



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

ANTÔNIO FÁBIO LIMA SILVA

**ANÁLISE COMPARATIVA DE DESEMPENHO ENTRE MICROINVERSORES E
INVERSORES DE STRING UTILIZANDO O SOFTWARE PVSYST EM UMA
PLANTA FOTOVOLTAICA COMERCIAL NA CIDADE DE FORTALEZA-CE**

FORTALEZA
2022

ANTÔNIO FÁBIO LIMA SILVA

ANÁLISE COMPARATIVA DE DESEMPENHO ENTRE MICROINVERSORES E
INVERSORES DE STRING UTILIZANDO O SOFTWARE PVSYST EM UMA PLANTA
FOTOVOLTAICA COMERCIAL NA CIDADE DE FORTALEZA-CE

Monografia apresentada ao Programa de Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. Paulo Cesar Marques de Carvalho.

FORTALEZA

2022

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Sistema de Bibliotecas
Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

- S578a Silva, Antônio Fábio Lima.
Análise comparativa de desempenho entre microinversores e inversores de string utilizando o software PVsyst em uma planta fotovoltaica comercial na cidade de Fortaleza-CE / Antônio Fábio Lima Silva. – 2022.
55 f. : il. color.
- Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Curso de Engenharia Elétrica, Fortaleza, 2022.
Orientação: Prof. Dr. Paulo Cesar Marques de Carvalho.
1. Microinversor. 2. Inversor de String. 3. Geração Fotovoltaica. 4. PVsyst. I. Título.
- CDD 621.3
-

ANTONIO FÁBIO LIMA SILVA

ANÁLISE COMPARATIVA DE DESEMPENHO ENTRE MICROINVERSORES E
INVERSORES DE STRING UTILIZANDO O SOFTWARE PVSYSYEM UMA PLANTA
FOTOVOLTAICA COMERCIAL NA CIDADE DE FORTALEZA-CE

Monografia apresentada ao Programa de
Graduação em Engenharia Elétrica da
Universidade Federal do Ceará, como requisito
parcial à obtenção do título de Bacharel em
Engenharia Elétrica.

Aprovada em: ____/____/____.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Paulo Cesar Marques de Carvalho (Orientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Lucas Silveira Melo
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Eng. Matheus Albuquerque Melo
Magus Soluções Renováveis

A Deus.

Aos meus pais.

Aos meus familiares

Aos meus amigos

A minha noiva, Jecyca.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, agradeço a Deus por me dar forças durante todo o curso, e por trazer as melhores pessoas possíveis para a minha vida. Por tudo que conquistei e ainda irei conquistar, dedicarei sempre minha gratidão ao Senhor.

Agradeço aos meus pais, Alcione Lima e Francisco José, por tudo. Foram meu alicerce e quem me sustentou, educou, motivou e me abraçou nos momentos difíceis que passei. Sem meus pais, não sou nada. E cada vitória que conquistarei em minha vida, dedicarei a eles.

A minha noiva, companheira, melhor amiga e parceira, Jecyca. Obrigado por sempre acreditar que sou capaz de vencer cada obstáculo, que venha a me desanimar. Serei sempre grato a tudo que fez por mim.

Agradeço aos meus amigos, que obtive durante os anos de faculdade, em especial, Andrey, Amanda, Jandson, Gabriel Pinto, Davi Dias, toda a galera da Fazenda da Elétrica e meus amigos do curso de Engenharia de Telecomunicações. Sem vocês tudo seria bem mais difícil, agradeço demais a nossa parceria.

Agradeço ao meu orientador, professor Dr. Paulo Carvalho, que sempre se mostrou prestativo a me auxiliar a realizar o meu trabalho da melhor maneira. Ao professor Dr. Lucas Silveira Melo por aceitar compor a banca e ajudar a desenvolver um melhor trabalho. Ao Eng. Matheus Melo por aceitar o convite de compor a minha banca e por todos os ensinamentos relacionados ao setor de geração distribuída. À Dra. Ivonne Dupont que disponibilizou seu tempo para me orientar e me auxiliar nas primeiras versões do meu trabalho.

Meus sinceros agradecimentos a todos que de alguma forma me ajudaram a chegar até aqui, desde a minha infância.

“É o seu lugar no mundo; é a sua vida. Vá em frente e faça tudo o que puder com ela, e torne-a a vida que você quer viver.”

- Mae Jemison

RESUMO

Para projetar um sistema fotovoltaico (FV) conectado à rede (SFCR), deve-se buscar a maior produtividade possível e com um menor custo de aquisição, que atenda às necessidades energéticas do usuário. Dessa forma, no presente trabalho realizou-se um estudo comparativo de desempenho, entre inversores de *string* e microinversores, com a mesma potência instalada, em uma unidade consumidora comercial, utilizando o software PVsyst, na cidade de Fortaleza-CE. Para tanto, o presente trabalho é baseado em um estudo de caso, fundamentado por simulações computacionais no PVsyst, tendo o seu banco de dados, como referência dos parâmetros climáticos e elétricos. Além da análise das principais diferenças entre as duas tecnologias e os possíveis ganhos de eficiência com o sistema instalado com microinversores. Assim como, o registro, em gráficos e tabelas, de todos os dados obtidos nas simulações. Diante disto, verificou-se que, em 10 anos, a produtividade do sistema com microinversor reduziu 3,94%, enquanto a produtividade do sistema com inversor de *string*, decaiu 4,03%. Comparativamente, a maior variação de desempenho foi de 2,47% para o sistema com microinversor, mesmo estando com a mesma potência instalada. Dessa forma, constatou-se que optando pela instalação de microinversores, a geração de eletricidade será mais eficiente, no entanto, o seu elevado custo inicial, de 2,98 R\$/Wp, não o torna uma opção viável, economicamente.

Palavras-chave: Microinversor. Inversor de *String*. Geração Fotovoltaica. PVsyst.

ABSTRACT

To design a photovoltaic (PV) system connected to the grid (SFCR), one must seek the highest possible productivity and with a lower acquisition cost, which meets the energy needs of the user. Thus, in the present work, a comparative performance study was carried out between string inverters and microinverters, with the same installed power, in a commercial consumer unit, using the PVsyst software, in the city of Fortaleza-CE. Therefore, the present work is based on a case study, based on computer simulations in PVsyst, having its database as a reference for climatic and electrical parameters. In addition to the analysis of the main differences between the two technologies and the possible efficiency gains with the system installed with microinverters. As well as the registration, in graphs and tables, of all the data obtained in the simulations. In view of this, it was verified that, in 10 years, the productivity of the system with microinverter reduced by 3.94%, while the productivity of the system with string inverter decreased by 4.03%. Comparatively, the highest performance variation was 2.47% for the microinverter system, even with the same installed power. Thus, it was found that by opting for the installation of microinverters, electricity generation will be more efficient, however, its high initial cost, of 2.98 R\$/Wp, does not make it an economically viable option.

Keywords: Microinverter. String Inverter. Photovoltaic Generation. PVsyst.

LISTA DE FIGURAS

Figura 01 – Geração mundial de eletricidade por fontes.....	15
Figura 02 – Participação da Geração FV na Matriz Elétrica Brasileira.	16
Figura 03 – Sistema com Inversor FV Conectado à Rede.....	19
Figura 04 – Inversor FV de String.....	20
Figura 05– Microinversores conectados à rede elétrica.	21
Figura 06 – Arranjo de módulos FV afetados por sombreamento.....	23
Figura 07– Módulo FV afetado por sombreamento em sistema com microinversores.....	24
Figura 08 – Monitoramento remoto de um inversor tradicional.	24
Figura 09 – Monitoramento remoto por módulo FV de um sistema com microinversores.	25
Figura 10 – Comparação de preço por kWp de microinversores e inversores de string.	26
Figura 11 – Módulos FV instalados no telhado do sistema analisado.....	32
Figura 12 – Módulos FV utilizado da marca JINKO SOLAR.	34
Figura 13 – Modelagem 3D do sistema FV.	35
Figura 14 – Sombreamento sobre o sistema FV no meio do ano.	35
Figura 15 – Sombreamento sobre o sistema FV no início do ano.	36
Figura 16 – Localização do sistema FV.....	37
Figura 17 – Dados meteorológicos obtidos com Meteonorm 8.0.	37
Figura 18 – Distribuição dos módulos FV no PVsyst.	38
Figura 19 – Resumo do sistema com inversor de string apresentado no relatório do PVsyst.	38
Figura 20 – Distribuição dos módulos FV por string.	39
Figura 21 - Resumo do sistema com microinversor apresentado no relatório do PVsyst.	40
Figura 22 - Distribuição dos módulos FV por MPPT dos microinversores.	40

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 01 – Comparativo de geração mensal entre microinversor e inversor de string obtida no primeiro ano de simulação.....	46
Gráfico 02 – Comparativo de geração anual entre microinversor e inversor de string durante 10 (dez) anos de simulação.....	48
Gráfico 03 – Comparativo de taxa de desempenho entre microinversor e inversor de string durante 10 (dez) anos de simulação.....	49

LISTA DE TABELAS

Tabela 01 – Principais Especificações dos Inversores de String da marca Growatt.	33
Tabela 02 – Principais Especificações dos Microinversores da marca Hoymiles.	33
Tabela 03 – Principais Especificações do Módulo FV da marca JINKO SOLAR.	34
Tabela 04 – Distribuição dos módulos FV por inversor.	39
Tabela 05 – Irradiação Horizontal Total do local da instalação.	42
Tabela 6 – Perdas obtidas na simulação da usina FV com microinversor, em %.	43
Tabela 07 – Perdas obtidas na simulação da usina FV com inversor de string, em %.	44
Tabela 08 – Geração mensal obtida no primeiro ano de simulação com microinversor.	45
Tabela 09 – Geração mensal obtida no primeiro ano de simulação com inversor de string. ...	45
Tabela 10 – Geração anual obtida na simulação com microinversor.	47
Tabela 11 – Geração anual obtida na simulação com inversor de string.	47

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABSOLAR	Associação Brasileira de Energia Solar Fotovoltaica
CA	Corrente Alternada
CC	Corrente Contínua
FC	Fator de Capacidade
FV	Fotovoltaico
GC	Geração Centralizada
GD	Geração Distribuída
IFCR	Inversores Fotovoltaicos Conectados à Rede
LCOE	<i>Levelized Cost of Energy</i>
MLPE	<i>Module-Level Power Electronics</i>
MPPT	<i>Maximum Power Point Tracking</i>
PR	<i>Performance Ratio</i>
REN	Resolução Normativa
SFCR	Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede
TIR	Taxa Interna de Retorno
UC	Unidade Consumidora
YF	<i>Final Yield</i>
YR	<i>Reference Yield</i>

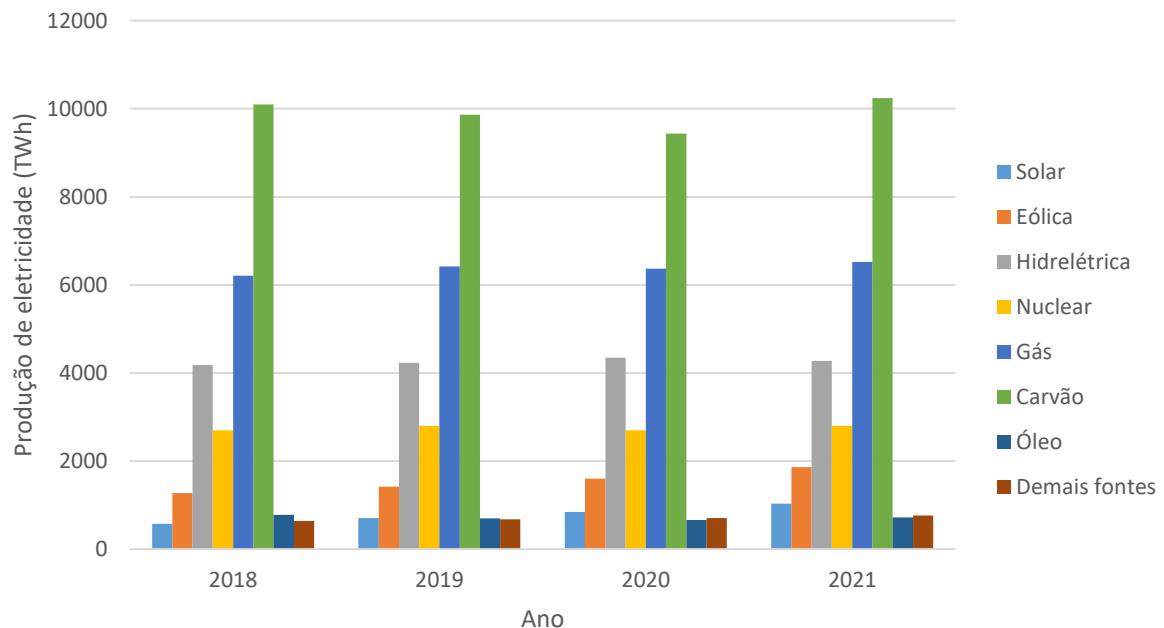
SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	15
1.1 Objetivo Geral	17
1.2 Objetivos Específicos	17
1.3 Estrutura do trabalho	18
2 INVERSORES DE <i>STRING</i> E MICRO INVERSORES	19
2.1 Inversores Fotovoltaicos	19
<i>2.1.1 Inversores Fotovoltaicos Conectados à Rede (IFCR)</i>	19
2.2 Inversores Fotovoltaicos de <i>String</i>	20
2.3 Microinversores	21
2.4 Principais diferenças entre Inversores de <i>String</i> e Microinversores	22
<i>2.4.1 Configuração de instalação</i>	22
<i>2.4.2 Potência dos arranjos FV</i>	22
<i>2.4.3 Disposição dos módulos FV</i>	22
<i>2.4.4 Garantia do fabricante</i>	23
<i>2.4.5 Influência de sombreamento</i>	23
<i>2.4.6 Monitoramento remoto da geração de eletricidade</i>	24
<i>2.4.7 Custo para aquisição</i>	25
3 ESTADO DA ARTE	27
4 MATERIAIS E MÉTODOS	32
4.1 Sistema FV analisado	32
4.2 Simulação no PVsyst	35
<i>4.2.1 Sistema FV com Inversor de <i>String</i></i>	38
<i>4.2.2 Sistema FV com Microinversores</i>	40
5 RESULTADOS E DISCUSSÕES	41
6 CONCLUSÃO	51
SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	52
REFERÊNCIAS	54

1 INTRODUÇÃO

Em todo o mundo, é perceptível um grande avanço quando se diz respeito às inovações tecnológicas relacionadas às energias renováveis. Tais soluções inovadoras para auxiliarem na descarbonização do setor energético global, necessitam da combinação de vários instrumentos políticos. Há diversas vantagens ambientais proporcionadas pelas energias renováveis, tais como a redução de gases poluentes, diminuindo as emissões de dióxido de carbono. Ademais, com o aumento dos investimentos no setor de energia renovável, impulsionou-se o crescimento de empregos relacionados ao setor (IRENA, 2017). Na Figura 01, é apresentado um levantamento de geração de eletricidade, em escala mundial, por fontes de energia, entre 2018 e 2021.

