



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CAMPUS DE SOBRAL
CURSO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

DIEGO BRENO DE OLANDA ALVES

**ANÁLISE COMPARATIVA DO INVERSOR STRING E MICROINVERSOR
PARA SISTEMAS DE GERAÇÃO DE ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA**

SOBRAL/ CE

2022

DIEGO BRENO DE OLANDA ALVES

**ANÁLISE COMPARATIVA DO INVERSOR STRING E MICROINVERSOR
PARA SISTEMAS DE GERAÇÃO DE ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia Elétrica do Campus Sobral da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Orientadora: Prof.^a Me. Cibelly Azevedo de Araújo Lima.

SOBRAL/ CE

2022

DIEGO BRENO DE OLANDA ALVES

**ANÁLISE COMPARATIVA DO INVERSOR STRING E MICROINVERSOR
PARA SISTEMAS DE GERAÇÃO DE ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia Elétrica do Campus Sobral da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Aprovada em: ____ / ____ / ____

BANCA EXAMINADORA

Prof.^a Me. Cibelly Azevedo de Araújo Lima
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof.^a Dr. Reuber Regis de Melo
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Eng. Gustavo Melo de Sousa
Ultra Energia

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Biblioteca Universitária

Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

- A478a Alves, Diego Breno de Olanda.
Análise Comparativa do Inversor Sstring e Microinversor para Sistemas de Geração de Energia Solar Fotovoltaica / Diego Breno de Olanda Alves. – 2022.
55 f. : il.
- Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Campus de Sobral, Curso de Engenharia Elétrica, Sobral, 2022.
Orientação: Profa. Ma. Cibelly Azevedo de Araújo Lima .
1. Energia Solar. Inversor. Microinversor. . I. Título.

CDD 621.3

AGRADECIMENTOS

A Deus, por ter sido um amparo e fortaleza em todos os momentos. A meus pais Jovane Ferreira Alves e Ana Célia de Olanda por confiarem em mim e por me apoiarem em toda a minha trajetória. A minha Orientadora Prof^a. Ms. Cibelly por me acompanhar nesse processo final de curso. A Teto Solar por ter me dado todo o suporte para a construção desse trabalho final de curso. A minha Esposa Ingryd Thayane por sempre está presente nas horas em que mais necessito dela, ao João Paulo por me ajudar sempre nos momentos em que solicitei ajuda, a meus irmãos Diogo, Diana e Diógenes por sempre estarem presentes na minha vida e a todos os meus amigos e amigas que fiz nesses anos em que passei na Universidade Feral do Ceará, sem eles não seria possível tal feito.

RESUMO

As energias renováveis estão em alta, principalmente quando se trata da energia solar. A conversão desta fonte de energia em energia elétrica é feita através dos sistemas fotovoltaicos. Nestes sistemas é essencial a presença de inversores, pois são eles que fazem a conversão da corrente contínua (CC) em corrente alternada (CA), adequada para a ligação do sistema com a rede elétrica. Esses inversores podem ser diferenciados pela sua topologia, podendo ser do tipo inversor *string* e microinversor. Mediante a evolução desta fonte de energia, este trabalho tem como objetivo geral apresentar uma análise comparativa do inversor *string* e microinversor para sistemas de energia solar fotovoltaica. E como objetivos específicos: Mostrar as etapas do sistema de energia solar fotovoltaica, abordar as características do sistemas de inversor *string* e microinversor e realizar uma análise dos sistemas de inversor *string* e microinversor. Através de uma revisão bibliográfica, exploratória, com abordagem qualitativa, referente a trabalhos publicados no âmbito nacional e internacional este estudo se dividirá em quatro capítulos: O primeiro é uma breve introdução abordando as etapas e as metodologias que se dará o aprofundamento da pesquisa, o segundo irá tratar-se dos sistemas de energia solar fotovoltaica, levando todo o embasamento teórico de autores para aprofundar-se da temática desde o potencial fotovoltaico no Brasil até a produção e fabricação da célula fotovoltaica. Em seguida, no terceiro capítulo, serão descritos separadamente as especificações dos inversores e suas topologias e os microinversores, relatando suas vantagens, configurações e eficiência, bem como as características dos sistemas de inversor *string* e microinversor. O último capítulo trará a análise dos sistemas de inversor *string* e microinversor para que assim possa ser realizada a comparação dos dois sistemas. Como conclusão, fez-se perceber que os microinversores, embora tenham ainda um custo elevado, são ideais no aumento da captação de energia, mesmo em dias nublados. Além de apresentar maior confiabilidade, flexibilidade e modularidade e com os avanços das tecnologias no mundo, é possível investir cada vez mais na energia solar fotovoltaica, para isso é necessário que ocorram incentivos do governo para que os valores dos equipamentos sejam menores e assim, mais famílias consigam aderir ao sistema.

PALAVRAS-CHAVE: Energia Solar. Inversor. Microinversor.

ABSTRACT

Renewable energies are on the rise, especially when it comes to solar energy. The conversion of this energy source into electrical energy is done through photovoltaic systems. In these systems, the presence of inverters is essential, as they convert direct current (DC) into alternating current (AC), suitable for connecting the system to the electrical grid. These inverters can be distinguished by their topology, they can be of the string inverter and microinverter type. Through the evolution of this energy source, this study aims to present a comparative analysis of string inverter and microinverter for photovoltaic solar energy. And as specific objectives: Show the stages of the photovoltaic solar energy system; Address the characteristics of string inverter and microinverter systems and; Conduct an analysis of string inverter and microinverter systems. Through an exploratory bibliographic review, with a qualitative approach, referring to works published nationally and internationally, this study will be divided into three chapters: The first will deal with Photovoltaic Solar Energy Systems, taking all the theoretical basis of authors to delve deeper into the subject from the photovoltaic potential in Brazil to the production and manufacture of the photovoltaic cell. Next, the specifications of the inverters and their topologies and the microinverters will be described separately, reporting their advantages, configurations and efficiency, as well as the characteristics of string inverter and microinverter systems. The last chapter will bring the analysis of the string inverter and microinverter systems so that the comparison of the two systems can be carried out and thus reach a conclusion. In conclusion, the comparison of string inverter and microinverter for photovoltaic solar energy in the analyzed studies made it clear that microinverters, although they still have a high cost, are ideal for increasing energy capture, even on cloudy days. In addition to presenting greater reliability, flexibility and modularity and with the advances in technologies in the world, it is possible to invest more and more in photovoltaic solar energy, so it is necessary that government incentives occur so that the values of equipment are lower and thus, more families able to join the system.

Keywords: Solar energy. Inverter. Microinverter.

LISTA DE SIGLAS

ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
CC	Corrente Contínua
CA	Corrente Alternada
MPPT	Maximum Power Point Tracking
SFCR	Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede Elétrica
SFV	Sistemas Fotovoltaicos
SiGS	Silício Grau Solar
SIGA	Sistema de Informações de Geração da ANEEL
SPMP	Seguimento de Ponto de Máxima Potência
MLPE	<i>Module-Level Power Electronics</i>

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Funcionamento de uma célula fotovoltaica	19
Figura 2 - Evolução da Fonte Solar Fotovoltaica no Brasil	22
Figura 3 - Configuração de um SFCR com inversor central	25
Figura 4 - Configuração de um SFCR com 3 inversores string	27
Figura 5 - Configuração de um SFCR com três inversores string com MPPT	28
Figura 6 - Configuração de um SFCR com seis microinversores	31
Figura 7 - Sistema composto por microinversores fotovoltaicos de dois estágios	33
Figura 8 - Imagem dos microinversores de três grandes fabricantes	34
Figura 9 - Tipos de sistemas fotovoltaicos conectados à rede	37
Figura 10 – Microinversores instalados nas costas dos módulos fotovoltaicos	42
Figura 11 - Sistema de geração fotovoltaica com inversor string – Cliente A	47
Figura 12 - Sistema de geração fotovoltaica com microinversor – Cliente B	47
Figura 13 – Geração Cliente A versus Cliente B, durante o período de um ano.	49

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Vantagens oferecidas pelos microinversores	30
Tabela 2 - Comparação entre geração Cliente A e Cliente B no período de um ano	48

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Tipos de células de silício	20
Quadro 2 - Eficiência de alguns microinversores	32
Quadro 3 - Características dos sistemas de inversor string e microinversor	36
Quadro 4 - Comparação entre Inversor Growatt e microinversor Daye	44
Quadro 5 - Comparação entre Inversor Growatt e microinversor Daye em 6, 8 e 10 placas	45
Quadro 6 - Comparação entre Inversor Growatt e microinversor Daye em 22, 28 e 34 placas	45
Quadro 7 - Comparação entre Inversor Growatt e microinversor Daye em 44, 48 e 52 placas	46
Quadro 8 - Comparação entre Inversor Growatt e microinversor Daye em 56, 58 e 60 placas	46

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	12
1.1 Definição do problema	14
1.2 Justificativa	14
1.3 Objetivos	15
1.3.1 Objetivo Geral	15
1.3.2 Objetivo Específico	15
1.4 Estrutura do Trabalho	15
2 OS SISTEMAS DE ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA	17
2.1 Célula fotovoltaica	17
2.2 Potencial fotovoltaico no Brasil	21
3 INVERSORES E MICROINVERSORES	24
3.1 Topologia dos Inversores <i>String</i>	24
3.1.1 Inversor central	24
3.1.2 Inversor <i>string</i>	26
3.1.3 Inversor <i>Multi-string</i>	27
3.2 Microinversor	28
4 ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE OS SISTEMAS DE INVERSORES STRING E MICROINVERSORES	35
4.1 Estudos que fazem análise comparativa entre inversores e microinversores ..	39
4.2 Comparação financeira dos inversores e microinversores de duas marcas	44
4.3 Comparação de geração de dois sistemas semelhantes	47
CONSIDERAÇÕES FINAIS	50
REFERÊNCIAS	52

1 INTRODUÇÃO

As energias renováveis estão em ascensão, principalmente quando se trata da energia solar. Diferente das fontes convencionais de energia utilizadas, a energia solar é temporalmente intermitente e apresenta uma variabilidade espacial elevada em razão de sua forte relação com condições meteorológicas locais (BORIM, 2019).

Mesmo o Brasil tendo grande capacidade para evoluir este tipo de energia, devido as favoráveis condições climáticas de alguns estados, os sistemas fotovoltaicos, que são o conjunto de equipamentos utilizados para gerar essa energia, não estão tão presentes na vida dos brasileiros. Isso se dá principalmente, pelos altos custos que se tem para adquirir tal sistema (ALVES, 2018).

A energia solar fotovoltaica pode se definir como a produção de energia elétrica gerada pela incidência de luz solar, sendo essa direta ou difusa, o que significa que pode ser produzida até mesmo em dias nublados, em que as nuvens difundem a luz do sol. Essa geração é feita através de placas solares fotovoltaicas, que captam a luz solar e a convertem em energia (TONIN, 2017).

O aproveitamento da energia advinda do sol é uma das alternativas mais promissoras para lidar com assuntos ambientais, pois se trata de fonte de energia limpa e renovável, não agredindo tanto o meio ambiente, como as hidrelétricas e termelétricas (CUNHA, 2016).

Para que ocorra a conversão direta da energia solar em energia elétrica são necessários os módulos ou painéis, feitos das células fotovoltaicas. A célula é um dispositivo feito de material semicondutor, que hoje em dia, o mais usado comercialmente vem sendo o silício, do tipo monocristalino ou policristalino.

Para Santos (2018) as células e módulos fotovoltaicos são, em sua maioria, fabricados a partir de materiais semicondutores, como o silício, o mais comum. Este material é o mais tradicional, pois além de não ser tóxico, é o segundo elemento mais abundante da Terra com mais de 28% da massa da crosta terrestre.

Em condições laboratoriais é possível produzir células individuais de cristal de silício com eficiência superior a 24%. Ainda assim, devido a contínuas pesquisas no campo das células solares, o valor teórico alcançável da eficiência se direciona aos 30%. Porém, comercialmente, a eficiência é de apenas 13 a 19% podendo chegar em 24% nos próximos anos (PARENTE, 2021).

Conforme relata Araújo (2021) o rendimento das células depende de diversos fatores e a operação em módulo possui eficiência global inferior à eficiência das células individuais devido ao fator de empacotamento, fator esse que relaciona o número de camadas de materiais para a proteção das células fotovoltaicas, à eficiência óptica de cobertura do módulo e a perda nas interconexões elétricas das células.

Estes sistemas de geração fotovoltaica dependem diretamente da irradiação solar, portanto, a geração de energia é inteiramente influenciada pela temperatura de operação dos painéis e outros fatores climáticos, como sombreamentos e sujidade (COLODETTE, 2019).

Silva (2021) relata que a utilização de sistemas fotovoltaicos ao redor do mundo ganhou expressão a partir dos sistemas isolados, contudo, este cenário está mudando, e os sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica (SFCE) vêm ganhando destaque, devido aos incentivos governamentais e investimentos de empresas do setor.

