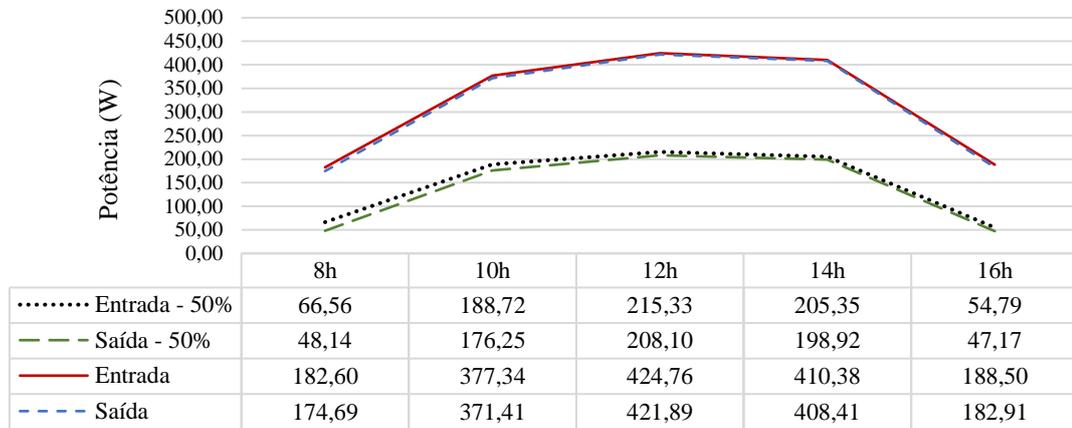


Fonte: Elaborado pelo autor, 2023

O gráfico da Figura 25, ao detalhar a potência do otimizador sob uma retenção solar de 50%, mostra que, apesar do sombreamento intensificado, a capacidade de geração de energia dos módulos permanece eficaz, principalmente nos momentos de maior incidência solar. A retenção solar leva a uma diminuição na potência de saída, que é proporcional ao grau de sombreamento imposto. Contudo, o otimizador exibe uma adaptabilidade notável diante dessas

alterações, assegurando a geração de energia inclusive nas fases iniciais e finais do dia, quando a irradiância solar é reduzida.

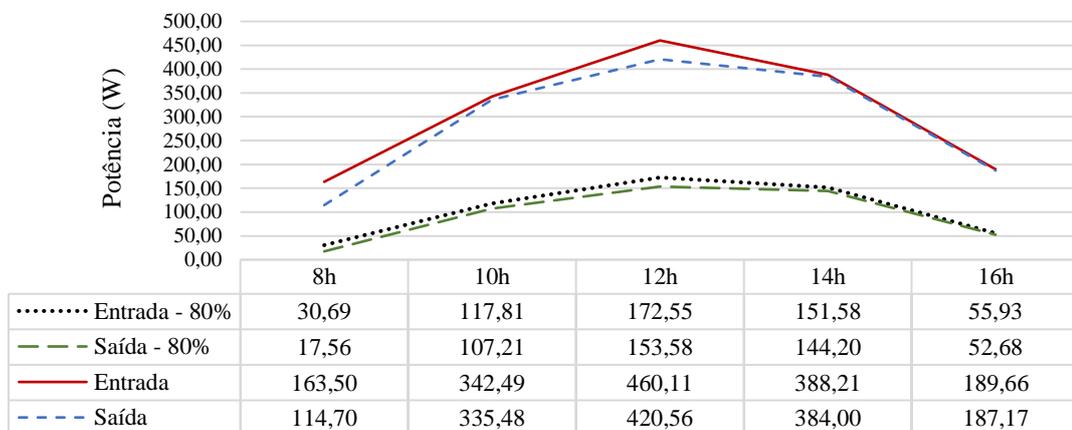
Figura 25 – Gráfico de potências em Watts (W) do otimizador em cenários com e sem retenção solar de 50%



Fonte: Elaborado pelo autor, 2023

Na Figura 26, é observado o comportamento de um sombreamento ainda mais acentuado, de 80%. Mesmo sob essas condições, os módulos com o otimizador mantêm a geração de energia, embora haja uma queda substancial na potência de entrada e saída em comparação com situações de menor sombreamento, mostrando a capacidade do otimizador de continuar operando e convertendo energia, mesmo sob adversidades. A correlação direta entre a eficiência do sistema e a incidência luminosa sobre os módulos fotovoltaicos fica ainda mais evidente neste cenário de maior retenção solar.

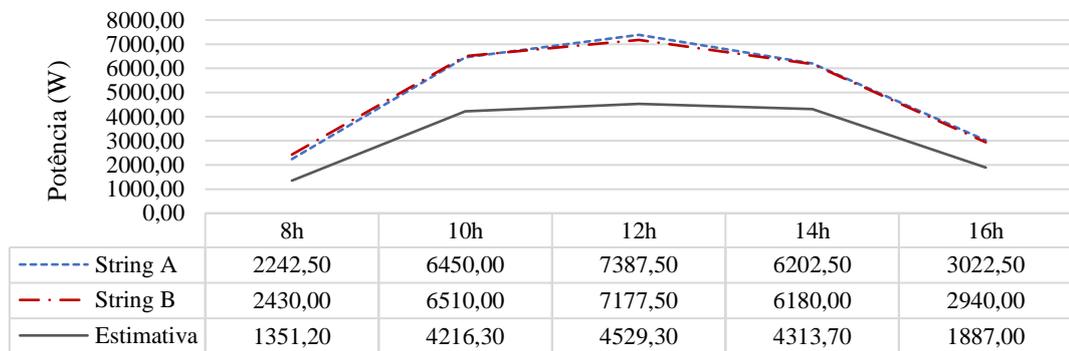
Figura 26 - Gráfico de potências em Watts (W) do otimizador em cenários com e sem retenção solar de 80%



Fonte: Elaborado pelo autor, 2023

Conforme ilustrado na Figura 27, que representa uma condição de sombreamento de 30%, a *String A*, que foi submetida ao sombreamento, apresenta uma potência similar à da *String B*, que não foi afetada pelo sombreamento. O terceiro valor é uma estimativa da geração de potência, considerando uma simulação da hipótese na qual todos os módulos da *string* desenvolvem a mesma potência do módulo sombreado. Essa simulação demonstra um declínio mais acentuado na geração de toda a *string*.

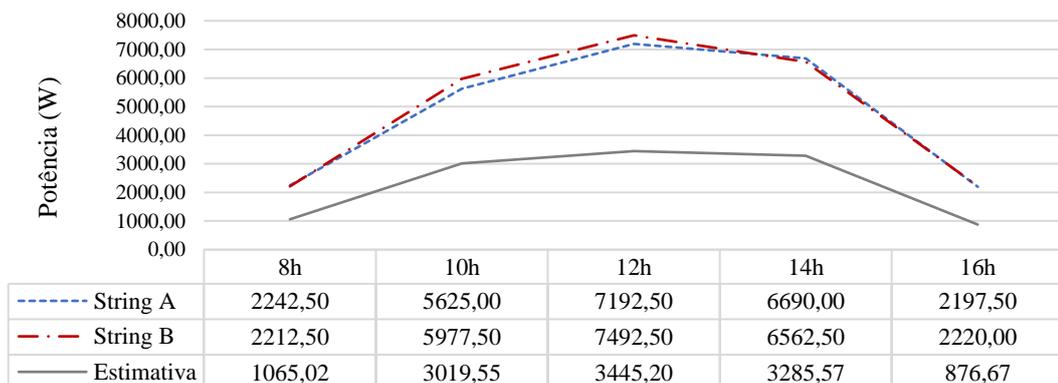
Figura 27 – Gráfico da influência do sombreamento de 30% na potência em Watts (W) das *strings*



Fonte: Elaborado pelo autor, 2023

Analisando a Figura 28, para 50% de sombreamento, nota-se que as potências geradas pelas *Strings A* e *B* estão em níveis semelhantes. Isso sugere que, mesmo com sombreamento significativo, quando presente em apenas um par de módulos, o sistema retém parte significativa de sua eficiência. Para o valor estimado, foi apresentada uma queda mais expressiva, sobretudo nos horários de pico.