Figura 01 – Geração mundial de eletricidade por fontes.

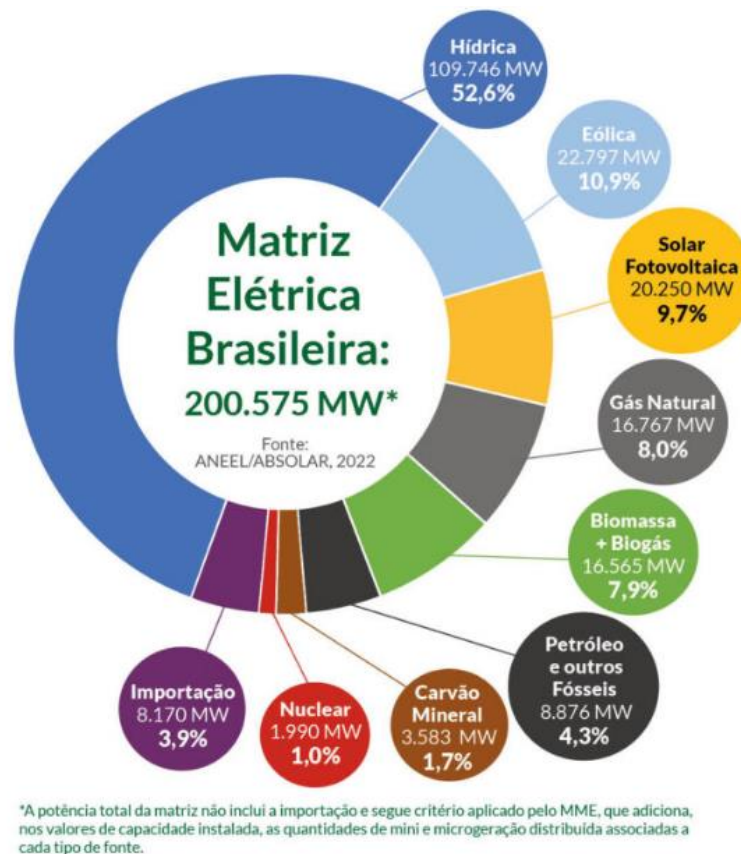


Fonte: Adaptado de BP (2022).

Dentre as fontes de energias renováveis mais utilizadas no mundo, a geração FV vem se destacando, cada vez mais, desde a última década. Sendo responsável, de acordo com a Figura 01, pela geração de quase 1.032,50 TWh, em 2021. As instalações com este tipo de tecnologia podem fornecer eletricidade, tanto para uso residencial quanto para grandes instalações comerciais. Além disso, é uma ótima solução, juntamente com banco de baterias para quem vive longe dos centros urbanos, em regiões bem remotas (IRENA, 2017).

No Brasil, o conceito de geração distribuída de energia foi definido com a Resolução Normativa nº 482/2012, a qual foi revisada pela REN 687/2015 e pela REN 786/2017. Com a publicação da Lei 14.300/2022, o que estabelece o Marco Legal da Geração Distribuída, se impôs aos micro e minigeradores de geração distribuída de energia, uma garantia jurídica com regras mais coesas e definitivas (TEIXEIRA, 2022). Um cenário mais atualizado referente às fontes energéticas participantes da Matriz Elétrica Brasileira, está explícita na Figura 02.

Figura 02 – Participação da Geração FV na Matriz Elétrica Brasileira.



Fonte: ABSOLAR (2022).

Segundo a Associação Brasileira de Energia Solar Fotovoltaica (ABSOLAR), em 2021, o país subiu para 13º lugar, em escala mundial, de capacidade instalada. Além disso, a geração FV está em 3º lugar como a fonte mais utilizada nacionalmente. Atingindo a marca de quase 20,25 GW de potência instalada, unindo Geração Centralizada (GC) e Geração Distribuída (GD), até o início de outubro de 2022.

Ao projetar um sistema de geração FV, atenta-se em obter a maior eficiência possível do sistema para que a geração de eletricidade atenda às necessidades energéticas do proprietário. Dentre as modalidades de sistemas de energia solar FV, existem os Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede (SFCR).

Dessa forma, são utilizados equipamentos que convertem a energia, em corrente contínua, advinda dos módulos FV, em corrente alternada. Tradicionalmente, os inversores CC/CA mais utilizados são os inversores de *string*, os quais em suas entradas são conectados vários módulos FV, em série e em paralelo. Tal configuração pode se tornar passível a alguns problemas, sobretudo, perdas por sombreamento, que afetam toda a série de módulos FV, reduzindo a eficiência do arranjo FV (COLODETTE, 2019).

Logo, uma alternativa é a utilização de micro inversores, nessas situações. Visto que os módulos FV operam individualmente, não sofrendo influência dos outros módulos FV que venham a sofrer algum tipo de problema, além disso, o monitoramento, nesse equipamento, também possibilita a análise individual de cada módulo FV, concedendo, uma manutenção mais bem direcionada (COLODETTE, 2019). Embora este equipamento possua as vantagens citadas, anteriormente, deve-se haver um estudo sobre a sua real necessidade, uma vez que, a sua principal desvantagem é seu custo mais elevado, além de não suportar uma grande quantidade de módulos FV.

1.1 Objetivo Geral

Realizar uma análise comparativa de geração de eletricidade entre inversores de *string* e microinversores, com a mesma potência instalada, em uma usina FV, de um ponto comercial, na cidade de Fortaleza-CE por meio de simulações no software PVsyst. Além de verificar a viabilidade financeira da instalação das duas tecnologias.

1.2 Objetivos Específicos

- Realizar simulações computacionais de uma planta FV utilizando o software PVsyst como referência dos parâmetros climáticos e elétricos atribuídos ao sistema FV, a partir do seu banco de dados.
- Analisar as principais diferenças entre microinversores e inversor de *string*, os possíveis ganhos de eficiência utilizando a primeira tecnologia na usina FV analisada.

- Registrar todos os dados obtidos por meio das simulações realizadas, com gráficos e tabelas, com a finalidade de gerar um comparativo mais preciso entre as duas tecnologias.

1.3 Estrutura do trabalho

O presente trabalho está dividido em 6 (seis) capítulos, os quais estarão descritos, abaixo:

No capítulo 1, está apresentada a introdução, com os cenários atuais no mundo e nacionalmente, mostrando as principais motivações e objetivos para a elaboração deste trabalho de conclusão de curso.

No capítulo 2, há a fundamentação teórica para uma explicação comparativa e detalhada entre microinversores e inversores de *string*.

No capítulo 3, está o estado da arte, no qual foram apresentados vários trabalhos em que houve a análise comparativa entre os dois equipamentos estudados neste trabalho, expondo quais dos dois possuem uma maior viabilidade técnica e financeira.

No capítulo 4, apresenta-se as metodologias e os materiais utilizados para execução deste trabalho.

No capítulo 5, estão os resultados obtidos nas simulações executadas no PVsyst. Além da análise da viabilidade financeira de cada tecnologia.

No capítulo 6, está a conclusão fundada a partir dos resultados analisados nos capítulos anteriores, seguida das sugestões de trabalhos futuros e da lista de referências bibliográficas.

2 INVERSORES DE *STRING* E MICRO INVERSORES

No presente capítulo, serão apresentadas as características de inversores e microinversores de sistemas conectados à rede, além de entender as principais diferenças entre estes equipamentos, assim como as vantagens e desvantagens apresentadas por cada um.

2.1 Inversores Fotovoltaicos

Os inversores FV são aparelhos responsáveis por converter a corrente contínua (CC), gerada pelos módulos FV, em corrente alternada (CA) para que forneça energia aos equipamentos elétricos do local da instalação.

2.1.1 Inversores Fotovoltaicos Conectados à Rede (IFCR)

Os inversores FV conectados à rede elétrica, realizam a conversão CC-CA, a partir da energia gerada pelos módulos FV. Este tipo de aparelho é reconhecido pela rede elétrica da distribuidora, como sendo uma fonte de corrente. Além disso, é importante ressaltar que o IFCR opera somente conectado a uma rede elétrica. Em uma condição que o fornecimento é interrompido, o IFCR é desligado automaticamente por questões de segurança (VILLALVA e GAZOLI, 2012). Pode-se verificar um esquemático de um sistema em que utiliza este tipo de inversor, na Figura 03.

Figura 03 – Sistema com Inversor FV Conectado à Rede.

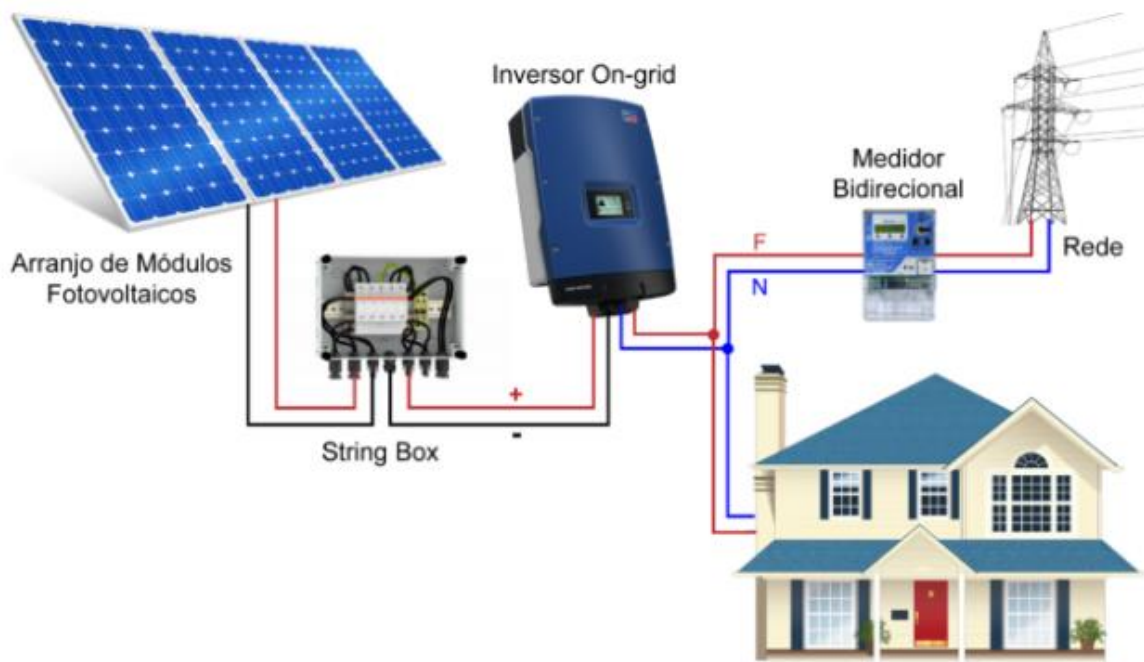


Fonte: GRIDPOWER ENGENHARIA (2016).

2.2 Inversores Fotovoltaicos de *String*

Os inversores FV de *string* possuem a característica de ter os seus arranjos FV compostos por módulos FV conectados em série. Dessa forma, qualquer influência externa a um módulo FV, afetará o desempenho de todo o arranjo. Além disso, há limitações no inversor FV de *string*, quanto às disposições dos módulos FV, uma vez que, em um ou mais arranjos, estes devem estar na mesma orientação e inclinação, para garantir que não ocorra problemas, como corrente reversa, por exemplo. Por outro lado, inversores de *string* têm como vantagem, a utilização de poucas unidades em uma instalação, devido a sua capacidade de comportar uma grande quantidade de módulos FV, em série, pelo fato de atender à uma tensão de entrada elevada. Assim como, ter uma localização mais privilegiada para a realização de manutenções futuras (CANAL SOLAR, 2021). Abaixo, na Figura 04, há uma ilustração de um sistema com esse tipo de inversor.

Figura 04 – Inversor FV de String.



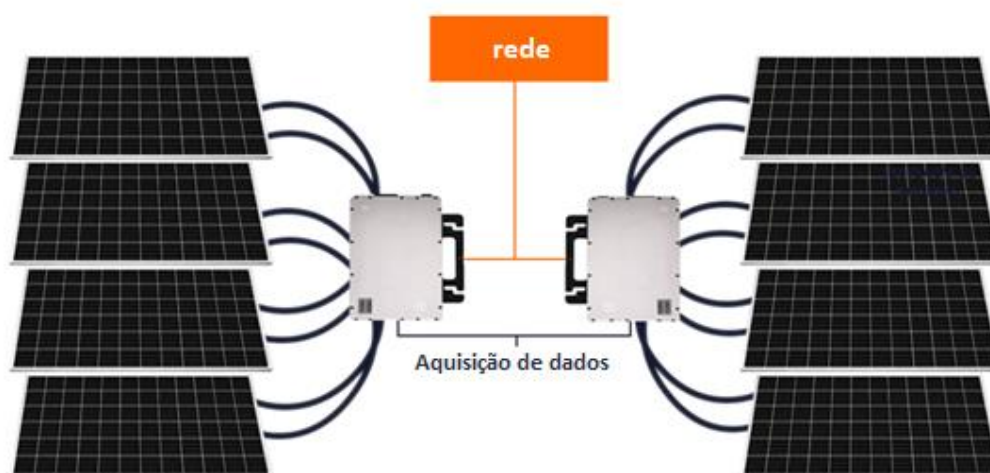
Fonte: ELETRÔNICA DE POTÊNCIA (2021).

Nota-se na Figura 04, a principal característica do inversor de *string*, que é a capacidade de gerar eletricidade, por meio de uma série de módulos FV conectados à sua entrada e convertendo a CC, em CA, para alimentar as cargas de determinada instalação.

2.3 Microinversores

Os microinversores, assim como os inversores de *string*, são conectados juntos à rede elétrica. A principal diferença é com relação à estrutura do arranjo, uma vez que os módulos FV operam individualmente, ou em um arranjo com dois módulos em paralelo. Dessa forma, a queda de desempenho, advinda de defeitos ou sombreamento, em um módulo FV, não afetará os demais. Além disso, esses dispositivos suportam até 4 (quatro) módulos, podendo, cada um, estar com inclinação e orientação diferentes (FOTOVOLT, 2022). Na Figura 05, há um demonstrativo das conexões dos arranjos FV e das conexões entre microinversores.