Um dos componentes de suma importância para os sistemas fotovoltaicos são os inversores, pois são eles que fazem a conversão da corrente contínua (CC) em corrente alternada (CA), adequada para a ligação do sistema com a rede elétrica (LOPES et al., 2018).

Esse inversor conectado à rede possui mecanismos para interagir com os parâmetros elétricos da rede, por isso dependem da tensão elétrica da concessionária para gerar energia elétrica. Esses inversores podem ser diferenciados pela sua topologia, podendo ser do tipo inversor *string* e microinversor. Os do tipo *string* podem ser encontrados de três formas: inversor central, inversor *string* e inversor multistring (ALVES, 2021).

Para Barbosa (2021) quando a taxa de desempenho em sistemas de geração de energia solar fotovoltaica diminui, geralmente tem relação com a taxa de sujidade, inclinação e orientação dos módulos fotovoltaicos, bem como seu sombreamento, além da temperatura de operação destes módulos e de sua tecnologia de fabricação.

1.1 Definição do problema

O atual cenário energético mundial apresenta indicações de esgotamento dos recursos naturais voltados para a geração de energia, principalmente tratando da energia hídrica que sofre com a falta de chuvas e conseqüentemente compromete o fornecimento de energia para a população, assim como a alta nas taxas de cobrança energética.

Diante dessa problemática, a geração renovável de energia elétrica traz imensos benefícios, principalmente a energia solar, que se mostra como uma grande alternativa ao cobrir as necessidades da humanidade de forma inesgotável, podendo servir de base para um desenvolvimento sustentável.

Sistemas de geração de energia elétrica, utilizando a energia solar fotovoltaica com inversores string já são uma realidade a um bom tempo, mas com a entrada no mercado de sistemas fotovoltaicos utilizando microinversores (inversores fixos a módulos fotovoltaicos) se faz necessário entender e aprofundar o conhecimento sobre o desempenho final da geração de energia utilizando estes equipamentos. Para tanto, faz-se a seguinte indagação: Qual melhor equipamento para um bom desempenho da energia fotovoltaica: inversor *string* ou microinversor?

1.2 Justificativa

Com o crescimento do mercado para a geração de energia solar fotovoltaica, muitos equipamentos estão sendo ofertados, bem como diversos fabricantes apresentando soluções nesta área. Por isso a importância de se elaborar cada vez mais estudos que abordem esta temática, em prol de gerar conhecimento e incentivo para a procura desse modelo de geração de energia limpa.

A motivação para produzir este estudo se deu diante da escassez deste tipo de comparação no cenário brasileiro, tendo em vista a evolução da energia solar e da real necessidade deste tipo de análise de dados. Esta comparação entre inversores e microinversores será de grande utilidade para dimensionamento e produção de futuros sistemas de energia solar fotovoltaico e levará conhecimento para acadêmicos, docentes e pessoas que desejam aderir a este tipo de sistema em suas residências.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo Geral

- Apresentar uma análise comparativa do inversor *string* e microinversor para energia solar fotovoltaica

1.3.2 Objetivo Específico

- Mostrar as etapas do sistema de energia solar fotovoltaica;
- Abordar as características dos sistemas de inversor *string* e microinversor;
- Realizar uma análise econômica dos sistemas de inversor *string* e microinversor;

1.4 Estrutura do Trabalho

Este estudo trata-se de uma revisão bibliográfica, exploratória, com abordagem qualitativa, referente a trabalhos publicados no âmbito nacional e internacional sobre uma análise comparativa do inversor *string* e microinversor para energia solar fotovoltaica.

A revisão bibliográfica refere-se à fundamentação teórica que irá ser adotada para tratar o tema e o problema de pesquisa, ela faz um armazenamento de dados processando-se mediante levantamento das publicações existentes sobre o assunto (CALDAS, 1986).

O autor Yin (2015) faz referência ao método qualitativo afirmando que se trata de uma abordagem focada na identificação das características de situações, eventos e organizações e corrobora com o estudo de caso que contribui de forma inigualável, para a compreensão que temos dos fenômenos individuais, organizacionais, sociais e políticos.

A pesquisa do tipo exploratória visa proporcionar o reconhecimento do problema. Neste tipo de pesquisa pode haver o envolvimento de um levantamento bibliográfico, entrevistas com pessoas experientes no problema pesquisado. Assim, assumiu a forma de pesquisa bibliográfica e estudo de caso. Já a pesquisa descritiva buscou descrever as características de determinadas as características de

determinada população ou fenômeno ou o estabelecimento de relações entre variáveis (TEIXEIRA, 2010).

O estudo será dividido em três capítulos: O capítulo 2 irá tratar-se dos Sistemas de energia solar fotovoltaica, levando todo o embasamento teórico de autores para aprofundar-se da temática desde o potencial fotovoltaico no Brasil à produção e fabricação da célula fotovoltaica. Em seguida, no capítulo 3, serão descritos separadamente as especificações dos inversores e suas topologias e os microinversores, relatando suas vantagens, configurações e eficiência, bem como as características dos sistemas de inversor *string* e microinversor. O último capítulo, capítulo 4, trará a análise dos sistemas de inversor *string* e microinversor para que assim possa ser realizada a comparação dos dois sistemas e dessa forma chegar-se a uma conclusão.

2 OS SISTEMAS DE ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA

Com o avanço das tecnologias no mundo, é possível investir cada vez mais nas fontes de energia renováveis. É uma fonte que vem ganhando destaque nos últimos anos, é a energia solar. Mesmo o Brasil tendo sua matriz energética focada nas hidrelétricas e termoelétricas, os sistemas fotovoltaicos estão cada vez mais garantindo seus espaços em leilões federais ou em outras concessões (ANEEL, 2018).

Borim (2019) comenta que a energia fotovoltaica é uma matriz limpa e eficiente, que se encontra em constante ascensão no cenário mundial, justamente, devido a sua abundância energética em nosso planeta e aos melhores índices de custo-benefício associados ao desenvolvimento tecnológico da humanidade.

O crescimento da energia fotovoltaica é notável em todo planeta. Quando feita uma análise dos dados fornecidos por agências internacionais, como a International Renewable Energy Agency – IRENA (Agência Internacional para as Energias Renováveis), uma referência dentro do setor, ela apresenta indicativos deste crescimento, onde teve um aumento de mais de 70 GW instalados contra 50 GW da energia eólica, entre os anos de 2015 e 2016 (IRENA, 2016).

Segundo Lobo (2019), escassez das chuvas em alguns locais do Brasil obriga as concessionárias a utilizarem outras fontes de energia além da hídrica, como por exemplo, usam as termoelétricas, onde, por se tratar de fontes de energia muito mais caras, ocorre o aumento no valor da conta de energia, pois ao ativar a bandeira tarifária vermelha, a ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica) permite que a concessionária cobre maiores valores por kWh.

De acordo com Trapp (2021), devido esses constantes aumentos na tarifa de luz, está ocorrendo um crescente interesse de consumidores residenciais em meio urbano, no uso dos Sistemas Fotovoltaicos (SFV) com a finalidade de reduzir o custo energético em sua residência.

2.1 Célula fotovoltaica

Os elementos básicos que formam os módulos fotovoltaicos são as células, onde se conectam com o objetivo de gerar energia elétrica. A radiação que atinge

estas células é convertida em eletricidade através do efeito fotovoltaico (GODOI, 2018).

O início da descoberta deste efeito fotovoltaico foi no ano de 1839 com Alexandre-Edmond Becquerel observando em uma experiência que se iluminou placas metálicas imersas em solução ácida, que surgiu uma diferença de potencial entre os eletrodos imersos nessa solução. Alguns anos depois, em 1876, W.G. Adams e R. E. Day observaram efeito similar em um dispositivo de estado sólido fabricado com selênio. Mas os primeiros dispositivos denominados de células fotovoltaicas foram desenvolvidos por C. E. Frits em 1883, fabricados em selênio (KNABBEN, 2017).

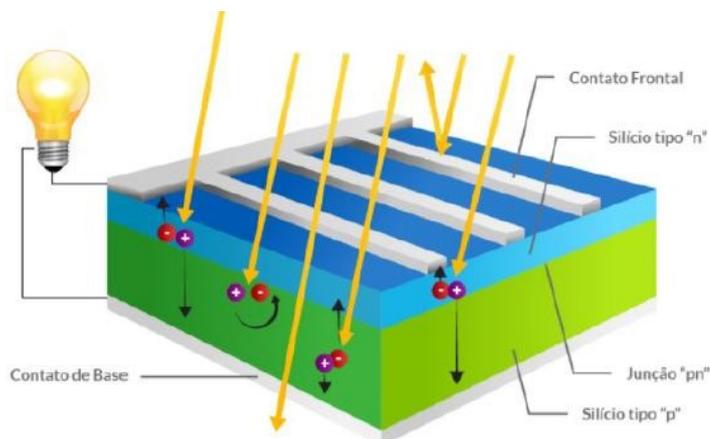
Nos Estados Unidos, em 1950, foram fabricados, nos laboratórios Bell, as primeiras células fotovoltaicas baseadas nos avanços tecnológicos na área de dispositivos semicondutores. Células estas, fabricadas a partir de lâminas de silício cristalino, atingindo uma boa eficiência da conversão, que na época era alta, de 6% com potência de 5mW e área de 2 cm² (COLODETTE, 2019).

Por ser um elemento abundante na crosta terrestre, o Silício Grau Solar (*SiGS*), é o semicondutor mais usado para a construção das células fotovoltaicas. Ele passa por processo de purificação até chegar a 99,9999% de pureza, além de ser extraído com facilidade da natureza (MORAIS, 2017).

Lopes et al., (2018) citam que para criar uma célula solar, é necessária uma composição com uma camada fina de material do tipo *N* em uma metade e na outra metade uma camada com maior espessura de material do tipo *P*, sendo formada assim, a junção *PN*. O aprisionamento dessas cargas causa um efeito de campo elétrico permanente que dificulta a passagem de mais elétrons do lado *N* para o lado *P*. Quando o campo elétrico formar uma barreira capaz de impedir que os elétrons livres restantes no lado *N* passem para lado *P*, esse processo entra em equilíbrio.

Segundo Fernandes (2020), se uma junção *PN* for exposta a fótons com energia maior que o *gap*, ocorrerá a geração de pares elétron-lacunas, se isto suceder na região onde o campo elétrico é diferente de zero, as cargas serão deslocadas gerando uma diferença de potencial ao qual é chamado de efeito fotovoltaico. Consequentemente, se as duas extremidades da célula forem interligadas por um condutor elétrico, haverá uma circulação de elétrons, dando origem a uma corrente elétrica. Este princípio de funcionamento da célula fotovoltaica e está representado na Figura 1 a seguir:

Figura 1 - Funcionamento de uma célula fotovoltaica



Fonte: Godoi (2018)

Os sistemas fotovoltaicos podem ser categorizados como sistemas isolados, quando se armazena a energia gerada em banco de baterias e normalmente são instalados em locais sem acesso à rede elétrica, e sistemas conectados à rede, sendo colocado em paralelo com a rede elétrica da concessionária de distribuição (FERNANDES, 2020).

De acordo com Silva (2021) quase 80% dos módulos fotovoltaicos fabricados são feitos utilizando alguma variação do Silício, este elemento, atualmente, é o mais usado para a fabricação das células fotovoltaicas. No mercado de células feitas de silício, existem variados tipos, dentre eles destacam-se: Silício Monocristalino, Policristalino, Amorfo e filme fino.

Para Godoi (2018) o que diferencia este tipo de célula é sua pureza, ou seja, quanto mais perfeita for à estrutura molecular do silício encontrada, melhor será a sua eficiência de conversão de luz solar em energia elétrica. Contudo, a eficiência da célula está diretamente ligada ao custo da produção. Quanto mais eficiente, mais caro será o módulo solar. Os tipos de células de silício estão descritos no Quadro 1 a seguir:

Quadro 1 - Tipos de células de silício

TIPOS DE SILÍCIO	DEFINIÇÃO
Monocristalino	Esta célula possui quatro lados cortados para otimizar espaço no painel. Ela possui eficiência de 14% a 21% é atualmente, a maior disponível no mercado.
Policristalino	Passam por um processo de produção mais simplificado, por isso apresentam um preço mais acessível. Contudo, sua eficiência é de 13% a 16,5%.
Amorfo	Por lidar com temperatura relativamente baixa permite empregar inúmeros materiais para compor o substrato, possibilitando a criação de painéis flexíveis ou com formas variadas. Essa tecnologia utilizada apresenta um valor menor, mas sua eficiência fica entre 5% a 7%.

Fonte: Godoi (2018)

Dentre os módulos fotovoltaicos comercializados, encontram-se predominantemente as tecnologias de silício monocristalino e policristalino, isso porque são tecnologias que atingem maior eficiência da conversão de energia. A diferença entre elas está no processo de fabricação, células policristalinas são feitas a partir de vários cristais de silício combinados, enquanto células monocristalinas provem de um único cristal puro de silício (GOUVEA, 2017).

