



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA
CURSO DE ENGENHARIA ELÉTRICA**

TARCÍSIO FILIPIN VESSOZI

**ESTUDO DE CASO: AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO DE PAINÉIS
FOTOVOLTAICOS COM SEGUIDOR SOLAR EM COMPARAÇÃO A PAINÉIS
FOTOVOLTAICOS FIXOS**

**Alegrete
2023**

TARCÍSIO FILIPIN VESSOZI

**ESTUDO DE CASO: AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO DE PAINÉIS
FOTOVOLTAICOS COM SEGUIDOR SOLAR EM COMPARAÇÃO A PAINÉIS
FOTOVOLTAICOS FIXOS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Pampa, como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. Eng. Mauro Fonseca Rodrigues

**Alegrete
2023**

Ficha catalográfica elaborada automaticamente com os dados fornecidos pelo(a) autor(a) através do Módulo de Biblioteca do Sistema GURI (Gestão Unificada de Recursos Institucionais).

V582e Vessozi, Tarcísio Filipin

Estudo de Caso: Avaliação de Desempenho de Painéis Fotovoltaicos com Seguidor Solar em Comparação a Painéis Fotovoltaicos Fixos / Tarcísio Filipin Vessozi.

69 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Universidade Federal do Pampa, ENGENHARIA ELÉTRICA, 2023.

“Orientação: Prof. Dr. Eng. Mauro Fonseca Rodrigues”.

1. Energia Solar Fotovoltaica. 2. Painel Fotovoltaico com Seguidor Solar. I. Título.

TARCISIO FILIPIN VESSOZI

**ESTUDO DE CASO: AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO DE PAINÉIS FOTOVOLTAICOS COM
SEGUIDOR SOLAR EM COMPARAÇÃO A PAINÉIS FOTOVOLTAICOS FIXOS**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Curso de
Engenharia Elétrica da
Universidade Federal do Pampa,
como requisito parcial para
obtenção do grau de Bacharel em
Engenharia Elétrica.

Trabalho defendido e aprovado em: 7 de dezembro de 2023.

Banca examinadora:

Prof. Dr. Mauro Fonseca Rodrigues
Orientador

Prof. Dr. Chrystian Dalla Lana da Silva

Prof^a. Dr^a. Ana Paula Carboni de Mello



Assinado eletronicamente por **CHRYSYIAN DALLA LANA DA SILVA, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 07/12/2023, às 11:43, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



Assinado eletronicamente por **ANA PAULA CARBONI DE MELLO, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 07/12/2023, às 16:03, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



Assinado eletronicamente por **MAURO FONSECA RODRIGUES, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 17/12/2023, às 20:23, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.unipampa.edu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **1313752** e o código CRC **3FFFA1A1**.

Não há exemplo maior de dedicação do que o da nossa família. À minha querida família, que tanto admiro e tenho orgulho em fazer parte, dedico o resultado do esforço realizado ao longo deste percurso.

AGRADECIMENTO

Ao Prof. Dr. Mauro Fonseca Rodrigues por aceitar o desafio de me orientar, pela dedicação, paciência e disponibilidade demonstrada durante esse projeto.

A Deus, que me abençoou com Vosso Espírito, indicando-me o caminho a ser seguido para que alcançasse o aperfeiçoamento através desta caminhada.

Aos Professores, pela dedicação, carinho e amizade, não medindo esforços para que eu conseguisse vencer este desafio.

Aos Meus Pais, que com humildade, firmeza e perseverança, nunca descreditaram que eu chegaria ao caminho dos vitoriosos.

A Empresa Widitec/Qualyagro e especialmente ao Sr. Eng. Wilson Dill e a equipe de engenharia, pelo apoio e disponibilização do espaço de trabalho para realização dos testes e levantamentos dos dados necessários.

Aos Colegas cujo convívio e amizade sentirei saudades.

Ao Meu Irmão por indicar o melhor curso, e pela experiência demonstrada.

“A mente que se abre a uma nova ideia
jamais voltará ao seu tamanho original.”.

Albert Einstein

RESUMO

Existem diversas formas de aumentar a eficiência de geração de energia através de painéis fotovoltaicos. Esse trabalho tem por objetivo avaliar e comparar o desempenho de um sistema fotovoltaico real com painel seguidor solar em relação a um sistema convencional com painel fixo na região Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul. Foram coletados dados de geração de cada sistema individualmente sob condições climáticas e de posicionamento geográfico idênticas para, posteriormente, fazer a comparação. A bibliografia aponta variações de 14% a 35% de ganho em sistemas similares, mas, em sua maioria, em ambientes de simulação. Para possibilitar a análise utilizaram-se dois painéis fotovoltaicos iguais, um instalado com o seguidor solar de plataforma rotativa de dois eixos e o outro instalado de forma fixa, alinhado ao Norte com ângulo de 28 graus. Para a coleta de dados, foi instalado um micro inversor *on-grid* com monitoramento de entradas independente. Após a coleta, os dados foram divididos em três categorias: dias de sol, dias nublados e dias de chuva, foram feitas as comparações de desempenho na geração entre os sistemas em cada uma dessas categorias e depois uma análise geral, fazendo uma média durante todo o período analisado. Por fim, foi refeita a análise levando em consideração a energia consumida pelo sistema seguidor durante o funcionamento, chegou-se a um ganho médio do período analisado superior a 20% em geração de energia nas condições gerais, sendo que em dias de sol o ganho médio diário ultrapassa os 25% e nos dias nublados fica próximo dos 15%. Com esses valores torna-se possível encontrar o rendimento do sistema seguidor para outras regiões com características climáticas diferentes. Com os resultados concluiu-se que o objetivo do trabalho foi alcançado e que para o sistema seguidor se tornar atrativo comercialmente, seu valor de venda e manutenção não deve alcançar 20% do sistema fixo. Sugere-se uma continuação do trabalho para avaliar com Engenharia Econômica esse impacto de retorno financeiro.

Palavras-chave: fontes renováveis de energia, energia fotovoltaica, seguidor solar, rendimento energético, matriz de energia elétrica.

ABSTRACT

There are several ways to increase energy generation efficiency through photovoltaic panels. This work aims to evaluate and compare the performance of a real photovoltaic system with a solar tracker panel in relation to a conventional system with a fixed panel in the Northwest region of the State of Rio Grande do Sul. Generation data were collected from each system individually under conditions identical climate and geographic positioning to later make the comparison. The bibliography indicates variations of 14% to 35% gains in similar systems, but, for the most part, in simulation environments. To enable the analysis, two identical photovoltaic panels were used, one installed with the two-axis rotating platform solar tracker and the other installed fixedly, aligned to the North at an angle of 28 degrees. For data collection, an on-grid micro inverter was installed with independent inputs monitoring. After collection, the data was divided into three categories: sunny days, cloudy days and rainy days. Generation performance comparisons were made between the systems in each of these categories and then a general analysis, making an average over the entire period analyzed. Finally, the analysis was redone taking into account the energy consumed by the tracking system during operation, reaching an average gain of over 20% in energy generation over the analyzed period under general conditions, and on sunny days the gain daily average exceeds 25% and on cloudy days it is close to 15%. With these values it becomes possible to find the performance of the tracking system for other regions with different climatic characteristics. With the results it was concluded that the objective of the work was achieved and that for the follower system to become commercially attractive, its sale and maintenance value should not reach 20% of the fixed system. It is suggested that the work be continued to evaluate this impact on financial return with Economic Engineering.

Keywords: renewable energy sources, photovoltaic energy, solar tracker, energy yield, electrical energy matrix.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Evolução da energia fotovoltaica no Brasil.....	23
Figura 2 – Cenário atual de energia com fonte fotovoltaica no Brasil.	24
Figura 3 – Energia renovável X energia não renovável.	25
Figura 4 – Divisão da oferta interna de energia.	25
Figura 5 – Potencial de radiação solar no Brasil.	26
Figura 6 – Evolução dos preços e da potência instalada em energia fotovoltaica.	32
Figura 7 – Produtividade fotovoltaica anual no plano inclinado a 20°.	33
Figura 8 – Exemplo de sistema seguidor solar de eixo único.	37
Figura 9 – Exemplo de sistema seguidor com eixo horizontal.	37
Figura 10 – Exemplo de sistema seguidor com eixo vertical.	38
Figura 11 – Exemplo de sistema seguidor de dois eixos.	39
Figura 12 – Metodologia adotada para execução do trabalho.	40
Figura 13 – Inversor utilizado no estudo.	42
Figura 14 – Software do sistema de inversores empregado.	42
Figura 15 – Potencial fotovoltaico médio por regiões.	44
Figura 16 – Localização geográfica das instalações fotovoltaicas.	45
Figura 17 – Trajetória solar durante o período de análise.	46
Figura 18 – Trajetória solar durante o ano inteiro.	47
Figura 19 – Sistema de informações da estação meteorológica.	48
Figura 20 – Disposição dos painéis solares.	49
Figura 21 – Micro-inversor.	49
Figura 22 – Mecanismo responsável pelo giro do seguidor solar.	50
Figura 23 – Painéis solares de referência para o seguidor.	51
Figura 24 – Controle de posição e acionamento dos motores do seguidor solar.	51
Figura 25 – Comparativo de potência média de geração nos dias de sol.	54
Figura 26 – Comparativo de potência média de geração nos dias nublados.	56
Figura 27 – Comparativo de potência média de geração nos dias de chuva.	58

Figura 28 – Comparativo geral de potência média de geração do período em análise. 59

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Comparação da eficiência da célula para diferentes materiais.	31
Tabela 2 – Especificações Técnicas dos Painéis Fotovoltaicos.	52
Tabela 3 – Especificações técnicas do micro-inversor.	53
Tabela 4 – Comparativo de Geração de energia nos dias de sol.	55
Tabela 5 – Comparativo de Geração de energia nos dias nublados.	56
Tabela 6 – Comparativo de Geração de energia nos dias de chuva.	58
Tabela 7 – Comparativo geral de Geração de energia do período em análise.	60
Tabela 8 – Comparativo de energia corrigida nos dias de sol.	61
Tabela 9 – Comparativo de energia corrigida nos dias nublados.	61
Tabela 10 – Comparativo de energia corrigida para dias de sol mais dias nublados.	62

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

ANEEL	– Agência Nacional de Energia Elétrica
CA	– Corrente Alternada
CC	– Corrente Contínua
COP 21	– 21ª Conferência das Nações Unidas sobre Mudanças Climáticas
EPE	– Empresa de Pesquisa Energética
GEE	– Gases de Efeito Estufa
MMA	– Ministério do Meio Ambiente
MPPT	– Maximum Power Point Tracking
PDE	– Plano de Desenvolvimento Energético
PROINFA	– Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica
PV	– Painel Fotovoltaico
UERGS	– Universidade Estadual do Rio Grande do Sul

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	21
1.1	Justificativa.....	21
1.2	Objetivos	25
1.2.1	OBJETIVO GERAL.....	25
1.2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	25
2	CONCEITOS GERAIS E REVISÃO DE LITERATURA	26
2.1	Energia solar fotovoltaica.....	26
2.1.1	COMO É GERADA ELETRICIDADE EM PAINÉIS FOTOVOLTAICOS	27
2.1.2	EFICIÊNCIA DAS PLACAS FOTOVOLTAICAS	30
2.1.3	DESAFIOS ECONÔMICOS DA ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA.....	31
2.1.4	REGULAMENTAÇÃO E NORMAS	33
2.2	Seguidor solar	34
2.2.1	SEGUIDOR SOLAR DE EIXO ÚNICO	36
2.2.2	SEGUIDOR SOLAR DE EIXO HORIZONTAL.....	37
2.2.3	SEGUIDOR DE EIXO VERTICAL OU AZIMUTE	37
2.2.4	SEGUIDOR DE DOIS EIXOS.....	38
3	METODOLOGIA	40
3.1	Técnicas empregadas para coletar e organizar os dados	41
4	DESENVOLVIMENTO DO TRABALHO	44
4.1	Localização da instalação	44
4.2	Arranjo e funcionamento do sistema	48
4.2.1	CARACTERIZAÇÃO DA CONDIÇÃO CLIMÁTICA LOCAL	48
4.2.2	A INSTALAÇÃO DE TESTE	48
4.3	Levantamento de dados	52
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES	54

5.1	Dias de sol	54
5.2	Dias nublados	55
5.3	Dias de chuva	57
5.4	Resultado geral	59
5.4.1	DIAS DE SOL	60
5.4.2	DIAS NUBLADOS.....	61
5.4.3	RESULTADO GERAL CORRIGIDO	62
6	CONCLUSÃO	64
	REFERÊNCIAS	66

1 INTRODUÇÃO

As fontes renováveis de energia são as formas de energia consideradas inesgotáveis, pois se renovam durante sua utilização, também são conhecidas como fontes de energia limpa por emitirem baixa quantidade de gases de efeito estufa. As mais conhecidas e utilizadas são: hidráulica, eólica, biomassa e solar.