Figura 05– Microinversores conectados à rede elétrica.



Fonte: Adaptado de OPUS SOLAR (2021).

Outra vantagem desse dispositivo, é a possibilidade de através de um monitoramento remoto, analisar o desempenho de cada módulo FV, individualmente. No entanto, este aparelho também possui algumas desvantagens, tais como a dificuldade de acesso, uma vez que é instalado no telhado, junto aos módulos FV, além de uma menor eficiência, devida exposição às elevadas temperaturas, apesar dos ganhos de geração de eletricidade. E, principalmente, relacionado ao seu elevado custo (GETPOWER SOLAR, 2020).

2.4 Principais diferenças entre Inversores de *String* e Microinversores

2.4.1 Configuração de instalação

Os inversores de *string* necessitam ser instalados em locais abrigados, pois não são projetados para operarem em ambientes externos, apesar de possuírem proteções internas para situações de adversidades climáticas. Assim como, é necessária a conexão de proteções (chaves seccionadoras, disjuntores e dispositivo de proteção contra surtos), tanto na entrada (corrente contínua) quanto na saída (corrente alternada). Por outro lado, os microinversores são instalados próximos aos módulos FV, externamente, realizando a conversão CC-CA com baixa tensão em corrente contínua. Além de prescindir dispositivos de proteção entre os módulos e suas entradas MPPT que representa “*Maximum Power Point Tracking*”, ou em tradução livre, rastreamento do ponto de potência máxima (GENYX, 2021).

2.4.2 Potência dos arranjos FV

Com relação à potência dos arranjos FV, um inversor de *string* pode suportar vários módulos FV conectados em série nas entradas do seus rastreadores de potência, devido à capacidade de trabalhar com uma alta tensão em CC. Enquanto para o microinversor é permitido somente um ou dois módulos FV em paralelo, por entrada MPPT (CANAL SOLAR, 2021).

2.4.3 Disposição dos módulos FV

Quando se fala em disposição dos módulos FV, refere-se à orientação, à inclinação e à quantidade de módulos FV, em arranjos em paralelo. Enquanto o microinversor, que geralmente possui 4 entradas MPPT, pode ter em cada uma das suas entradas, painéis FV com orientação e inclinação diferentes, para um inversor de *string* deve-se ter uma maior atenção, visto que, em entradas MPPT que possuem duas ou mais *strings* em paralelo, a quantidade, a orientação e a inclinação dos módulos FV conectados em cada *string*, devem ser iguais.

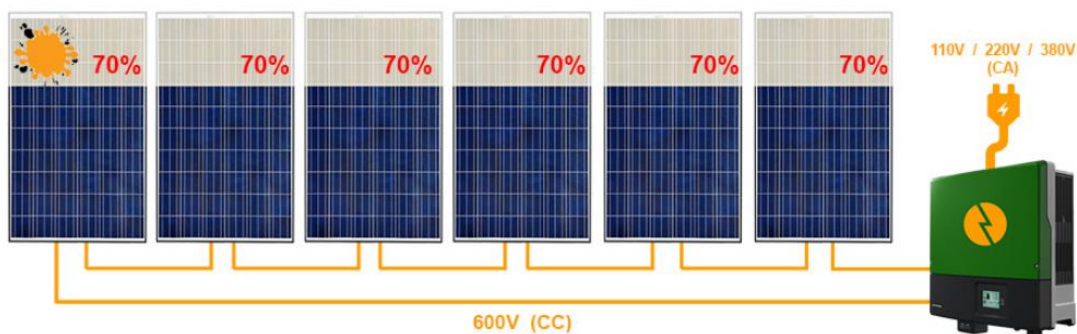
2.4.4 Garantia do fabricante

Cada fabricante desses equipamentos tem sua especificidade com relação ao tempo de garantia. No caso do inversor tradicional a garantia gira em torno de 5 a 10 anos com reposição total ou somente de algumas peças. Por outro lado, os microinversores possuem um tempo de garantia maior, cujo período vai de 12 a 15 anos (BERNARDES, 2017).

2.4.5 Influência de sombreamento

Um dos principais pontos a considerar, quando se compara o funcionamento do inversor de *string* com do microinversor, é a influência do sombreamento sobre a eficiência na geração de eletricidade. Os inversores tradicionais por possuírem arranjos com vários módulos FV em série, sofrem mais quando estão sob influência de sombreamento, uma vez que ao afetar um módulo toda a *string* também será afetada, trabalhando com baixa eficiência (CANAL SOLAR, 2021). A ilustração mostrada na Figura 06, demonstra o comportamento do sistema com esse tipo de problema.

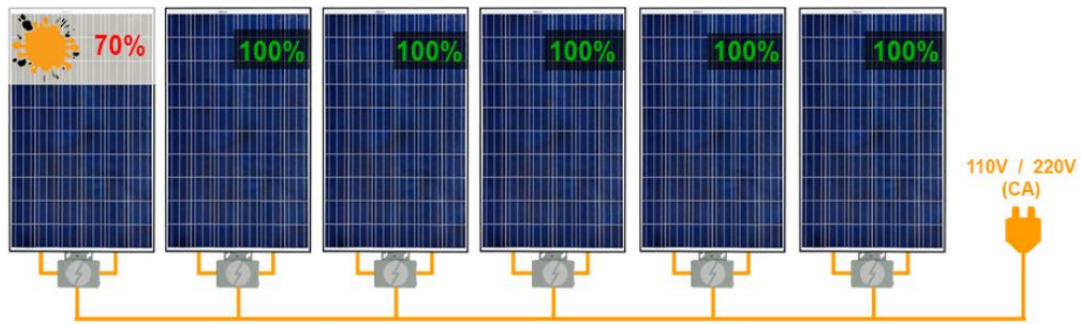
Figura 06 – Arranjo de módulos FV afetados por sombreamento.



Fonte: PORTAL SOLAR (2017).

Nota-se na Figura 06, que toda a série de módulos está limitada às mesmas condições de um só módulo FV afetado. Diferentemente, da mesma situação acontecendo com um sistema sendo operado por microinversores, no qual cada painel FV é otimizado de maneira independente, não permitindo que todo o sistema seja prejudicado (CANAL SOLAR, 2021). Na Figura 07, é apresentada uma ilustração do comportamento de um sistema FV, com microinversores, afetado por sombreamento.

Figura 07– Módulo FV afetado por sombreamento em sistema com microinversores.



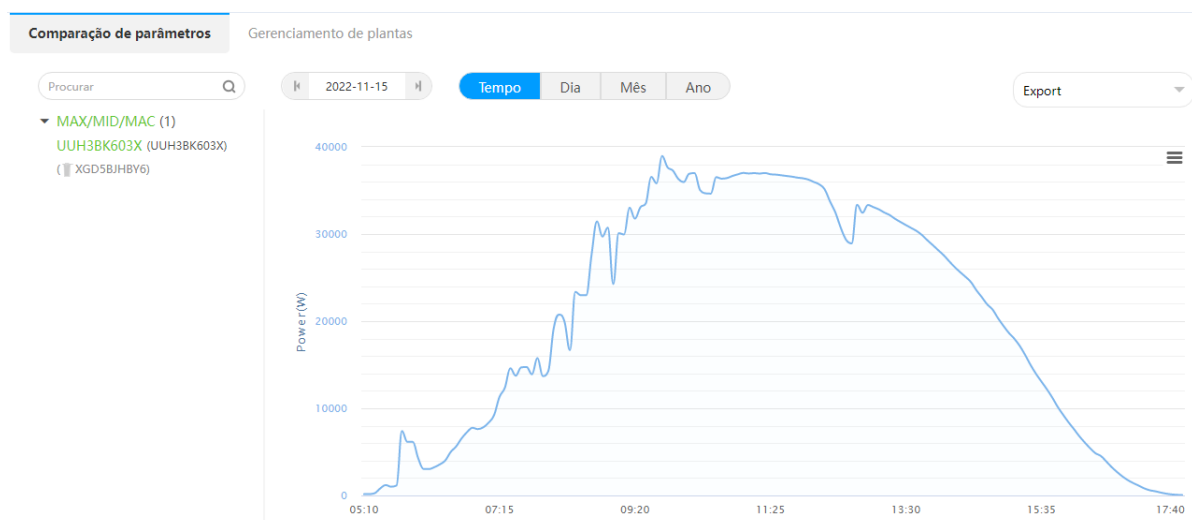
Fonte: PORTAL SOLAR (2017).

Na Figura 07, observa-se que apesar de um módulo FV ser acometido por sombreamento em um sistema com microinversores, este não reduzirá a eficiência de todos os outros módulos, já que é tratado individualmente.

2.4.6 Monitoramento remoto da geração de eletricidade

O monitoramento de um inversor permite, ao operador, no máximo, uma verificação dos parâmetros relacionados a uma *string*. O que impossibilita a identificação de uma falha em um módulo FV, por exemplo. Dessa forma, com toda a série de módulos FV afetada, e sem localizar o problema remotamente, necessita-se de uma aferição do problema, examinando a *string* localmente. A seguir, na Figura 08, há uma demonstração de monitoramento de um inversor de *string* da marca Growatt.

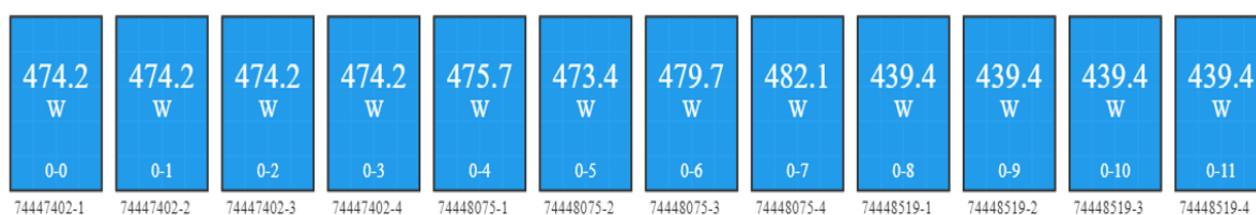
Figura 08 – Monitoramento remoto de um inversor tradicional.



Fonte: Portal de monitoramento da Growatt.

Na Figura 08, há um exemplo de monitoramento, em tempo real, da potência de um inversor de *string* com potência nominal de 36 kW. No canto superior esquerdo da Figura 08, em “Configurações de Parâmetros”, está descrito o número de série do equipamento, para que seja identificado. De outro modo, o monitoramento de um sistema com microinversor concede ao usuário a verificação individual de cada módulo FV, o que viabiliza a identificação do defeito ou falha, mais facilmente (CANAL SOLAR, 2021). Na Figura 09, tem-se um exemplo de monitoramento de um microinversor da marca Hoymiles.

Figura 09 – Monitoramento remoto por módulo FV de um sistema com microinversores.



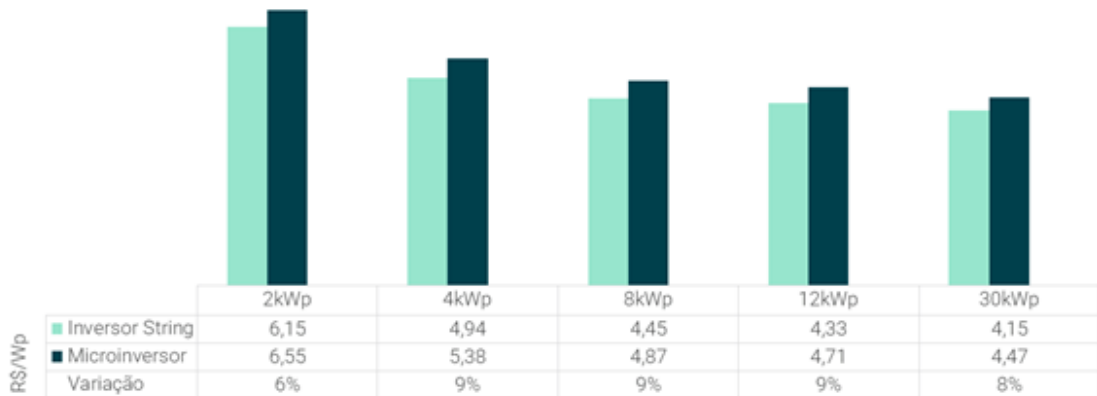
Fonte: Portal de monitoramento da Hoymiles.

É apresentado na Figura 09, um exemplo de monitoramento de um sistema com três microinversores, onde cada um possui quatro módulos FV conectados, mostrando a potência individual, em tempo real. Assim como, há o número de série para identificação, abaixo de cada ilustração de módulo FV. Dessa forma, caso algum módulo FV apresente qualquer comportamento anormal, será possível identificar o problema com mais eficiência, para que a manutenção seja melhor direcionada.

2.4.7 Custo para aquisição

Outro ponto importante é o custo inicial para a aquisição destes aparelhos. Apesar do microinversor apresentar algumas vantagens frente ao inversor de *string*, o seu custo inicial pode inviabilizar a sua aplicação. Comparando os custos das duas tecnologias, o custo para adquirir um inversor de *string*, com 10 anos de garantia, pode chegar a ser um terço do preço de um sistema com microinversor, com 25 anos de garantia (BENY, 2022). Em janeiro de 2022, a Greener Consultoria realizou uma pesquisa acerca dos preços dos microinversores e dos inversores de *string*, para algumas faixas de potência instalada, em kWp, conforme é mostrado na Figura 10.

Figura 10 – Comparação de preço por kWp de microinversores e inversores de *string*.



Fonte: GREENER (2022).

Nota-se na Figura 10, que o preço por Wp, em janeiro de 2022, para a aquisição de um sistema com microinversor, foi superior em todas as opções. Deixando perceptível que um sistema de 2 kWp, chega a ser 6% mais caro, com relação ao sistema com inversor de *string*, atingindo a uma variação de até 9%, para outras potências instaladas.

3 ESTADO DA ARTE

Neste presente capítulo, serão apresentados alguns trabalhos produzidos, comparando o desempenho de microinversores, em relação às instalações com inversores de *string*. Os autores, abaixo citados, enfatizaram as inúmeras formas de avaliação, entre essas duas tecnologias. Desde sistemas FV residenciais a grandes usinas. Algo em comum, que sempre estará presente nesses trabalhos, são as perdas por sombreamento. Mostrando, na maioria das vezes, que os microinversores são essenciais para evitar que a produção de eletricidade seja afetada por esse tipo de problema.