Para Rodrigues (2017), as células fotovoltaicas são interligadas para formar um módulo fotovoltaico, que, com a soma de todas as células, apresentará características elétricas com o objetivo de gerar mais energia. Estes módulos apresentam células ligadas em série, compartilhando a mesma corrente e aumentando a tensão do circuito de acordo com o número de células.

Atualmente, de acordo com Parente (2021), os módulos comerciais apresentam 72 ou 144 células associadas em série e podem ser encontrados no mercado em diversos tamanhos e modelos, sendo os modelos comerciais mais populares os de 36 e 72 células, com eficiência média 17%. O número de células depende do quanto de potência máxima que o fabricante deseja atingir com aquele modelo de módulo, sendo que quanto maior número de células, maior será a potência máxima.

2.2 Potencial fotovoltaico no Brasil

As formas de fazer conversão de energia elétrica são diversas no mundo e no Brasil não seria diferente. O país tem um potencial hidrelétrico abundante, segundo Alves (2019) é um dos maiores do mundo, responsável por 62,5% de toda a energia gerada. Contudo, as crises hídricas vêm atingindo diversas regiões do país e isso vem afetando diretamente na sua produção e eficiência.

Quando chega o período de escassez de chuvas, a utilização complementar de outras matrizes energéticas se faz necessária. É quando se usa a segunda matriz mais utilizada no Brasil, a termelétrica. De acordo com dados do Sistema de Informações de Geração da ANEEL (mais conhecido como SIGA) detém 24,40% da potência fiscalizada do país. Em períodos de escassez hídrica, essa matriz é amplamente utilizada para suprir a produção de energia elétrica insuficiente das hidrelétricas (FERNANDES, 2020).

O uso da matriz termelétrica para gerar energia causa preocupação, pois como ela é proveniente da queima, na maioria das vezes, de combustíveis fósseis (petróleo, gás natural e carvão), acaba gerando gases tóxicos na atmosfera, prejudicando o planeta, pois estimula o aumento do efeito estufa e a saúde da população que vive próxima a essas usinas (LOPES et al., 2018).

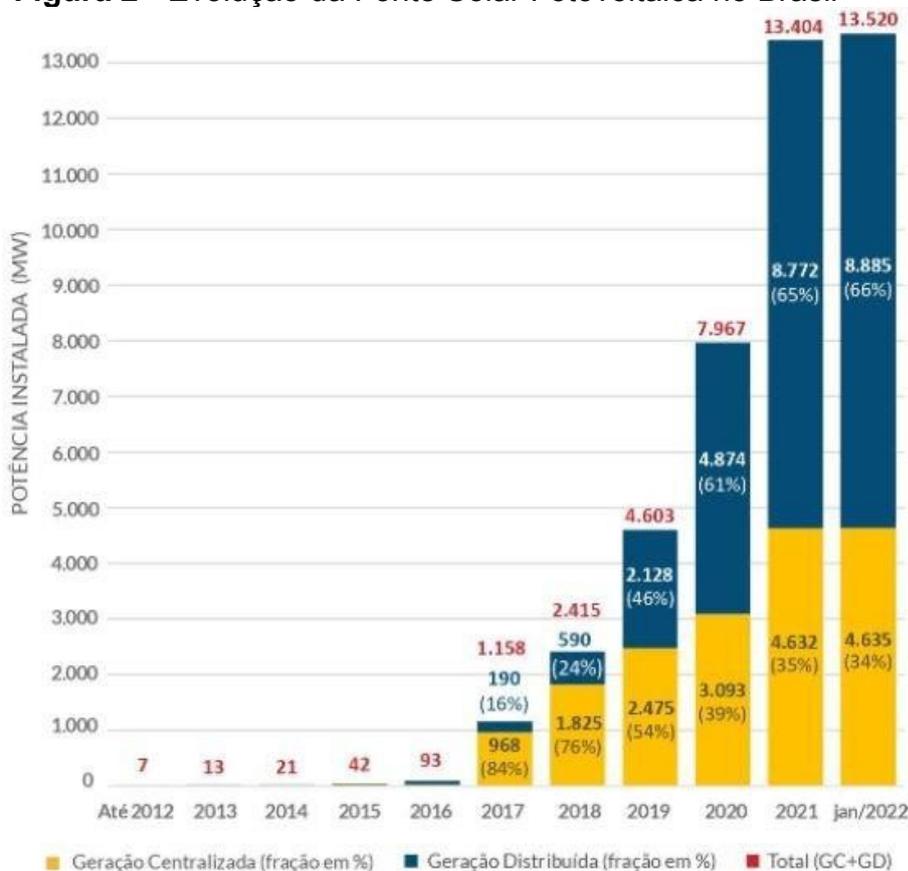
Lobo (2019) enfatiza que nos últimos anos vem ocorrendo um crescimento considerável na instalação de fontes de energia renováveis e limpas no Brasil, destacando a energia eólica e solar fotovoltaica, que apresentam diversas vantagens. São fontes de energia elétrica limpa, utilizam como fonte recursos inesgotáveis, como a luz do sol e o movimento de correntes de ar.

Entretanto, os geradores eólicos, necessitam de grande espaço para serem instalados, o que iria tornar dificultoso caso fosse utilizado em centros urbanos e residências. Já os painéis solares, podem ser instalados em praticamente qualquer lugar, exigindo pouco espaço e podendo ser instalado, inclusive, em cima da própria estrutura construída, como casas, indústrias e empresas (TRAPP, 2019).

Silva (2021) aborda que a energia solar fotovoltaica deu um salto significativo nos últimos anos, de geração, uma contribuição para esse aumento se deu pelo barateamento da tecnologia, os incentivos fiscais dos governos estaduais e federais para a aquisição de kits fotovoltaicos.

A Figura 2 mostra a evolução na geração de energia solar no Brasil no decorrer dos anos.

Figura 2 - Evolução da Fonte Solar Fotovoltaica no Brasil



Fonte: Associação Brasileira de Energia Solar Fotovoltaica (2022)

É perceptível o aumento do número de pessoas procurando empresas de projeto e instalação de painéis fotovoltaicos visando uma economia de energia e com a aprovação do marco legal da micro e mini geração distribuída (geração de energia elétrica próxima ou no local de consumo), a utilização de painéis fotovoltaicos vai se tornar cada vez mais popular. Assim como também o aumento de número de empresas oferecendo tais serviços.

Segundo Simioni (2017) a classificação das centrais geradoras distribuídas é realizada de acordo com a potência instalada. A resolução normativa ANEEL 482/2012 foi revisada e a resolução normativa ANEEL 687/2015, denomina que, microgeração distribuída é a central geradora com potência instalada até 75 kW e minigeração distribuída é a central geradora de 75 kW até 5 MW, para sistemas fotovoltaicos.

A ANEEL, em seu módulo 3 do documento PRODIST - Procedimentos de Distribuição, apresenta os níveis de tensão de conexão de centrais geradoras distribuídas. Devendo ser monofásico em baixa tensão para potência instalada até 10 kW; trifásico em baixa tensão para potências entre 10 kW e 75 kW; trifásico em baixa tensão ou média tensão para potências 76 kW a 500 kW; em média tensão ou alta tensão para potências 501 kW a 30 MW e alta tensão para potências acima de 30 MW (ANEEL, 2018).

O marco legal da micro e mini geração distribuída, foi um projeto de lei aprovado, se tornando a Lei Nº 14.300, de 6 de Janeiro de 2022, que visa trazer uma regulamentação para micro e mini geração distribuída, bem como uma maior segurança jurídica para as novas usinas solares com geração de até 5 MW. Com a nova lei, os consumidores que adquirirem o sistema até 12 meses após a publicação da mesma, terão sua geração assegurada nos moldes atuais, até o ano de 2045 (BRASIL, 2022).

Em relação a estes incentivos, Borim (2019) comenta que, a redução do preço dos módulos fotovoltaicos no mercado internacional, a criação de marcos regulatórios para o setor, como por exemplo, a resolução normativa nº 482/2012, e a liberação de financiamentos para sistemas residenciais, comerciais, tem favorecido a solidificação da geração fotovoltaica conectada à rede no Brasil.

A utilização de sistemas fotovoltaicos ao redor do mundo ganhou expressão a partir dos sistemas isolados, contudo, de acordo com o estudo de Silva (2018) este cenário esta mudando, e os sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica (SFCR) vem ganhando destaque, devido aos incentivos governamentais e investimentos de empresas do setor. Estes sistemas fotovoltaicos conectados à rede são classificados em sistema com inversor central, inversor com uma única *string*, inversor com múltiplas *strings* e microinversor e serão definidos nos capítulos a seguir.

3 INVERSORES E MICROINVERSORES

O inversor fotovoltaico é um componente de suma importância para os sistemas fotovoltaicos, pois são eles que fazem a conversão da corrente contínua (CC) em corrente alternada (CA), adequada para a ligação do sistema com a rede elétrica. A geração de energia através de um sistema fotovoltaico depende de diversos fatores tais quais a irradiância, temperatura, inclinação dos módulos, entre outros (KNABBEN, 2017).

A tensão CA transformada pelo inversor deve obedecer a certos parâmetros de amplitude, frequência e conteúdo harmônico que atende corretamente às cargas a serem alimentadas. Para inversores interligados à rede elétrica, a tensão convertida pelo inversor deve ser sincronizada com a rede elétrica (CAMARGO, 2017).

3.1 Topologia dos Inversores *String*

O inversor fotovoltaico conectado à rede possui mecanismos para interagir os parâmetros elétricos da rede, por isso dependem da tensão elétrica da concessionária para gerar energia elétrica. Esses inversores de conexão à rede podem ser diferenciados pela sua topologia, podendo ser do tipo inversor *string* e microinversor. Os do tipo *string* podem ser encontrados de três formas: inversor central, inversor *string* e inversor *multistring*.

3.1.1 Inversor central

O inversor central é utilizado em sistemas fotovoltaicos com potência entre 20 e 400kW, onde é conectado a um conjunto de módulos fotovoltaicos associados em paralelo, de forma que a conversão da energia gerada pelos módulos é centralizada em um único inversor (CABRAL, 2016).

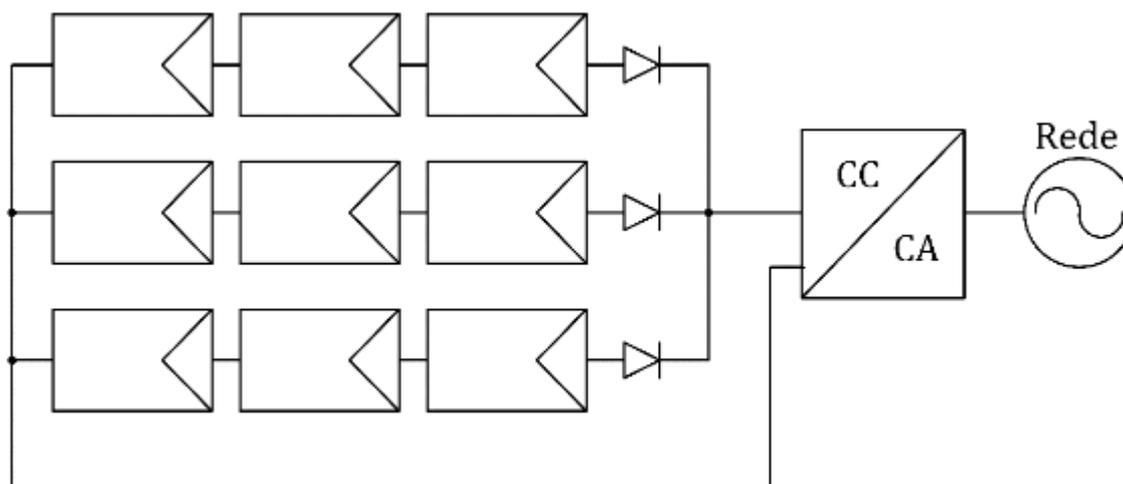
No inversor centralizado, existem vários módulos fotovoltaicos onde são conectados em série, formando um arranjo, que por sua vez, podem ser conectados em paralelo, formando um sistema. Entretanto, como afirma, Melo (2017) a operação do sistema com inversor centralizado apresenta alguns problemas, tais como, perdas de potência devido à diferença de características de fabricação entre

os módulos e sombreamento parcial dos módulos ocasionado por nuvens, árvores ou até edificações próximas, especialmente em áreas urbanas.

Mas para Dutra (2017), a principal vantagem do inversor central é na redução dos custos, pois apesar da grande quantidade de módulos, só se utiliza um inversor. Em situações de falha, toda a geração será comprometida, o que é agravado pela falta de um rastreador de ponto de potência máxima (Maximum Power Point Tracking - MPPT), evidenciando a falta de recursos de melhoria de aproveitamento de módulos.

Os MPPT's são algoritmos que têm por objetivo maximizar a geração de energia nas condições impostas. Nos inversores de string, isto é, aqueles que recebem a conexão de um arranjo de módulos conectados em série, essa maximização é limitada pelo módulo com as piores condições de geração (AYRÃO, 2020). A Figura 3 apresenta a configuração básica de um sistema fotovoltaico conectado à rede com inversor central, onde é representado o conjunto de módulos, os diodos de bloqueio de cada série, o inversor e a rede elétrica.