Atualmente a exploração de recursos renováveis vem ganhando força devido ao grande aumento de demanda de energia elétrica, isso se explica pelo fato de que são provenientes de recursos naturais que podem ser facilmente aproveitados com a utilização da tecnologia disponível.

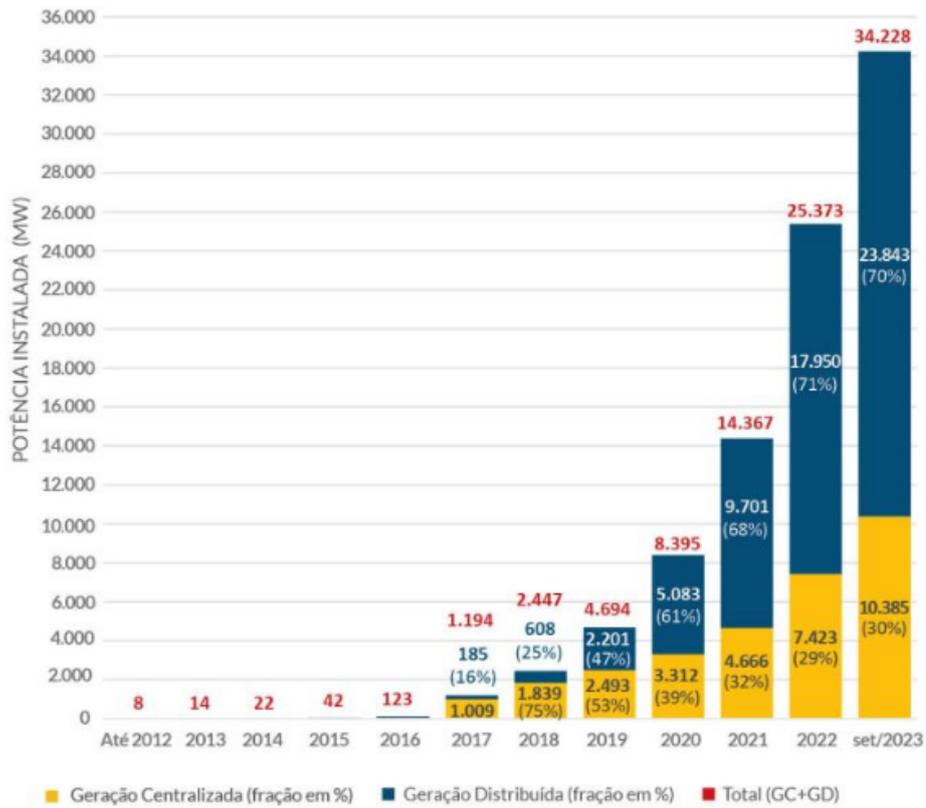
Melhorar o rendimento dessas fontes renováveis, melhorando sua rentabilidade, irá aumentar sua penetração e uso pelos usuários. Uma das formas de aumentar o rendimento na produção de energia solar fotovoltaica é utilizando sistema seguidor solar. Existem diversas formas de seguidores, todos apresentam um ganho de rendimento em relação ao sistema fixo, porém nem sempre são vantajosos devido ao alto valor de instalação e manutenção.

1.1 Justificativa

A geração de energia renovável oriunda de fonte fotovoltaica vem crescendo no Brasil e no mundo. A Figura 1 apresenta uma mostra dos últimos anos desse aspecto.

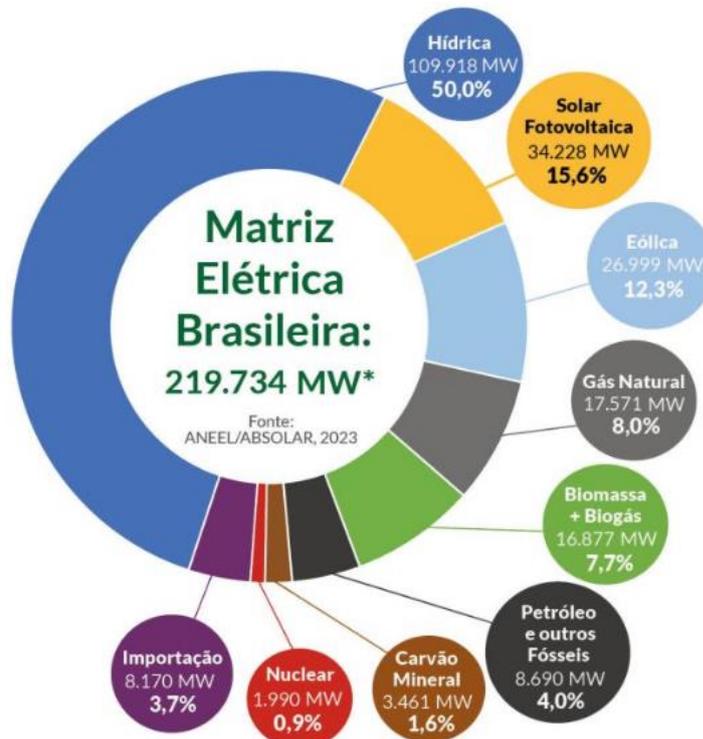
No mês de novembro de 2023 o Brasil atingiu uma capacidade instalada de 35 GW em geração solar fotovoltaica, sendo divididos com 24,34 GW em geração distribuída própria de consumidores e 10,68 GW em geração centralizada nas grandes usinas. Só no último ano foram instalados 14 GW, o que significa um aumento de 66% na capacidade de geração de energia solar fotovoltaica no país (ABSOLAR, 2023). A Figura 2 apresenta esse cenário na matriz de energia elétrica do Brasil.

Figura 1 - Evolução da energia fotovoltaica no Brasil.



Fonte: ABSOLAR (2023).

Figura 2 - Cenário atual de energia com fonte fotovoltaica no Brasil.



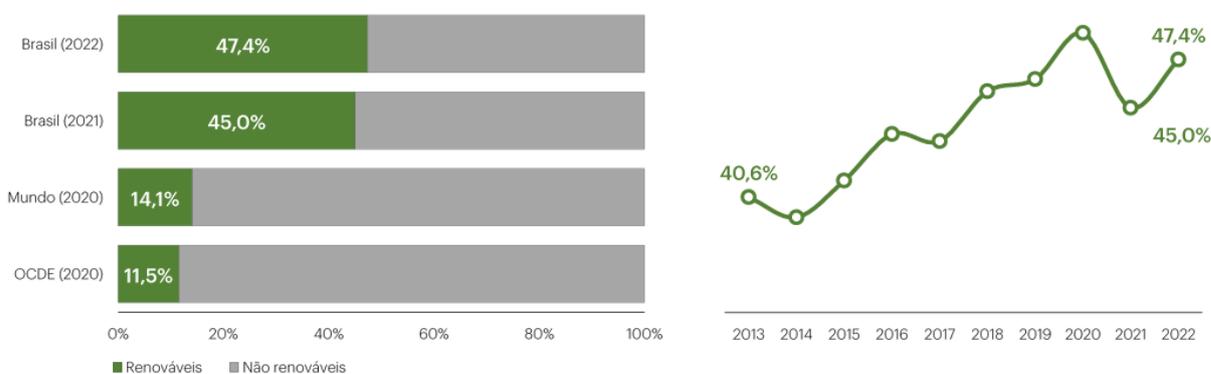
Fonte: ABSOLAR (2023).

Observando o grande potencial e alto crescimento na procura, torna-se de imensa necessidade o estudo de métodos para elevar a eficiência na geração fotovoltaica, para possibilitar um melhor aproveitamento da luz solar nas instalações já existentes e ainda continuar competitivo no mercado com novas instalações. Além disso, faz-se necessário ampliar o cenário das fontes renováveis no mundo todo, permitindo a eliminação dos combustíveis fósseis. A Figura 3 apresenta a atual configuração de energias renováveis X não renováveis no Brasil e no Mundo. A Figura 4 apresenta a repartição da oferta interna no país.

Figura 3 – Energia renovável X energia não renovável.

Participação das renováveis na OIE

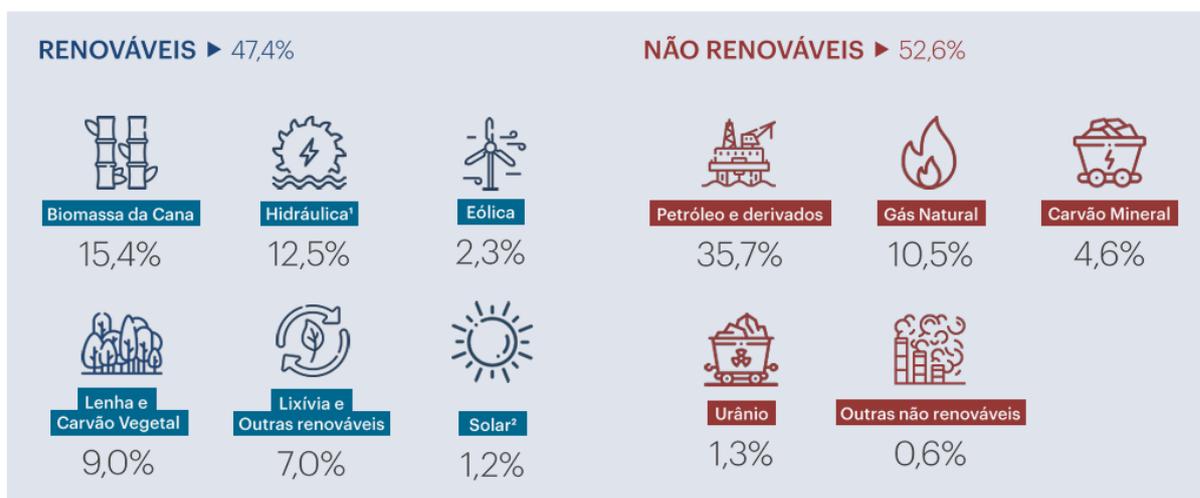
Fonte: Agência Internacional de Energia (AIE) e EPE para o Brasil. Elaboração: EPE



Fonte: ANEEL (2023).

Figura 4 – Divisão da oferta interna de energia.

Repartição da Oferta Interna de Energia (OIE) 2022



Fonte: ANEEL (2023).