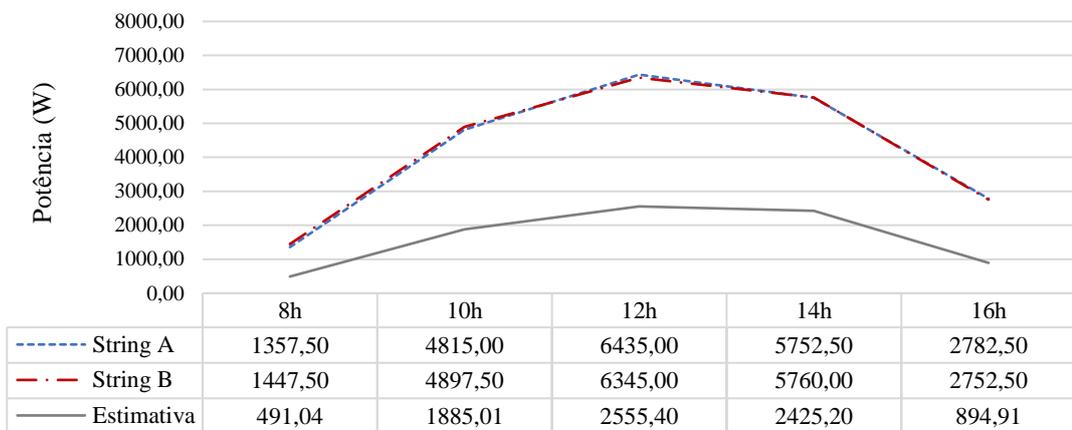
Figura 28 – Gráfico da influência do sombreamento de 50% na potência em Watts (W) das *strings*



Fonte: Elaborado pelo autor, 2023

A Figura 29, que representa um sombreamento de 80%, sendo uma condição de operação muito acentuada no sistema fotovoltaico. A potência de entrada da *String A* apresenta valores próximos aos da *String B*, com pequenas variações que refletem as perdas decorrentes do par de módulos sob sombreamento e as diferenças inerentes entre as duas *strings*. A estimativa, por outro lado, mostra uma queda mais acentuada, destacando que sob condições de sombreamento intenso, a eficiência do sistema seria muito comprometida.

Figura 29 – Gráfico da influência do sombreamento de 80% na potência em Watts (W) das *strings*



Fonte: Elaborado pelo autor, 2023

Devido à ausência de uma queda acentuada de tensão, se observa que dificilmente ocorre a ativação do diodo de *bypass* nessa topologia, permitindo que o submódulo continue gerando energia de acordo com a retenção solar à qual a célula é submetida. Dessa forma, à medida que o percentual de sombreamento aumenta, há uma redução proporcional na potência gerada, evidenciando a sensibilidade desses sistemas a variações na irradiância solar. Nota-se, entretanto, que o sistema otimizado demonstra resiliência, mantendo uma geração de energia considerável mesmo sob condições de sombreamento intenso.

Ao realizar o mesmo procedimento de teste no sistema de arquitetura convencional para comparar sua resposta ao sombreamento com a topologia otimizada anteriormente analisada, observou-se que o diodo *bypass* do módulo foi acionado já quando submetido pelo encobrimento da tela de retenção de 30%. Isso deixou o módulo inoperante no sistema, impossibilitando a realização das leituras referentes ao teste.

De acordo com a SolarEdge (2023), uma diferença de 20% na irradiação solar que incide nas células em um submódulo é suficiente para ativar o diodo de *bypass*. Assim, o acionamento

do diodo de *bypass* em um sistema fotovoltaico convencional indica que o sistema é mais sensível ao sombreamento do que um sistema otimizado.

No mesmo modelo de teste que incorporou a tela de retenção também foi conduzida uma análise da qualidade da energia gerada pela arquitetura otimizada. Essa análise abrangeu a avaliação do fator de potência, da distorção harmônica total de corrente (DTI) e do comportamento do sinal de corrente contínua na saída do otimizador.

A análise da Tabela 3 mostra que a distorção harmônica é influenciada pela presença de retenção solar localizada, embora o impacto seja mínimo. Os harmônicos foram mais elevados nos horários de menor irradiância, especificamente por volta das 8h e das 16h. A 5ª harmônica foi a de maior amplitude em todas as medições. Observa-se que durante as medições, não foram encontrados inter-harmônicos significativos.

O fator de potência permaneceu predominantemente capacitivo, oscilando entre 0,98 e 0,99, valores próximos do ideal de 1,00. Essa estabilidade no fator de potência ressalta a capacidade do sistema em manter uma relação adequada entre as potências ativa e reativa, independentemente da irradiância ou da retenção solar, demonstrando, assim, a alta qualidade do inversor.

Tabela 3: Análise da qualidade de energia da arquitetura otimizada

Horário	Retenção solar 30%		Retenção solar 50%		Retenção solar 80%	
	DTI	Fator de Potência	DTI	Fator de Potência	DTI	Fator de Potência
8h com retenção	3,40%	0,99	10,40%	0,99	13,60%	0,98
8h sem retenção	3,20%	0,99	4,90%	0,99	11,00%	0,99
10h com retenção	2,00%	0,99	2,50%	0,99	3,00%	0,99
10h sem retenção	2,00%	0,99	2,30%	0,99	2,50%	0,99
12h com retenção	2,00%	0,99	2,90%	0,99	2,20%	0,99
12h sem retenção	1,80%	0,99	3,00%	0,99	2,00%	0,99
14h com retenção	2,00%	0,99	2,20%	0,99	2,20%	0,99
14h sem retenção	1,90%	0,99	2,20%	0,99	2,20%	0,99
16h com retenção	3,90%	0,99	4,80%	0,99	4,20%	0,99
16h sem retenção	3,90%	0,99	8,40%	0,99	4,20%	0,99

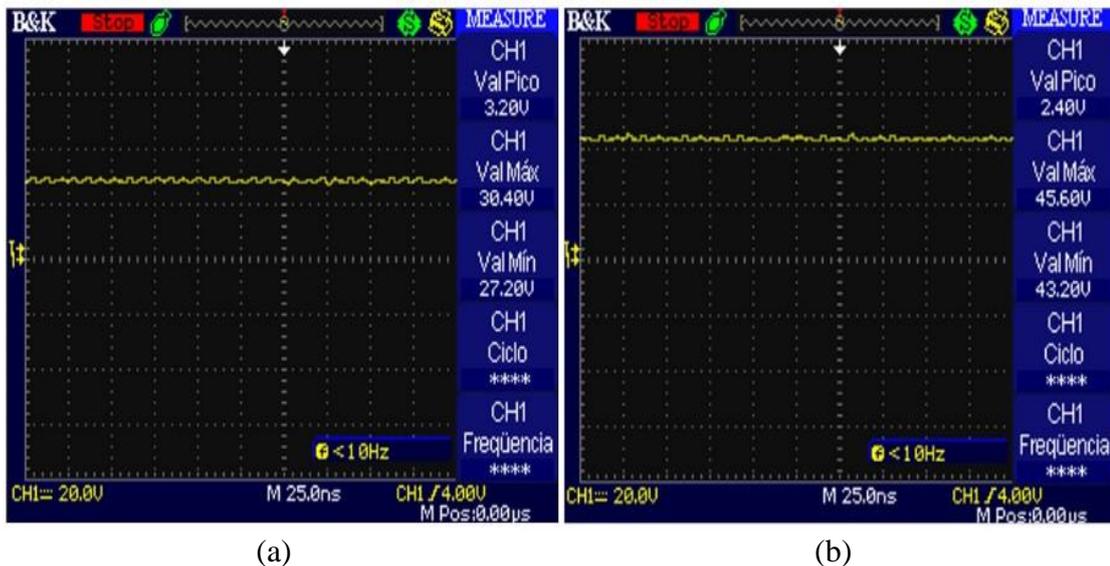
Fonte: Elaborado pelo autor, 2023

Ao avaliar a Figura 30, que apresenta as tensões de saída do otimizador sob duas condições de irradiância, observa-se que a Figura 30a, correspondente à condição com retenção solar de 30% ao meio-dia, revela um sinal bastante estável e um valor de pico a pico de 3,20 V.

Por outro lado, a Figura 30b, que exibe a tensão de saída ao meio-dia sem retenção solar, mostra um sinal igualmente estável, mas com um valor de pico a pico menor, de 2,4 V.

Essa comparação indica que a tensão de saída do otimizador varia mais sob condições de sombreamento dos módulos fotovoltaicos, sugerindo que o equipamento, ao realizar um trabalho maior na conversão de corrente contínua, pode apresentar um sinal com uma oscilação levemente mais acentuada. No entanto, em ambos os cenários, o otimizador de potência mantém sua eficácia, visto que o sinal de saída não experimenta oscilações significativas.