Figura 3 - Configuração de um SFCR com inversor central



Fonte: Passos (2021)

Em uma central inversora, diversas *strings*, ou filas, de painéis fotovoltaicos são conectadas em paralelo a uma central inversora de grande potência. Cada *string* é dotada de um diodo de bloqueio, para impedir que a energia circule de uma *string* à outra e acabe danificando os módulos (SILVA, 2018).

Cunha (2016) relata que os inversores centrais são utilizados em sistemas de grande porte, tais como nas chamadas fazendas solares, com potências de 10 a 250

kW, com conexão à rede trifásica e com algumas fileiras conectadas em paralelo. São inversores com elevado rendimento e por apresentar várias grandes fileiras de módulos, o MPPT pode não ser eficiente para sombreamentos parciais.

Segundo Andres (2018) a configuração de inversor central está caindo em desuso, pois a eficiência do sistema fica muito limitada em condições de sombreamento parcial dos módulos, devido à presença dos diodos de bloqueio. Isso, pois o algoritmo MPPT aperfeiçoa a operação para apenas uma *string*, em detrimento das demais.

Apesar de os inversores centrais oferecerem uma alta eficiência e um baixo custo por watt, a sua utilização é restrita a módulos com iguais características elétricas e sujeitos a condições de sombreamento semelhantes, o que geralmente não constitui um problema para projetos de grandes usinas geradoras (ARAÚJO, 2021).

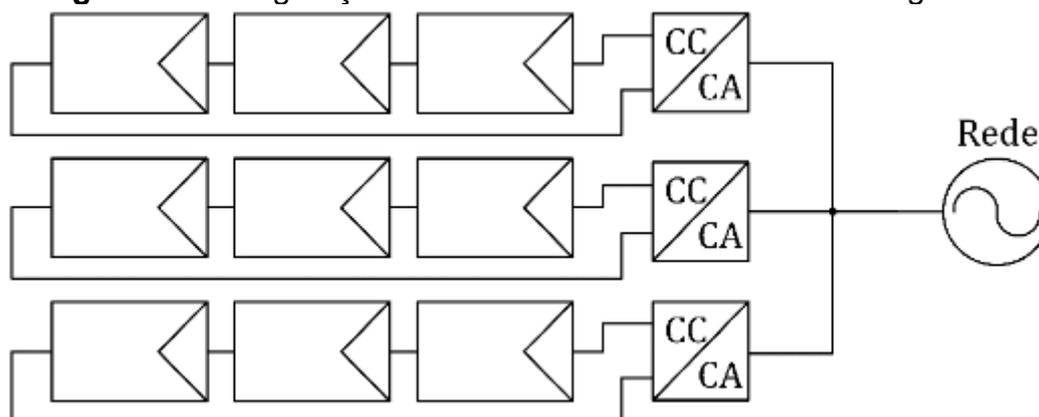
3.1.2 Inversor *string*

A topologia que usa inversores do tipo *string*, é caracterizada por cada série de módulos estar conectada à um inversor. Essa configuração reduz acoplamentos defeituosos, diminui as perdas ocasionadas por sombreamentos e evita as perdas nos diodos de bloqueio. Essas vantagens implicam aumento da eficiência energética e da confiabilidade do sistema (BERWANGER, 2019).

De acordo com Passos (2021), a desvantagem da utilização do inversor *string* é o aumento dos custos, uma vez que é necessário um maior número de inversores de menor potência. Na sua configuração existe uma certa quantidade de módulos são conectados em série à um inversor de menor potência.

Esta configuração traz a vantagem de possuir uma maior confiabilidade, já que dispensa o uso do diodo de bloqueio, ao mesmo passo que utiliza um inversor para cada fila de módulos painéis fotovoltaicos. Entretanto, esta configuração também sofre com a ocorrência de sombreamentos parciais, já que o sombreamento de um módulo acarreta a perda de desempenho dos demais, devido ao fato de todos estarem conectados em série (PASSOS, 2021). Esta é a configuração mais utilizada atualmente, mas que já começa a cair em desuso pouco a pouco. A Figura 4 mostra a configuração *string*.

Figura 4 - Configuração de um SFCR com 3 inversores string



Fonte: Passos (2021)

Neste tipo de configuração cada *string* de módulos fotovoltaicos está ligada a um inversor. Deste modo, o inversor permite a adaptação da *string* ao seu ponto de potência máximo. Ainda assim o sistema tem o seu desempenho degradado no caso de sombreamento em um ou mais módulos dessa *string*.

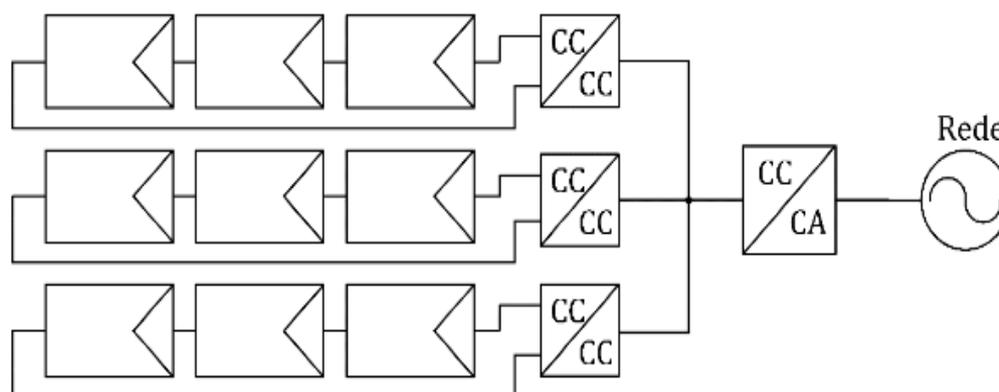
3.1.3 Inversor *Multi-string*

Os inversores *multi-string* são indicados para sistemas que têm vários módulos ou arranjos com diferentes orientações e, conseqüentemente, submetidos a diferentes condições de irradiância e temperatura. Essa topologia caracteriza-se pela utilização de um conversor CC/CC para cada série, onde esses conversores são responsáveis pelo rastreamento do ponto de máxima potência (MPPT) da série, e são ligados a um único conversor CC/CA (BARBOSA, 2019).

Para Stedile (2019) Os inversores *multi-string* reduzem consideravelmente o custo dos inversores *string* e, além disso, houve uma melhora do desempenho operacional do sistema devido ao aumento da energia obtida do gerador fotovoltaico.

A Figura 5 apresenta a configuração de um sistema fotovoltaico conectado à rede com inversor *multi-string*, onde estão representados módulos fotovoltaicos de diferentes ângulos, conversores CC/CC com SPMP que é outra forma de nomear o MPPT, o inversor e a rede elétrica.

Figura 5 - Configuração de um SFCR com três inversores string com MPPT



Fonte: Passos (2021)

Os inversores *multi-string* apresentam várias entradas independentes e permite a ligação de várias *strings* de módulos através de conversores adaptadores que, na maioria dos casos, realizam a função MPPT e, portanto, permite otimizar o desempenho para cada *string* de módulos conectada ao inversor, o que facilita a instalação com diferentes orientações e inclinações (ANDRES, 2018).

Segundo Pinho e Galdino (2014) os inversores utilizados atualmente em SFCR incorporam funções de controle que influenciam no funcionamento do sistema, tais como: seguidor do ponto de máxima potência, conexão ou desconexão da rede em função das condições da mesma e da irradiância incidente sobre arranjo, medida da energia, entre outras.

3.2 Microinversor

Segundo Silva (2021), a mais recente forma de realizar a conversão CC/CA. é utilizando microinversores. Neste tipo de configuração, cada microinversor está conectado individualmente a cada módulo fotovoltaico ou apresenta entradas para conexão de diversos módulos individualmente.

Trapp (2021) cita os microinversores, afirmando que são inversores em miniatura que são conectados diretamente aos módulos fotovoltaicos ou conjunto de módulos. A proposta é parecida com a dos otimizadores de potência e se diferenciam por fazerem o papel de conversores CC/CA. Logo, com a utilização dos

microinversores ligados diretamente aos módulos não é necessário utilizar um inversor de frequência tradicional.

Um microinversor solar ou simplesmente microinversor é um dispositivo utilizado em aplicações fotovoltaicas capaz de converter corrente contínua (CC) gerada por um único módulo fotovoltaico em corrente alternada (CA) para injeção na rede elétrica. As saídas de dois ou mais microinversores podem ser combinadas para aumentar a potência instalada, isto é, o montante de energia injetado na rede elétrica (ARAUJO, 2021).

Os microinversores são conectados diretamente a cada módulo fotovoltaico (FV) numa faixa de potência de 50 a 250 W e têm como vantagem a capacidade de extrair a máxima potência de cada um, pela utilização de MPPT individual, minimizando os efeitos causados por possíveis sombreamentos nos arranjos de módulos. Alguns microinversores suportam dois módulos FV conectados em série, atingindo no máximo 500 Wp (RABUSKE JÚNIOR, 2021).

Apesar do elevado rendimento, o custo por kWp é elevado, como afirma Godoi (2018) além disso a manutenção é de difícil execução, por ser feita de modo individual e por estarem posicionados atrás dos módulos FV. Tais sistemas, apesar de sua menor capacidade para gerar eletricidade, poderão auxiliar na redução da fatura de energia elétrica, tornando-se a opção mais atraente para os consumidores residenciais.

O investimento inicial para a instalação do sistema de microinversor ainda é elevado para a maioria das famílias brasileiras, uma vez que, se trata de uma tecnologia nova e seus custos ainda são pouco acessíveis para a maioria das famílias brasileiras. Tal fato se dá pelo valor inicial dos microinversores mas acredita-se que o desenvolvimento de sistemas de baixa potência será uma tendência nacional, pois no decorrer dos anos existe uma tendência de barateamento dessa tecnologia. Deste modo, devido ao baixo consumo de energia e à necessidade de implementar inversores solares de baixa potência, acredita-se que o Microinversor/Módulo-CA será a melhor opção para proporcionar uma solução técnica para este mercado competitivo (MELO, 2017).

Para Silva (2018), os sistemas fotovoltaicos com microinversor são, normalmente, aplicados em sistemas de baixa potência. Cada módulo possui seu próprio inversor para injetar a energia gerada do módulo à rede elétrica. Os principais desafios de implementação dos microinversores são melhorar a eficiência

e a durabilidade. Os microinversores possuem grande capacidade de se tornar dispositivos do tipo “*plug and play*”, tornando a instalação mais simples e rápida.

Os microinversores para módulos fotovoltaicos podem aperfeiçoar a geração de energia reduzindo os efeitos de sombreamento, uma vez que o processamento da energia de cada módulo fotovoltaico pode ser controlado individualmente (LOBO, 2019). Portanto, em relação aos Microinversores, é importante observar algumas vantagens oferecidas por eles, sendo descritas na Tabela 1.

Tabela 1 - Vantagens oferecidas pelos microinversores

Melhoria no aproveitamento da energia coletada, através de técnicas de rastreamento do ponto de máxima potência para cada módulo ou para no máximo dois módulos conectados em série;
Redução de efeitos de sombreamento parcial e perdas por descasamento (mismatch) que ocorreriam caso fossem instalados numa mesma fileira módulos FV de modelos diferentes;
Elevada densidade de potência em um pequeno peso e volume: produtos comerciais existentes que atendem aos requisitos industriais e de telecomunicações;
Operação plug-and-play (ligar e usar), justificando a simplicidade na instalação;
Aumento na flexibilidade e modularidade em instalações fotovoltaicas permitindo a expansão futura da potência instalada de acordo com a necessidade e capital a ser investido;
Apresentam eficiência de 95% com densidade de potência de 17 W/polegada ³ (1 W/cm ³);

Fonte: Lobo (2019)

Os microinversores encontrados no mercado são projetados para serem conectados a módulos FV com baixa tensão, em torno de 20 a 60 V MP para conexão à rede elétrica monofásica de 127/220 V_{rms}. A principal desvantagem dos microinversores é que cada módulo inversor necessita de um sistema de controle de MPPT, elevação de tensão, sincronismo à rede e da malha de controle da corrente injetada separados, o que podem elevar os custos caso sejam instalados vários microinversores em paralelo à rede elétrica (MELO, 2017).