A oferta interna de energia é o total de energia disponibilizada pelo país, na Figura 4 é possível ver que a maior parte da energia disponível no país ainda é proveniente de fontes não renováveis.

Por fim, cabe destacar o grande potencial de radiação solar que o Brasil possui (Figura 5), permitindo ampliar a conversão energética a partir do efeito fotovoltaico, melhorando, ainda mais, nosso percentual de energia renovável presente na matriz energética como um todo, visto que ainda é dominada por fósseis (ANEEL, 2023).

Figura 5 – Potencial de radiação solar no Brasil.



Fonte: PEREIRA (2017).

Ampliar a capacidade de fontes geradoras também é uma forma de manter o equilíbrio energético entre geração e demanda no sistema elétrico de potência,

como um todo, pois estamos numa rede interligada que abrange todo país e gerenciada pelo ONS (Operador Nacional do Sistema), permitindo que o armazenamento energético possa ser efetivo. Nesse cenário, onde novas instalações podem diminuir, novas tecnologias para otimização da geração e aumento do rendimento das existentes deve ser uma perspectiva em análise constante.

1.2 Objetivos

Os objetivos do trabalho são descritos de forma geral no item 1.2.1 e no item 1.2.2 estão os objetivos específicos.

1.2.1 OBJETIVO GERAL

O objetivo geral deste trabalho é fazer uma comparação real de rendimento na geração de energia elétrica, durante um período de 31 dias, entre um sistema fotovoltaico que utiliza seguidor solar em dois eixos e um sistema fotovoltaico fixo inclinado para o Norte, ambos com a mesma capacidade de geração, sob condições climáticas adversas. Posteriormente uma análise sobre essa comparação para definir se nesse caso compensa ou não o uso de seguidor solar.

1.2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

São objetivos específicos do trabalho:

- montar a plataforma de teste com os dois painéis;
- criar uma metodologia de análise que permita coletar os dados;
- especificar uma topologia com equipamentos para análise eficiente do processo;
- analisar os dados obtidos;
- usar as conclusões como argumento de venda técnica e econômica para sistemas comerciais da empresa patrocinadora do estudo.

2 CONCEITOS GERAIS E REVISÃO DE LITERATURA

O Brasil é um dos grandes exemplos mundiais em questão de exploração de energias renováveis. Apenas 14,1% da oferta na matriz energética mundial é constituída de fontes renováveis, porém no Brasil, a utilização sobe para 47,4% (ANEEL, 2023). Os principais responsáveis por elevar sua presença na matriz energética foram, além da fonte hídrica, outras fontes renováveis como a solar fotovoltaica, a eólica e os biocombustíveis.

O aumento da implantação de fontes de energia limpa contribui diretamente para a redução dos gases de efeito estufa (GEE), isso possibilita ao país cumprir os compromissos firmados no Acordo de Paris em 2015, resultante da Conferência das Nações Unidas sobre as Mudanças Climáticas – COP 21. Esse acordo prevê redução de 37% das emissões dos GEE para 2025 e 43% para 2030, tendo como referência as emissões em 2005. A meta do Brasil é ampliar para 45% o uso de energias renováveis e para 18% o uso de bioenergias até 2030 (INVESTRS, s.d.).

As instituições responsáveis pelo setor energético brasileiro estipulam metas que superam aquelas referentes ao Acordo de Paris. O Plano de Desenvolvimento Energético (PDE) indica que, até 2030, 48,5% da geração de energia no país será proveniente de fontes renováveis. PCHs, biomassa, fotovoltaica e eólica terão crescimento de 96%, evoluindo sua capacidade de geração de 46 GW, em 2021, para 88 GW, em 2030. De acordo com o PDE, a capacidade de produção eólica alcançará 40 GW, e a energia fotovoltaica poderá atingir os 12,6 GW (EPE, PDE 2021).

Nos últimos anos, o Rio Grande do Sul vem ganhando destaque por adotar o modelo de geração distribuída (GD), sendo a energia fotovoltaica a principal fonte. O Estado está na 2^o posição do ranking brasileiro com relação à quantia de unidades consumidoras que geram energia fotovoltaica.

2.1 Energia solar fotovoltaica

O aproveitamento da energia do sol pode ser realizado por meio de diferentes tecnologias que têm uma ampla gama de aplicações, dentre elas: iluminação, aquecimento, água quente para edifícios e indústrias, produção de energia solar térmica e conversão fotovoltaica de energia elétrica.

A energia solar é a única fonte indefinidamente renovável que apresenta capacidade de prover energia suficiente para satisfazer toda a demanda energética mundial (DUNLAP, 2015). Os raios solares têm uma incidência total de cerca de $1,8 \times 10^{17}$ W em nossa atmosfera. Aproximadamente metade dessa incidência consegue atravessar a atmosfera, resultando em uma insolação de $9,0 \times 10^{16}$ W na superfície terrestre. Considerando uma modesta eficiência de 15% de um painel fotovoltaico, o potencial resultante que pode ser fornecido mundialmente por esses módulos é de $1,3 \times 10^{16}$ W. Sabendo que o uso primário total de energia no mundo é de cerca de $5,7 \times 10^{20}$ J, para um potencial consumido de $1,8 \times 10^{13}$ W, a utilização de apenas 0,14% da energia solar, convertida pelo efeito fotovoltaico, disponível seria capaz de satisfazer toda nossa necessidade energética (DUNLAP, 2015).

Atualmente, a participação da energia solar ainda é pouco expressiva na matriz mundial. Entretanto, ela apresentou um aumento de cerca 2.000% entre 1996 e 2006, sendo que, em 2018, a capacidade instalada total mundial atingiu 486 GW (ANEEL, 2021).

Até um passado recente, a energia solar fotovoltaica era empregada no Brasil apenas em sistemas isolados ou autônomos, instalados em locais não alcançados pela rede elétrica, como propriedades rurais, comunidades isoladas, centrais remotas de telecomunicações e sistemas de sinalização (VILLALVA, 2015). Entretanto, a aprovação do uso de sistemas de geração conectados à rede pela ANEEL, através da resolução nº 482 de 2012, permitiu o avanço recente da quantidade de sistemas fotovoltaicos conectados à rede, tendo um aumento significativo no país desses sistemas nos últimos anos.

2.1.1 COMO É GERADA ELETRICIDADE EM PAINÉIS FOTOVOLTAICOS

O efeito fotovoltaico é a geração de uma corrente elétrica em um material semicondutor quando exposto a luz, seja ela do sol ou de qualquer outra fonte. Esse processo só é possível graças à movimentação de elétrons no interior da estrutura desse tipo de material, que é utilizado na fabricação do painel solar, por exemplo.

A estrutura dos semicondutores é composta por uma banda de valência e uma de condução, separadas por uma lacuna “gap”. A banda de valência é cheia de elétrons semilivres e a de condução é parcialmente vazia, enquanto o “gap” entre elas é de 1 elétron-volt (eV).

O efeito fotovoltaico, então, é quando os elétrons da banda de valência do semicondutor recebem fótons com energia suficiente para que consigam saltar o “gap” até a banda de condução, criando a corrente elétrica.

Esse salto ocorre quando a energia do fóton é maior ou igual a energia do “gap”, que é o que fica no meio, entre a energia máxima da banda de valência e a mínima da banda de condução, ou seja, a diferença entre elas (Efeito Fotoelétrico x Efeito Fotovoltaico: Diferenças, s.d.).

Um sistema solar fotovoltaico é composto por três blocos básicos: o bloco gerador, o bloco de condicionamento de potência e, quando necessário, o bloco de armazenamento. Enquanto o primeiro bloco abrange os painéis fotovoltaicos em diferentes arranjos, o cabeamento elétrico e as estruturas de suporte, o segundo pode ser composto por conversores c.c.-c.c., pontos de potência máxima (MPPT), inversores, controladores de carga, entre outros dispositivos de proteção, supervisão e controle. Por fim, o terceiro bloco contém as baterias e/ou outras formas de armazenamento. Pois esses sistemas podem operar isolados, sem contato com a rede de distribuição de eletricidade das concessionárias, ou conectados à rede. Ambos os sistemas apresentam alguns componentes básicos, que serão apresentados com mais detalhes a seguir.

• Módulos Fotovoltaicos

Um módulo fotovoltaico é composto por um arranjo de células fotovoltaicas conectadas de modo a produzir tensão e corrente para a geração de energia. Esse arranjo pode ser em série e/ou a paralelo, com número variável de células, dependendo da tensão de utilização e da corrente elétrica desejada. É importante ressaltar que os termos: módulo, placa, ou painel possuem o mesmo significado, sendo utilizados para descrever um conjunto empacotado de células fotovoltaicas disponíveis comercialmente.

• Inversores

O inversor é o equipamento eletrônico responsável por transformar a energia elétrica gerada pelos painéis, de corrente contínua (CC) para corrente alternada

(CA). Além disso, ele também é responsável por garantir a segurança do sistema e medir a energia produzida pelos painéis solares.

Considerando que grande parte dos aparelhos eletrodomésticos utilizados diariamente é construída para trabalhar com a rede elétrica residencial em tensão alternada de 127 ou 220 V, e frequência de 60 Hz, a presença de um inversor CC-CA é essencial para que a energia produzida em corrente contínua por um sistema fotovoltaico autônomo possa ser utilizada.

• **Controladores de carga**

Controladores de carga, também conhecidos como reguladores de carga, são equipamentos responsáveis por estabelecer a correta conexão entre os módulos fotovoltaicos e as baterias empregadas no sistema, evitando assim sobrecargas e que as baterias não sofram descargas excessivas, aumentando conseqüentemente, o tempo de vida útil da bateria. O controlador de carga deve ter seus parâmetros e método de controle ajustados às especificações da bateria do sistema. Os dois tipos mais utilizados são:

- Tipo eletrônico PWM (*Pulse Width Modulation*)– modulação de largura de pulso, com transistores e circuitos eletrônicos que permitem um controle mais preciso da abertura e fechamento das chaves, além de também possuir um microprocessador que atua de forma a carregar a bateria respeitando seu perfil de carga.
- Tipo eletrônico com PWM e MPPT (*Maximum Power Point Tracking*) – rastreamento do ponto de máxima potência, que além de apresentarem todos os recursos dos modelos anteriores, também possibilita que o módulo fotovoltaico opere sempre em seu ponto de máxima potência, otimizando a geração de energia.

• **Baterias**

A bateria é um equipamento eletroquímico para se armazenar energia elétrica na forma de energia química. Bancos de baterias podem ser agrupados em série ou

paralelo no sistema, de acordo com os objetivos pretendidos para o fornecimento de energia. Assim como já descrito anteriormente para a associação de placas fotovoltaicas, o agrupamento de baterias em série permite a obtenção de tensões maiores, já que a tensão resultante da associação é a soma das tensões individuais das baterias. Por sua vez, a associação em paralelo resulta em uma tensão final igual à tensão individual das baterias agrupadas, enquanto a corrente final é a soma das individuais, o que é adequado para sistemas em que correntes maiores são esperadas. Claramente, se o objetivo do sistema for a obtenção tanto de tensões maiores quanto de correntes maiores que aquelas fornecidas por uma bateria individual, é possível a associação conjunta em série e paralelo de baterias (VILLALVA, 2015).