Figura 30 – Sinais de tensão de saída do otimizador de potência: a) Curva de tensão com retenção solar de 30%; b) Curva de tensão sem retenção solar.



Fonte: Do autor, 2023

A partir dos gráficos apresentados na Figura 30, gerados pelo osciloscópio, optou-se pela utilização do aplicativo Grabit, integrado ao ambiente MATLAB, como ferramenta de complemento na análise do gráfico. O recurso possibilita extrair pontos de dados a partir de imagens gráficas. Ao empregar esta técnica, foi possível coletar e avaliar os valores relacionados à tensão e tempo, em um período de 50 nanossegundos. Estes resultados estão compilados na Tabela 4, demonstrando as flutuações de tensão observadas ao longo do experimento.

Na condição de retenção solar de 30%, a tensão oscila, em termos percentuais, em torno de 8,38%, variando de 27,68 V a 30 V. Sem retenção, a variação percentual é de 6,50%, oscilando entre 43,03 V e 45,83 V. Conforme já demonstrado na tela do osciloscópio, embora as amplitudes de variação sejam relativamente pequenas para ambas as condições, a situação

com retenção apresenta uma flutuação percentual mais significativa dentro do seu espectro de valores.

Tabela 4: Comparação de tensão e tempo entre amostras do osciloscópio com 30% de retenção e sem retenção solar

<b>Retenção solar 30%</b>		<b>Sem retenção solar</b>	
Instante (ns)	Tensão (volts)	Instante (ns)	Tensão (volts)
0,07	28,39	0,28	43,03
2,44	27,68	1,94	43,10
4,43	29,03	4,46	44,06
6,16	29,55	7,04	45,83
8,52	28,32	9,51	43,87
11,97	28,19	12,40	43,25
14,93	29,10	15,50	43,56
17,05	28,26	18,10	43,12
20,51	29,03	20,18	44,24
23,89	29,87	23,42	44,56
26,23	27,42	26,75	43,24
28,97	29,22	29,19	45,25
31,84	29,16	31,65	43,46
34,53	28,19	34,11	43,30
37,26	29,48	36,59	44,49
40,2	28,52	39,41	44,40
43,41	29,22	42,80	43,55
45,71	30,00	45,54	44,45
48,24	28,26	47,20	44,23
50,00	27,74	48,94	43,48

Fonte: Elaborado pelo autor, 2023

## 6.2 RESULTADOS DA CURVA DE CORRENTE E TENSÃO COM ENCOBRIMENTO DE CÉLULAS COM TELA TOTALMENTE OPACA

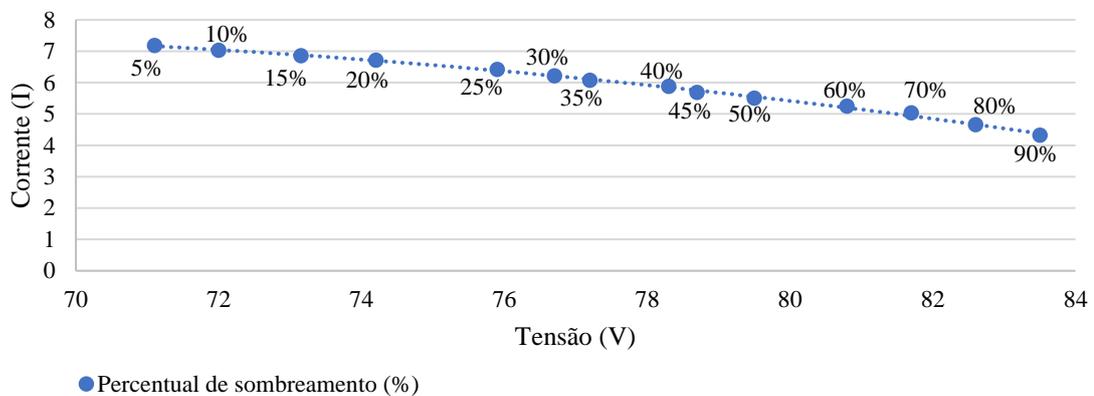
Para o segundo experimento, a análise realizada no sistema otimizado (Figura 31a) com o encobrimento de um submódulo destaca a relação entre tensão e corrente no par de módulo fotovoltaico sob a influência do sombreamento vertical. Conforme o percentual de sombreamento cresce, há um aumento progressivo na tensão e a corrente mostra uma diminuição mais regular.

Segundo Villalva e Gazoli (2012), se o módulo fotovoltaico aumenta a corrente, a tensão tende a diminuir; inversamente, a tensão tende a aumentar quando a corrente do módulo diminui. Portanto, considerando este princípio, pode-se inferir que o desempenho global do

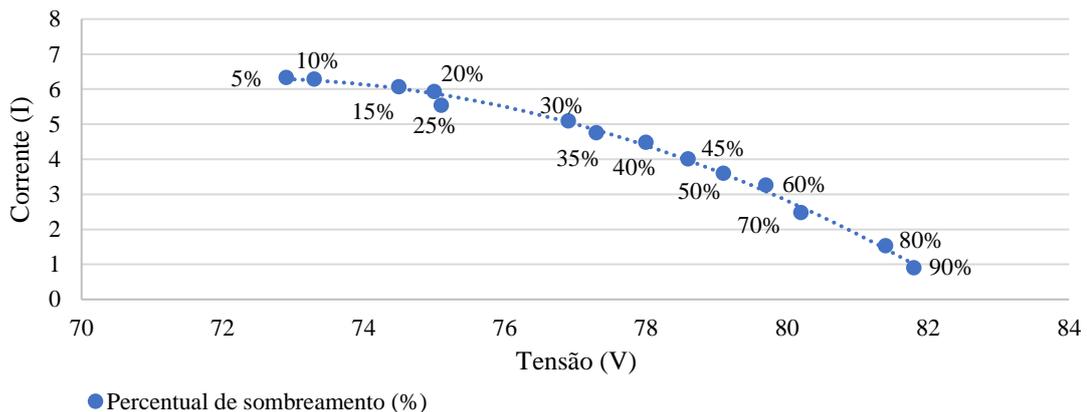
módulo é afetado à medida que o sombreamento se intensifica, sendo esta influência mais perceptível na corrente do que na tensão.

Conforme a Figura 31b, que representa os dados do par de módulos sob sombreamento horizontal em três submódulos, é possível identificar que à medida que o percentual de sombreamento aumenta, notamos um declínio contínuo na corrente. Concomitantemente, a tensão apresenta uma oscilação mais sutil, mas com uma tendência perceptível de alta à medida que o sombreamento se eleva.

Figura 31 – Gráfico de corrente e tensão na saída do par de módulos da topologia otimizada: a) Curva com sombreamento em um submódulo; b) Curva com sombreamento em três submódulos.



(a)



(b)

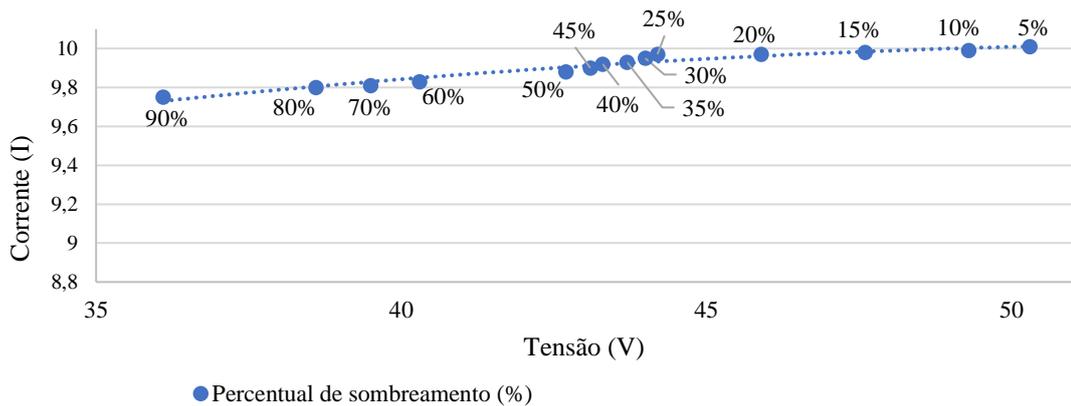
Fonte: Elaborado pelo autor, 2023

A partir da análise realizada no sistema otimizado (Figura 32a) com o encobrimento de um submódulo, observou-se que a tensão de saída no otimizador de potência diminuiu à medida que o percentual de sombreamento na célula aumentou. Essa redução demonstra uma relação