Segundo Cunha (2016) o microinversor tem maior vida útil, a qual depende principalmente da tecnologia dos capacitores utilizados (capacitores de filme substituindo os eletrolíticos, por exemplo), e menor tamanho se comparado ao inversor de fileiras de módulos (*strings*) convencional. Para módulos fotovoltaicos conectados em série que alimentarão um inversor de fileira (*string*), além do elevado

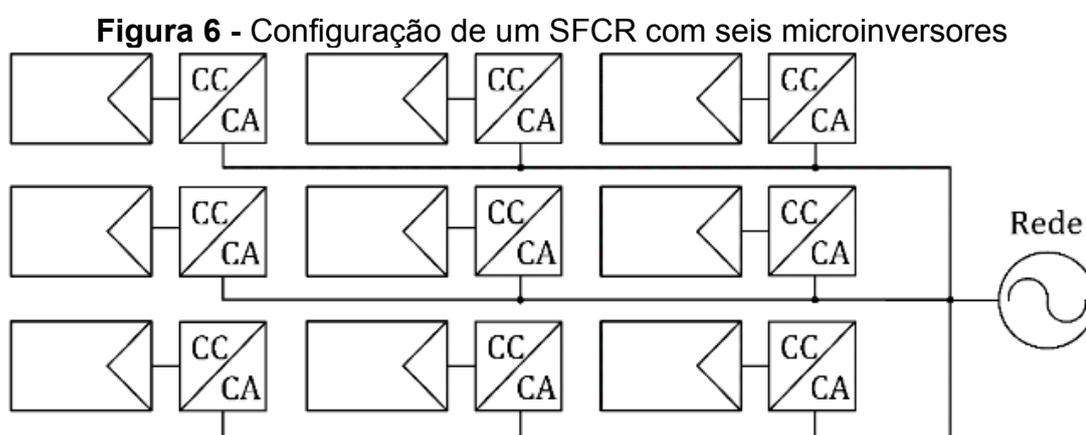
nível de tensão, o controle de MPPT é feito apenas para a fileira sem maximizar a extração de potência dos módulos individualmente.

As funções de maximização de energia são mais eficientes por terem a característica de encontrar o melhor ponto de operação individual para cada grupo de módulos. Entre as grandes vantagens da utilização dos microinversores estão à facilidade de instalação, melhores opções de projeto e design e melhor rendimento devido aos MPPTs individuais com entrada para cada módulo (SILVA, 2021).

O sistema fotovoltaico com microinversor possui a vantagem de maior modularidade, sendo aplicados em sistemas menores e mais simples. Na topologia de microinversores, cada módulo possui sua própria unidade eletrônica responsável pelo MPPT do módulo, aumento de tensão, conversão de CC/CA e sincronização e conexão à rede da concessionária (SANTOS, 2021).

Além dessas vantagens, o estudo feito por Berwanger (2019) apresenta, que, embora os microinversores apresentem um custo inicial mais alto, quando comparados à topologia tradicional de inversor central, eles podem facilmente compensar isso com aumento da captação de energia, observando que cada módulo fotovoltaico irá operar no seu máximo. Além disso, o sistema tem uma maior confiabilidade, flexibilidade e modularidade.

Outra vantagem citada no mesmo estudo diz respeito à segurança: como a topologia de microinversores não envolve conexão de módulos em série, as tensões de CC são baixas, o que diminui os riscos de choque elétrico e formação de arco elétrico (BERWANGER, 2019). A Figura 6 apresenta a configuração básica de um sistema fotovoltaico conectado à rede com inversor integrado ao módulo e a rede elétrica.



Fonte: Passos (2021)

Segundo Stedeli (2021) o preço de usinas fotovoltaicas com microinversores é cerca de 20% maior. Os inversores *string* têm eficiência de até 98% e um custo de 7 a 20 centavos de euro por W, já os microinversores têm eficiência de 90 a 95% e custo de 33 centavos de euro por W. O Quadro 2 aborda a eficiência de alguns microinversores.

Quadro 2 - Eficiência de alguns microinversores

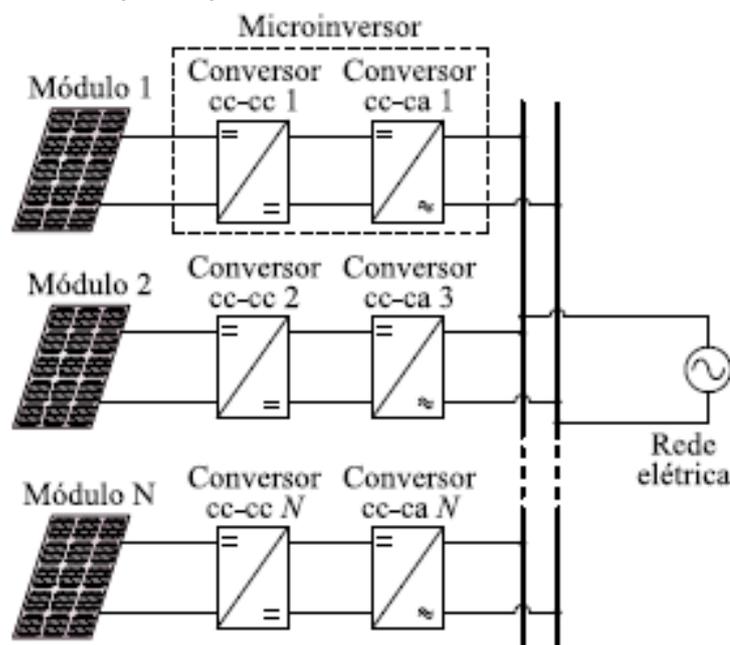
Classificação	Fabricante	Eficiência Europeia
1	SMA	95,4%
2	Enphase	95,2%
3	Hoymiles	95,0%
4	ABB/Power One	94,6%
5	Involar MAC 500	94,3%
6	APS Y 500	94,1%
7	Envertech	93,2%
8	Involar MAC 250	92,7%
9	Changetec	90,9%
10	AEconversion	90,3%
11	Enecsys	90,3%
12	Ienergy	89,9%
13	Letrika 260	88,7%

Fonte: Krauter e Bendfeld (2017)

Para Araújo (2021), os microinversores são tendência no mercado de equipamentos para processamento de energia solar fotovoltaica. Isso se dá pelo fato deles, serem capazes de conectar um único módulo à rede elétrica, além de possuir vantagens referentes à modularidade e ao custo inicial de implantação.

No caso de microinversores de dois estágios, ilustrados na Figura 7, Alves (2018) cita que normalmente no estágio de conversão CC-CC, possui alto ganho e eleva a tensão CC dos módulos a um patamar superior ao valor de pico da tensão da rede elétrica, além de realizar o rastreamento do ponto de máxima potência do módulo fotovoltaico. O segundo estágio, por sua vez, é responsável por injetar a energia na rede elétrica respeitando as normas da concessionária.

Figura 7 - Sistema composto por microinversores fotovoltaicos de dois estágios



Fonte: Alves (2018)

Em contrapartida, no caso dos microinversores de estágio único, o conversor CC-CC da Figura 7 é inexistente. Desse modo, o conversor CC-CA deve possuir ganho estático entre 10 e 20, além de ser responsável pelo rastreamento do ponto de máxima potência e pela injeção de energia na rede elétrica (ALVES, 2018).

Segundo Knabben (2017) os microinversores se diferenciam dos convencionais inversores *string* pela quantidade de módulos conectados: enquanto inversores *string* convertem a energia proveniente da associação de vários módulos fotovoltaicos, microinversores processam a energia oriunda de um único módulo. Este autor pontua algumas vantagens dessa característica de modularidade: 1) Menor redução da potência gerada, devido a sombreamentos, pois a redução de potência fica restrita ao microinversor cujo módulo está sombreado, e não no sistema completo; 2) Rastreamento individual do ponto de máxima potência e conseqüente aumento do rendimento e 3) Manutenção e troca individual dos módulos, sem a necessidade de desconexão completa dos equipamentos que compõem o sistema.

O conhecimento do mercado de microinversores é de suma importância para a especificação do protótipo que será desenvolvido. As atuais empresas fabricantes de microinversores para geração fotovoltaica são estrangeiras e, em grande parte, localizadas na Alemanha, Estados Unidos e China (MELO, 2021).

. A Figura 8 apresenta as imagens de três microinversores fabricados pelas empresas SMA, ABB e Siemens, grandes fabricantes europeias. O microinversor da Siemens possui 21,5 cm de comprimento, 17 cm de largura e 2,9 cm de altura, revelando quão compactos são esses produtos.

Figura 8 - Imagem dos microinversores de três grandes fabricantes



Fonte: Melo (2021)

Godoi (2018) afirma que para que o microinversor seja caracterizado como sistema de processamento de energia solar fotovoltaica conectado à rede elétrica, este deve conter algumas funcionalidades básicas, como: estar em conformidade com os padrões de qualidade de energia para conexão com a rede elétrica; Conter dispositivos de proteção contra condições anormais de funcionamento da rede e do gerador fotovoltaico; Desativar em caso de ilhamento; Possuir sincronismo de fase com a rede; e operar, sempre que possível, no processamento da máxima potência disponível pelo sistema.

4 ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE OS SISTEMAS DE INVERSORES STRING E MICROINVERSORES

Atualmente a maioria das instalações fotovoltaicas utiliza estruturas em *string*, mas, alternativamente, podem ser usados sistemas com microinversores como principal meio de conversão da energia. Esses sistemas que utilizam microinversores apresentam entradas individuais por módulo. Já na configuração utilizando inversores *string*, os módulos fotovoltaicos são ligados em série e conectados ao inversor através de uma ou mais entradas MPPT, onde existe uma ligação série desses módulos, módulos conectados à entrada única do inversor, respeitando os parâmetros de tensão e corrente máxima suportada do equipamento (BARBOSA, 2021).

Segundo Melo (2021), a principal diferença entre inversores *string* e os microinversores é que nos inversores *string* toda a potência é transformada em um único inversor, transformando a potência gerada por vários painéis em apenas um equipamento. Os microinversores transformam a potência individual de cada painel no local da geração.

Segundo Barbosa (2019), já que não é necessário colocar várias placas em série, os microinversores possuem a tensão CC inferior, isso faz com que sistemas com estes dispositivos sejam mais seguros, pois é mais fácil dimensionar proteção para sistemas de corrente alternada do que sistemas de corrente contínua. Outra vantagem dos microinversores é ser mais fácil a ampliação da usina, já que não é limitada a um inversor central, que possui uma potência máxima, limite de strings e tensão máxima de operação.

Para Borim (2019) tanto os inversores quanto os microinversores, permitem o acompanhamento da geração de energia, dependendo apenas do modelo equipamento escolhido, contudo, alguns microinversores possibilitam o acompanhamento da energia gerada módulo por módulo, possibilitando ao proprietário da usina identificar com clareza equipamentos com problema ou com necessidade de manutenção.

O sistema de monitoramento dos microinversores permite identificar facilmente problemas de sombreamento local ou defeitos nos equipamentos, isso devido a seu acompanhamento individual, que é algo que não acontece com os inversores *string*. Além disso, em algumas residências não há um local bom para

instalar o inversor string, fazendo com que muitos clientes optem pela opção descentralizada. Tudo isso deve ser levando em consideração no momento da escolha do tipo de usina (GODOI, 2018).

Camargo (2017) afirma que o monitoramento em inversores string se mostra um pouco limitado quando comparado com microinversores devido ao fato da interdependência dos módulos nos microinversores, é possível acompanhar dados de desempenho de forma individual dos módulos, como a geração produzida, tensão e outros parâmetros.

Isso não ocorre com os inversores *string*, pois o inversor detecta e reproduz os dados no monitoramento apenas pela série de módulos (*string*) e não módulo individualmente. As configurações dos sistemas de inversor *string* e microinversor têm características distintas conforme a aplicação e as principais estão mostradas no Quadro 3:

Quadro 3 - Características dos sistemas de inversor *string* e microinversor

SISTEMAS COM INVERSOR STRING	SISTEMAS COM MICROINVERSOR
Operam com tensões em corrente contínua que podem alcançar 1.000V, com necessidade de <i>string</i> box e proteção específica;	Operam com tensões em corrente contínua da ordem da tensão do módulo fotovoltaico (30V), sem necessidade de proteção adicional;
Tamanho e massa dos inversores significativos necessitando local específico para montagem;	Tamanho e massa dos inversores pequenos sendo montados abaixo dos módulos fotovoltaicos;
Maior consumo durante o período Noturno;	Menor consumo durante o período Noturno;
Baixa modularidade: expansão futura do sistema necessita dimensionamento inicial ou substituição do inversor;	Alta modularidade: expansão futura do sistema necessita de aquisição de módulos fotovoltaicos e microinversores adicionais;
Sombreamento, sujeira ou falha em um dos módulos afeta a <i>string</i> inteira reduzindo sua produtividade global;	Sombreamento, sujeira ou falha em um dos módulos afeta somente o módulo específico, não alterando a produção dos demais;
Garantia máxima de 7 anos com vida útil de 12 anos;	Garantia máxima de 15 anos com vida útil de 25 anos;
Eficiência de conversão maior e custo por Watt relativamente baixo;	Eficiência de conversão menor e custo por Watt relativamente alto;

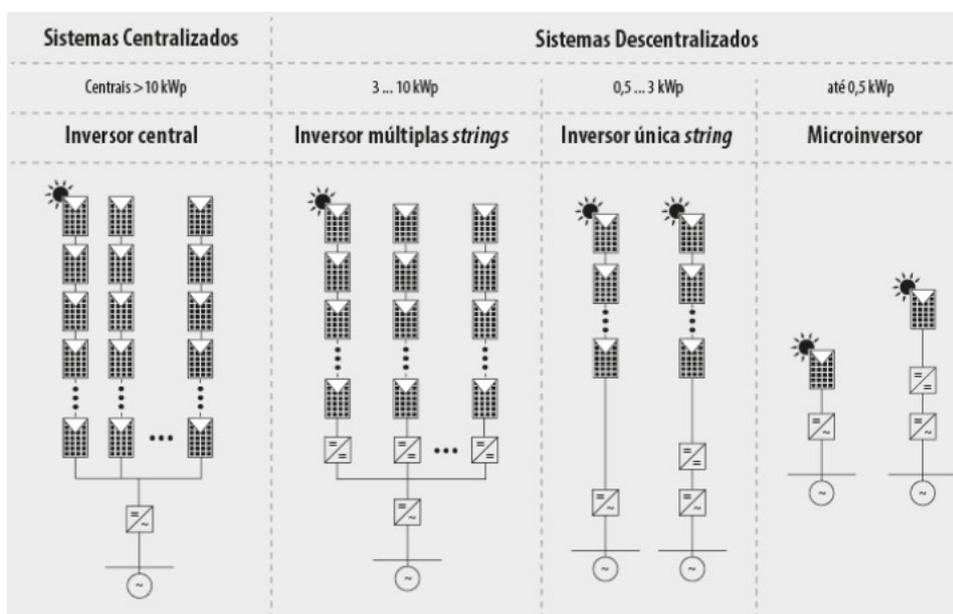
Fonte: Camargo (2017)

Para Stedile (2019) a partir do sistema de monitoramento é possível extrair dados e informações pertinentes para acompanhar o desempenho de operação do

sistema fotovoltaico. Em caso de falhas no sistema o monitoramento será o recurso mais facilitado para detectar que o sistema está com problema. Em inversores string, o acompanhamento desses dados pode ser feito através de um display no próprio inversor.