2.1.2 EFICIÊNCIA DAS PLACAS FOTOVOLTAICAS

Os raios de energia solar, tanto diretos como difusos, são transformados em energia elétrica graças às células ou painéis fotovoltaicos. Esses são compostos por materiais semicondutores, como módulos em silício (mono ou policristalino), em filmes finos, com silício amorfo ou telureto de cádmio, ou ainda em material orgânico e de corantes, tecnologias ainda em fase de teste. A comparação entre as eficiências de cada tipo de módulo de acordo com seu material está representada na Tabela 1.

Tabela 1– Comparação da eficiência da célula para diferentes materiais.

Material da Célula Fotovoltaica	Eficiência da Célula em laboratório (%)	Eficiência da Célula comercial (%)
Silício Monocristalino	24,7	18
Silício Policristalino	19,8	15
Silício Cristalino de Filmes Finos	19,2	9,5
Silício Amorfo	13	10,5
Silício Micromorfo	12	10,7
Célula Híbrida	20,1	17,3
CIS, CIGS	18,8	14
Telureto de Cádmio	16,4	10

Fonte: Mauad et al. (2017, p. 187)

As células de CIS ($CuInSe_2$) têm por base o cobre, o índio e o selênio. Este material apresenta a particularidade de ser estável quando sujeito a incidência luminosa. Apresentam excelentes propriedades de absorção. As células de CIGS são constituídas pelos mesmos elementos das CIS, mas com a particularidade de o índio formar uma liga com o gálio, o que permite obter melhores desempenhos.

2.1.3 DESAFIOS ECONÔMICOS DA ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA

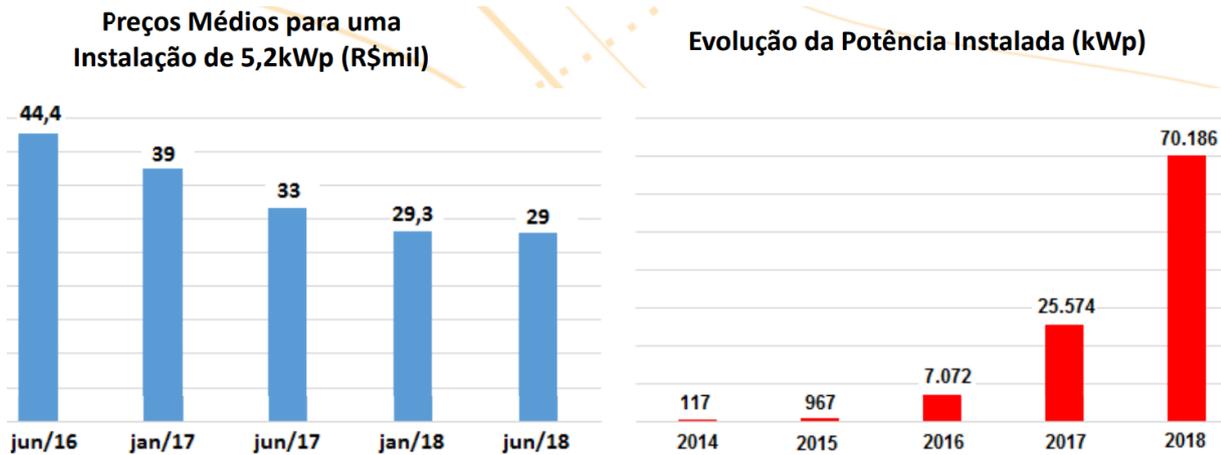
Entretanto, alguns desafios devem ser superados para que a energia solar possa conquistar seu espaço na matriz elétrica nacional. A ausência de incentivos governamentais tornou-se um obstáculo para a implantação de sistemas fotovoltaicos no Brasil, que carece de programas que impulsionem pequenos produtores, pessoas comuns ou pequenas empresas a adquirir mini ou microssistemas de geração fotovoltaica em seus próprios telhados.

Estudos como Zauza (2018) mostraram que é necessário um gasto médio mensal de energia elétrica superior a R\$ 200,00 para viabilizar o investimento realizado durante sua vida útil. Em 2023 é possível obter retorno do investimento a partir de 6 anos, para um gasto médio mensal de R\$ 100,00, isso devido a redução dos custos de instalação, módulos fotovoltaicos e inversores, se o gasto médio mensal for acima dos R\$ 300,00 então o retorno se dá já nos 5 anos após a instalação.

Apesar disso, o custo da eletricidade de origem fotovoltaica ainda é considerado alto, quando comparado ao de origem hidrelétrica. Porém, o aumento superior a 60% no custo da energia elétrica, experimentado pelo consumidor brasileiro em 2015, fez com que os olhares voltassem novamente para a energia solar fotovoltaica (VILLALVA, 2015). Inclusive, há alguns anos a energia elétrica vem sofrendo aumentos acima da inflação, caracterizando um encarecimento ao usuário final, permitindo uma melhor viabilidade em investimentos de GD.

Segundo o Atlas Solarimétrico do Rio Grande do Sul de 2018, o Estado teve uma enorme evolução no mercado fotovoltaico após o ano de 2015. Na Figura 6 é possível observar isso.

Figura 6 – Evolução dos preços e da potência instalada em energia fotovoltaica.



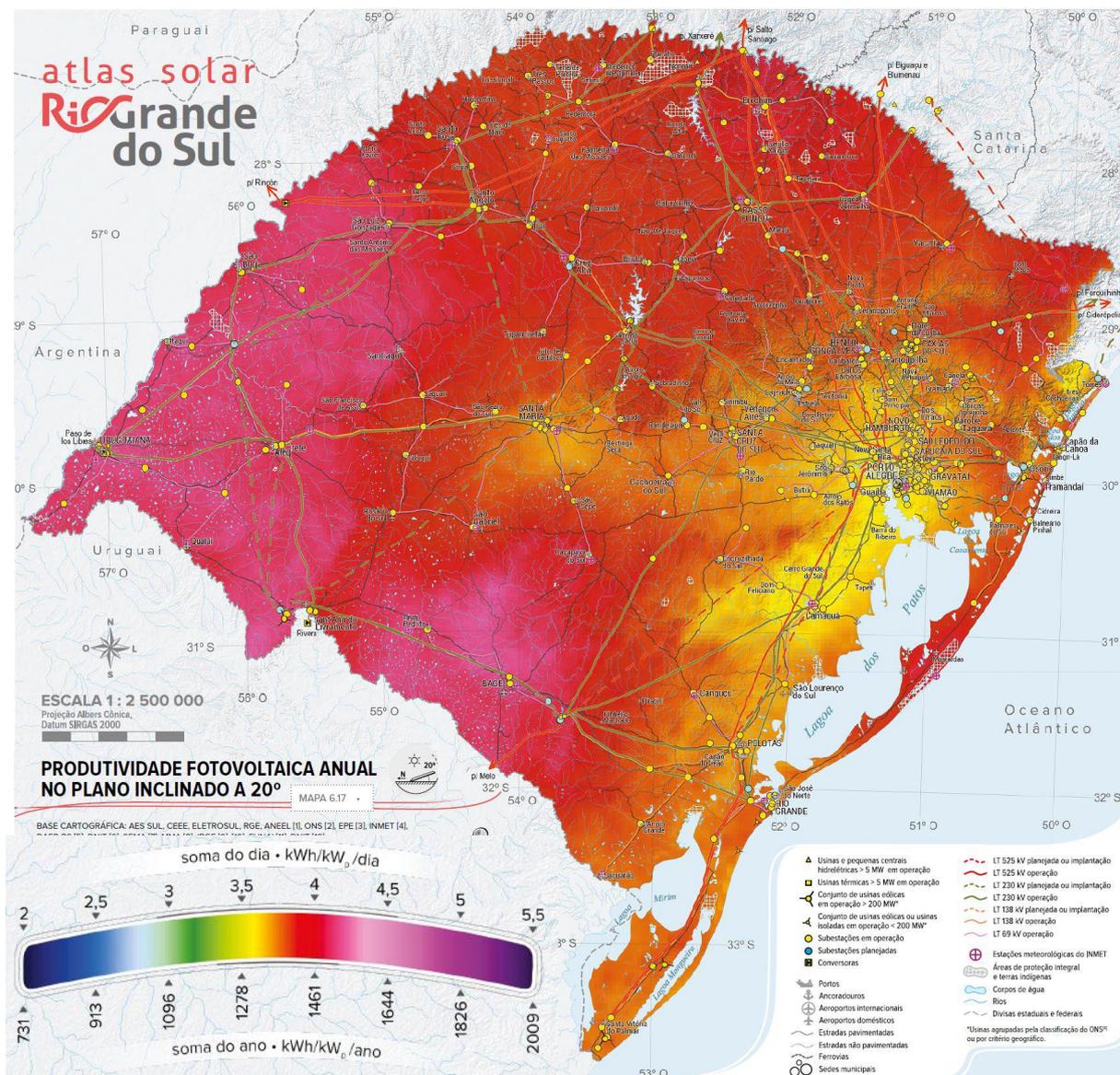
Fonte: Rio Grande do Sul (2018, p. 5).

Os preços caíram 34,7% em dois anos e a potência instalada no Estado cresceu 900% em um período equivalente.

Na Figura 7 está apresentado o potencial médio diário e anual de geração de energia Fotovoltaica em todo o Rio Grande do Sul.

Os dados foram coletados utilizando um plano inclinado de 20° orientado para o Norte. Nesta figura é possível ver que a região sudoeste apresenta o maior potencial, pois tem a maior incidência de radiação e grandes áreas aptas para a instalação de painéis fotovoltaicos. A região noroeste possui grande potencial, mesmo com a forte atividade agrícola, que diminui as áreas disponíveis para implantação de sistemas fotovoltaicos nas áreas rurais. A região Metropolitana de POA possui o menor potencial solar do estado, mesmo assim, a produtividade média é superior a territórios como da Alemanha, da Inglaterra ou do Norte da França (RIO GRANDE DO SUL, 2018).

Figura 7 – Produtividade fotovoltaica anual no plano inclinado a 20°.



Fonte: Rio Grande do Sul (2018, p. 10).

2.1.4 REGULAMENTAÇÃO E NORMAS

Como citado anteriormente, a resolução normativa nº 482, aprovada pela Aneel em abril de 2012, autorizou a micro e minigeração de energia elétrica partindo de fontes renováveis de energia como sistemas de GD conectado à redes de baixa tensão. Essa resolução foi alterada em novembro de 2015 pela resolução normativa nº 687, que define as características de micro e minigeração, estabelece as condições para o acesso dessas gerações aos sistemas de compensação de créditos de energia elétrica para autoprodutores de energia, e permite a

possibilidade de cada cidadão brasileiro ou empresa de ter em seu telhado uma usina fotovoltaica para a complementação do consumo próprio ou para a exportação de energia (VILLALVA,2015).

Algumas mudanças trazidas pela nova norma envolvem os custos de eventuais melhorias ou reforços no sistema de distribuição em função da conexão na rede. Esses custos estão dispensados do cálculo da participação financeira do consumidor, no caso da microgeração distribuída, sendo integralmente arcados pela distribuidora, exceto para o caso de geração compartilhada. Além de outras alterações, a norma também modificou quais consumidores podem aderir ao sistema de compensação de energia elétrica. Esses consumidores são aqueles responsáveis por unidade consumidora com microgeração ou minigeração distribuída; por unidade consumidora integrante de empreendimento de múltiplas unidades; por unidade consumidora caracterizada como geração compartilhada; ou por unidade consumidora caracterizada como autoconsumo remoto. Em 2021 entrou em vigor a RN nº 1000/2021 e em 2022 a LEI nº 14300 que altera a RN 1000 no que diz respeito à conexão e faturamento de centrais de micro e mini geração e traz aprimoramento das regras do sistema de compensação de energia. Além das resoluções normativas citadas, também estão vigentes normas da ABNT com relação aos sistemas fotovoltaicos conectados à rede. Essas normas são:

- **ABNT NBR 16.149** – “Características da interface de conexão com a rede elétrica de distribuição”.
- **ABNT NBR 16.150** – “Características da interface de conexão com a rede elétrica de distribuição – Procedimento de ensaio de conformidade”.
- **ABNT NBR 16.274** – “Requisitos mínimos para documentação, ensaios de comissionamento, inspeção e avaliação de desempenho”.
- **ABNT NBR 62.116** – “Procedimento de ensaio de anti-ilhamento para inversores de sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica”.