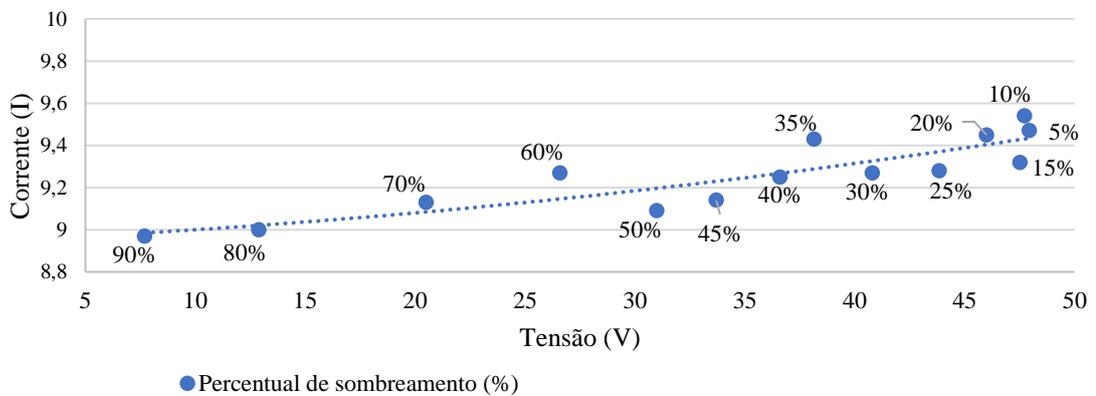
entre o sombreamento e a diminuição da tensão, embora pequenas variações tenham sido observadas. Para a corrente elétrica, foi observada uma diminuição menor à medida que o sombreamento aumentava. Esta variação na corrente não é tão acentuada quanto a que se observa na tensão, o que evidencia que o otimizador prioriza a conversão da tensão do que nos valores de corrente.

A Figura 32b, relacionada ao otimizador de potência, mostra que a tensão diminui mais à medida que o sombreamento aumenta. A corrente, por outro lado, diminui de forma mais gradual com sombreamento total. Esses dados mostram que o otimizador tenta manter a corrente estável, mesmo em condições adversas, enquanto a tensão é controlada e varia de acordo com o sombreamento.

Figura 32 – Gráfico de corrente e tensão na saída do otimizador de potência: a) Curva com sombreamento em um submódulo; b) Curva com sombreamento em três submódulos.



(a)



(b)

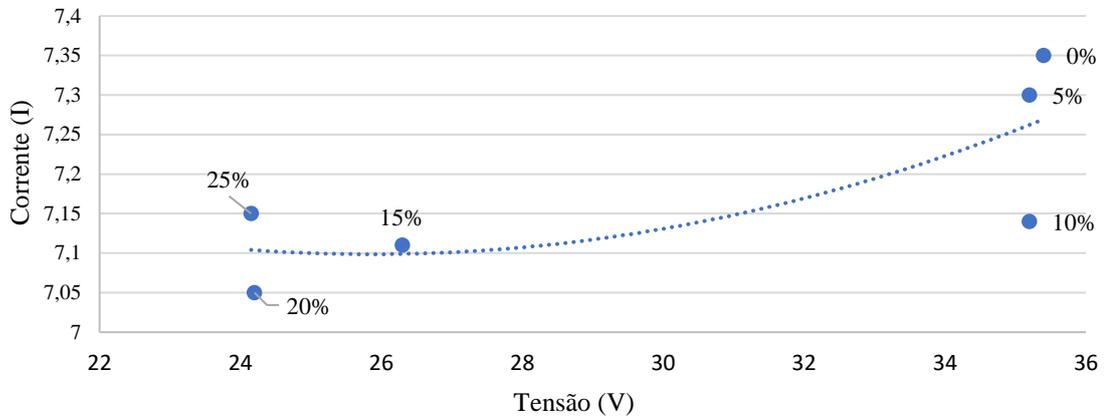
Fonte: Elaborado pelo autor, 2023

Com base ao apresentado pela Figura 33a, referente ao gráfico de corrente e tensão de um módulo de topologia convencional com sombreamento vertical em um submódulo, observa-se que a tensão inicial, sob condições de 0% de sombreamento, é de 35,4 V e a corrente é de 7,35A. No entanto, à medida que o sombreamento aumenta, há uma queda progressiva na tensão. Com somente 15% de sombreamento, a tensão já apresenta uma queda acentuada para 26,3 V, indicando o possível acionamento do diodo *bypass* do módulo. Já a corrente apresenta variações menores, mantendo-se próxima a 7 A, mesmo com o aumento do sombreamento devido a atuação do diodo no submódulo.

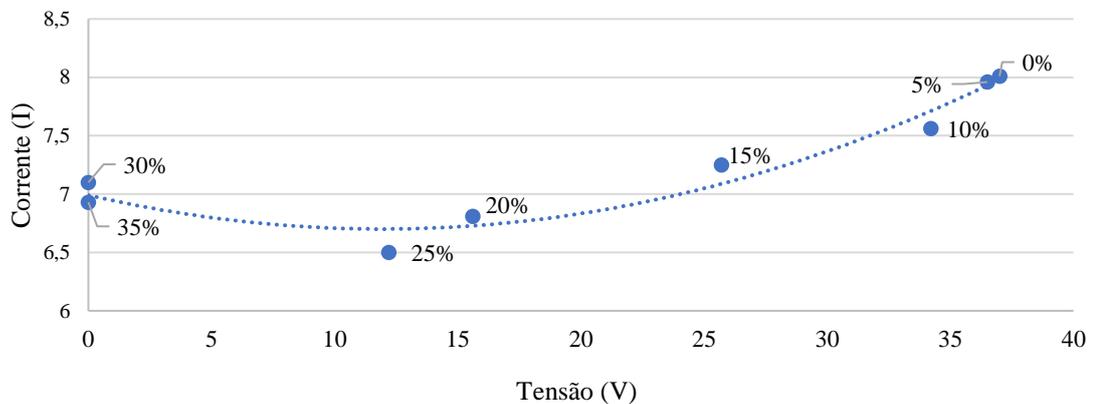
A análise do gráfico presente na Figura 33b, que está relacionada ao gráfico de corrente e tensão de um módulo de topologia convencional submetido a sombreamento horizontal em três submódulos, revela o impacto do sombreamento e a subsequente ativação dos diodos *bypass*. Sem o sombreamento, a tensão do módulo foi de 37 V e a corrente é de 8,01 A. À medida que a retenção solar aumentou, a tensão sofreu reduções significativas. Ao atingir 15% de sombreamento, a tensão caiu para 25,7 V, indicando a ativação do primeiro diodo *bypass*. Com o aumento do sombreamento para 25%, ocorreu outra queda expressiva na tensão, sugerindo a ativação do segundo diodo *bypass*. O ciclo de ativação se completou quando o sombreamento chegou entre 30% e 35%, com a tensão chegando a 0 V, o que indica a ativação do terceiro diodo *bypass*.

Isso isola completamente o módulo do sistema, fazendo com que ele atue apenas como um caminho de passagem de corrente. É importante destacar que, apesar das mudanças significativas na tensão devido à atuação dos diodos, a corrente apresentou variações mais suaves, mantendo-se predominantemente acima de 6,5 A, mesmo com o aumento do sombreamento em um submódulo individual.

Figura 33 - Gráfico de corrente e tensão de um módulo de topologia convencional; a) Curva com sombreamento em um submódulo; b) Curva com sombreamento em três submódulos



(a)



(b)

Fonte: Elaborado pelo autor, 2023

Dessa forma, os dados dos gráficos referentes à corrente (I) e tensão (V) nos dispositivos apresentam uma trajetória curvilínea, com valores que não estabelecem uma relação linear direta. Portanto, a adoção de uma linha de tendência polinomial de segunda ordem torna-se pertinente, uma vez que ela consegue representar a relação entre as variáveis de forma mais precisa e se ajusta bem aos pontos de dados.

A Tabela 5 fornece uma compilação dos dados das variações de corrente (I) e tensão (V) em dispositivos com as duas topologias fotovoltaicas, otimizada e convencional, sob diferentes níveis de sombreamento, representados por 1 e 3 submódulos sombreados.