Morais (2017) cita que os microinversores são utilizados em potências de até 0,5 kWp. Quando está entre 0,5 kWp e 3 kWp, utiliza-se o inversor com uma única string. Já para potências de geração entre 3 kWp e 10 kWp, a configuração mais adequada é o inversor com múltiplas strings. Por fim, o sistema com inversor central é aplicado para potências de geração acima de 10 kWp. A Figura 9 abaixo apresenta a classificação de acordo com a potência do sistema fotovoltaico.

Figura 9 - Tipos de sistemas fotovoltaicos conectados à rede



Fonte: Moraes (2017)

A estrutura usualmente mais utilizada para geração de energia fotovoltaica de alta potência conectada à rede é o inversor centralizado, onde vários módulos fotovoltaicos são conectados em série, formando um arranjo, que por sua vez, podem ser conectados em paralelo, formando um sistema (PARENTE, 2021).

A operação do sistema com inversor centralizado apresenta alguns problemas, tais como, perdas de potência devido à diferença de características de fabricação entre os módulos e sombreamento parcial dos módulos ocasionado por nuvens, árvores ou até edificações próximas, especialmente em áreas urbanas (SILVA, 2021).

Já a configuração de múltiplas *strings* é aplicada, normalmente, em sistemas de grande porte, possuindo uma grande flexibilidade para o aumento da potência instalada. Sua desvantagem está em usar um único inversor, dificultando manutenção quanto a falhas ou problemas relacionados ao seu funcionamento (KNABBEN, 2017).

Para Silva (2021), os sistemas fotovoltaicos com microinversor são, normalmente, aplicados em sistemas de baixa potência. Cada módulo possui seu próprio inversor para injetar a energia gerada do módulo à rede elétrica. Os principais desafios de implementação dos microinversores são melhorar a eficiência.

O sistema fotovoltaico com microinversor também é citado por Lopes et al., (2018) por ter a vantagem de maior modularidade, sendo aplicados em sistemas menores e mais simples. Como um inversor é integrado a cada módulo fotovoltaico, reduzem-se perdas devido às diferenças de fabricação entre cada módulo e devido ao sombreamento parcial, causado por prédios ou árvores próximas. Além disso, o MPPT é implementado em cada módulo fotovoltaico, ampliando a capacidade de geração de energia.

Para Carmargo (2017) alguns microinversores possuem a capacidade de gerenciar 2 ou até 4 módulos, mas no geral são muito menores e são instalados atrás dos próprios painéis. Essa diferença de operação muda alguns pontos do projeto e faz muita diferença no momento da venda para a empresa ofertante do serviço e para o cliente.

Tonin (2017) afirma que os inversores *string* têm a vantagem de serem mais baratos, entretanto, a geração de cada placa depende das outras placas, já que geralmente apenas um sistema MPPT faz o controle de cada *string*. Já os microinversores garantem que cada placa ligada a eles trabalhe sempre gerando a máxima energia possível. Isso faz muitas vezes com que o uso de microinversores em usinas que tem telhados com diferentes posições e inclinações seja mais vantajoso.

4.1 Estudos que fazem análise comparativa entre inversores e microinversores

Como foi observado nos capítulos anteriores, um inversor fotovoltaico converte a potência do gerador fotovoltaico, que chega em Corrente Contínua (CC), em uma Corrente de saída Alternada (CA), e essa corrente alternada em condições normais é injetada na rede elétrica. O desenvolvimento da tecnologia dos inversores de potência nos últimos anos permitiu um considerável ganho na eficiência da conversão CC/CA, contribuindo para a confiabilidade juntamente com uma redução de custo desses inversores.

Com isso, os mercados de inversores fotovoltaicos de conexão à rede foram crescendo e surgindo cada vez mais formas no mercado, como o inversor *string* e microinversor. Dessa forma este capítulo irá analisar alguns estudos que fazem a comparação entre os dois sistemas.

O primeiro estudo é do autor Silva (2021) que realizou uma análise comparativa dos índices de mérito de seis sistemas de geração solar fotovoltaica em funcionamento há pelo menos oito meses, três com inversores e três com microinversores. Esses sistemas foram escolhidos observando sua localização, potência nominal e seu fator de sobredimensionamento (*oversize*).

O primeiro e segundo sistema de geração, possuem 16 módulos de 335W - Modelo 335PHK-36 – Fabricante BYD; e 1 Inversor de 5000W – Modelo MIN 5000TL-X – Fabricante GROWATT. O terceiro sistema possui 16 módulos de 335W - Modelo 335PHK-36 – Fabricante BYD; e 1 Inversor de 6000W – Modelo MIN 6000TL-X – Fabricante GROWATT, estes são as características dos inversores *String*.

O quarto e quinto modelo possuem 20 módulos de 405W - Modelo TSM-405DE – Fabricante TRINA SOLAR e; 5 microinversores de 1500W – Modelo MI-1500 – Fabricante HOYMILES. E o sexto modelo possui 14 módulos de 375Wp - Modelo M6/72H – Fabricante GCL e; 4 microinversores de 1200W – Modelo MI-1200 – Fabricante HOYMILES.

Os resultados apresentados no estudo de Silva (2021) evidenciam que, independentemente da arquitetura utilizada, as tecnologias de inversor e microinversor demonstraram desempenho semelhantes quando analisadas em

condições reais de operação. Mas que dependendo dos fatores externos, como: sombreamento, sujidade e aquecimento, eles podem se diferenciar.

Foi possível observar que, de acordo com o esperado, as influências externas como o sombreamento, a sujidade dos módulos e a falta ventilação natural são prejudiciais ao desempenho do sistema e devem ser evitadas e ou consideradas na fase de projeto, implementação e manutenção de um sistema de geração de energia fotovoltaico.

Um dos sistemas analisados no estudo de Silva (2021) obteve um desempenho baixo devido à poeira em que está submetida por conta da falta de asfalto na região da instalação. Isto evidencia a necessidade de adequar a frequência de limpeza dos módulos a cada planta, esta verificação pode ser feita no momento da instalação para que as manutenções sejam programadas previamente, evitando perdas na geração.

Outro achado importante no estudo de Silva (2021) é que os telhados com telha colonial são mais apropriados para aplicação de microinversores do que os com telha metálica, já que os microinversores são instalados acima do telhado e demandam mais atenção a temperatura em que são submetidos.

O estudo de Colodette (2019) fez a simulação e análise comparativa da produção anual de dois sistemas: um inversor *string* e outro utilizando microinversores, sem e com sombreamentos parciais. Os módulos fotovoltaicos usados em ambas às situações eram idênticos e modelados com características técnicas equivalentes ao modelo DHP72-330, fabricante DAH Solar.

No estudo em questão, o sistema com inversor *string* foi modelado em oito módulos fotovoltaicos ligados em série formando uma *string*, conectada à entrada MPPT do inversor, modelado com as características técnicas equivalentes às do modelo Sunny Boy 2.0, fabricante SMA. O inversor foi modelado com potência de saída igual a 2000W, eficiência ponderada de 96,4% e faixas operacionais conforme *datasheet* do produto.

Já o sistema com microinversor foram modelados quatro módulos fotovoltaicos ligados de forma independente a cada uma das quatro entradas MPPT do microinversor disponíveis. O microinversor foi modelado com potência de saída igual a 1000W, eficiência ponderada de 94,5% e faixas operacionais conforme *datasheet* do produto.

Os resultados no estudo de Colodette (2019) apontam que o sistema com inversor *string* gerou energia no primeiro ano igual a 4.442kWh e os sistemas com micro inversor geram energias iguais com valor de 2.225kWh por micro que, somadas as potências geradas pelos dois micros em estudo, equivalem a 4.450kWh. onde a diferença média no ano é igual a 1,36%, o que equivale a dizer que, na condição simulada, o sistema com microinversor gera 1,36% mais energia por ano do que o sistema com inversor *string*.

O estudo de Godoi (2018) também realiza uma análise experimental de comparação entre o inversor *string* e o microinversor, onde foram necessários utilizar 8 módulos *Sun-Earth* em uma estrutura formando uma *string* de 1.645 kWp. Estes módulos compõem o arranjo fotovoltaico instalado no inversor do tipo *string* – Fronius IG 2000. E o outro módulo, também *Sun-Earth*, foi conectado diretamente ao microinversor Hoymiles MI-250.

O inversor *string* utilizado para os testes de análise experimental, foi o inversor do tipo *string* - Fronius IG 2000. Este inversor Fronius tem a capacidade de sincronizar com a rede elétrica de forma automática, incluindo a proteção de anti-ilhamento, que funciona como um detector de falha de tensão e sai de operação caso ocorra alguma anomalia.

Já o microinversor fotovoltaico utilizados para análise experimental foi o inversor Hoymiles MI-250, que no caso da sua tensão de saída influencia na corrente CA, ou seja, para tensões de rede igual 230V, a corrente na saída é de 1,20A, para 240V a corrente extraída será de 1,04A, considerando que o inversor esteja trabalhando na sua máxima potência.

Godoi (2018) afirma que a instalação dos microinversores são mais simples, devido ao fato que podem ser instalados na própria estrutura de fixação dos módulos e a conexão do lado CC, juntamente com a do lado CA, não necessitam de mecanismo de proteção (como por exemplo a *string* box que são exigidas para os inversores *strings*), já que os microinversores possuem sistema de proteção internos possibilitando a conversão da corrente CC em corrente CA de forma segura.

Como concorda o estudo de Barros (2016) afirmando que os microinversores são dispositivos compactos que possibilitam a interface dos módulos solares fotovoltaicos com a rede elétrica, permitindo uma extração contínua de energia em cada módulo, sem influenciar a extração dos módulos adjacentes, sendo

normalmente, instalados nas costas dos módulos. Assim como mostra na figura 10 a seguir:

Figura 10 – Microinversores instalados nas costas dos módulos fotovoltaicos



Fonte: Barros (2016)

É importante ressaltar a simplicidade da instalação fotovoltaico quando se utiliza os microinversores, mesmo para um sistema fotovoltaico que utilizam uma quantidade mais expressiva de microinversores, é necessário apenas fixá-los os microinversores na estrutura dos módulos, conectando-os às fases da rede e ao Terra, dimensionando os cabos CA para comportar o somatório das correntes do arranjo projetado.

Godoi (2018) relata que em sistemas fotovoltaicos de pequeno e médio porte, o emprego de microinversores ao invés de inversores *string* pode promover um aumento na geração de energia elétrica ao reduzir os efeitos de sombreamento e a perda de eficiência, pelo fato do microinversor controlar individualmente a energia extraída de cada módulo.

Por fim, Godoi (2018) relata que devido à ocorrência de 67 nuvens no céu, e produtividade energética do microinversor foi de apenas 0,17% superior em relação ao inversor *string*. Em outro dia, o inversor *string* injetou na rede elétrica cerca de 4,63 kWh/kWp e o microinversor injetou cerca de 4,7 kWh/kWp, apresentando um ganho na produtividade de energia elétrica de apenas 1,5%.

O estudo de Lopes et al., (2018) analisa dois arranjos fotovoltaicos: o primeiro consta com quatro módulos, sendo o conjunto ou *string* que estão conectadas no

inversor de 3kW, e a outra *string* conectado em dois microinversores totalizando 1kW.