2.2 Seguidor solar

Um sistema seguidor solar é composto por dispositivos mecânicos que tem por objetivo direcionar os painéis fotovoltaicos para a posição mais favorável a captar o máximo de radiação solar possível, procurando sempre manter o painel perpendicular à radiação solar incidente, proporcionando desta maneira, o melhor

aproveitamento da energia luminosa solar. Um sistema de seguidores solares, apesar de incrementar em cerca de 20% o preço total de um sistema de geração fotovoltaica de energia, pode vir a aumentar cerca de 40% a captação de energia em alguns casos. Os seguidores fotovoltaicos geralmente apresentam um baixo custo de manutenção (BLASZCZAK, 2017).

Existem diversas categorias de seguidores solares, variando em custo, complexidade e funções. Eles podem fazer o seguimento através de vários eixos e garantir diferentes níveis de precisão.

Quanto maior o ângulo de incidência solar, aquele entre a posição do Sol com uma reta perpendicular ao painel, menor será a potência de geração de energia. Ao se utilizar um seguidor solar, este ângulo é reduzido a zero e a produção de energia passa a ser máxima ou muito próxima da máxima durante determinado dia e com a radiação existente. Uma demonstração algébrica indica um ganho teórico de até 57% (MOUSAZADEH et al., 2009).

Os dois ângulos mais importantes na captação da energia solar são o ângulo azimutal do sol, na determinada área de estudo e o ângulo de inclinação do painel fotovoltaico durante a captação da radiação solar, em relação ao próprio sol. Algumas das características comuns utilizadas em sistemas com seguidor solar são: utilização de um ou dois motores, movimento por sensores de luminosidade ou de acordo com o calendário, suprimento de energia própria ou externa, funcionamento durante o ano inteiro ou em apenas algumas estações do ano, entre outras. Além disso, estes sistemas podem ser passivos, quando movidos pela expansão térmica de um líquido, gerada por reações químicas, ou ativos, quando movidos por motores, computadores ou manualmente (MOUSAZADEH et al., 2009).

Dos seguidores solares ativos, tem-se ainda uma subdivisão em três categorias. A primeira delas engloba os baseados em microprocessadores e sensores. Este tipo de seguidor move-se de acordo com a diferença de iluminação entre sensores posicionados estrategicamente no painel solar. Estes sensores quando em desequilíbrio, ativam os microprocessadores conectados ao sistema para realizar o movimento com a ajuda de um motor, até que os sensores estejam com uma diferença de iluminação próxima a zero, o que indica a posição ótima do painel. Esses seguidores possuem alta precisão.

A segunda categoria é constituída por seguidores baseados em data e tempo, o qual por fórmulas ou algoritmos calcula a posição do Sol embasado em

informações geográficas e então envia comandos para o motor, para que este mude a posição dos painéis em determinado tempo para um ângulo de incidência determinado.

O último e terceiro caso é quando se utiliza a combinação dos dois tipos anteriores, ou seja, a utilização de microprocessadores e sensores com informações de data e tempo. Desta forma, para movimentos menos frequentes como em alguns casos o ângulo azimutal do painel, é possível utilizar dados calculados e então utilizar do seguidor solar por sensores para o movimento do ângulo de incidência (MOUSAZADEH et al., 2009).

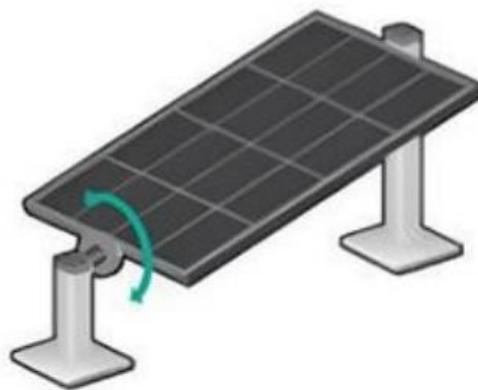
A seguir estão descritos os modelos mais utilizados de sistemas com seguidor solar.

2.2.1 SEGUIDOR SOLAR DE EIXO ÚNICO

Este tipo de seguidor tem um eixo Norte-Sul fixo, normalmente com ângulo de inclinação igual a latitude do local. O seguidor faz o giro no sentido Leste-Oeste durante o dia, acompanhando a trajetória do sol. Adotando o eixo N-S como eixo de rotação, garante-se que o painel estará perpendicular ao sol nos equinócios da Primavera e de Outono. Em qualquer outro dia um pequeno erro vai acontecer.

Os seguidores solares de eixo único são relativamente simples e vão aumentar a eficiência do sistema.

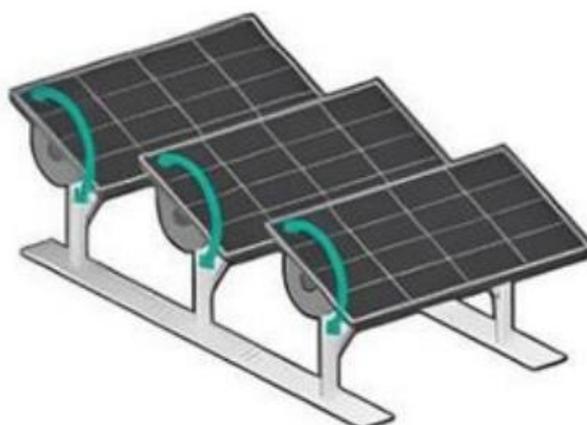
Figura 8 – Exemplo de sistema seguidor solar de eixo único.



2.2.2 SEGUIDOR SOLAR DE EIXO HORIZONTAL

Neste modelo de seguidor, os painéis são fixados sobre um eixo horizontal giratório, que vai servir como pivô, isso permite um ajuste de inclinação sazonal e melhor aproveitamento do sol. São seguidores muito simples, de instalação muito econômica e com pouca manutenção. A eficiência deste arranjo é menor em relação aos outros seguidores, mas mesmo assim é uma opção a ser considerada quando o objetivo é aumentar a eficiência total do sistema, pois este sistema pode suportar um grande número de painéis. O seguidor de eixo horizontal, diferentemente de outros seguidores, não necessita de um sistema automático de posicionamento, podendo antes funcionar através de uma série de posições fixas, determinadas anteriormente a instalação.

Figura 9 – Exemplo de sistema seguidor com eixo horizontal.



Fonte: CALCA (2023)

2.2.3 SEGUIDOR DE EIXO VERTICAL OU AZIMUTE

Neste tipo de seguidor, o painel é instalado com inclinação fixa sobre uma base giratória, que acompanha a trajetória do sol, provocando uma variação do azimute ao longo do dia.

É possível afirmar que um seguidor vertical vai colher menos 7% da radiação que um seguidor de dois eixos e mais 4% do que um seguidor polar (CORTEZ, 2013).

A vantagem deste tipo de seguidor é o fato de ser muito robusto e de fácil implementação, em muitos casos esta vantagem compensa a menor radiação colhida. Por essa razão vem ganhando espaço no mercado dos seguidores.

Figura 10 – Exemplo de sistema seguidor com eixo vertical.



Fonte: CALCA (2023)

2.2.4 SEGUIDOR DE DOIS EIXOS

Este seguidor associa o modelo de eixo vertical com o modelo de eixo horizontal. Possui um poste vertical que permite a rotação no eixo Leste-Oeste e um eixo horizontal que vai permitir movimento sentido Norte-Sul. A estrutura sobre a qual os painéis vão ser montados está presa ao eixo que permite o movimento Norte-Sul. É o modelo de seguidor que apresenta maior eficiência dentre os citados aqui, usado principalmente nos parques solares e em instalações de grandes dimensões. Alguns deles podem suportar uma área de colheita até 300 metros quadrados (CORTEZ, 2013).

A grande desvantagem deste tipo de seguidor é o esforço a que estão sujeitos, principalmente devido ao seu peso e ao fato de que tem que ser bloqueados sempre que se registrar muito vento.

Em muitas aplicações, devido à complexidade mecânica necessária para a estrutura e manutenção, este tipo de seguidor acaba se tornando muito caro, não compensando o ganho em eficiência de geração, quando comparados com um seguidor vertical.

Figura 11 – Exemplo de sistema seguidor de dois eixos.

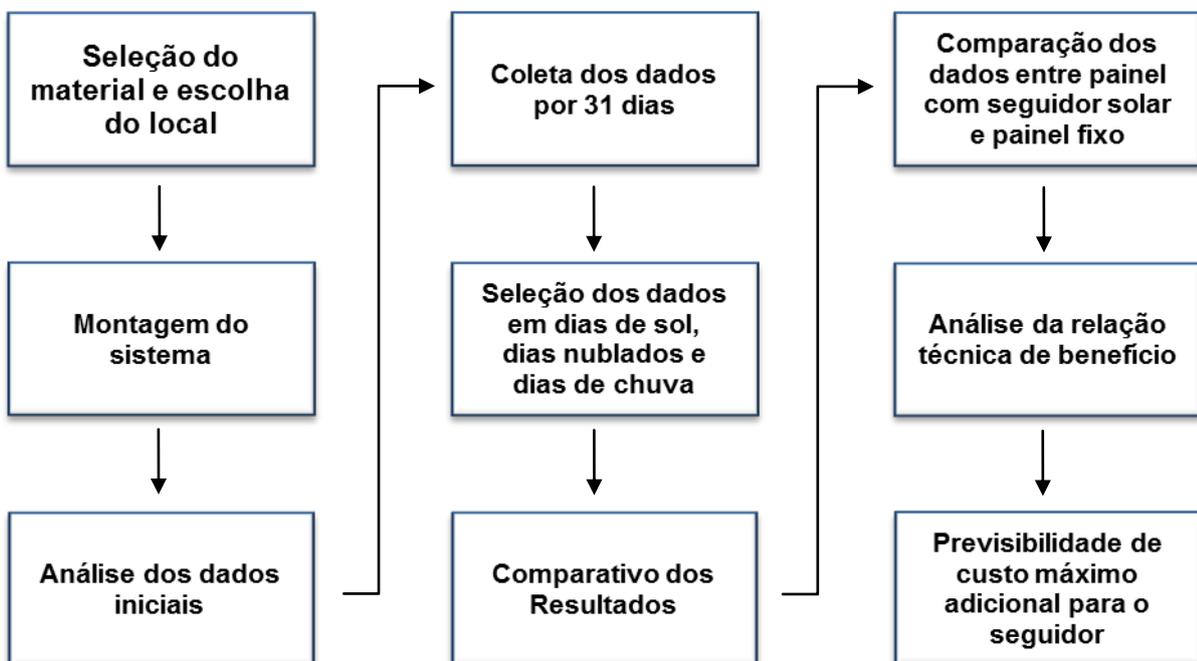


Fonte: CONTEUDISTA (2021)

3 METODOLOGIA

O procedimento metodológico adotado para aquisição de dados, análise e avaliação está sintetizado na Figura 12, demonstrando o sequenciamento de atividades desenvolvidas. Esse procedimento foi criado para analisar os dados obtidos a partir da instalação de teste criada e que está detalhada no Capítulo 4. A partir desse protótipo, foi possível obter dados conclusivos que permitem mostrar vantagens técnicas e financeiras do sistema móvel quanto ao sistema fixo de transformação de energia do Sol em eletricidade.