Tabela 5: Valores de corrente e tensão com sombreamento gradual na saída dos dispositivos

Ponto de medição	Otimizador		Otimizador		Par de módulos		Par de módulos		Módulo		Módulo	
Topologia	Otimizada		Otimizada		Otimizada		Otimizada		Convencional		Convencional	
Submódulos	1		3		1		3		1		3	
Percentual	(I)	(V)	(I)	(V)	(I)	(V)	(I)	(V)	(I)	(V)	(I)	(V)
0%	10,02	50,29	9,58	47,50	7,28	70,60	6,32	74,10	7,35	35,40	8,01	37,00
5%	10,01	50,30	9,47	47,95	7,18	71,10	6,33	72,90	7,30	35,20	7,96	36,50
10%	9,99	49,30	9,54	47,73	7,03	72,00	6,29	73,30	7,14	35,20	7,56	34,20
15%	9,98	47,60	9,32	47,52	6,86	73,15	6,07	74,50	7,11	26,30	7,25	25,70
20%	9,97	45,90	9,45	46,00	6,71	74,20	5,93	75,00	7,05	24,20	6,81	15,60
25%	9,97	44,20	9,28	43,85	6,42	75,90	5,54	75,10	7,15	24,15	6,50	12,20
30%	9,95	44,00	9,27	40,80	6,21	76,70	5,09	76,90	-	-	7,10	0,00
35%	9,93	43,70	9,43	38,15	6,07	77,20	4,76	77,30	-	-	6,93	0,00
40%	9,92	43,30	9,25	36,60	5,88	78,30	4,48	78,00	-	-	-	-
45%	9,90	43,10	9,14	33,70	5,69	78,70	4,01	78,60	-	-	-	-
50%	9,88	42,70	9,09	31,00	5,50	79,50	3,60	79,10	-	-	-	-
60%	9,83	40,30	9,27	26,60	5,25	80,80	3,26	79,70	-	-	-	-
70%	9,81	39,50	9,13	20,50	5,03	81,70	2,48	80,20	-	-	-	-
80%	9,80	38,60	9,00	12,90	4,66	82,60	1,53	81,40	-	-	-	-
90%	9,75	36,10	8,97	7,70	4,32	83,50	0,90	81,80	-	-	-	-
100%	9,71	34,20	8,90	1,50	4,92	69,20	0,40	51,30	-	-	-	-

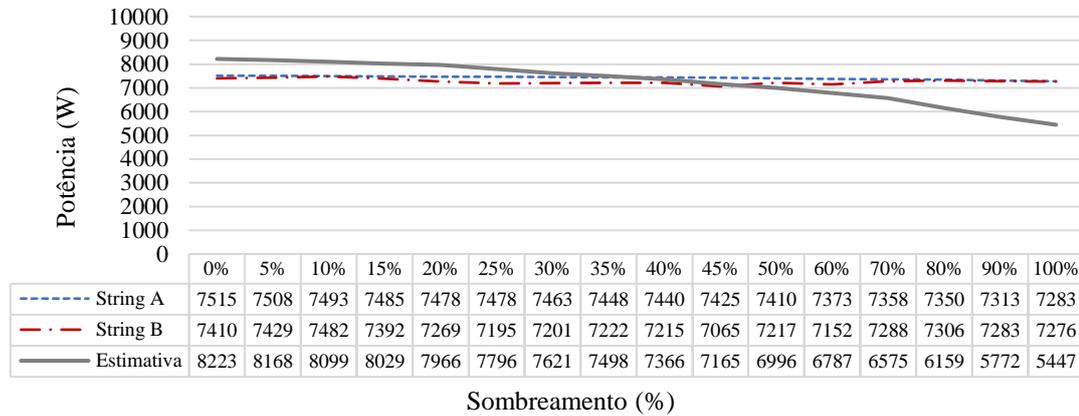
Fonte: Elaborado pelo autor, 2023

Ao examinar os dados contidos na Figura 34, que explora o efeito do sombreamento vertical em um submódulo nas *strings* de topologia otimizada, nota-se que a *String A*, exposta diretamente ao sombreamento, inicia com uma potência de 7515 W quando ainda não há a retenção solar. Contudo, mesmo com o aumento gradual do sombreamento, a potência da *String A* mostra uma diminuição relativamente suave, atingindo 7282 W, uma redução de 3,10%, após o sombreamento total do submódulo.

Em comparação, a *String B*, que não é submetida ao sombreamento, exibe flutuações em sua potência devido às oscilações das variáveis atmosféricas; ela começa com 7410 W e atinge 7276 W no final das medições. A estimativa, que simula todos os módulos da *string* operando com a eficácia do submódulo mais afetado, inicia com uma potência mais alta, 8223 W, mas sofre uma queda expressiva, chegando a 5447W, uma redução de 33,76%, com o sombreamento total.

#### 6.4 RESULTADOS DE POTÊNCIA NAS STRINGS COM ENCOBRIMENTO DE CÉLULAS COM TELA TOTALMENTE OPACA

Figura 34 – Gráfico da influência na potência das *strings* na topologia otimizada com sombreamento em um submódulo

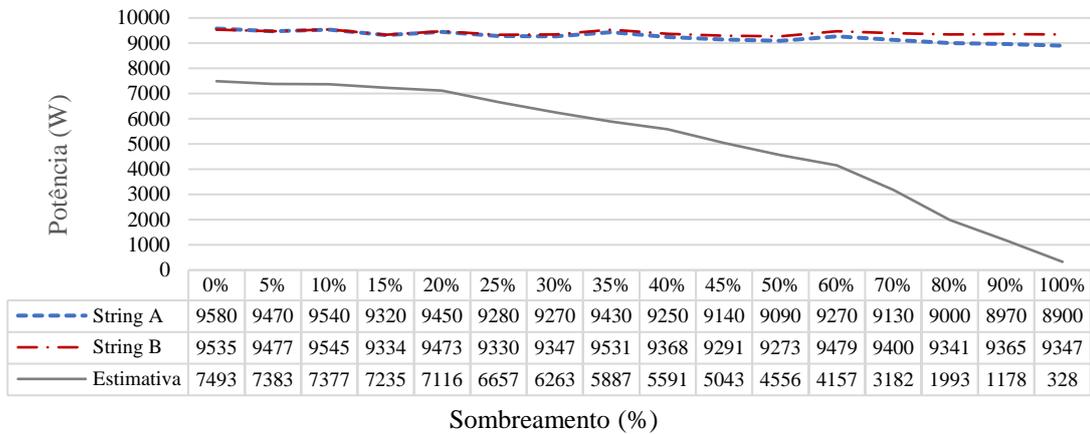


Fonte: Elaborado pelo autor, 2023

Na análise do gráfico da Figura 35, percebe-se o efeito do sombreamento horizontal em três submódulos nas *strings* de topologia otimizada. A *String A*, submetida ao sombreamento, começa com uma potência de 958 W sem o encobrimento, mostrando uma diminuição quase linear à medida que o sombreamento se intensifica, atingindo 890 W, uma queda de 7,09% ao final do teste com 100% de retenção solar. Isso pode indicar uma resiliência ao sombreamento na topologia otimizada.

A *String B*, que não foi exposta ao sombreamento, mantém uma estabilidade notável em sua potência, oscilando levemente em torno dos 953 W ao início e diminuindo para 934 W, redução de 1,99% ao final. A estimativa, que reflete uma situação onde todos os módulos da *string* operam com a eficiência do submódulo mais comprometido, revela uma redução acentuada, começando com 749 W e terminando a 328 W, uma diminuição de 56,20%. Isso sugere que, se todos os módulos operassem com o desempenho do submódulo mais afetado em uma topologia otimizada, a produção energética seria significativamente comprometida.