Estruturados em um arranjo de módulos chamado *strings* com quatro módulos de 270W cada, totalizando 1080W, da marca *canadian*, ligados a um inversor da marca *php* de 3kW e outra *string* de quatro módulos, com mesmas especificações dos módulos anteriores, ligados a dois microinversores da marca *Apsystems* de 500 W cada, totalizando 1kW. Tanto o sistema com inversor, quanto o com microinversores, estão funcionando com 4 módulos solares de 270Wp totalizando 1080Wp. Os microinversores utilizados possuem potência nominal de 500W cada, totalizando 1kW.

As medições do estudo de Lopes et al., (2018) ocorreram no período de trinta dias e pode-se concluir como resultado que o sistema conectado aos microinversores, obteve um maior rendimento quando comparado com o sistema conectado ao inversor. Enquanto o sistema com microinversores obteve 170,5kWh/mês, o sistema com inversor obteve 163,2kWh/mês, ou seja, um aumento de aproximadamente 4,5% (7,3kWh/mês) na energia gerada no período de trinta dias.

Essa diferença mensal de geração ao longo de alguns anos traria uma diferença significativa para a economia geral do sistema de geração. Mesmo considerando que o custo dos microinversores sejam superiores ao custo do inversor, é viável investir na aquisição de microinversores e num pequeno período haverá o retorno financeiro em termos de geração.

O estudo de Fernandes (2020) traz uma diferença prática entre inversores *string* e microinversores. O autor afirma o inversor *string* é mais robusto tendo dimensões e pesos muito maiores que os microinversores. Por exemplo, o inversor *string* UNO-DM-4.0-TL-PLUS-SB pesa 18 kg, enquanto o microinversor APS-YC500 pesa 2,5 kg. Em relação a largura: o inversor tem 606 mm e o microinversor 221 mm. A altura do inversor é 254 mm e do micro é 167 mm.

Como foi observado nos estudos anteriores, um dos piores fatores que diminuem a geração de energia pelos módulos é o sombreamento. No estudo de Fernandes (2020) é observado que as entradas MPPT limitadas dos inversores *string* conectam módulos que estão ligados em série formando assim uma *string* e quando um dos módulos é sombreado todos os outros, na mesma *string*, também são afetados na mesma proporção havendo assim perdas bem maiores. Nos

microinversores isso não ocorre pois possuem entradas independentes e a geração a nível de módulo pela tecnologia MLPE (Eletrônica de Potência a Nível de Módulo), que controla cada módulo individualmente, então o sombreamento em um módulo não afeta a produção dos demais ligados ao mesmo microinversor e nem no resto do sistema.

Por fim, Fernandes (2020) aborda sobre a vida útil equipamentos, onde os inversores *string* tem vida útil de 10 a 15 anos, com uma média de 5 anos de garantia. Já os microinversores possuem uma vida útil maior com média de 25 anos e com a garantia de até 25 anos.

4.2 Comparação financeira dos inversores e microinversores de duas marcas

O quadro abaixo relata a comparação financeira do inversor *string* da fabricante Growatt e do microinversor da fabricante Daye. Esta comparação se fundamenta a partir do número de placas, potência do sistema e seus respectivos valores.

Quadro 4 - Comparação entre Inversor Growatt e microinversor Daye

INVERSOR GROWATT			MICROINVERSOR DAYE		
Nº DE PLACAS	POT. SIST. (kWP)	VALOR	Nº DE PLACAS	POT. SIST. (kWP)	VALOR
3	1,35	R\$ 6.829,00	4	1,8	R\$ 7.269,00
3	1,38	R\$ 6.969,00	4	1,84	R\$ 7.479,00
3	1,59	R\$ 7.629,00	4	2,12	R\$ 8.359,00

Fonte: Aldo (2022)

É observado que o número de placas do inversor *string* é menor, devido a distribuidora de equipamentos Aldo só iniciar as vendas de microinversores a partir de quatro placas. Assim, a comparação do número exato das potências será analisada no quadro a seguir.

Quadro 5 - Comparação entre Inversor Growatt e microinversor Daye em 6, 8 e 10 placas

INVERSOR GROWATT			MICROINVERSOR DAYE		
Nº DE PLACAS	POT. SIST. (kWP)	VALOR	Nº DE PLACAS	POT. SIST. (kWP)	VALOR
6	2,7	R\$ 11.159,00	6	2,7	R\$ 11.979,00
8	3,68	R\$ 14.329,00	8	3,68	R\$ 14.889,00
10	4,6	R\$ 18.699,00	10	4,5	R\$ 19.199,00

Fonte: Aldo (2022)

Neste quadro já é possível observar a diferença entre valores mesmo quando se têm a mesma quantidade de placas e pouca diferença na potência do sistema. Para a quantidade de placas de seis, oito e dez, o microinversor mostra-se ser um pouco mais caro, entretanto essa diferença ainda não é tanta. Para seis placas, temos R\$ 820 reais de diferença; já com oito placas são R\$ 570 de diferença; e com dez placas, obtêm-se R\$ 500 reais de diferença.

O quadro abaixo irá analisar a diferença entre a quantidade de vinte e duas placas, vinte e oito e trinta e quatro placas.

Quadro 6 - Comparação entre Inversor Growatt e microinversor Daye em 22, 28 e 34 placas

INVERSOR GROWATT			MICROINVERSOR DAYE		
Nº DE PLACAS	POT. SIST. (kWP)	VALOR	Nº DE PLACAS	POT. SIST. (kWP)	VALOR
22	10,12	R\$ 36.739,00	22	10,12	R\$ 41.998,00
28	12,88	R\$ 46.469,00	28	12,88	R\$ 54.267,00
34	15,3	R\$ 53.409,00	34	15,3	R\$ 62.657,00

Fonte: Aldo (2022)

Em relação à quantidade de 22 placas, obtêm-se a diferença de R\$ 5.259 reais; já para 28 placas o valor diferencial fica de R\$ 7.798 reais; e para 34 placas o valor de R\$ 9.248 reais. Já é possível notar uma diferença financeira grande entre os dois sistemas. O seguinte quadro analisará a diferença de valores entre o número de quarenta e quatro placas, quarenta e oito e cinquenta e duas placas.

Quadro 7 - Comparação entre Inversor Growatt e microinversor Daye em 44, 48 e 52 placas

INVERSOR GROWATT			MICROINVERSOR DAYE		
Nº DE PLACAS	POT. SIST. (kWP)	VALOR	Nº DE PLACAS	POT. SIST. (kWP)	VALOR
44	19,8	R\$ 66.169,00	44	19,8	R\$ 79.959,00
48	22,08	R\$ 76.299,00	48	22,08	R\$ 89.236,00
52	23,92	R\$ 81.669,00	52	23,92	R\$ 97.227,00

Fonte: Aldo (2022)

Para quarenta e quatro placas, têm-se a diferença de R\$ 13.790 reais. Já em quarenta e oito placas, têm-se a diferença de R\$ 12.937 reais. E para cinquenta e duas placas, obtêm-se a diferença final de R\$ 15.528 reais. O último quadro de comparação financeira analisará a quantidade de cinquenta e seis placas, cinquenta e oito e sessenta placas.

Quadro 8 - Comparação entre Inversor Growatt e microinversor Daye em 56, 58 e 60 placas

INVERSOR GROWATT			MICROINVERSOR DAYE		
Nº DE PLACAS	POT. SIST. (kWP)	VALOR	Nº DE PLACAS	POT. SIST. (kWP)	VALOR
56	25,2	R\$ 83.809,00	56	25,2	R\$ 101.493,00
58	26,68	R\$ 95.379,00	58	26,68	R\$ 108.925,00
60	27,6	R\$ 97.839,00	60	27,6	R\$ 111.545,00

Fonte: Aldo (2022)

A análise diferencial do número de cinquenta e seis placas é do valor R\$ 17.684 reais. Para cinquenta e oito a diferença financeira é de R\$ 13.546 reais. E por fim a de sessenta placas com diferença em valores é 13.706 reais. Com a análise destes dados e estudos, é possível chegar a uma conclusão. Esta será abordada no tópico seguinte.

4.3 Comparação de geração de dois sistemas semelhantes

Para dar mais sustentação ao comparativo entre os sistemas de geração distribuída com inversor *string* e microinversor serão analisados dois sistemas os quais seus dados serão descritos nas figuras Figura 11 e Figura 12. Com a finalidade da preservação da identidade dos clientes, que são reais, serão denominados Cliente A como o cliente com sistema com Inversor *string* e Cliente B como sistema com microinversor. Os dados para essa investigação foram fornecidos pela empresa Teto Solar Energias Renováveis.

Figura 11 - Sistema de geração fotovoltaica com inversor string – Cliente A

ITEM	DESCRIÇÃO	QTD
1	Painel solar DAH – HCP72x9-370W	20
2	Inversor Growatt - MIN 6000TL-X	1
3	Estrutura Completa de Fixação em telhado cerâmico	1
4	Dispositivos de proteção, cabos, quadros e aterramento	1

Fonte: Teto Solar Energia (2021)

O sistema do Cliente A, possui uma potência de geração instalada de 7,4 kWp sendo 20 painéis DAH de 370W, estrutura para um telhado cerâmico, inversor Grwatt – MIN 600TL – X, com localização na cidade de Sobral-CE.

Figura 12 - Sistema de geração fotovoltaica com microinversor – Cliente B

ITEM	DESCRIÇÃO	QTD
1	Painel solar DAH – HCP72x9-370W	20
2	Microinversor Homiles- MI 1500	5
3	Estrutura Completa de Fixação em telhado cerâmico	1
4	Dispositivos de proteção, cabos, quadros e aterramento	1

Fonte: Teto Solar Energia (2021)

O sistema do Cliente B, possui uma potência de geração instalada de 7,4 kWp sendo 20 painéis DAH de 370W, estrutura para um telhado cerâmico, microinversor Homiles – MI 1500, com localização na cidade de Sobral-CE

A análise dos dois sistemas, baseia-se nas informações de geração coletadas pelo sistema de acompanhamento de geração da Growatt e também da hoymilles. Tais dados serão analisados mês-a-mês no período de 01 ano, os dados coletados serão mostrados na Tabela 2.

Tabela 2 - Comparação entre geração Cliente A e Cliente B no período de um ano

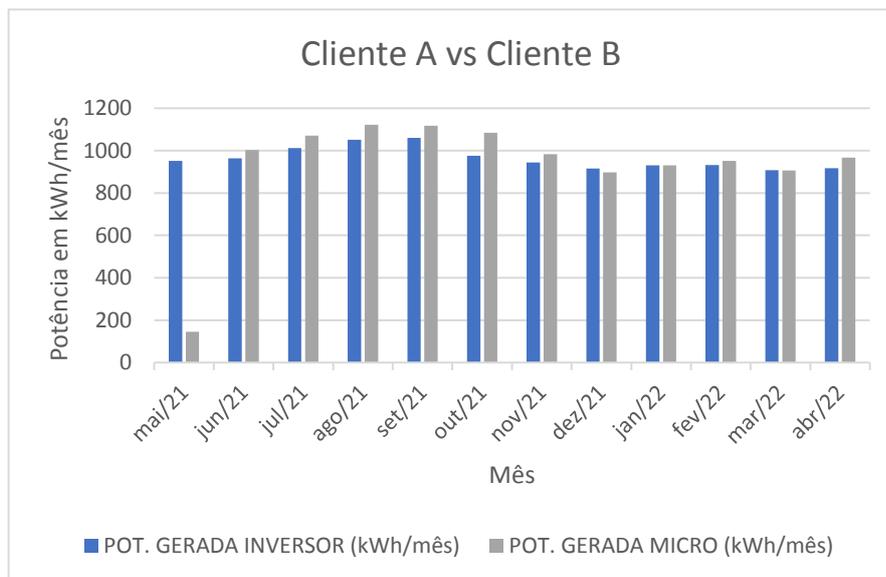
CLIENTE A -SOBRAL - 7,4 kWp - INVERSOR			CLIENTE B -SOBRAL - 7,4 kWp - MICRO	
Nº	MES/ANO	POT. GERADA INVERSOR (kWh/mês)	MES/ANO	POT. GERADA MICRO (kWh/mês)
1	mai/21	951,2	mai/21	146
2	jun/21	963,9	jun/21	1003,01
3	jul/21	1011,7	jul/21	1070,04
4	ago/21	1051,5	ago/21	1121,52
5	set/21	1060	set/21	1117,04
6	out/21	975,5	out/21	1084,82
7	nov/21	944,8	nov/21	983,56
8	dez/21	914,9	dez/21	897,12
9	jan/22	931,3	jan/22	931,12
10	fev/22	931,4	fev/22	951,12
11	mar/22	907,6	mar/22	905,95
12	abr/22	916,3	abr/22	967,48

Fonte: Growatt e Hoymilles (2022)

É possível notar que, mesmo em condições semelhantes, o sistema com microinversor se sobrepõe, em geração, se comparado com o sistema com inversor *string* com exceção do mês de maio, por conta do início da geração tardia no mês, e do mês de dezembro nas quais as condições de geração ainda se encontra dentro do esperado, todavia, ainda são desconhecidos os motivos da baixa geração se comparado com os demais meses.