No estudo apresentado por Maia et al. (2017) foram verificados em dois locais com consumos diferentes, na cidade de Campo Grande/MS, os custos de implementação, referentes às estruturas de fixação, cabos, suportes, placas de sinalização, disjuntores, e outros componentes elétricos necessários para a instalação de um sistema de microgeração distribuída, com potência até 75 kW, com microinversor e com inversor multi-*string*. Foi constatado que para adquirir um microinversor nos dois locais analisados, o custo de implementação é maior do que instalando um inversor multi-*string*. Mais precisamente 17,5% a mais de investimento, no local com menor consumo e 7,3% no local com maior consumo, caso opte por microinversores. No entanto, os autores frisam que mesmo que o investimento inicial, para a instalação de um microinversor, seja alto, com a sua eficiência chegando até 25%, por ter um rastreamento do máximo ponto de potência individual, ainda assim, compensa o investimento.

Por outro lado, Chepp e Krenzinger (2018) analisaram a geração de eletricidade em uma instalação, utilizando inversor de *string* e microinversor, em dois dias distintos do ano. Foi realizada uma modelagem 3D para análise do sombreamento existente sobre o sistema. Observaram que no caso estudado, o ganho de energia obtido com microinversores, em relação a geração utilizando um inversor de *string*, foi somente de 1%. Dessa forma, o custo a mais, de quase 5 vezes o valor do sistema com inversor *string*, se torna maior do que o retorno com o pouco ganho, instalando microinversores. Segundo os autores, optar por microinversores, nesse caso, não é viável.

Assim como, no trabalho de Godoi et al. (2018), em uma análise, realizando uma mesma comparação, verificaram que o microinversor, em condições de sombreamento parcial, dispôs de uma produtividade energética de apenas 77,2%, com relação ao esperado. Não se obteve vantagens em grandes proporções, em situações com bastante influência de sombreamento parcial e de variação na irradiância. A produtividade do microinversor, com

relação ao inversor de *string* foi superior, em média, 4,36%, em situações sem sombreamento. Segundo os autores um valor bem abaixo do que se espera, de acordo com as informações do fabricante.

O objetivo do trabalho de Colodette (2019) foi a apresentação de um estudo comparativo, baseando-se, em termo anuais, de geração de eletricidade. A comparação foi realizada utilizando simulações computacionais. Realizando simulações com os dois sistemas, com microinversor e com inversor de *string*, sem sombreamento, a diferença média anual de geração foi desprezível, visto que foi somente 0,18% a mais para o microinversor. Por outro lado, em situações com a influência do sombreamento sobre os módulos FV, a diferença de geração entre as duas tecnologias, chegou a 2,08% a mais de produção para o microinversor, tendo a diferença média anual de 1,36%.

Já no artigo de Harb et al. (2013), os impactos de vários fatores foram analisados em um sistema FV residencial de 6 kW, utilizando as duas abordagens. Em seus resultados, em condições com sombreamento, o Custo Nivelado de Energia, ou LCOE (*Levelized Cost of Energy*), com uma cotação de US\$ 581, a menos, pôde ser alcançado mais rapidamente no sistema FV, no qual foram implantados microinversores. Uma vez que, obteve-se que o microinversor, em relação ao inversor de *string*, em situações com sombreamento intenso, gerou 14% a mais de eletricidade. Por outro lado, foi verificado que os custos para substituição do sistema FV com microinversores é uma opção menos econômica, em caso de falhas, chegando a ser \$ 620, a diferença a favor do sistema FV com inversor *string*.

Fernandes (2020) apresentou em seu trabalho uma análise de caso, comparando as duas tecnologias, na cidade de Uberlândia-MG. Verificou-se que o sistema com inversor de *string* obteve apenas a vantagem de ser 15% mais barato. Segundo o autor, o microinversor mesmo com valor inicial mais alto, de R\$ 26.990,00, promove bem mais benefícios, tais como maior vida útil, maior flexibilidade de instalação, entre outros. Apesar dos sistemas FV estudados possuírem mesma potência instalada, o sistema com microinversor, em termos anuais, gerou em torno de 11,8%, a mais de eletricidade, do que o sistema com inversor de *string*.

Gazis et al. (2013) realizaram um estudo em que foram comparados microinversores, conectados em cada módulo FV, com inversores tradicionais. A fim de verificar o desempenho de cada sistema FV foram realizadas simulações no software PVsyst. Foram verificados casos em que a porcentagem de sombreamento variou de 10% a 100%. Considerando uma influência parcial de sombreamento, os microinversores produziram a mais

de energia, 11,36%. Além disso, foram 1,94%, a mais, de energia em condições de sombreamento intenso. No entanto, em situações sem sombreamento o inversor de *string*, sobressaiu-se com uma geração, a mais que o microinversor, de 3,66%.

O índice de desempenho, ou PR (*Performance Ratio*), de um sistema FV é dimensionado considerando vários parâmetros, tais como sombreamento, perdas por temperatura, orientação, inclinação, entre outros. Desta forma, Lagarde et al. (2021) verificaram este índice em 200 instalações FV por todo o território francês, sendo 100 com inversores tradicionais e mais 100 microinversores. Observou-se que os índices de desempenho foram praticamente idênticos entres as duas tecnologias, em média, chegando a 79%. Mostrando que em uma visão mais geral de todo o território e sob às mesmas condições, os sistemas teriam uma média de desempenho semelhante.

Em um sistema FV de 3 kW conectada à rede, Tiwari, Pandey e Goswami (2021), realizaram um comparativo de desempenho, instalando tanto um inversor central como um microinversor. As duas instalações possuíam ângulos azimutal e de inclinação fixos. Os sistemas foram projetados realizando simulações computacionais. Segundo as simulações realizadas pelos autores, os microinversores obtiveram melhores resultados tanto em área sombreada como “não sombreada”. Considerando o primeiro ano de geração, sem sombreamento, a geração do microinversor foi 3,2% maior do que da outra instalação. Já com perdas por sombreamento, o microinversor obteve geração maior que o inversor de *string*, em 1,1%.

Famoso et al. (2015) realizaram experimentos, por quase um ano, para analisar a produção de eletricidade de sistemas FV prediais, com microinversores e com inversores de *string*, no sul da Itália. Assim como, no trabalho de Tiwari, Pandey e Goswami (2021), os microinversores tiveram maior um desempenho, chegando a produzir até 4,8%, a mais, de eletricidade, em regiões com ou sem influência de sombras. Houve a comparação de sistema FV não sombreados, com os dois tipos de equipamentos, considerando azimute e inclinação semelhantes. Mesmo assim, os microinversores potencializaram a geração de eletricidade, o que, segundo os autores, justifica o seu alto investimento.

Na cidade de Palmas-TO, Lopes et al. (2018) realizaram uma análise comparativa de desempenho, em um período de 30 (trinta) dias, entre um sistema FV com inversor de 3kW e um sistema FV com dois microinversores de 500W, cada. Os dois sistemas dispõem da mesma potência instalada, ou seja, 1,08 kWp. No dado período, o sistema FV com inversor de *string*

produziu 163,20 kWh/mês. Por outro lado, com uma produção de eletricidade de 170,50 kWh/mês, o sistema FV com microinversores teve um desempenho de 4,50% maior do que o sistema FV com inversor de *string*. Vale ressaltar que as condições de sombreamento eram as mesmas para as duas instalações.

Assim como, em Teresina-PI, Santos et al. (2022) compararam o desempenho de dois sistemas FV conectados à rede, com potências instaladas semelhantes. No primeiro sistema FV, com um inversor de *string* com potência instalada de 14,74 kWp, já no segundo sistema com oito microinversores com potência instalada de 13,60 kWp. Para realizar as análises de produtividade de cada sistema, também foi utilizado o *software* PVsyst. O desempenho dos dois sistemas atendeu ao que se esperava. Para a instalação com inversor de *string*, em que a unidade consumidora (UC) necessitava de 1800 kWh/mês, produziu-se 1871,06 kWh/mês, sem influência de sombreamento. Já para a instalação com microinversores, a UC precisava de 1700 kWh, mensais, e o sistema entregou 1706,67 kWh/mês, com sombreamento parcial causado por platibandas.

Oliveira (2019) buscou comparar o custo benefício entre microinversor e inversor de *string* ou *multistring*, levando em consideração a geração de energia elétrica para uma UC em Apucarana-PR. Considerou-se a Taxa Interna de Retorno (TIR), a fim de verificar a viabilidade econômica de cada sistema. A TIR para o sistema com microinversor, com geração de eletricidade média mensal de 1194 kWh/mês, foi de 8,52%. Comparando com a TIR do sistema com inversor de *string*, 9,44%, a diferença do tempo de retorno, chega a ser quase um ano de diferença, sendo de 6 a 7 anos para o inversor de *string*, com geração de eletricidade média mensal de 1224,5 kWh/mês, e de 7 a 8 anos para a instalação com microinversores. Dessa forma, segundo o autor, de acordo com os dados expostos, o sistema com inversor de *string*, torna-se mais atrativo, financeiramente.

Semelhante à Oliveira (2019), Melo, Freitas e Melo (2020) realizaram um estudo do impacto no tempo de retorno dos dois tipos de tecnologia para geradores de pequeno porte. Os resultados de produtividade energética foram obtidos por meio do *software* PVsyst, em um cenário com sombreamento parcial. Em uma UC com 4.320 kWh/ano de consumo, a TIR para o sistema com inversor de *string* foi de 10,7%, e para o sistema com microinversores foi de 10%. Dessa forma, o tempo de retorno do investimento ficou em torno de 10 anos para as duas situações. Por outro lado, em uma UC com consumo de 15.600 kWh/ano, se teve um tempo de retorno do investimento mais breve, em torno de 4 anos, para o sistema com inversor de *string*, cuja TIR foi de 36,3%. Já para o sistema com microinversores, com uma TIR de 26,6%, o tempo

de retorno do investimento ficou, aproximadamente, de 5 anos.

Logo, verifica-se que a tecnologia MLPE (*Module-Level Power Electronics*), que significa, em tradução para o português, Eletrônica de Potência em Nível de Módulo, presente nos microinversores, contribui bastante para o seu desempenho, pois consiste na produção individualizada de eletricidade, em que cada módulo FV trabalha de forma independente, não tendo ligação à produção dos outros módulos FV do sistema. No entanto, nem sempre será uma opção mais viável, economicamente, frente aos sistemas com inversor de *string*, muitas vezes pelo fato de ser um equipamento com custo inicial mais alto. Segundo Maia et al. (2017) o custo de um sistema FV com microinversores chega a ser 17,5% mais caro que uma instalação com inversor de *string*.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

A metodologia adotada será por meio de experimentos, utilizando ferramentas computacionais e dados reais, como localização e dados climáticos. A fim de realizar o comparativo de desempenho entre as duas tecnologias abordadas nesse trabalho, em um mesmo ambiente. Por fim, será avaliada a questão financeira e a melhor solução a ser adotada.

Os dados computacionais foram obtidos por meio do software *PVsys* 7.2 (versão de teste disponível por 30 dias), o qual é uma poderosa ferramenta, reconhecida mundialmente, para dimensionamento de sistemas FV, cujos dados de equipamentos e dados meteorológicos utilizados, estão em conformidade com os valores reais. A meteorologia aplicada aos sistemas, é resultado dos dados fornecidos pelo software *Meteonorm* 8.0, já presente no *PVsys*.

4.1 Sistema FV analisado

O sistema FV estudado está instalado em uma UC comercial, localizada no bairro Centro na cidade de Fortaleza-CE. Na Figura 11, está uma foto real da instalação.

Figura 11 – Módulos FV instalados no telhado do sistema analisado.



Fonte: Próprio Autor.

De acordo com a Figura 11, é possível verificar alguns pontos em que podem surgir sombreamento sobre os módulos, devido ao desnível entre as paredes e telhados vizinhos. Na Tabela 01, estão listadas as características dos inversores de *string*, já existentes.

Tabela 01 – Principais Especificações dos Inversores de String da marca Growatt.

Especificações	MID 15KTL3-X	MID 20KTL3-X
Entrada		
Máx. Potência CC (kW)	22,50	33
Máx. Tensão de Entrada CC (Vcc)	1100	
Número de MPPTs / Número de Entradas CC	2 / 4	
Faixa de Tensão de MPPT (Vcc)	180 - 1000	
Máx. Corrente de Entrada por MPPT (A)	25	
Máx. Corrente de Curto-Circuito por MPPT Isc (A)	32	
Saída		
Potência Nominal de Saída CA (kW)	15	20
Máx. Potência de Saída CA (kW)	16,6	22
Tensão Nominal de Saída (Vca)	230-380	
Tipo de Conexão da Rede	Trifásica (3F-N-P)	
Máx. Corrente de Saída (A)	24,2	31,90
Frequência Nominal de Saída (Hz)	50/60	
Máx. Eficiência	98,80%	

Fonte: GROWATT, 2021.

Por outro lado, na Tabela 02, tem-se as principais especificações dos microinversores selecionados, para substituir os inversores de *string*, e realizar a comparação de desempenho.

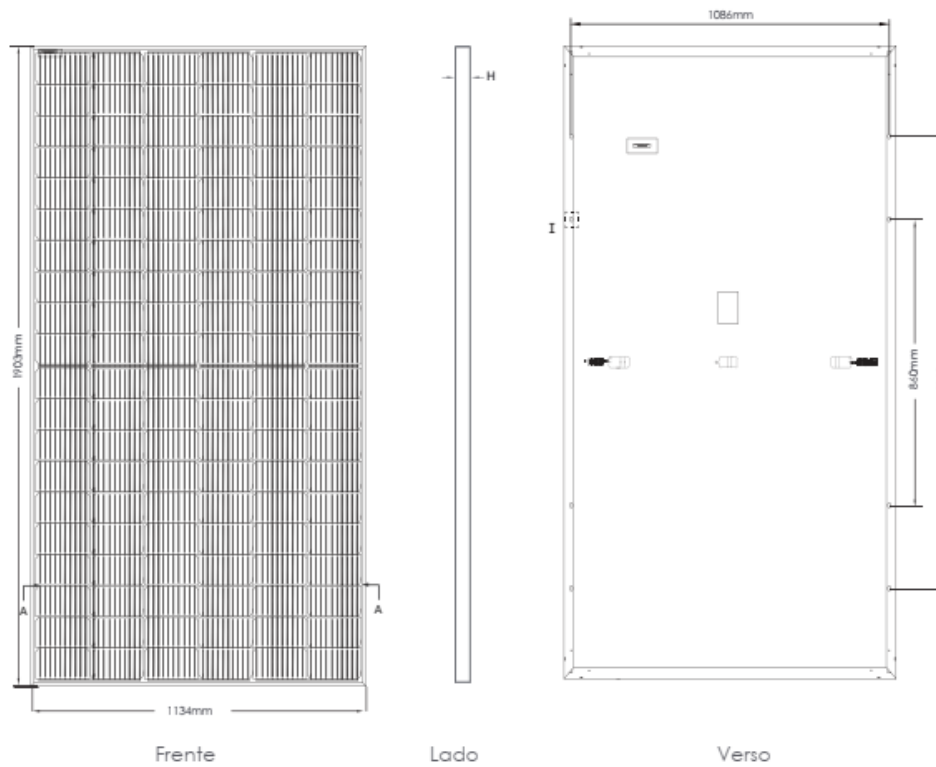
Tabela 02 – Principais Especificações dos Microinversores da marca Hoymiles.