Figura 35 – Gráfico da influência na potência das *strings* em topologia otimizada com sombreamento em três submódulos

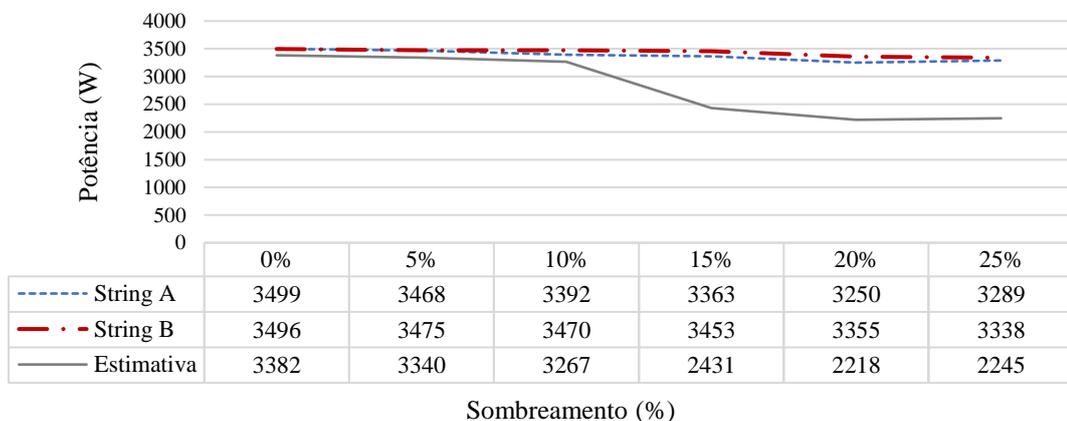


Fonte: Elaborado pelo autor, 2023

Os resultados apresentados na Figura 36 ilustram o impacto do sombreamento em um submódulo nas *strings* em topologia convencional. A *String A*, sujeita ao sombreamento direto, começa com uma potência de 3499 W sob condições sem sombreamento. À medida que o sombreamento aumenta, a potência da *String A* diminui gradualmente, atingindo 3289 W, uma redução de 6%, com um sombreamento de 25%. Observa-se uma leve recuperação da potência entre 20% e 25% de sombreamento, na faixa de ativação do diodo *bypass*.

A proximidade entre os valores de potência da *String A* e da *String B* aponta que o impacto direto do sombreamento em apenas um submódulo é relativamente limitado, mesmo na topologia convencional. O valor da estimativa reflete uma simulação na qual todos os módulos da *string* teriam um desempenho semelhante ao do módulo sombreado; nessa simulação, a potência inicial de 3382 W, sem sombreamento, sofre uma redução mais acentuada ao atingir 15% de sombreamento, caindo 28,11 %, com a potência de 2431 W.

Figura 36 – Gráfico da influência na potência das *strings* em topologia convencional com sombreamento em um submódulo

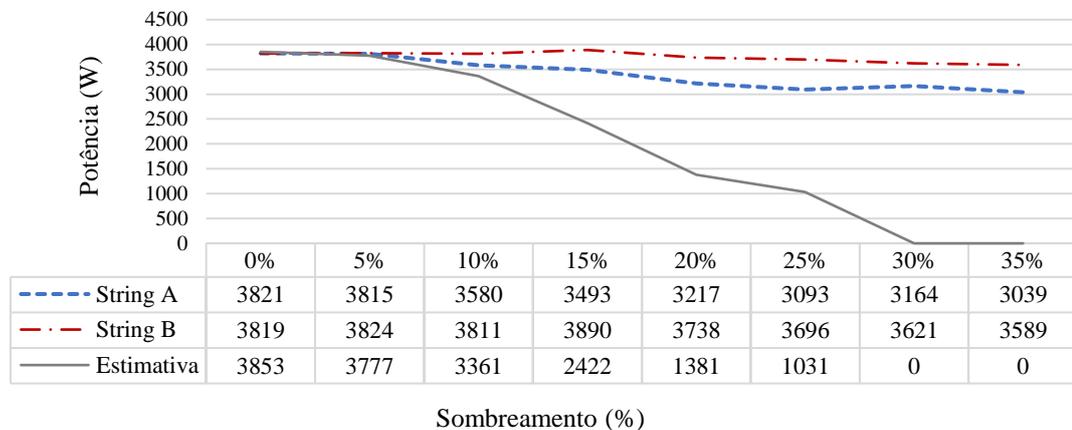


Fonte: Elaborado pelo autor, 2023

Analisando os dados da Figura 37, que abordam o sombreamento horizontal em três submódulos nas *strings* de topologia convencional, nota-se o impacto do sombreamento na potência de saída da *String A*. Inicialmente, com 0% de sombreamento, a *String A* possui uma potência de 3821 W. Contudo, à medida que o sombreamento se intensifica, a potência desta *string* declina de forma acentuada, em 20,46%, chegando a 3039 W com 35% de sombreamento. Já a *String B*, que não foi diretamente afetada pelo sombreamento, apresenta flutuações menores em sua potência, indicando uma maior estabilidade. Observa-se que, ao atingir 15% de retenção, a potência da *String A* já é inferior à da *String B*, destacando a sensibilidade da primeira ao sombreamento.

A estimativa, que reflete uma situação hipotética na qual todos os módulos da *string* operam no desempenho do submódulo mais afetado, começa com uma potência de 3853 W, sofre quedas maiores à medida que o sombreamento aumenta, chegando a 0 W nos 30% e 35% de sombreamento. Isso indica que, sob o encobrimento intenso em três submódulos, a eficiência do sistema, conforme a simulação, seria completamente comprometida.

Figura 37 – Gráfico da influência na potência das *strings* em topologia convencional com sombreamento em três submódulos



Fonte: Elaborado pelo autor, 2023

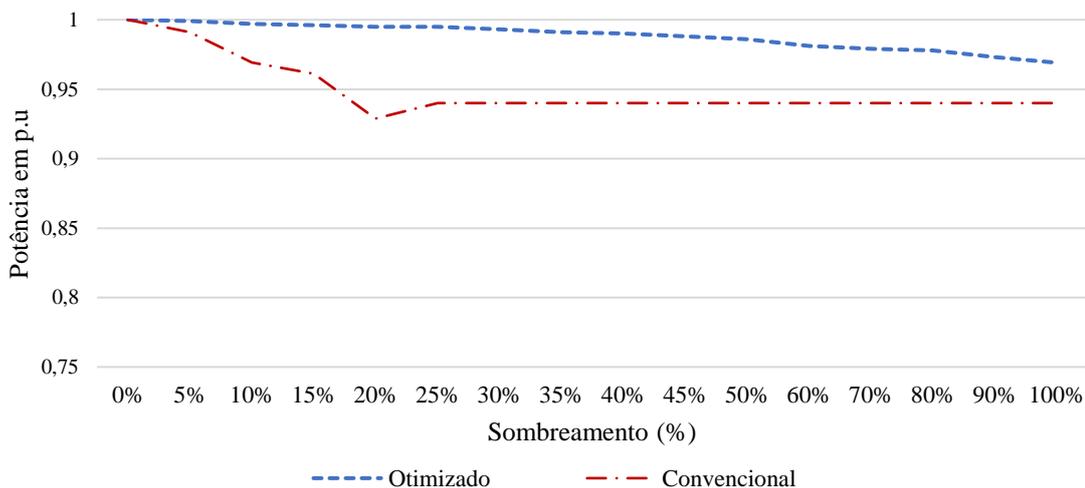
Os resultados apresentados indicam que a topologia otimizada demonstra notável resiliência e eficiência diante do sombreamento, seja este em um submódulo ou em três submódulos. Mesmo sob sombreamento intenso, essa topologia revelou uma capacidade de manter uma potência relativamente estável, tanto em sombreamentos verticais quanto horizontais, tornando-a uma escolha robusta para sistemas fotovoltaicos que podem enfrentar desafios relacionados à sombra, garantindo uma produção de energia mais consistente.

Após a análise dos dados da Figura 38, que compara a eficiência das topologias otimizada e convencional mediante a influência do sombreamento em um submódulo, em termos de potência por unidade (p.u), notamos diferenças significativas nas respostas de ambas as arquiteturas. Na topologia otimizada, a eficiência da *string* inicia em 100% e, gradualmente, desce para 96,9% ao enfrentar 100% de sombreamento. Esta queda suave destaca a capacidade da topologia otimizada de manter sua eficiência mesmo com o aumento do sombreamento.

Em contrapartida, a topologia convencional começa com uma eficiência de 100% e ao atingir 15% de sombreamento, já apresenta uma redução perceptível, caindo para 96,1%. Porém, após 20% de sombreamento, a eficiência estabiliza em aproximadamente 94%, mantendo esse patamar até o final do teste. Isto indica que, após um determinado ponto, a topologia convencional não consegue mais se recuperar e compensar adequadamente os efeitos do sombreamento, mostrando uma dependência significativa da atuação do diodo *bypass* e, como resultado, uma perda de potência em comparação com a arquitetura otimizada.