A Figura 13 mostra um gráfico de comparativo entre a geração do sistema do Cliente A versus a geração do Cliente B.

Figura 13 – Geração Cliente A versus Cliente B, durante o período de um ano.



Fonte: Autor (2022)

A Figura 13 deixa evidente que a geração de energia elétrica de um sistema com microinversor e inversor *string* são semelhantes no decorrer de um ano sendo que o sistema com micro leva uma leve vantagem se comparado com o sistema com inversor. Comparando dois sistemas e levando em consideração um ano de geração ainda não é possível tirar conclusões concretas de qual sistema é mais vantajoso com relação à geração, mas levanta uma questão que deve ser investigada em trabalhos posteriores.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

A energia solar fotovoltaica se difere das fontes convencionais de energia utilizadas, pois apresenta uma variabilidade espacial elevada em razão de sua forte relação com condições meteorológicas locais, sendo uma fonte de energia limpa e renovável, que não agride o meio ambiente. Portanto, este aproveitamento da energia advinda do sol é uma das alternativas mais promissoras para lidar com assuntos ambientais.

A comparação do inversor *string* e microinversor para utilização em sistemas de energia solar fotovoltaica nos estudos e dados analisados fez-se perceber que os microinversores são ideais no aumento da captação de energia, mesmo em dias nublados. Além de apresentar maior confiabilidade, flexibilidade e modularidade. Contudo, como se pode observar, o custo deste equipamento é um pouco elevado.

Entretanto, torna-se algo vantajoso quando se utilizam em pequenas quantidades, como puderam ser observadas com o módulo de seis, oito e dez placas, que não teve uma diferença financeira muito grande. Contudo, à medida que aumentam a quantidade de placas, como é observado no vigésimo segundo vigésimo oitavo e trigésimo quarto conjunto de placas. E assim continua a aumentar os valores com quarenta e quatro, quarenta e oito placas, cinquenta e duas, onde o maior valor diferencial apresentado é na quantidade de sessenta placas.

Um importante achado foi que as influências externas como o sombreamento, a sujidade dos módulos e a falta ventilação natural, prejudicam o desempenho do sistema. Isto evidencia a necessidade de adequar a frequência de limpeza dos módulos, observar se existem árvores próximas aos locais de instalação.

Conclui-se que, com os avanços das tecnologias no mundo, é possível investir cada vez mais na energia solar fotovoltaica, assim é necessário que ocorram incentivos do governo para que os valores dos equipamentos sejam menores e assim, mais famílias consigam aderir ao sistema.

Em relação à escolha de utilizar inversor ou microinversor, pode-se concluir que os microinversores trazem diversos benefícios, que vão desde sua instalação, ao fato que podem ser instalados na própria estrutura de fixação dos módulos fotovoltaicos. Bem como, sua segurança, já que não necessitam de mecanismo de proteção, já que o possui um sistema de proteção interna possibilitando a conversão

da corrente CC em corrente CA de forma segura. A sua desvantagem é a perceptível diferença de valores quando se aumenta a quantidade de placas.

Diante disso, sugere-se para o desenvolvimento de trabalhos futuros a utilização de uma metodologia de pesquisa de campo, onde poderão ser coletados dados dos módulos fotovoltaicos fabricados na região em questão. Para que seja comprovada, cada vez mais a eficiência dos microinversores.

REFERÊNCIAS

ALDO DISTRIBUIDORA. **Energia solar: Jinko solar superou expectativas com aumento do embarque**. 2022. Disponível em: <https://www.aldo.com.br/blog/jinko-solar-superou-expectativas/>. Acesso em: 17 jun. 2022.

ANEEL, Agência Nacional de Energia Elétrica. **Geração distribuída ultrapassa 20 mil conexões**. 2018. Disponível em: < <http://www.aneel.gov.br>>. Acesso: 15 mar. 2022.

ALVES, T. S. MICRO INVERSOR DE ESTÁGIO ÚNICO CONECTADO À REDE ELÉTRICA BASEADO NO CONVERSOR FLYBACK (**Monografia**) Bacharelado em Engenharia Elétrica. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Ponta Grossa, 2018.

ANDRES, B. Projeto e implementação de um conversor módulo integrado para a conexão de geração fotovoltaica á rede elétrica (**Dissertação**) Pós-graduação em Engenharia Elétrica. Universidade Federal de Santa Maria. Rio Grande do Sul, 2018.

ARAÚJO, F. V. Sistema fotovoltaico para empreendimento de múltiplas unidades consumidoras: análise de viabilidade técnica e econômica de implementação em um condomínio em Fortaleza – CE (**Monografia**) Curso de Graduação em Engenharia Elétrica. Universidade Federal do Ceará. Fortaleza, 2021.

AYRÃO, V. **Energia solar fotovoltaica no Brasil: Conceitos, aplicações e estudos de caso**. International Copper Association Brazil, Rio de Janeiro, 2018.

BARBOSA, M. M. Análise da viabilidade técnica e econômica para instalação de um gerador fotovoltaico conectado a rede para indústria atendida em média tensão (**Monografia**) Curso de Engenharia Elétrica. Centro Universitário do Sul de Minas. Varginha, 2019.

BARBOSA, L. R. Geração solar fotovoltaica distribuída (*on-grid*): vantagens, barreiras e limitações (**Dissertação**) Mestrado em Engenharia da Produção. Universidade Paulista – UNIP, São Paulo, 2021.

BARROS, L. A. M. Desenvolvimento de um Microinversor com Armazenamento Local de Energia para Aplicações Solares Fotovoltaicas (**Dissertação**) Mestrado em Engenharia Eletrônica Industrial e de Computadores. Universidade do Minho. Portugal, 2016.

BERWANGER, D. Desenvolvimento de um sistema fotovoltaico com rastreador solar de um eixo instalado em uma propriedade rural conectado à rede (**Dissertação**) Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Energia na Agricultura. Universidade Estadual do Oeste do Paraná. Cascavel, 2019.

BORIM, D. D. E. Análise técnica e econômica de modalidades de sistemas fotovoltaicos (**Monografia**) Curso de Engenharia Elétrica da Escola Politécnica. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2019.

CALDAS, M. A. E. **Estudos de revisão de literatura: fundamentação e estratégia metodológica**. São Paulo: Hucitec, 1986.

CAMARGO, L. T. Projeto de Sistemas Fotovoltaicos conectados à Rede Elétrica (**Monografia**) Graduação em Engenharia Elétrica. Universidade Estadual de Londrina. Londrina, 2017.

COLODETTE, J. A. F. Uso de micro inversores em sistemas fotovoltaicos: avaliação comparativa e estudo de caso (**Monografia**) Especialização em fontes renováveis: geração, operação e integração. Universidade federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, 2019.

CUNHA, R. B. A. Proposta de sistema fotovoltaico monofásico conectado à rede elétrica (**Dissertação**) Mestrado em Engenharia Elétrica. Universidade Federal da Bahia. Salvador, 2016.

CABRAL, H. G. Estudo e desenvolvimento de um microinversor empregando o conversor CUK para microgeração fotovoltaica (**Dissertação**) Mestrado em engenharia elétrica. Pontifícia universidade católica do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2016.

DUTRA, A. E. Micro inversor fotovoltaico buck-boost com eliminação da tensão de modo comum (**Monografia**) Graduação em Engenharia Elétrica. Universidade Federal de Campina Grande. Paraíba, 2017.

FERNANDES, C. G.. Estudo comparativo do uso de inversor string e microinversores na geração de energia elétrica em instalações fotovoltaicas. (**Monografia**) Graduação em Engenharia Elétrica. Universidade Federal do Uberlândia. São Paulo, 2020.

GODOI, R. R. Análise comparativa de desempenho de inversor String e microinversor (**Monografia**) Graduação em Engenharia Elétrica. Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2018.

GOUVÊA, E. C. Resposta espectral de células fotovoltaicas em condições reais de operação (**Dissertação**) Mestrado em Engenharia Mecânica. Universidade Estadual Paulista. Guaratinguetá, 2017.

GROWATT, MONITORAMENTO. Monitoramento de sistemas elétricos fotovoltaicos. Disponível em: <https://server.growatt.com/?lang=pt>. Acesso em: 17 jun. 2022.

HOYMILES, S-MILES CLOUD. Monitoramento de sistemas elétricos fotovoltaicos. Disponível em: <https://m.hoymiles.com/platform/login>. Acesso em: 17 jun. 2022.

KNABBEN, G. C. Microinversor fotovoltaico não isolado de dois estágios (**Dissertação**) Mestrado em Engenharia Elétrica. Universidade Federal de Santa Catarina. Rio Grande do Sul, 2017.

LOBO, F. D. Análise técnico-econômica de um projeto de sistema fotovoltaico para um sítio no interior do espírito santo (**Monografia**) Graduação em Engenharia Elétrica. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2019.

LOPES, T. M. **Análise comparativa de geração de sistemas fotovoltaicos conectados à rede com um inversor e com microinversores**. IX Jornada de Iniciação Científica e Extensão. Instituto Federal do Tocantins, 2018.

MORAIS, J. C. S. Desenvolvimento de um microinversor conectado à rede baseado na integração do conversor Cuk com uma estrutura de indutores chaveados **(Dissertação)** Mestrado em Engenharia Elétrica e Informática Industrial. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2017.

MELO, F. C. Projeto e desenvolvimento de um novo inversor solar de estágio único sem transformador adequado para aplicações de baixa potência **(Doutorado)** Pós-Graduação em Engenharia Elétrica. Universidade Federal de Uberlândia. Uberlândia, 2017.

MELO, I. M. Estudo de viabilidade para implantação de um sistema de geração fotovoltaica em uma fazenda no interior do Ceará. **(Monografia)** Graduação em Engenharia Elétrica. Universidade Federal do Ceará. Fortaleza, 2021.

PARENTE, A. F. Estudo comparativo sobre o desempenho entre usinas de geração de energia fotovoltaica com uso de inversores string e microinversores **(Monografia)** Graduação em Engenharia de Energias Renováveis. Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2021.

PASSOS, A. S. O uso do sistema fotovoltaico como alternativa energética em residências de médio padrão na cidade de Lagarto (SE) **(Monografia)** Graduação em Engenharia Civil. Centro Universitário AGES. Paripiranga, 2021.

PINHO, J. T.; GALDINO, M. A. **Manual de engenharia para sistemas fotovoltaicos**. Grupo de Trabalho de Energia Solar – GTES, CEPEL – CRESESB, edição revisada e atualizada. Rio de Janeiro, RJ: CEPEL/CRESESB, 2014.

RABUSKE JUNIOR, F. J. Estudo de viabilidade para implantação de sistema fotovoltaico em escolas públicas municipais **(Monografia)** Graduação em Engenharia Elétrica. Universidade de Santa Cruz do Sul – UNISC. Santa Cruz do Sul, 2021.

RODRIGUES, L. T. Estudo comparativo de novas tecnologias de geração fotovoltaica **(Monografia)** Curso superior de tecnologia em sistemas de energia. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina. Florianópolis, 2017.

SILVA, D. S. Análise operacional do desempenho de sistemas de geração fotovoltaica utilizando inversores do tipo string e microinversor **(Monografia)** Graduação em Engenharia Elétrica. Universidade Federal do Tocantins. Palmas 2021.

SANTOS, B. S. Análise de Desempenho e Retorno de Capital Aplicado em Sistemas Fotovoltaicos com Inversor *String*, Microinversor e Inversor com Otimizador de Potência **(Monografia)** Graduação em Engenharia Elétrica. Universidade Federal de Uberlândia. Uberlândia, 2021.

SILVA, F. D. M. Projeto de uma miniusina solar fotovoltaica para o centro de intendência da marinha em Natal (CeIMNa) **(Dissertação)** Mestrado Profissional em Energia Elétrica. Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Natal, 2018.

SIMIONI, T. O impacto da temperatura para o aproveitamento do potencial solar fotovoltaico **(Dissertação)** Mestrado em Planejamento Energético. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2017.

STEDILE, R. Análise da implantação de um sistema fotovoltaico conectado a rede na cidade de Blumenau-SC **(Dissertação)** Programa de pós-graduação em Sistemas de Energia. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2019.

TEIXEIRA, E. **As três metodologias: acadêmica, da ciência e da pesquisa.** Petrópolis, RJ: Vozes, 2010.

TETO SOLAR, ORÇAMENTOS. Orçamentos para sistemas elétricos fotovoltaicos. Disponível em: <https://tetosolarenergy.com.br/>. Acesso em: 20 jun. 2022.

TRAPP, G. Análise do fator de desempenho entre sistemas de geração fotovoltaica utilizando micro inversores e inversores com string **(Monografia)** Especialização em Energias Renováveis. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2019.

TONIN, F. S. Caracterização de Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede Elétrica na Cidade de Curitiba **(Dissertação)** Mestrado em Engenharia Elétrica. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2017.

YIN, R. K. **Estudo de Caso: Planejamento e Métodos.** Porto Alegre: Bookman. 2015.