Especificações	HMS-1800-4T
Entrada	
Máx. Tensão de Entrada CC (Vcc)	65
Número de MPPTs / Número de Entradas CC	4 / 4
Faixa de Tensão de MPPT (Vcc)	16 - 60
Máx. Corrente de Entrada por MPPT (A)	13,3
Máx. Corrente de Curto-Circuito por MPPT Isc (A)	20
Saída	
Potência Nominal de Saída CA (W)	1800
Tensão Nominal de Saída (Vca)	220/180-275
Tipo de Conexão da Rede	Monofásica (1F-N-P)
Máx. Corrente de Saída (A)	8,18
Frequência Nominal de Saída (Hz)	50/60
Máx. de Unidades por Ramo	3
Máx. Eficiência	96,5%

Fonte: HOYMILES, 2021.

O módulo FV, já existente na instalação, mostrado na Figura 12, será utilizado tanto no sistema com inversor de *string* quanto no sistema com microinversores, nas simulações computacionais no PVsyst.

Figura 12 – Módulos FV utilizado da marca JINKO SOLAR.



Fonte: JINKO SOLAR, 2021.

Logo, as informações dos parâmetros do módulo FV, estão apresentadas na Tabela 03.

Tabela 03 – Principais Especificações do Módulo FV da marca JINKO SOLAR.

Especificações	JKM460M-60HL4-V
Potência nominal (W)	460
Tensão de circuito aberto Voc (V)	41,48
Corrente de curto-circuito Isc (A)	14,01
Tensão de máxima potência Vmp (V)	34,20
Corrente de máxima potência Imp (A)	13,45
Eficiência (%)	21,32
Irradiância de referência (W/m ²)	1000
Temperatura de referência (°C)	25
Massa (kg)	24,20
Comprimento (m)	1,903
Largura (m)	1,134
Altura (m)	0,030

Fonte: JINKO SOLAR, 2021.

4.2 Simulação no PVsyst

Primeiramente, realizou-se uma modelagem 3D do local da instalação para uma melhor avaliação do espaço, utilizando a versão de teste do software Sketchup Pro 2021. Este método foi muito importante para análise dos espaços em que o sistema FV sofre, em algum período do ano, perdas na geração de eletricidade por conta de sombreamento. Na Figura 13, tem-se o resultado da análise 3D.

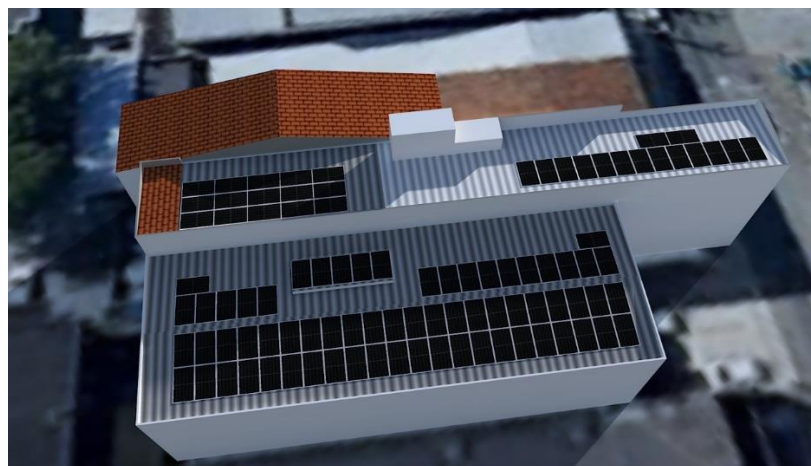
Figura 13 – Modelagem 3D do sistema FV.



Fonte: Próprio Autor.

Com o auxílio do software Sketchup Pro 2021, é possível investigar o sombreamento sobre a superfície do objeto, de acordo com o seu fuso horário. Assim, verificou-se o pior cenário de sombreamento no telhado analisado, como mostrado na Figura 14.

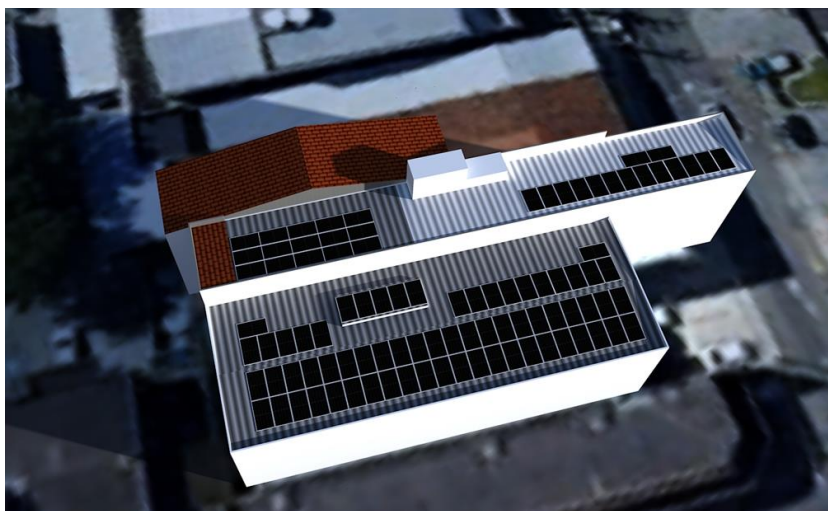
Figura 14 – Sombreamento sobre o sistema FV no meio do ano.



Fonte: Próprio Autor.

A condição de sombreamento, mostrada na Figura 14, foi perceptível durante o dia 11 de julho, até às 10h00 da manhã. Espera-se que o sistema FV sofra bastante perda na sua produção até o horário informado, principalmente considerando os arranjos FV instalados no telhado inferior. A fim de realizar uma comparação em um intervalo de 6 meses, é necessário analisar a Figura 15.

Figura 15 – Sombreamento sobre o sistema FV no início do ano.

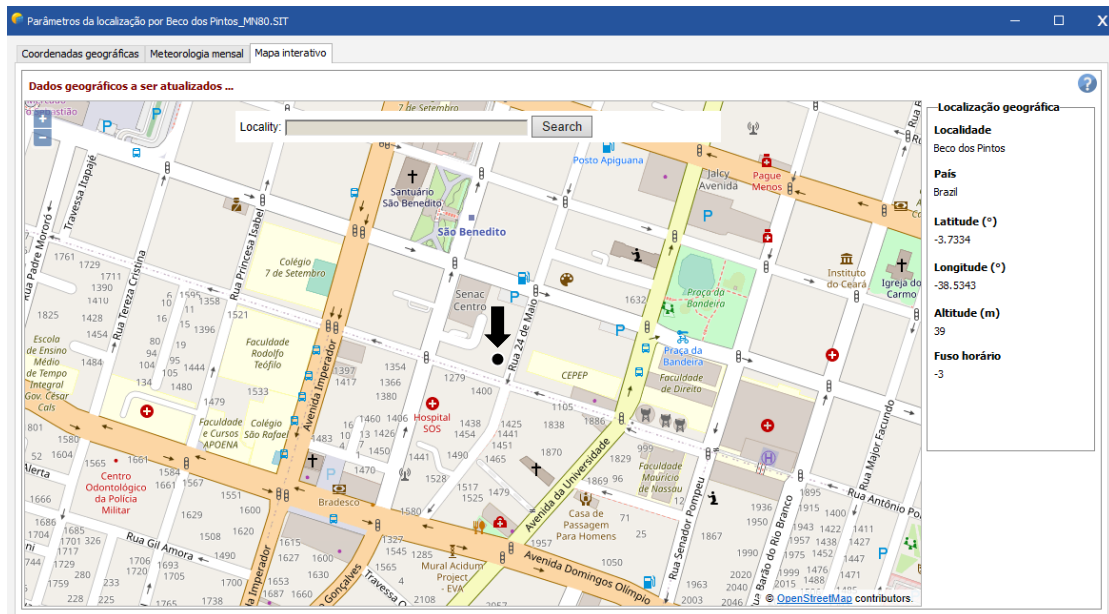


Fonte: Próprio Autor.

Na Figura 15, são mostradas as regiões afetadas por sombreamento, por volta das 09h00 da manhã, no dia 11 de janeiro, devido às platibandas da edificação, tanto na parte superior quanto inferior do telhado. Dessa forma, o sombreamento no início do ano, se encerra uma hora antes do cenário visto na Figura 14.

No PVsyst, com a localização da planta FV obteve-se as suas coordenadas geográficas em graus decimais: -3.733400, -38.534300. Na Figura 16, é mostrada a localização exata do sistema FV, encontrada no próprio software.

Figura 16 – Localização do sistema FV.



Fonte: PVsyst 7.2.

Dessa forma, foram geradas as informações meteorológicas do local, tais como irradiação horizontal total, irradiação difusa horizontal, temperatura ambiente, velocidade do vento, fator de turbidez de Linke e humidade relativa. Na Figura 17, são apresentados os dados gerados, utilizando o *Meteonorm 8.0*.

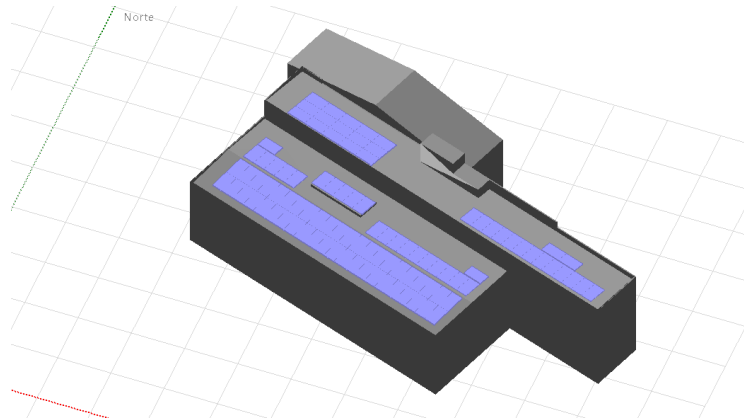
Figura 17 – Dados meteorológicos obtidos com Meteonorm 8.0.

Parâmetros da localização por Bico dos Pintos_MN80.SIT						
Coordenadas geográficas Meteorologia mensal Mapa interativo						
Localização Bico dos Pintos (Brasil)						
Fonte dos dados Meteonorm 8.0 (2009-2017), Sat=100%						
	Irradiação horizontal total	Irradiação difusa horizontal	Temperatura	Velocidade do vento	Turvação de Linke	Humidade relativa
	kWh/m ² /mês	kWh/m ² /mês	°C	m/s	[-]	%
Janeiro	172.2	82.1	27.5	4.40	3.683	75.8
Fevereiro	139.6	76.8	27.4	3.90	3.630	78.8
Março	163.0	74.7	27.3	3.40	3.737	79.9
Abril	145.4	77.6	26.7	3.30	3.478	82.7
Maio	150.2	74.0	27.2	3.80	3.388	79.2
Junho	145.3	62.1	26.4	4.20	3.743	78.0
Julho	157.5	66.4	26.6	4.70	3.275	73.5
Agosto	177.8	73.8	26.8	5.50	3.452	70.0
Setembro	177.8	70.4	26.7	6.00	3.780	70.6
Outubro	190.5	83.9	27.4	6.00	4.070	69.7
Novembro	192.1	72.7	27.2	5.70	3.966	71.9
Dezembro	182.4	77.9	27.8	5.19	3.801	72.1
Ano	1993.8	892.4	27.1	4.7	3.667	75.2

Fonte: PVsyst 7.2.

Com as coordenadas do sistema definidas, de acordo com o banco de dados do *Meteornorm* 8.0, a irradiação horizontal total, é em torno de 1994 kWh/m²/ano. Por outro lado, importando a modelagem 3D do Sketchup Pro 2021, realizou-se a distribuição dos módulos FV no telhado, no próprio PVsyst, para que seja executada a simulação. O resultado está apresentado, na Figura 18.

Figura 18 – Distribuição dos módulos FV no PVsyst.



Fonte: Próprio autor, utilizando o PVsyst.

4.2.1 Sistema FV com Inversor de String

O sistema FV com inversor de *string* contou com 2 (dois) inversores trifásicos da marca Growatt de 15 kW e de 20 kW, alimentados com a corrente contínua advinda de 96 (noventa e seis) módulos FV da marca Jinko Solar, dispostos em 3 (três) orientações e 2 (duas) inclinações. Totalizando uma potência instalada de 44,20 kWp, como mostrado na Figura 19.

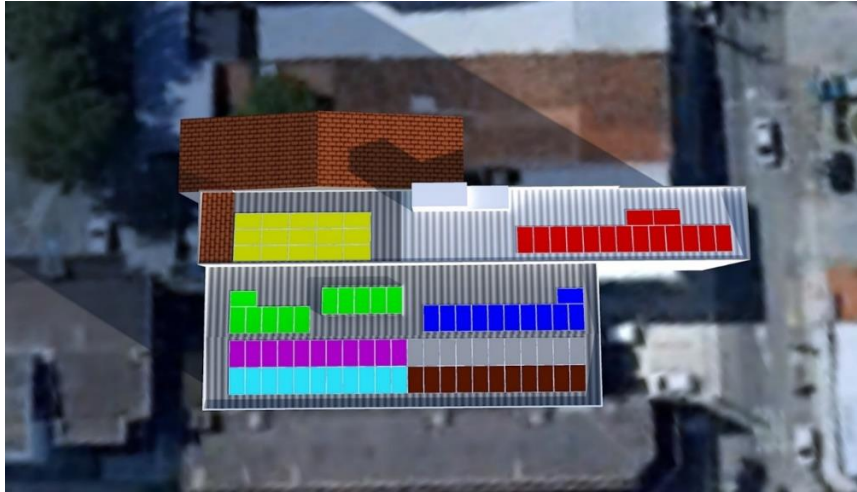
Figura 19 – Resumo do sistema com inversor de string apresentado no relatório do PVsyst.