## 6.5 COMPARAÇÃO DE POTÊNCIA EM P.U DAS TOPOLOGIAS COM ENCOBRIMENTO DE CÉLULAS COM TELAS TOTALMENTE OPACAS

Figura 38 – Gráfico comparativo da eficiência das topologias com sombreamento em um submódulo



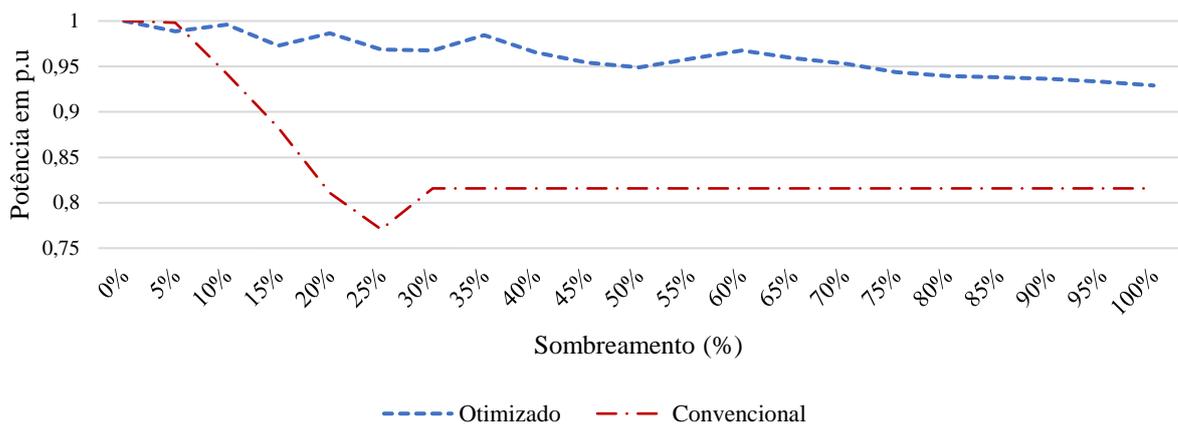
Fonte: Elaborado pelo autor, 2023

Com base nos dados apresentados na Figura 39, que compara as topologias otimizada e convencional em relação ao impacto do sombreamento em três submódulos, observa-se a superioridade da configuração otimizada em termos de resiliência. Mesmo quando o sistema é

submetido a um sombreamento de 100%, a topologia otimizada ainda mantém 92,9% de sua eficiência original em termos de potência por unidade (p.u). A curva de redução, embora gradual, destaca a robustez desta arquitetura, mesmo em cenários de baixíssima irradiância.

Em contraste, no sistema convencional, a eficiência estabiliza em torno de 81,5% após 25% de sombreamento, em termos de potência por unidade (p.u), sem apresentar variações significativas à medida que o sombreamento aumenta. Esta característica indica a ativação sequencial dos três diodos *bypass*, indicando que, após atingir um determinado grau de sombreamento, a topologia convencional não consegue mais compensar os efeitos adversos, resultando em uma perda de potência adicional ao valor de redução causado pelo módulo sombreado, o que resulta em uma eficiência constante.

Figura 39 – Gráfico comparativo da eficiência das topologias com sombreamento em três submódulos



Fonte: Elaborado pelo autor, 2023

Durante os experimentos, o sombreamento parcial possibilitou a reprodução de um cenário que se assemelha a um sombreamento individualizado na área. Isso permitiu simular situações envolvendo o sombreamento localizado e o acúmulo de sujeira na superfície, ou casos nos quais o desempenho intrínseco de um dos equipamentos seja inferior à média estabelecida pelo conjunto.

Após as análises, observou-se um bom comportamento do sistema com otimizador de potência, que manteve um desempenho sólido na geração. Para o sistema convencional, houve uma redução na produção de energia no conjunto de módulos durante o sombreamento, variando de 0 a 20% de redução da luminosidade solar, apresentando perda de potência em todo o conjunto de módulos.

A partir desse percentual de sombreamento, o módulo é isolado do sistema pelo diodo *bypass* presente na unidade. No sistema com otimizador, ocorreu apenas uma diminuição na potência registrada no módulo com redução da luminosidade, não prejudicando a geração dos demais módulos do sistema durante a operação, sendo possível estender a redução da luminosidade solar de 0 a 80%, sem haver a atuação do diodo *bypass*.

Os resultados indicam uma redução notável na potência total gerada pela arquitetura convencional em comparação com a topologia otimizada. Além disso, a implementação do otimizador de potência mostrou-se importante para preservar a eficiência global do sistema, evitando perdas substanciais de energia em situações de intempéries.

A partir dos experimentos realizados em um modelo de otimizador de potência para sistemas fotovoltaicos, é esperado que os resultados possam contribuir para o desenvolvimento de inovações na parte eletrônica dos equipamentos ou serem utilizados na elaboração de projetos fotovoltaicos para uma redução no custo dos equipamentos ou maior capacidade energética.

Assim, um estudo experimental realizado em campo pode ser mais confiável em seus resultados por ser submetido às condições ambientais reais, dessa forma pode reduzir as incertezas referentes às características dos otimizadores de potência em sistemas fotovoltaicos.

Os resultados apresentados são importantes para atender às demandas do setor para contribuir na melhoria dos equipamentos com maior eficiência, segurança e viabilidade, desse modo, os conceitos e experimentos podem orientar novos estudos na linha de pesquisa de otimizadores fotovoltaicos.

## 7 CONCLUSÃO

Este estudo experimental em campo proporcionou uma comparação prática entre duas arquiteturas fotovoltaicas, envolvendo a coleta de dados de variáveis como corrente e tensão, com o objetivo de analisar a eficiência e a qualidade da energia gerada por sistemas fotovoltaicos com otimizadores de potência.

Isso possibilitou a redução das incertezas relacionadas às características dos otimizadores de potência em sistemas fotovoltaicos em comparação com o sistema convencional. Os resultados obtidos em campo podem auxiliar no desenvolvimento de modelos computacionais mais próximos da realidade.

Nas análises referentes à qualidade energética da topologia otimizada, tanto para corrente alternada no inversor quanto para corrente contínua no otimizador, identificou-se um desempenho satisfatório. Mesmo diante de certas flutuações específicas, os indicadores, como harmônicos, fator de potência e sinal de tensão na saída do otimizador, se mostraram consistentemente positivos.

A arquitetura otimizada demonstrou um desempenho consistente na geração de energia, mesmo sob condições de irradiância variável. Os diodos *bypass* atuaram eficazmente na mitigação de perdas devido ao sombreamento, sendo seu uso menos necessário na arquitetura otimizada, o que permitiu que os módulos afetados pelo sombreamento continuassem a contribuir para a geração de energia. Por outro lado, o desempenho na produção de eletricidade da topologia convencional, por ser intrinsecamente mais simples, revelou-se mais vulnerável às flutuações comuns em sistemas fotovoltaicos, o que impactou negativamente sua eficiência global.

Dessa forma, os resultados deste estudo são relevantes para a escolha da topologia mais viável economicamente, levando em consideração a especificidade de cada ambiente de instalação em relação ao retorno do investimento, mesmo diante dos custos mais elevados associados aos sistemas otimizados. Os conceitos e experimentos aqui discutidos também podem orientar futuros estudos sobre otimizadores fotovoltaicos e melhoria da qualidade da energia gerada além de auxiliar na elaboração de projetos na escolha da arquitetura mais viável para cada aplicação.

Esta pesquisa se limitou à análise de um único fabricante para a topologia otimizada. Assim, explorar diferentes fabricantes e suas especificidades é relevante para entender melhor as características e restrições de cada um. Estudos futuros poderiam beneficiar-se de uma amostra mais ampla de modelos e de variados contextos para reforçar esses resultados.