Figura 12 – Metodologia adotada para execução do trabalho.



Fonte: O Autor

Seguindo a estrutura, primeiramente foram levantados dados durante um período de 31 dias, no intervalo de 16 de setembro até 16 de outubro de 2023. Esse período de primavera é uma época de temperaturas amenas e com bom potencial de radiação solar sem ultrapassar a temperatura de perda de rendimento da maioria dos painéis fotovoltaicos. Após isso, foi feita uma classificação dos dados em 3 categorias:

- dias de sol;
- dias nublados;

- dias de chuva.

Estas ações foram necessárias para avaliar o desempenho de cada sistema individualmente sob cada uma das condições climáticas acima durante o período de monitoramento. Posteriormente foi feito um comparativo geral de potência máxima e energia gerada entre o sistema com painel fotovoltaico seguidor solar e o sistema com painel fotovoltaico fixo.

Tecnicamente, é importante separar os dias com maior ou menor insolação para caracterizar, posteriormente, os aspectos que levem ao usuário tomar a decisão de usar ou não o seguidor solar, baseando-se na característica predominante em sua região. Além disso, foi feito o levantamento da média de todos esses dias para uma análise maior do sistema e suas condições de monitoramento.

Cabe salientar, por fim, que no período observado, tivemos uma boa variação de dias chuvosos, nublados e de Sol, permitindo, com isso, avaliar de forma objetiva o rendimento do gerador.

3.1 Técnicas empregadas para coletar e organizar os dados

Para coletar os dados e poder analisá-los de forma coerente e eficaz seria necessário medir de forma periódica a corrente e a tensão dos módulos instalados e realizar esse processo por todo tempo de observação.

Felizmente, os equipamentos atualmente empregados como inversores de potência CC para CA, nos sistemas fotovoltaicos, apresentam monitoramento instantâneo da potência gerada. Com isso, é possível quantificar a energia que os arranjos, painéis ou células fotovoltaicas transformam de luz em eletricidade.

A Figura 13 apresenta o inversor utilizado, um micro-inversor da marca Deye, modelo SUN2000G3-US-220.

Esse inversor possui quatro entradas MPPT para painéis solares, com monitoramento independente por entrada e conexão wifi para envio de dados ao portal da SOLARMAN, que podem ser acessados de qualquer lugar com conexão a internet.

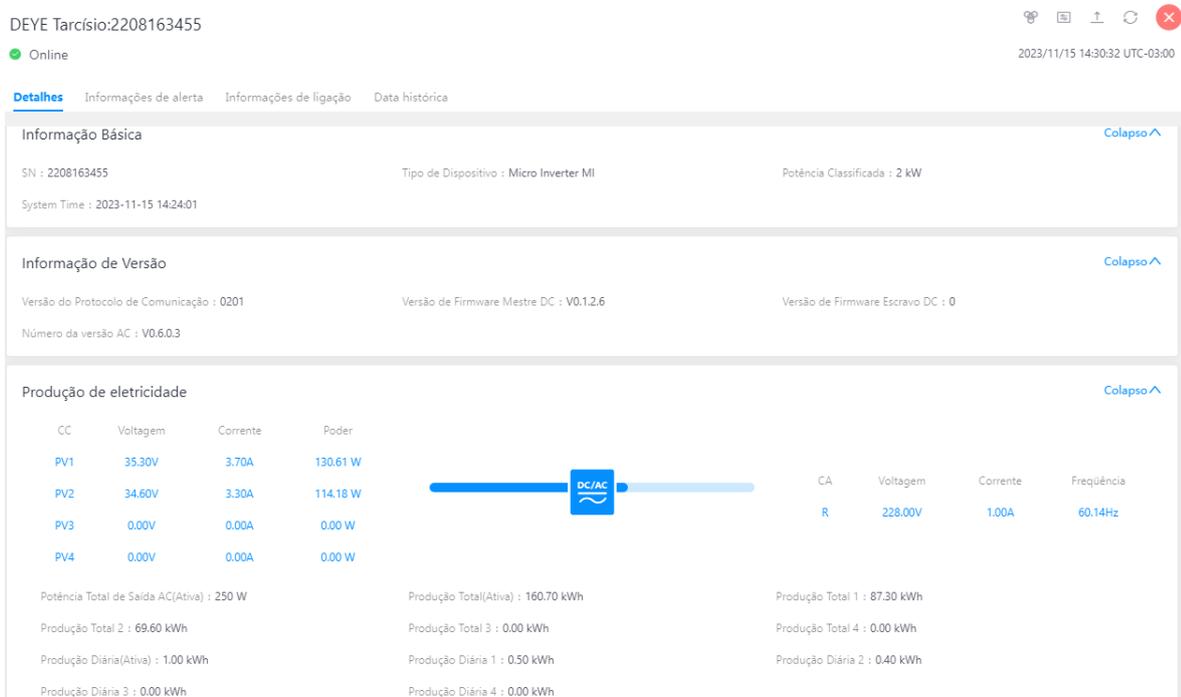
Figura 13 – Inversor utilizado no estudo



Fonte: Deye Inversores (2023)

Através da ferramenta ilustrada na Figura 14 foi possível adquirir e analisar os dados para o sistema em teste.

Figura 14 – Software do sistema de inversores empregado.



Fonte: SOLARMAN(2023)

Através desse software é possível monitorar grandezas como: Produção diária, produção mensal, potência e tensão CC de cada entrada, potência e tensão

CA da saída, frequência de saída e diversas outras. Foram colhidos dados de potência CC e produção diária de cada painel, isso possibilitou a criação de um banco de dados do período em análise.

Os dados obtidos com o inversor são exportados para um computador e com a utilização da ferramenta de planilhas Excel, foi possível fazer a organização e tratamento desses dados e a partir daí, gerar curvas de desempenho para cada situação.

4 DESENVOLVIMENTO DO TRABALHO

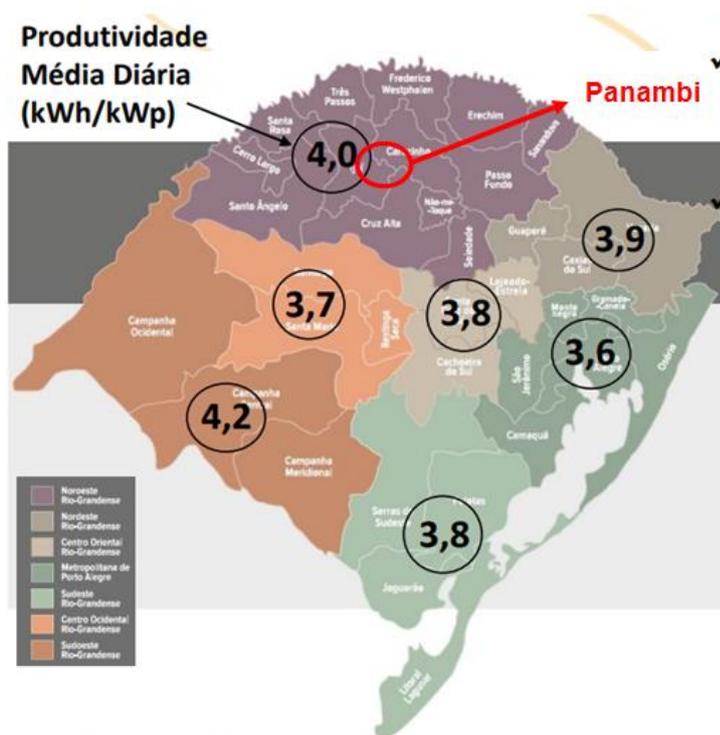
Para realizar as medições a empresa patrocinadora dos testes, forneceu os equipamentos e a mão de obra para montagem e monitoramento. Neste capítulo está descrito como foi realizado o trabalho, detalhes e métodos utilizados, esses são os tópicos abordados:

- localização da instalação;
- arranjo e funcionamento do sistema;
- levantamento de dados.

4.1 Localização da instalação

A instalação está localizada na cidade de Panambi, que pertence à região Noroeste do RS, privilegiada com um enorme potencial fotovoltaico. Com um ângulo de inclinação de 28° orientado para o norte, a região se torna o segundo maior potencial do estado. Isso pode ser verificado na Figura 15, que apresenta o potencial médio anual por regiões.

Figura 15 – Potencial Fotovoltaico médio por regiões.



A Figura 16 mostra uma imagem aérea do local da instalação, está situada na sede da empresa Widitec/Qualyagro, próximo a fábrica 2.

Figura 16 – Localização geográfica das instalações fotovoltaicas.



Fonte: Google Maps.

A instalação fica localizada nas seguintes coordenadas: Latitude de $28^{\circ}20'55.0''S$ e longitude de $53^{\circ}30'18.3''W$. Com a utilização de uma ferramenta para cálculo da posição do sol no céu para cada local sobre a terra a qualquer hora do dia, é possível verificar a trajetória do sol durante o período analisado e também durante o ano inteiro. A Figura 17 mostra a trajetória do sol durante esse período.

Nessa figura, a linha superior, que delimita a área em amarelo, representa a trajetória do sol no pior caso para geração solar fotovoltaica, é quando ocorre o solstício de inverno, no dia 21 de junho, é o dia com menos horas de sol do ano. Já no limite inferior ocorre o contrário, representa o solstício de verão, dia 21 de dezembro, dia com maior número de horas de sol do ano e o melhor caso para geração de energia fotovoltaica. A linha em amarelo localizada entre o limite superior e limite inferior representa a trajetória solar no período de análise desse trabalho.