Resumo do projeto			
Localização geográfica Beco dos Pintos Brasil	Localização Latitude -3.73 °S Longitude -38.53 °W Altitude 39 m Fuso horário UTC-3	Parâmetros projeto Albedo 0.20	
Dados meteorológicos Beco dos Pintos Meteornorm 8.0 (2009-2017), Sat=100% - Synthetic			
Resumo do sistema			
Sistema acoplado à rede Simulação para o ano nº 1	Sistema instalado num edifício	Exigências do consumidor Carga ilimitada (rede)	
Orientação do plano dos módulos Planos fixos 3 orientações Inclin/azimutes 5 / -19 ° 3 / -19 ° 3 / 161 °	Sombras próximas Cálculo elétrico detalhado segundo disp. módulos		
Informação do sistema Grupo FV		Inversores	
Número de módulos	96 unidades	Número de unidades	2 unidades
Pnom total	44.2 kWp	Pnom total	35.0 kWca
		Rácio Pnom	1.262

Fonte: Próprio autor, utilizando o PVsyst

Na Figura 20, está exposta a distribuição dos módulos FV em cada entrada CC do inversor. Cada cor é destinada a uma *string* dos inversores FV.

Figura 20 – Distribuição dos módulos FV por string.



Fonte: Próprio Autor

Para uma melhor percepção da distribuição dos módulos FV por inversor, foi elaborada a Tabela 04:

Tabela 04 – Distribuição dos módulos FV por inversor.

Duas séries fotovoltaicas com 15 módulos FV	Amarelo/Vermelho	MPPT1	MID 20KTL3-X
Duas séries fotovoltaicas com 11 módulos FV	Verde/Azul	MPPT2	
Duas séries fotovoltaicas com 11 módulos FV	Roxo/Cinza	MPPT1	MID 15KTL3-X
Duas séries fotovoltaicas com 11 módulos FV	Turquesa/Marrom	MPPT2	

Fonte: Próprio Autor

4.2.2 Sistema FV com Microinversores

Assim como no sistema com inversor de *string*, a mesma quantidade de módulos FV está disposta em 3 (três) orientações e conectados em 24 (vinte e quatro) microinversores da marca Hoymiles de 1,80 kW. Como está mostrado na Figura 21:

Figura 21 - Resumo do sistema com microinversor apresentado no relatório do PVsyst.

Resumo do projeto			
Localização geográfica	Localização	Parâmetros projeto	
Beco dos Pintos	Latitude	-3.73 °S	Albedo
Brasil	Longitude	-38.53 °W	0.20
	Altitude	39 m	
	Fuso horário	UTC-3	
Dados meteorológicos			
Beco dos Pintos			
Meteonorm 8.0 (2009-2017), Sat=100% - Synthetic			
Resumo do sistema			
Sistema acoplado à rede		Sistema instalado num edifício	
Simulação para o ano n° 1			
Orientação do plano dos módulos		Sombras próximas	Exigências do consumidor
Planos fixos	3 orientações	Cálculo elétrico detalhado	Carga ilimitada (rede)
Inclin/azimutes	5 / -19 °	segundo disp. módulos	
	3 / -19 °		
	3 / 161 °		
Informação do sistema		Inversores	
Grupo FV		Número de unidades	24 unidades
Número de módulos	96 unidades	Pnom total	43.2 kWca
Pnom total	44.2 kWp	Rácio Pnom	1.022

Fonte: Próprio autor, utilizando o PVsyst.

Por outro lado, ao invés de ter uma série de módulos FV conectados em cada entrada CC do inversor, como no caso do inversor de *string*, com o microinversor, em cada uma das quatro entradas CC, possui um módulo FV trabalhando de maneira independente. Dessa forma, verifica-se na Figura 22 a grande variedade de cores, como demonstração da divisão do sistema FV.

Figura 22 - Distribuição dos módulos FV por MPPT dos microinversores.



Fonte: Próprio Autor.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A fim de avaliar o desempenho do gerador FV, com as duas tecnologias, serão utilizados alguns indicadores como parâmetro comparativo. Um desses indicadores é o referente ao rendimento final, representado pela sigla Y_f (*Final Yield*) (LIMA; GONÇALVES, 2018). É dado pela Equação 1:

$$Y_f = \frac{E_p \text{ [kWh]}}{P_{pico} \text{ [kWp]}} \quad (1)$$

Em que E_p refere-se a eletricidade produzida, em um determinado período. P_{pico} é a potência de pico instalada do sistema FV. Outro indicador é o rendimento de referência, Y_r (*Reference Yield*). Que é dado pela divisão entre a irradiância solar incidente no plano do módulo FV (H_i) e a irradiância global incidente no plano horizontal (I_{gph}) igual a 1000 W/m². É expresso pela Equação 2:

$$Y_r = \frac{H_i \text{ } \left[\frac{\text{kWh}}{\text{m}^2} \right]}{I_{gph} \text{ } \left[\frac{\text{kW}}{\text{m}^2} \right]} \quad (2)$$

Assim como, tem-se a taxa de desempenho, ou *Performance Ratio* (PR), dada pela divisão entre o rendimento final (Y_f) e o rendimento de referência (Y_r). Como está na Equação 3:

$$PR = \frac{Y_f}{Y_r} \quad (3)$$

Por fim, também se considera o fator de capacidade (FC) - Eq. (4). Este indicador apresenta a relação entre o que o sistema FV produziu e o que poderia ter produzido em operação com potência nominal, em 100% do tempo (LIMA; GONÇALVES, 2018).

$$FC \text{ (\%)} = \frac{E_p}{P_{pico} \times 24 \times D} \times 100 \quad (4)$$

Em que D se refere a quantidade de dias do período que está sendo analisado. A partir do banco de dados do *Meteonorm 8.0*, obteve-se a irradiação horizontal total, medida em

kWh/m², de acordo com o local da instalação, no Centro de Fortaleza-CE, considerando resultados medidos até 2017. Conforme a Tabela 05.

Tabela 05 – Irradiação Horizontal Total do local da instalação.

Mês	GlobHor(kWh/m ²)
Jan	172,2
Fev	139,6
Mar	163,0
Abr	145,4
Mai	150,2
Jun	145,3
Jul	157,5
Ago	177,8
Set	177,8
Out	190,5
Nov	192,1
Dez	182,4
Ano	1993,9

Fonte: PVsyst 7.2.

De acordo com os resultados apresentados na Tabela 05, o mês, com maior taxa de irradiação incidente numa superfície horizontal, foi novembro com 192,1 kWh/m². Anualmente, somando a irradiação de todos os meses, o local da instalação possui uma irradiação de 1993,9 kWh/m².

No dimensionamento de uma usina FV, deve-se considerar todos os tipos de perdas que irão afetar a sua produtividade, tais como, degradação dos módulos, temperatura, sombreamento, *mismatch* (diferença de eletricidade produzida por dois ou mais módulos FV em uma mesma série FV), perdas ôhmicas CC e CA. Nas Tabelas 06 e 07, estão apresentadas as perdas obtidas, nos sistemas com microinversores e inversores de *string*, respectivamente, por meio da simulação no PVsyst, de ano em ano, durante 10 (dez) anos.

Tabela 06 – Perdas obtidas na simulação da usina FV com microinversor, em %.

Ano	Degradação do módulo	Temperatura	Sombreamento	Mismatch	Perdas Ôhmicas CC	Perdas Ôhmicas CA	Eficiência do Inversor
1	-0,20	-9,58	-0,38	-0,10	0,00	-0,89	-3,84
2	-0,60	-9,58	-0,38	-0,10	0,00	-0,89	-3,84
3	-1,00	-9,58	-0,38	-0,10	0,00	-0,89	-3,84
4	-1,40	-9,58	-0,38	-0,10	0,00	-0,88	-3,84
5	-1,80	-9,58	-0,38	-0,13	0,00	-0,88	-3,84
6	-2,20	-9,58	-0,38	-0,17	0,00	-0,88	-3,83
7	-2,60	-9,58	-0,38	-0,23	0,00	-0,87	-3,83
8	-3,00	-9,58	-0,38	-0,30	0,00	-0,87	-3,83
9	-3,40	-9,57	-0,38	-0,39	0,00	-0,86	-3,83
10	-3,80	-9,57	-0,38	-0,51	0,00	-0,86	-3,83

Fonte: PVsyst 7.2.

De acordo com a Tabela 06, que mostra as principais perdas que afetam a eficiência do sistema FV com microinversores, nota-se que, idealmente, as perdas por temperatura e sombreamento, não sofreram variações, assim como, as perdas ôhmicas CA e CC e perdas de eficiência do inversor que permaneceram constantes, durante os 10 (dez) anos simulados. As perdas ôhmicas CC são iguais a zero, uma vez que o cabeamento CC não há comprimentos relevantes, pois, os módulos FV estão bem próximos aos microinversores. Por outro lado, o PVsyst considera que há 0,2% de perda por degradação dos módulos FV, no primeiro ano, aumentando 0,4% a cada ano, chegando a 3,80% no décimo ano de funcionamento. Assim como, as perdas por *mismatch*, que se mantiveram por 0,1% até o quarto ano, e devido à degradação dos módulos FV foi aumentando, chegando a 0,51% no décimo ano, porém ainda sem muita relevância no resultado geral. Nesse caso, a degradação dos módulos FV impacta nas perdas por *mismatch*, em função da deterioração, ao longo dos anos, das células FV que compõem os módulos FV. A deterioração das células FV pode ser causada, por exemplo, por formação de pontos quentes (*hotspots*), por efeito de sombreamento (DANTAS; GUERRA; NASCIMENTO, 2021).

Tabela 07 – Perdas obtidas na simulação da usina FV com inversor de string, em %.

Ano	Degradação do módulo	Temperatura	Sombreamento	Mismatch	Perdas Ôhmicas CC	Perdas Ôhmicas CA	Eficiência do Inversor
1	-0,20	-9,58	-0,69	-2,10	-1,25	-1,05	-1,36
2	-0,60	-9,58	-0,69	-2,10	-1,25	-1,05	-1,36
3	-1,00	-9,58	-0,69	-2,10	-1,25	-1,04	-1,36
4	-1,40	-9,58	-0,69	-2,18	-1,25	-1,04	-1,36
5	-1,80	-9,58	-0,69	-2,31	-1,25	-1,03	-1,36
6	-2,20	-9,58	-0,69	-2,51	-1,25	-1,03	-1,36
7	-2,60	-9,58	-0,69	-2,79	-1,25	-1,02	-1,36
8	-3,00	-9,58	-0,69	-3,08	-1,25	-1,01	-1,36
9	-3,40	-9,57	-0,70	-3,38	-1,25	-1,01	-1,36
10	-3,80	-9,57	-0,70	-3,66	-1,25	-1,00	-1,36

Fonte: Fonte: PVsyst 7.2.

Percebe-se que assim como no sistema com microinversor, as perdas por temperatura, sombreamento, perdas ôhmicas CA e CC e perdas de eficiência do inversor, permaneceram constantes, com as perdas referentes à degradação dos módulos FV, chegando a 3,80% no décimo ano. As perdas por *mismatch*, foram maiores do que as que afetam o microinversor, devido à maior quantidade de módulos FV em uma série FV, chegando a 3,66% no décimo ano, assim como as perdas ôhmicas CC foram maiores, com 1,25%. Com relação ao sombreamento, o sistema com inversor de *string*, perdeu, em geração de eletricidade, 0,70%, ou seja, quase o dobro de eletricidade perdida com o sistema FV com microinversor, que chegou a 0,38%. Percebe-se também uma menor perda de eficiência do inversor de *string*, uma vez que os microinversores, podem ter sua geração de eletricidade reduzida de 3,5% a 5% em função das perdas em forma de calor, visto que o microinversor por estar mais exposto às condições climáticas, sofre com elevadas temperaturas (HCC ENERGIA SOLAR, 2022).

Os resultados de geração de eletricidade, taxa de desempenho, rendimento final e fator de capacidade, no primeiro ano de simulação, estão expostos nas Tabelas 08 e 09, considerando os sistemas FV com microinversores e inversores de *string*, respectivamente.

Tabela 08 – Geração mensal obtida no primeiro ano de simulação com microinversor.

Mês	Egerada (kWh)	PR	Yf (kWh/kWp)	FC (%)
Jan	6039	0,798	136,75	18,38
Fev	4912	0,799	111,23	14,95
Mar	5698	0,792	129,03	17,34
Abr	5131	0,797	116,19	15,62
Mai	5269	0,791	119,32	16,04
Jun	5092	0,788	115,31	15,50
Jul	5516	0,788	124,91	16,79
Ago	6265	0,795	141,87	19,07
Set	6235	0,793	141,19	18,98
Out	6697	0,797	151,65	20,38
Nov	6739	0,798	152,60	20,51
Dez	6395	0,799	144,81	19,46
Média	5832	0,795	132,07	17,75

Fonte: PVsyst 7.2.

De acordo com a Tabela 08, no primeiro ano de simulação, o sistema FV com microinversores, obteve-se uma maior geração de eletricidade, conseqüentemente, um melhor rendimento final e um melhor fator de capacidade, no mês de novembro. No entanto, a sua taxa de desempenho foi superior nos meses de fevereiro e de dezembro, visto que para estes determinados meses, a geração de eletricidade do sistema FV aproximou-se mais do máximo de geração esperado, para este período.