## REFERÊNCIAS

- ABSOLAR. **Panorama da solar fotovoltaica no Brasil e no Mundo**. Disponível em: <<https://www.absolar.org.br/mercado/infografico/>>. Acesso em 26 de out. de 2023.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL). **Resolução Normativa nº 1.031**, de 26 de julho de 2022. Disponível em: <https://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren20221031.pdf>. Acesso em: 15 nov. 2023.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL). **Resolução Normativa nº 1.059**, de 7 de fevereiro de 2023. Disponível em: <https://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren20231059.html>. Acesso em: 15 nov. 2023.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL). **Perdas de energia**. Disponível em: <<https://www.gov.br/aneel/pt-br/assuntos/distribuicao/perdas-de-energia/>>. Acesso em 28 de dez 2022.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL). **Procedimento de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional (PRODIST) – Módulo 8: Qualidade da Energia Elétrica. 2021**. Disponível em: <https://www.aneel.gov.br/modulo-8>. Acesso em: 02 nov. 2023.
- AGHAEI, Mohammadreza *et al.* Review of degradation and failure phenomena in photovoltaic modules, **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v.159, 2022.
- ALADABÓ, Ricardo. **Qualidade na Energia Elétrica**. 1. ed. São Paulo: Artliber Editora, 2001.  
Análise teórica e comportamental de otimizadores de potência para sistemas fotovoltaicos conectados à rede. **Energy Reports**, vol. 17, p. 127-134, 2019.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 16149: Requisitos mínimos para interconexão de microgeração e minigeração distribuída com a rede de distribuição com utilização de inversores**. Rio de Janeiro, 2013.
- BALFOUR, John. **Introdução ao Projeto de Sistemas Fotovoltaicos**. 1. ed. Rio de Janeiro: Grupo GEN, 2016. *E-book*. ISBN 9788521635314. Disponível em: <https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788521635314/>. Acesso em: 09 jan. 2023.
- CHOWDHURY, Srabanti; CHOWDHURY, Daniel; CROSSLEY, Peter.; **Microgrids and Active Distribution Networks**. London, IET, 2009.
- CONECTADA Energia. **Solução Comercial SolarEdge**. Disponível em: <<https://conectadaenergia.com.br/solaredge/>>. Acesso em 11 de jan. de 2023.
- DELINE, Chris; MEYDBRAY, Jenya; DONOVAN, Matt; FORREST, Jason. Photovoltaic Shading Testbed for Module-Level Power Electronics. Golden, CO: National Renewable Energy Laboratory, 2012. Disponível em: <https://www.nrel.gov/docs/fy12osti/54876.pdf>. Acesso em: 15 de maio de 2023.

DURKHEIM, Émile. **As regras do método sociológico**. 5. ed. São Paulo: Martins Fontes, 2009.

ECORI Energia. **Perdas por mismatch em sistemas** fotovoltaicos. Disponível em: <<https://www.ecorienergiasolar.com.br/artigo/modulos-fotovoltaicos---perdas-por-mismatch-em-sistemas-fotovoltaicos>>. Acesso em 10 jan. de 2023

ECORI Energia. **10 Passos para Você Escolher o Melhor Microinversor**. Disponível em: <<https://www.ecorienergiasolar.com.br/artigo/10-passos-para-voce-escolher-o-melhor-microinversor>>. Acesso em 18 de set. de 2023.

GANDHI, Oktoviano *et al.* Review of power system impacts at high PV penetration Part I: Factors limiting PV penetration. **Solar Energy**, v. 210, p. 181-201, 2020.

GIL, Antônio Carlos. **Como elaborar projetos de pesquisa**. 6. ed. São Paulo: Atlas, 2018.

HOSPITAL DE CLÍNICAS - UFTM – **HC instala usina de energia solar pioneira entre hospitais universitários**. Disponível em < <https://www.uftm.edu.br/ultimas-noticias/2586-hc-uftm-instala-usina-de-energia-solar-pioneira-entre-os-hospitais-universitarios>>. Acesso em 03 jan. de 2023.

JUNG, Felipe. **HIL-Assisted Implementation and Experimental Evaluation of Current Control Techniques for Photovoltaic Microinverters**. 2019. 151 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2019.

KNABBEN, Gustavo Carlos. **Microinversor fotovoltaico não isolado de dois estágios**. 2017. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Florianópolis, 2017.

LUNDQUIST, Johan. **On Harmonic Distortion in Power Systems**. Department of Electric Power Engineering. Göteborg: Chalmers University of Technology, 2001. Tese (Licentiate of Engineering) - Chalmers University of Technology, Göteborg, Suécia, 2001.

MULJADI, Eduard.; SINGH, Mohit.; GEVORGIAN, Vahan. User guide for PV dynamic model simulation written on PSCAD platform. Technical Report, NREL/TP-5D00-62053. National Renewable Energy Laboratory, novembro de 2014. Disponível em: <https://www.nrel.gov/docs/fy15osti/62053.pdf>. Acesso em 14 de nov. de 2023.

PEREIRA, Enio Bueno. *et al.* **Atlas brasileiro de energia solar**. 2. ed. São José dos Campos: INPE.

REFAAT, Ahmed. *et al.* A Novel Photovoltaic Current Collector Optimizer to Extract Maximum Power during Partial Shading or Mismatch Conditions. IEEE. Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering, São Petersburgo, p. 407-412, 2019.

SAMPIERI, Roberto Hernandez.; COLLADO, Carlos Fernández; LUCIO, Pilar Baptista. **Metodologia de pesquisa**. 3. ed. São Paulo: McGraw-Hill, 2006.

SAVECA, John; SUN, Yanxia; WANG, Zenghui. **Improved Particle Swarm Optimization by Means of Manipulation of the Inertia Weighting Factor Based on Albert Einstein Theory of Photoelectric Effect**. In: 1st Odisha International Conference on Electrical Power Engineering, Communication and Computing Technology (ODICON), 2021, Bhubaneswar, India. Proceedings. p. 1-7.

SOLAREEDGE. **Segurança contra incêndio em sistemas fotovoltaicos: Uma avaliação das soluções SolarEdge**. Disponível em: [https://knowledge-center.solaredge.com/sites/kc/files/fire\\_safety\\_white\\_paper\\_prt\\_bra.pdf](https://knowledge-center.solaredge.com/sites/kc/files/fire_safety_white_paper_prt_bra.pdf). Acesso em: 23 de set. de 2023.

SOLAREEDGE. **Technical Note: Bypass Diode Effects in Shaded Conditions**. 2023. Disponível em: <[https://knowledge-center.solaredge.com/sites/kc/files/se\\_technical\\_bypass\\_diode\\_effect\\_in\\_shading.pdf](https://knowledge-center.solaredge.com/sites/kc/files/se_technical_bypass_diode_effect_in_shading.pdf)>. Acesso em: 19 set. 2023.

SOUZA SILVA, João Lucas. *et al.* Análise teórica e comportamental de otimizadores de potência para sistemas fotovoltaicos conectados à rede. **Energy Reports**, Campinas, v. 8, p. 10154-10167, 2022.

SOUZA SILVA, João Lucas *et al.* Study of Power Optimizers for grid-connected photovoltaic systems. **IEEE Latin America Transactions**, v. 17, n. 1, p. 127–134, 2019. Disponível em: <https://latamt.ieeer9.org/index.php/transactions/article/view/200>. Acesso em: 10 jan. 2023.

SOUZA SILVA, João Lucas. Estudo e desenvolvimento experimental de otimizadores de potência para sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica. 2020. 122 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica e de Computação) – Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação, Campinas, 2020. Disponível em: <https://hdl.handle.net/20.500.12733/1639389>. Acesso em: 14 nov. 2023

TIGO ENERGY. **TS4-A-O**. Disponível em: <https://br.tigoenergy.com/product/ts4-a-o>. Acesso em: 22 de set. 2023.

UNIVERSIDADE FEDERAL DO TRIÂNGULO MINEIRO. **Conheça a UFTM**. Disponível em: <<https://www.uftm.edu.br/institucional/conheca-a-uftm>>. Acesso em 03 jan. de 2023.

VIAN, Ângelo, *et al.* **Energia solar: fundamentos, tecnologia e aplicações**. São Paulo: Editora Blücher Ltda, 2021.

VIEIRA, Romênia; ARAÚJO, Fábio; DHIMISH, Mahmoud; GUERRA, Maria. **A Comprehensive Review on Bypass Diode Application on Photovoltaic Modules**. Faculty of Sciences, Electronic Engineering, The University of York, 2020. Disponível em: <https://eprints.whiterose.ac.uk/177734/>. Acesso em: 02 nov. 2023.

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

VILLALVA, Marcelo Gradella; GAZOLI, Jonas Rafael. **Energia Solar Fotovoltaica**. 1. ed. São Paulo: Érica, 2012.

WEG. **Projetos Grid Zero: Afinal, como são homologados?** Disponível em: <<https://www.weg.net/solar/blog/projetos-grid-zero-afinal-como-sao-homologados/>>. Acesso em: 19 de nov. 2023.

WILLIS, H. Lee. **Distributed Power Generation: Planning and Evaluation**. 1 ed. Raleigh: CRC, 2000.

ZHANG, Xinghua *et al.* A Step-Down Partial Power Optimizer Structure for Photovoltaic Series-Connected Power Optimizer System, **IEEE International Power Electronics and Application Conference and Exposition**, Shenzhen, p. 1-4, 2018.