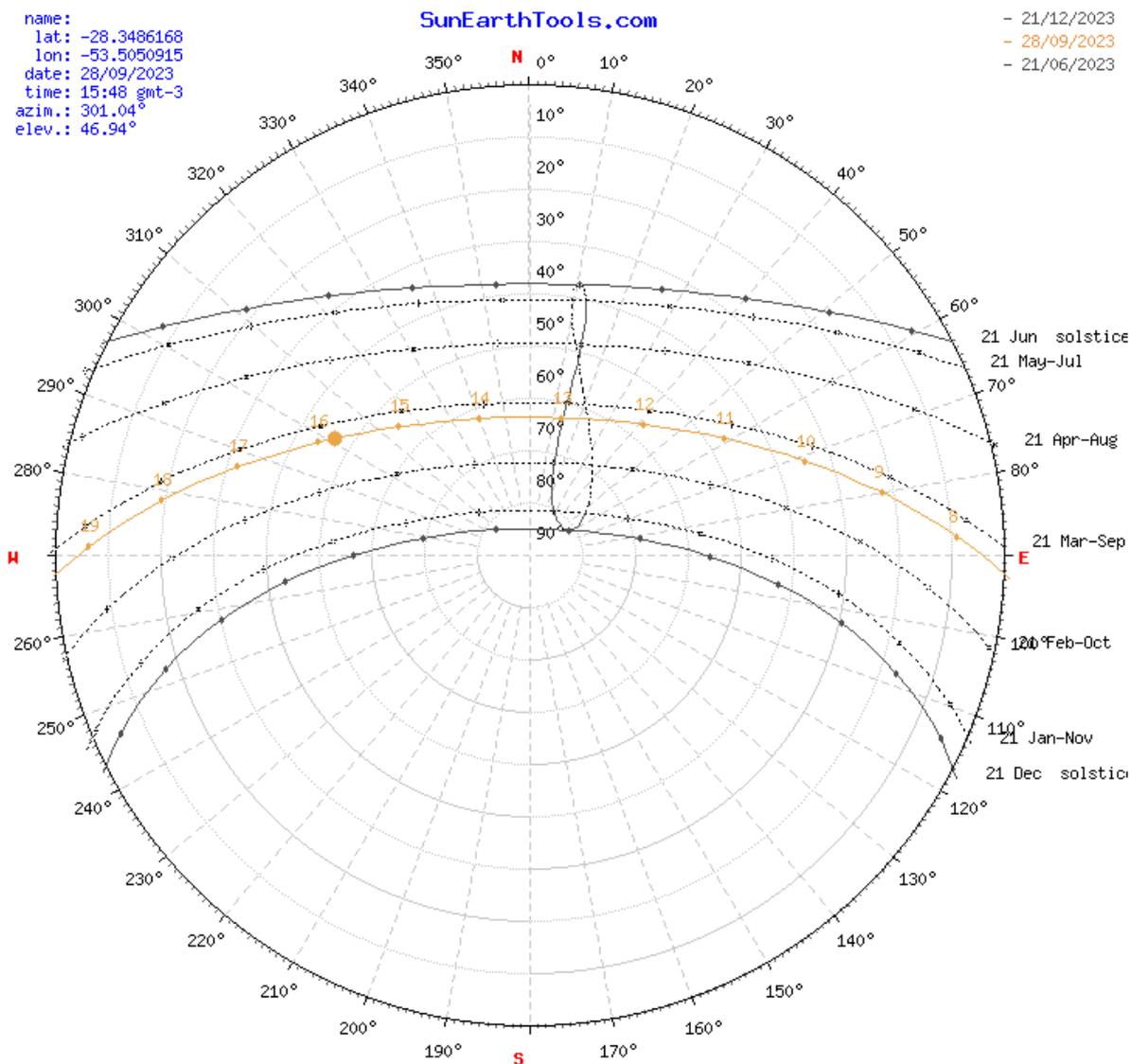
Figura 17 – Trajetória solar durante o período de análise.



Fonte: SunEarthTools (2023).

Na Figura 18 estão apresentadas as trajetórias do sol em cada mês do ano no local onde o sistema está instalado, as linhas contínuas superior e inferior, representam o pior e melhor caso sucessivamente, como na imagem anterior, que são os meses de junho e dezembro, as linhas pontilhadas entre as contínuas representam a trajetória do sol em pares de meses intermediários a estes. A primeira linha pontilhada mostra a trajetória do sol nos meses de maio e julho, a segunda linha pontilhada mostra o trajeto nos meses de abril e agosto, a terceira linha pontilhada mostra o trajeto nos meses de março e setembro, a quarta linha pontilhada mostra o trajeto nos meses de fevereiro e outubro e a quinta linha pontilhada representa a trajetória nos meses de janeiro e novembro.

Figura 18 – Trajetória solar durante o ano inteiro.



Fonte: SunEarthTools (2023).

É possível notar que a trajetória do sol nessa região varia um ângulo de $46,94^\circ$ em relação a terra no período entre solstícios de 21 de junho até 21 de dezembro, o que torna maior a vantagem de um sistema com seguidor solar em dois eixos sobre um sistema fixo.

4.2 Arranjo e funcionamento do sistema

4.2.1 CARACTERIZAÇÃO DA CONDIÇÃO CLIMÁTICA LOCAL

Para a filtragem de dias de Sol, dias nublados e dias de chuva, utilizou-se informações fornecidas pelo Portal Ecoflex, da empresa patrocinadora, mostrado na Figura 19.

Figura 19 – Sistema de informações da estação meteorológica.



Fonte: QualyAgro (2023)

Nesse portal encontram-se dados climáticos como: temperatura, umidade relativa do ar, histórico de chuvas, entre outros. Coletados por estações meteorológicas fabricadas e instaladas pela empresa patrocinadora. Através da estação meteorológica Ecoflex localizada junto à instalação, foi possível classificar com precisão cada condição climática durante o período de teste.

4.2.2 A INSTALAÇÃO DE TESTE

O sistema conta com dois painéis solares fotovoltaicos monocristalinos idênticos, instalados bem próximos, um na estrutura do seguidor solar em dois eixos e o outro na estrutura fixa inclinado para o norte. Esses são os responsáveis pela conversão da radiação solar em energia elétrica de corrente contínua (CC). Está mostrado na Figura 20.

Figura 20 – Disposição dos painéis solares.



Fonte: O Autor.

A conversão da energia em CC vinda dos painéis para CA e entrega a rede elétrica, é feita através do micro inversor *on-grid*, que foi fixado na estrutura de metal abaixo do painel solar fixo. Este inversor está recebendo a energia proveniente do painel com seguidor em sua entrada PV1 e a energia vinda do painel fixo em sua entrada PV2. Está mostrado na Figura 21.

Figura 21 – Micro inversor.



Fonte: O Autor.

O seguidor solar conta com dois motores de passo CC individuais, um responsável pelo giro sentido Norte-Sul e o outro pelo giro sentido Leste-Oeste. O

mecanismo conta com correias, transmissões, redutoras e roscas. É possível ver em detalhes na Figura 22.

Figura 22 – Mecanismo responsável pelo giro do seguidor solar.



Fonte: O Autor.

Esse seguidor solar é direcionado na posição do sol através de sensores, utilizando um conjunto de mini painéis solares posicionados estrategicamente, com uma barreira de alumínio entre eles, o qual faz sombra nesses painéis em posicionamento diferente de 90° com o sol, gerando desequilíbrio de tensão, conforme o sol muda de posição, ele se posiciona de acordo com a comparação da tensão de saída de dois desses painéis, tanto na vertical como na horizontal, através de um micro controlador. Pode ser visto na Figura 23.

Figura 23 – Painéis solares de referência para o seguidor.



Fonte: O Autor.

O controlador responsável por comparar saída dos sensores e acionar motores para posicionamento pode ser visto no circuito da Figura 24. Nessa figura também se vê uma fonte CC 12 V, que é utilizada para alimentação do circuito de controle e motores de passo do seguidor.

Figura 24 – Controle de posição e acionamento dos motores do seguidor solar.



Fonte: O Autor.

4.3 Levantamento de dados

Para o levantamento e comparação dos dados foram utilizados dois painéis fotovoltaicos idênticos, um instalado de forma fixa no plano inclinado de 28° em direção ao norte e o outro instalado na estrutura giratória com seguidor solar. Na tabela 2 se encontram as especificações dos painéis.

Tabela 2 – Especificações Técnicas dos Painéis Fotovoltaicos.

Painel Fotovoltaico de Silício Monocristalino	
Máx. Potência	360 W
Máx. Tensão de Pico	37,35 V
Máx. Corrente de Pico	9,64 A
Tensão de Circuito Aberto	44,82 V
Corrente de Curto-Circuito	10,60 A
Dimensões	1950*990*40 mm

Fonte: Canadian Solar (2023)

Embora existam painéis com potência superior a 500 W atualmente, estes painéis de 360 W permitem observar as características de desempenho com relação ao sistema pretendido. Nesse caso a tabela apresenta suas características de funcionamento.

Para efetuar as medidas de geração foi utilizado um inversor com entradas separadas para o painel com seguidor e o fixo, de forma a obter os dados em tempo real, monitorando e salvando as informações em banco de dados próprio do mesmo, como forma de garantir as considerações a respeito do estudo. Na Tabela 3 estão descritas as especificações do micro Inversor.

Decidiu-se adotar esse modelo de inversor levando em conta a sua eficiência, versatilidade de instalação e confiabilidade nas informações, além do fato de possuir 4 entradas MPPTs individuais, o que possibilita a coleta simultânea de dados dos dois sistemas com um único equipamento

Tabela 3 – Especificações Técnicas do Micro Inversor.

Micro Inversor DEYE SUN2000G3-US-220	
Dados de Entrada (CC)	
Nº de entradas MPPT	4
Potência de entrada recomendada	210~600 W
Máx. Tensão CC de Entrada	60 V
Faixa de Operação do MPPT	25~55 V
Faixa de Tensão Operacional CC	20~60 V
Máx. Corre de Curto-Circuito CC	16 A
Max. Corrente de Entrada	12,5 A x4
Eficiência Estática do MPPT	99%
Dados de Saída (CA)	
Máx. Potência de Saída	2000 W
Máx. Corrente de Saída	8,8 A
Tensão Nominal / Faixa	220 / 176~242 V
Frequência Nominal / Faixa	60 / 55~65 Hz
Fator de Potência	>0,99
Eficiência Ponderada CEC	95%

Fonte: Deye Inversores (2023)

Esse inversor aceita uma potência de até 600 W e tensão de 60 V por entrada PV, possui potência nominal de 2000 W de saída CA em uma tensão de 220 V e frequência de 60 Hz.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

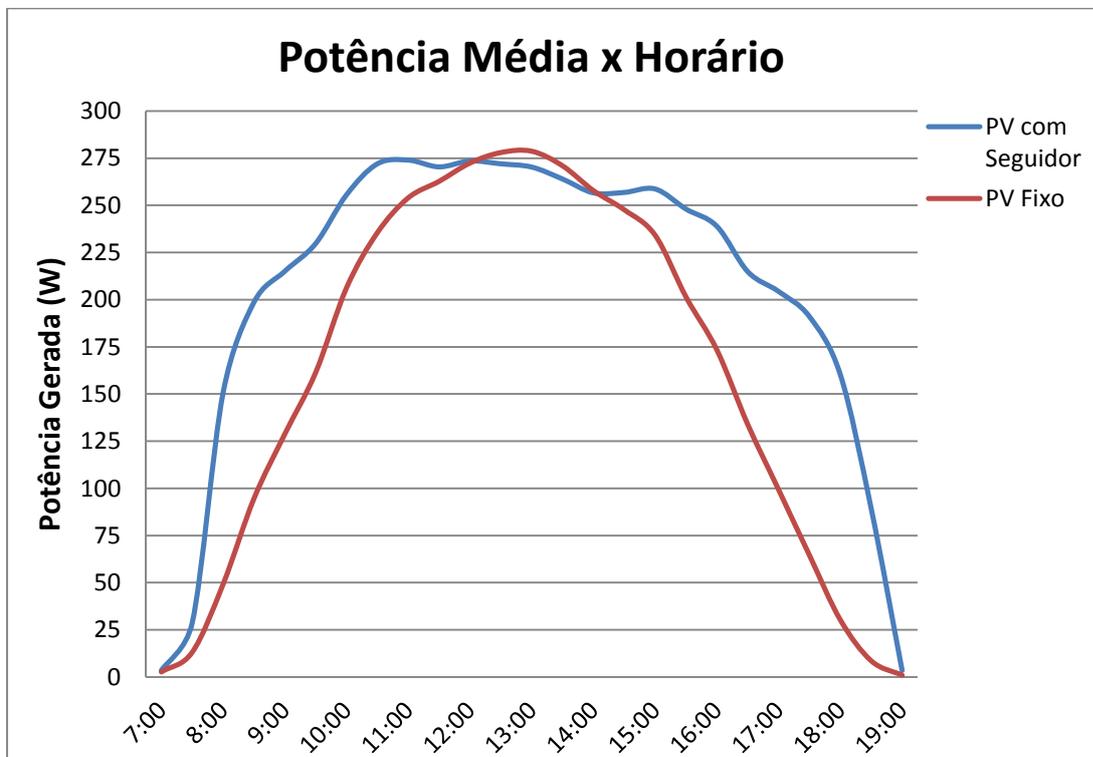
Neste capítulo serão apresentados os resultados de rendimento dos sistemas para cada condição estabelecida anteriormente: dias de sol, dias nublados e dias de chuva. Após será feito um comparativo geral de todo período analisado.