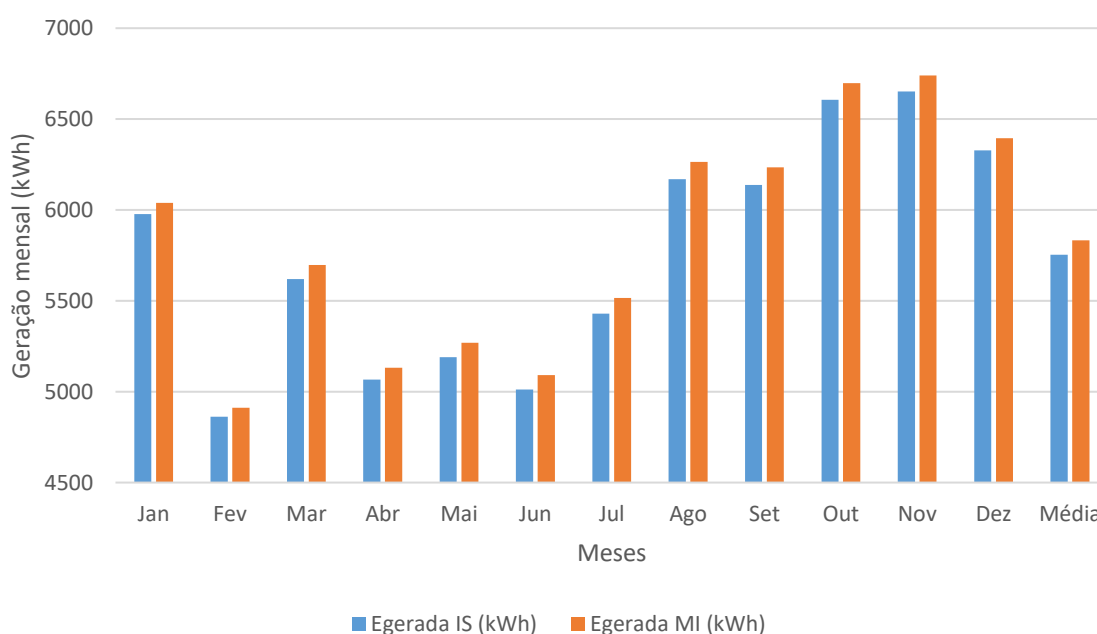
Tabela 09 – Geração mensal obtida no primeiro ano de simulação com inversor de string.

Mês	Egerada (kWh)	PR	Yf (kWh/kWp)	FC (%)
Jan	5977	0,790	135,35	18,19
Fev	4863	0,791	110,12	14,80
Mar	5620	0,781	127,26	17,11
Abr	5066	0,787	114,72	15,42
Mai	5190	0,779	117,53	15,80
Jun	5012	0,776	113,50	15,25
Jul	5430	0,776	122,96	16,53
Ago	6170	0,783	139,72	18,78
Set	6138	0,781	138,99	18,68
Out	6606	0,787	149,59	20,11
Nov	6651	0,787	150,61	20,24
Dez	6328	0,790	143,30	19,26
Média	5754	0,784	130,30	17,51

Fonte: PVsyst 7.2

É perceptível que na Tabela 09, no primeiro ano de simulação, o sistema FV com inversores de *string* atingiu uma maior geração de eletricidade, conseqüentemente, um melhor rendimento final e um melhor fator de capacidade, no mês de novembro, assim como no sistema FV com microinversores. Por outro lado, a sua taxa de desempenho foi superior no mês de fevereiro. A fim de realizar uma análise comparativa mais visual, da produção de eletricidade obtida pelas duas tecnologias estudadas, projetou-se o Gráfico 01.

Gráfico 01 – Comparativo de geração mensal entre microinversor e inversor de string obtida no primeiro ano de simulação.



Fonte: PVsyst 7.2.

De acordo com a Gráfico 01, percebe-se que os níveis de geração foram proporcionais ao longo dos meses, para os dois equipamentos, contando com uma pequena vantagem do microinversor. Esta superioridade do microinversor, com relação ao inversor de *string*, foi mais expressiva no mês de junho, em que o primeiro equipamento gerou 1,60% a mais que o seu concorrente. A menor diferença foi obtida em fevereiro, em que a vantagem do microinversor foi de, somente, 1,01%. Ademais, a taxa de desempenho do sistema FV com inversor de *string*, foi 1,52% menor do que com microinversores, nos meses de junho e de julho. Simulou-se os sistemas FV ao longo de 10 (dez) anos, e foram analisados os indicadores de desempenho de cada ano. Na Tabela 10, estão apresentados os resultados obtidos na simulação do sistema com microinversor.

Tabela 10 – Geração anual obtida na simulação com microinversor.

Ano	Egerada (kWh/ano)	PR	Yf (kWh/kWp/ano)	FC (%)
1	69989	0,795	1584,90	18,09
2	69713	0,792	1578,65	18,02
3	69437	0,789	1572,40	17,95
4	69165	0,785	1566,24	17,88
5	68866	0,782	1559,47	17,80
6	68560	0,779	1552,54	17,72
7	68248	0,775	1545,47	17,64
8	67923	0,771	1538,11	17,56
9	67584	0,767	1530,43	17,47
10	67229	0,763	1522,40	17,38
Média	68671	0,780	1555,06	17,75

Fonte: PVsyst 7.2.

Nota-se, na Tabela 10, que, como esperado, a geração de eletricidade veio decaindo ao longo dos anos. Mais precisamente, no décimo ano de funcionamento, o sistema obteve um desempenho de 3,94% menor que no primeiro ano. Já na Tabela 11, estão os dados obtidos no sistema com inversor de *string*.

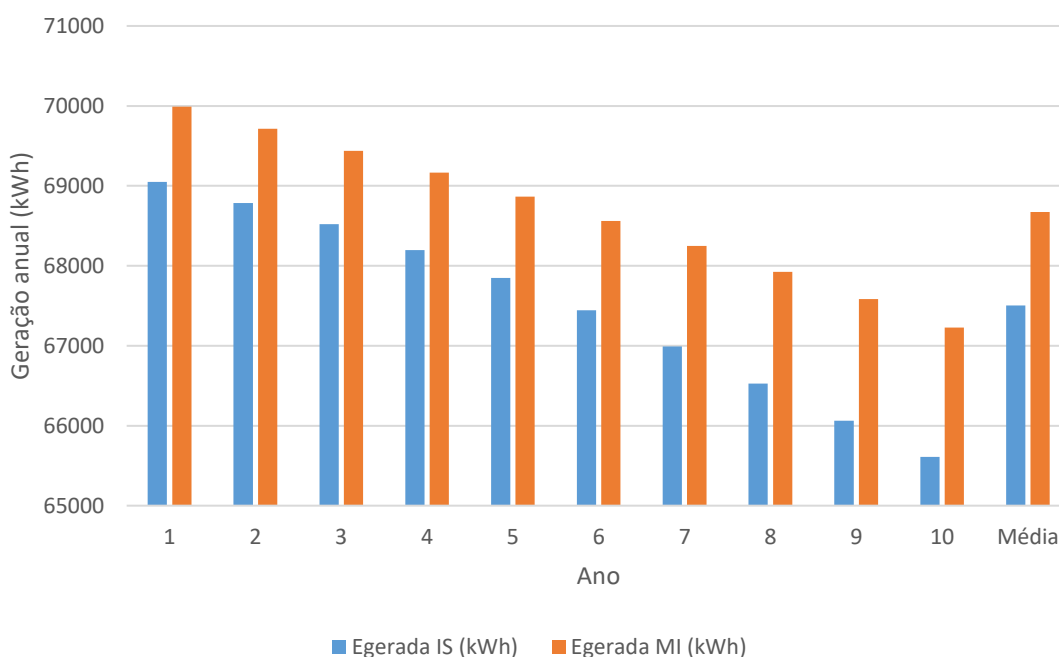
Tabela 11 – Geração anual obtida na simulação com inversor de string.

Ano	Egerada (kWh/ano)	PR	Yf (kWh/kWp/ano)	FC (%)
1	69048	0,784	1563,59	17,85
2	68784	0,781	1557,61	17,78
3	68519	0,778	1551,61	17,71
4	68198	0,774	1544,34	17,63
5	67847	0,770	1536,39	17,54
6	67443	0,766	1527,24	17,43
7	66991	0,761	1517,01	17,32
8	66527	0,755	1506,50	17,20
9	66062	0,750	1495,97	17,08
10	65608	0,745	1485,69	16,96
Média	67503	0,766	1528,59	17,45

Fonte: PVsyst 7.2.

Nesse caso, de acordo com a Tabela 11, no décimo ano de geração, houve uma redução de 4,98% com relação à geração no primeiro ano. Para realizar um comparativo visual da geração de eletricidade com os dois equipamentos, ao longo de 10 (dez) anos, se construiu o Gráfico 02.

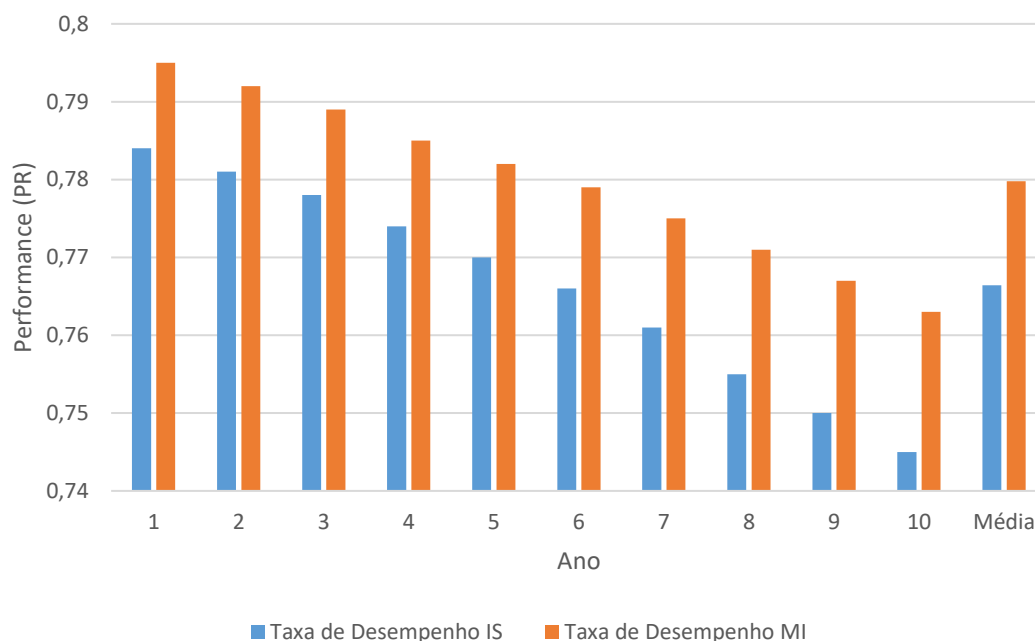
Gráfico 02 – Comparativo de geração anual entre microinversor e inversor de string durante 10 (dez) anos de simulação.



Fonte: PVsyst 7.2.

Analisando o Gráfico 02, constata-se que a menor diferença, em porcentagem, em que o sistema com microinversor se sobressai com relação ao sistema com inversor de *string*, é obtida no terceiro ano, com uma geração de eletricidade 1,34% maior. A diferença mais relevante encontra-se no décimo ano, em que a geração do sistema com microinversor foi 2,47% maior. Investigou-se, também, um comparativo da taxa de desempenho de cada equipamento, como mostrado no Gráfico 03.

Gráfico 03 – Comparativo de taxa de desempenho entre microinversor e inversor de string durante 10 (dez) anos de simulação.



Fonte: PVsyst 7.2.

No Gráfico 03, é perceptível um maior desempenho do sistema com microinversor. No ano 10 (dez), a taxa de desempenho do inversor de *string* reduziu, cerca de 4,97%, enquanto a instalação com microinversor ficou com 4,03% menor, comparando ao primeiro ano. Dessa forma, o sistema com o segundo equipamento ficou mais próximo, do que se esperava, apesar da presença de sombreamento na instalação. No décimo ano, a diferença, em porcentagem, do desempenho entre as duas tecnologias, chegou a 2,42% a mais para o microinversor.

Diante disto, elaborou-se cotações dos materiais e dos equipamentos para os dois tipos de sistemas, na Aldo Solar Distribuidora, em outubro de 2022. O preço do sistema com microinversor, ficou em torno de 2,98 R\$/Wp. Já o preço do sistema com inversor de *string*, foi de 2,59 R\$/Wp. Ou seja, o sistema com microinversor, em comparação com o sistema com inversor de *string*, ficou 15,06% mais caro.

Considerando que a maior diferença de geração de eletricidade foi de 2,47% a mais para o sistema com microinversor, no décimo ano, é notável que para o sistema com inversor de *string* alcançar o mesmo desempenho do outro tipo de instalação, pode-se somente adicionar mais alguns módulos FV. Com isso, serão realizados alguns cálculos para se obter esta quantidade de módulos FV.

- Geração de eletricidade (G_{anual}) – SFV com Inversor de *String* no décimo ano:

$$G_{\text{anual}} = 65.608 \text{ kWh} \quad (5)$$

- Geração de eletricidade por módulo FV (G_{pm}) – SFV com Inversor de *String* no décimo ano:

$$G_{\text{pm}} = \frac{G_{\text{anual}}}{Q_{\text{mód}}} = \frac{65.608 \text{ kWh}}{96 \text{ módulos}} = 683,42 \frac{\text{kWh}}{\text{módulo}} \quad (6)$$

Levando em consideração que se almeja obter uma geração igual ao do sistema com microinversor, no décimo ano, a quantidade de módulos FV que precisam ser adicionados ao sistema com inversor de *string*, é encontrada da seguinte forma:

$$G_{\text{mi10ano}} = 67229 \text{ kWh} \quad (7)$$

$$Q_{\text{td. de Módulos Necessários}} = \frac{G_{\text{mi10ano}}}{G_{\text{pm}}} = \frac{67229}{683,42} = 98,37 \approx 99 \text{ módulos} \quad (8)$$

Dessa maneira, de acordo com a Equação 8, para que o sistema com inversor de *string* obtenha um desempenho semelhante ao sistema com microinversores, necessitaria de 99 módulos FV, quantidade ainda aceitável, em questão de sobrecarregamento dos inversores. Visto que o sistema atual possui 96 módulos FV, necessitaria adicionar mais 3 módulos FV.

Em outubro de 2022, o preço do módulo FV utilizado neste trabalho, estava em torno de R\$ 1.172,41. Ao adicionarmos esse valor, multiplicado por 3, ao preço do sistema com inversor de *string*, totaliza-se R\$ 117.891,60, ou 2,59 R\$/Wp. Assim, mesmo com uma potência instalada maior, 45,54 kWp, está 10,41% mais barato do que o sistema com microinversores com potência instalada inferior, tornando a utilização do sistema com microinversor, nessa situação, uma opção não viável, financeiramente.

6 CONCLUSÃO

No presente trabalho foi desenvolvida uma análise comparativa de desempenho, por meio de simulações no software PVsyst, entre um sistema FV com inversor de *string* e um sistema FV com microinversores, com a mesma potência instalada, em uma planta FV comercial na cidade de Fortaleza-CE, a fim de verificar a viabilidade técnica e financeira entre as duas tecnologias. O inversor de *string* é a opção mais adquirida por quem deseja gerar sua própria eletricidade com um SFCR. Embora em situações em que há presença de sombreamento, por exemplo, a sua utilização deve ser questionada, dado que a sua série de módulos FV é totalmente comprometida, ocasionando um baixo rendimento. Nesse caso, deve-se realizar um estudo sobre a necessidade da implantação de microinversores, que trabalham com a tecnologia MLPE, ou seja, com cada módulo FV realizando a produção de eletricidade individualizada, fazendo com que, se porventura a eficiência de algum módulo FV venha a ser afetada por sombreamento, o sistema não sofra perdas por completo.

Com isso, realizou-se simulações computacionais no PVsyst, obtendo todos os dados necessários para a análise de desempenho, tanto do sistema com inversor de *string* quanto do sistema com microinversor. Todos os dados foram registrados, através de gráficos e tabelas, a fim de realizar um estudo comparativo. Analisou-se as principais diferenças entre os dois equipamentos, por meio de pesquisas e trabalhos de outros autores, verificando os possíveis ganhos de eficiência ao utilizar microinversores. Foi apurado que apesar das vantagens que o microinversor traz, mesmo com a comprovação de ganho de eletricidade, em algumas situações, o seu alto custo inicial pode tornar a sua aplicação impraticável.

Após finalizar as simulações, investigou-se as perdas que afetaram o desempenho de que cada sistema, durante 10 anos de operação. Para o sistema com microinversores, não houve variações, com relação às perdas por temperatura, sombreamento, perdas ôhmicas CA e perdas de eficiência do inversor. As perdas ôhmicas CC, permaneceram iguais a zero. E as perdas por *mismatch*, foram aumentando devido à elevação da degradação dos módulos FV. Já para o sistema com inversor de *string*, comparado ao sistema com microinversores, notou-se uma maior perda por *mismatch*, perdas ôhmicas CC e por sombreamento. Por outro lado, obteve uma menor perda de eficiência do inversor. As perdas por sombreamento foram um pouco mais que o dobro das obtidas no sistema com microinversores. Explorou-se a geração de eletricidade de cada sistema, no primeiro ano. Com a superioridade do microinversor em todos os meses, obteve-se uma maior diferença, comparado à instalação com inversor de *string*, no mês de junho, com 1,60%. Além disso, a diferença da taxa de desempenho entre os dois sistemas foi de 1,52%.

Ademais, analisando os dois sistemas em 10 anos de operação, observou-se o sistema com microinversor tendo sua produção de eletricidade reduzida 3,94% e sua taxa de desempenho com menos 4,03%, no décimo ano. De outro modo, o sistema com inversor de *string*, decaiu sua geração de eletricidade e sua taxa de desempenho, 4,98% e 4,97%, respectivamente, ao final da década. No terceiro ano, o sistema com microinversor gerou, a mais, de eletricidade, 1,34%, considerando esta, a menor variação entre os dois sistemas, na década analisada, e 2,47% a maior variação. A partir desta maior variação, realizou-se um cálculo simples para investigar a viabilidade financeira, utilizando o preço por kWp de cada sistema. Logo, verificou-se que para que o sistema com inversor de *string* obtenha um desempenho semelhante ao sistema com microinversores, basta a adição de 3 módulos FV. Com base no preço do módulo FV, em outubro de 2022, ao somar seu valor, multiplicado por 3, ao valor inicial do sistema com inversor de *string*, ainda assim, comparando ao sistema com microinversor, e com potência instalada maior, resulta em um preço 10,41% menor.

Dessa forma, limitando-se aos cálculos e banco de dados do software PVsyst, para a realização de uma análise comparativa de desempenho, em um mesmo local, mas com equipamentos diferentes, constata-se que, no presente trabalho, entre os dois sistemas analisados, a opção em que considera a instalação de inversores de *string*, com a adição de mais 3 módulos FV, é a mais viável financeiramente. Dispensando a necessidade de microinversores.

Portanto, diante dos resultados obtidos, no presente estudo, foi possível observar as vantagens e as desvantagens de cada equipamento analisado e a importância em identificar a real necessidade da implantação de microinversores em uma instalação FV, tornando o trabalho satisfatório. Os resultados de desempenho, do sistema com microinversores, foram superiores em todas as etapas do presente trabalho, no entanto, a sua principal desvantagem, seu alto custo inicial, foi primordial para o questionamento da sua aplicação.

SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Com o intuito de ampliar, ainda mais, os conhecimentos relacionados ao presente trabalho, foram sugeridos alguns trabalhos que podem ser desenvolvidos, por meio de análises e estudos, como está listado abaixo:

- Análise comparativa técnica-financeira entre microinversor e inversor de *string* com potência instalada semelhante em planta FV de pequeno porte.

- Determinação do ganho de eficiência de uma usina FV com microinversores em estrutura com circulação de ar livre
- Análise financeira da instalação de um sistema FV com microinversores utilizando fluxo de caixa em função do tempo.
- Análise experimental comparativa entre microinversores e inversores de *string* em planta FV de pequeno porte em instalações sem sombreamento e com sombreamento parcial.

REFERÊNCIAS

ABSOLAR. **Infográfico**. Disponível em: <<https://www.absolar.org.br/mercado/infografico/>>. Acesso em: 12 out. 2022.

BENY. **Microinversor Vs Inversor de String: Tudo Que Você Precisa Saber | BENY Elétrico**. Disponível em: <<https://www.beny.com/pt/microinverter-vs-string-inverter-all-you-need-to-know/>>. Acesso em: 16 nov. 2022.

BERNARDES, H. **Vida Útil e Garantias dos Equipamentos**. Disponível em: <<https://www.energysolver.com.br/single-post/garantias-e-vida-util-dos-equipamentos>>. Acesso em: 6 maio. 2022.

BP. **Statistical Review of World Energy**. Disponível em: <<https://www.bp.com/en/global/corporate/energy-economics/statistical-review-of-world-energy.html>>. Acesso em: 13 nov. 2022.

CANAL SOLAR. **Diferenças entre microinversores e inversores string**. Disponível em: <<https://canalsolar.com.br/diferencas-entre-microinversores-e-inversores-string/>>. Acesso em: 6 maio. 2022.

CHEPP, E. D.; KRENZINGER, A. **Estudo Comparativo do Uso de Inversor String e Micro Inversores na Geração de Energia Elétrica de Uma Instalação Fotovoltaica Com Sombreamento Parcial**. VII Congresso Brasileiro de Energia Solar - CBENS. Anais...Gramado: 2018. Disponível em: <<https://anaiscbens.emnuvens.com.br/cbens/article/view/111>>. Acesso em: 20 maio. 2022

COLODETTE, J. A. D. F. **Uso de Micro Inversores em Sistemas Fotovoltaicos - Avaliação Comparativa e Estudo de Caso**. Monografia—Universidade Federal de Minas Gerais: [s.n.]. Acesso em: 10 maio. 2022

DANTAS, J. C.; GUERRA, F. K. DE O. M. V.; NASCIMENTO, V. C. C. DO. Sistemas Fotovoltaicos: análise de perdas por Mismatch. **Revista Eletrônica de Engenharia Elétrica e Engenharia Mecânica**, v. 3, n. 2, p. 70–80, 6 dez. 2021. Acesso em: 15 nov. 2022

ELETRÔNICA DE POTÊNCIA. **Uma Introdução aos Sistemas Fotovoltaicos**. Disponível em: <<https://eletronicadepotencia.com/sistemas-fotovoltaicos/>>. Acesso em: 15 nov. 2022.

FAMOSO, F. et al. Performance Comparison between Micro-inverter and String-inverter Photovoltaic Systems. **Energy Procedia**, v. 81, n. 69, p. 526–539, 1 dez. 2015. Acesso em: 10 maio. 2022

FERNANDES, C. G. **Estudo Comparativo do Uso de Inversor String e Microinversores na Geração de Energia Elétrica Em Instalações Fotovoltaicas**. UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA: [s.n.]. Acesso em: 10 maio. 2022

FOTOVOLT. **Guia de Microinversores para geradores fotovoltaicos | FOTOVOLT**. Disponível em: <<https://www.arandanet.com.br/revista/fotovolt/guia/775-Microinversores-para-geradores-fotovolticos>>. Acesso em: 6 maio. 2022.

GAZIS, F. S. et al. **Micro inverters for PV plants compared to the ordinary string or central inverters**. Disponível em: <https://www.academia.edu/26073986/Micro_inverters_for_PV_plants_compared_to_the_ordinary_string_or_central_inverters>. Acesso em: 10 maio. 2022

GENYX SOLAR. **Micro Inversor x Inversor String | O guia que você precisava para ser mais assertivo**. Disponível em: <<https://genyx.com.br/micro-inversor-x-inversor-string/>>. Acesso em: 6 maio. 2022.

GETPOWER SOLAR. **Micro Inversor: Vantagens e Desvantagens**. Disponível em: <<https://getpowersolar.com.br/blog/micro-inversor-vantagens-e-desvantagens/>>. Acesso em: 15 nov. 2022.

GODOI, R. R. et al. **Álise Comparativa de Desempenho de Inversor String e Microinversor Instalados no Sistema Fotovoltaico FEELT-NUPEP-UFU**. VII Congresso Brasileiro de Energia Solar - CBENS. **Anais...** Gramado: 2018. Disponível em: <<https://anaiscbens.emnuvens.com.br/cbens/article/view/317>>. Acesso em: 20 maio. 2022

GREENER. **Preços dos Sistemas Fotovoltaicos: Microinversores x Inversor String**. Disponível em: <<https://www.greener.com.br/precos-dos-sistemas-fotovolticos-microinversores-x-inversor-string/>>. Acesso em: 16 nov. 2022.

GRIDPOWER ENGENHARIA. **Energia Solar – Gridpower Engenharia – Soluções em Energia Solar, Projetos Elétricos, Eficiência Energética e Automação**. Disponível em: <<http://gridpower.com.br/energia-solar/>>. Acesso em: 6 maio. 2022.

GROWATT. **MID 15-25KTL3-X - Inversores comerciais para telhados**. Disponível em: <<http://www.ginverter.pt/show-41-642.html>>. Acesso em: 12 out. 2022.

HARB, S. et al. **Microinverter and string inverter grid-connected photovoltaic system — A comprehensive study**. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/6745072>>. Acesso em: 20 maio. 2022.

HCC ENERGIA SOLAR. **Microinversores: O que ninguém te conta quando instala em seu projeto - HCC Energia Solar**. Disponível em: <<https://hccenergiasolar.com.br/microinversores-o-que-ninguem-te-conta-quando-instala-em-seu-projeto/>>. Acesso em: 27 nov. 2022.

HOYMILES. **Microinverter-single-phase -BR**. Disponível em: <<https://www.hoymiles.com/br/products/microinverter/single-phase/>>. Acesso em: 16 out. 2022.

IEA. **Renewable Energy Market Update - May 2022 – Analysis**. Disponível em: <<https://www.iea.org/reports/renewable-energy-market-update-may-2022>>. Acesso em: 10 maio. 2022.

JINKO SOLAR. **Jinko Solar- Módulo monofacial meia-célula Tipo-P 60**. Disponível em: <<https://www.jinkosolar.com/en/site/dwparameter>>. Acesso em: 12 out. 2022.

LAGARDE, Q. et al. Performance ratio of photovoltaic installations in France: Comparison between inverters and micro-inverters. **Journal of King Saud University - Engineering Sciences**, nov. 2021. Acesso em: 10 maio. 2022

LIMA, J. B. L. B.; GONÇALVES, J. DE A. **Análise Comparativa de Performance Entre Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede Instalados no Piauí e na Europa Através de Índices de Mérito**. Congresso Brasileiro de Energia Solar - CBENS. **Anais...** Gramado: 2018. Disponível em: <<https://anaiscbens.emnuvens.com.br/cbens/article/view/175>>. Acesso em: 20 out. 2022

LOPES, T. et al. **Análise comparativa de geração de sistemas fotovoltaicos conectados à rede com um inversor e com microinversores**. [s.l: s.n.]. Disponível em: <<https://prop.i.iftto.edu.br/ocs/index.php/jice/9jice/paper/viewFile/9177/4122>>. Acesso em: 25 nov. 2022.

MAIA, A. F. S. et al. **Análise da Implementação de Um Sistema de Microgeração de Energia Utilizando Microinversor e Inversor Multi-string Viability Analysis Of Grid Connected Photovoltaic Microgeneration Using Micro And Multi-string Inverter.** Congresso Técnico Científico da Engenharia e da Agronomia - Científico da Engenharia e da Agronomia - CONTECC. **Anais...**Belém: 2017. Disponível em: <https://www.confea.org.br/sites/default/files/antigos/contecc2017/eletrica/4_adidusdmdeumeim.pdf>. Acesso em: 20 maio. 2022

MELO, A. DE P.; FREITAS, L. C. G. DE; MELO, F. C. **Estudo do impacto no tempo de retorno do investimento em geradores fotovoltaicos de pequeno porte utilizando microinversores e inversores string.** Congresso Brasileiro de Energia Solar - CBENS. **Anais...**Fortaleza: 2020. Disponível em: <<https://anaiscbens.emnuvens.com.br/cbens/article/view/1008>>. Acesso em: 25 nov. 2022

OLIVEIRA, F. H. M. DE. **Comparação de custo benefício entre micro inversor e inversor multistring com base na expectativa de geração para Cliente de Apucarana-PR.** Monografia de Especialização—Universidade Tecnológica Federal do Paraná: [s.n.]. Acesso em: 15 nov. 2022

OPUS SOLAR. **Micro Inversor e Inversor String: Conheça vantagens e desvantagens.** Disponível em: <<https://opussolar.com.br/micro-inversor-e-inversor-string-conheca-algumas-vantagens-e-desvantagens/>>. Acesso em: 6 maio. 2022.

SANTOS, J. S. DOS et al. **Análise de desempenho de dois sistemas fotovoltaicos utilizando inversor string e microinversor na cidade de Teresina-PI.** Congresso Brasileiro de Energia Solar - CBENS. **Anais...**Florianópolis: 16 ago. 2022. Disponível em: <<https://anaiscbens.emnuvens.com.br/cbens/article/view/1233>>. Acesso em: 25 nov. 2022

TEIXEIRA, A. P. **Marco Legal faz de 2022 o melhor ano para ter energia solar.** Disponível em: <<https://canalsolar.com.br/marco-legal-faz-de-2022-o-melhor-ano-para-ter-energia-solar/>>. Acesso em: 10 maio. 2022.

TIWARI, S.; PANDEY, R.; GOSWAMI, A. Performance Analysis of 3kW Residential Grid-Connected Photovoltaic System with Microinverter Topology using System Advisor Model. **International Journal for Research in Applied Science and Engineering Technology**, v. 9, n. 9, p. 1294–1297, 30 set. 2021. Acesso em: 10 maio. 2022.