Durante os 31 dias de observação para o teste efetuados tivemos 8 dias de sol, 11 dias nublados e 12 dias de chuva, característicos desse período primaveril do ano.

5.1 Dias de sol

Foram considerados como dias de sol os dias em que o céu estava predominantemente limpo, com poucas nuvens e sem nenhum período de chuva durante o dia. Onde a incidência de luz solar direta torna-se mais elevada. A Figura 25 apresenta o comparativo da média de energia dos 8 dias considerados.

Figura 25 – Comparativo de potência média de geração nos dias de sol.



Fonte: O Autor.

A linha em azul representa a potência gerada no painel com seguidor solar e a linha em vermelho representa a potência gerada no painel fixo. É possível visualizar o ganho de eficiência no sistema com seguidor, pois em torno das 08:30h o painel já consegue entregar uma potência de 200 W ao sistema e se mantém acima deste valor até as 17h, enquanto o sistema com painel fixo só consegue entregar em torno de 100 W nesse horário, o painel fixo só consegue entregar os 200 w a partir das 10h e se mantém acima disto apenas até as 15:30h. Por volta das 11 h da manhã o painel com seguidor já havia chegado, praticamente, na sua potência máxima, enquanto o outro ainda estava aumentando sua potência de conversão que só alcançaria o pico por volta das 13 h da tarde.

A Tabela 4 apresenta o resumo dos dados obtidos do sistema no período sob análise.

Tabela 4 – Comparativo de Geração de energia nos dias de sol.

	PV com Seguidor	PV Fixo
Dias de análise	8	
Produção média diária	2,46 kWh	1,89 kWh
Produção total	19,7 kWh	15,1 kWh
Diferença percentual	30,46 %	

Fonte: O Autor.

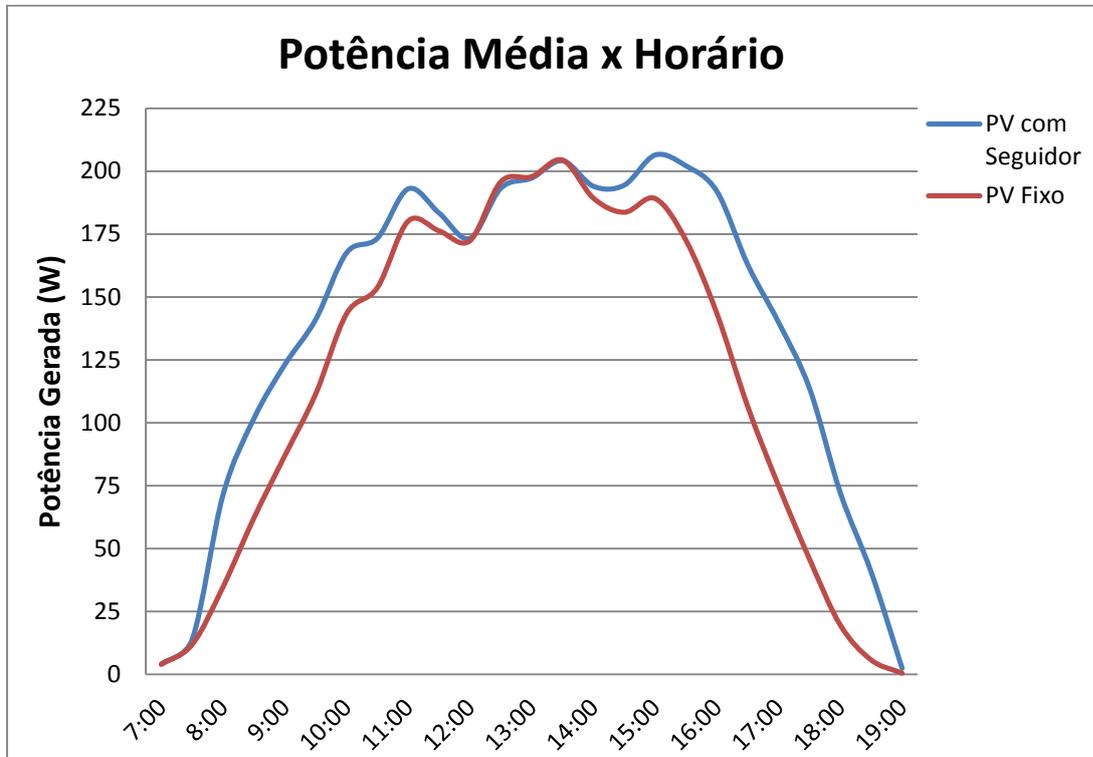
Durante esses 8 dias de sol, o sistema com seguidor conseguiu obter uma produção média diária de 2,46 kWh e totalizou uma geração de 19,7 kWh, enquanto o painel fixo teve uma produção média diária de 1,89 kWh e produção total de apenas 15,1 kWh. Portanto o painel com seguidor teve uma produção de energia de 4,6 kWh a mais do que o fixo nessa condição climática, isso significa uma produção 30,46% superior do seguidor em relação ao fixo. Esse valor é bem considerável quando se trata de ganho de desempenho em sistemas fotovoltaicos.

5.2 Dias nublados

Para considerar dias nublados, foram usados dias com muitas nuvens, poucos intervalos de sol e sem chuva, o que faz aumentar a incidência solar difusa,

diminuindo a incidência solar direta nos painéis. A Figura 26 apresenta a média de energia gerada para os 11 dias considerados.

Figura 26 – Comparativo de potência média de geração nos dias nublados.



Fonte: O Autor.

Nesse caso é possível notar uma queda na potência máxima gerada para os dois sistemas, não ultrapassando os 210 W durante o dia, porém o sistema com seguidor consegue atingir o pico em torno das 11h e manter até as 16h enquanto o outro só atinge por volta das 12:30h até as 14h. No geral, o seguidor tem um ganho médio diário de 01:30h no tempo de geração.

A Tabela 5 apresenta o resumo dos dados obtidos do sistema nesses dias.

Tabela 5 – Comparativo de Geração de energia nos dias nublados.

	PV com Seguidor	PV Fixo
Dias de análise	11	
Produção média diária	1,64 kWh	1,34 kWh
Produção total	18 kWh	14,7 kWh
Diferença percentual	22,45%	

Fonte: O Autor.

Durante os 11 dias considerados nublados, o sistema com seguidor conseguiu obter uma produção média diária de 1,64 kWh e totalizou uma geração de 18 kWh, enquanto o painel fixo teve uma produção média diária de 1,34 kWh e produção total de 14,7 kWh. Portanto o painel com seguidor teve uma produção de energia de 3,3 kWh a mais do que o fixo nessa condição climática, isso significa uma produção 22,45% superior do seguidor em relação ao fixo.

5.3 Dias de chuva

Foram considerados como dias de chuva, desde os dias que em algum momento ocorreu pancadas de chuva intermitentes até os dias com chuva pesada e tempestades.

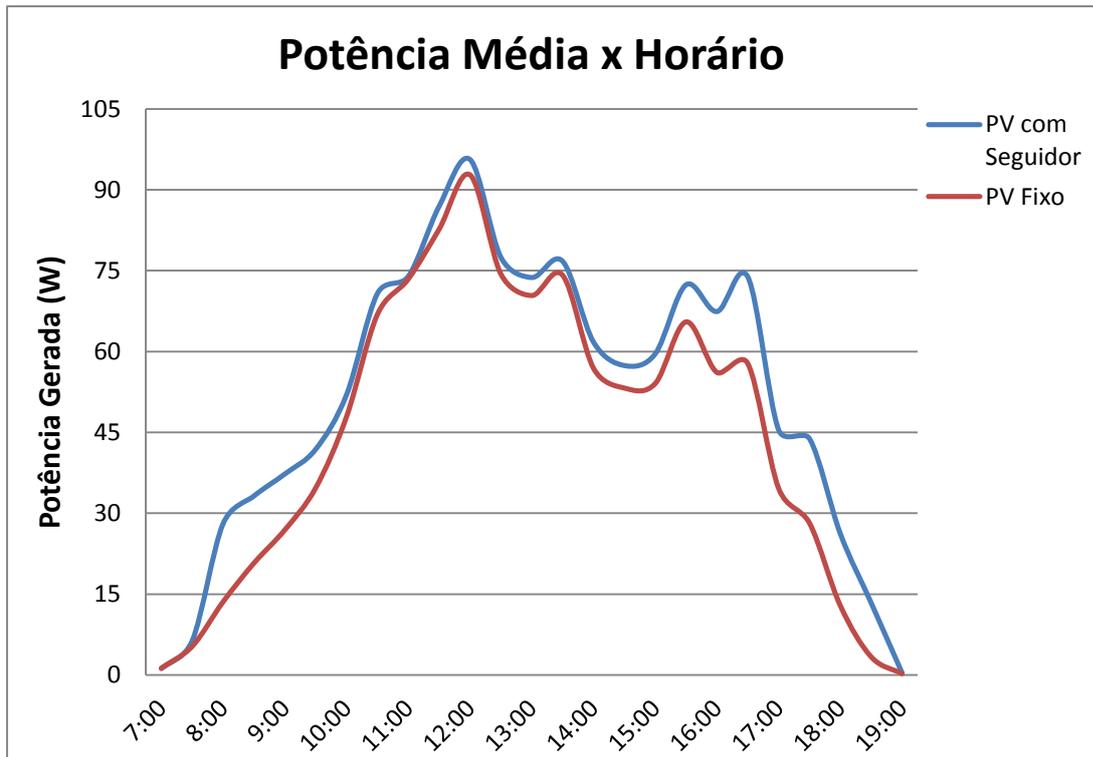
Para essa análise, deve ser levado em consideração o método adotado para proteção contra tempestades e economia de energia presente no sistema com seguidor solar. Esse método garante que a plataforma onde é fixado o painel solar, permaneça travada em posição horizontal durante períodos onde a radiação solar fica abaixo da mínima necessária para localização e posicionamento através dos sensores. Essa ação faz com que seja reduzida a área de contato com o vento em caso de tempestades em dias chuvosos e também reduz o consumo de energia nos motores de posicionamento, pois não fica posicionando o seguidor em dias sem sol.

A Figura 27 apresenta a média de energia gerada durante os 12 dias considerados.

Nota-se que nesse caso os valores ficam bem próximos, isso é devido ao sistema de proteção do seguidor, que basicamente o torna um painel fixo em dias muito fechados e chuva pesada. Além disso, ocorre uma forte queda na produção de energia devido ao bloqueio de luz solar gerado pelas nuvens grossas.

Ainda assim é possível observar certo deslocamento superior na curva de potência do seguidor em relação ao painel fixo, pois por menor que seja o intervalo com radiação solar direta ou difusa durante um dia chuvoso, o painel seguidor tendeu a se posicionar em direção ao sol para melhor aproveitá-lo.

Figura 27 – Comparativo de potência média de geração nos dias de chuva.



Fonte: O Autor.

A Tabela 6 mostra o resumo comparativo dos sistemas para dias de chuva.

Tabela 6 – Comparativo de Geração de energia nos dias de chuva.

	PV com Seguidor	PV Fixo
Dias de análise	12	
Produção média diária	0,44 kWh	0,38 kWh
Produção total	5,3 kWh	4,6 kWh
Diferença percentual	15,22 %	

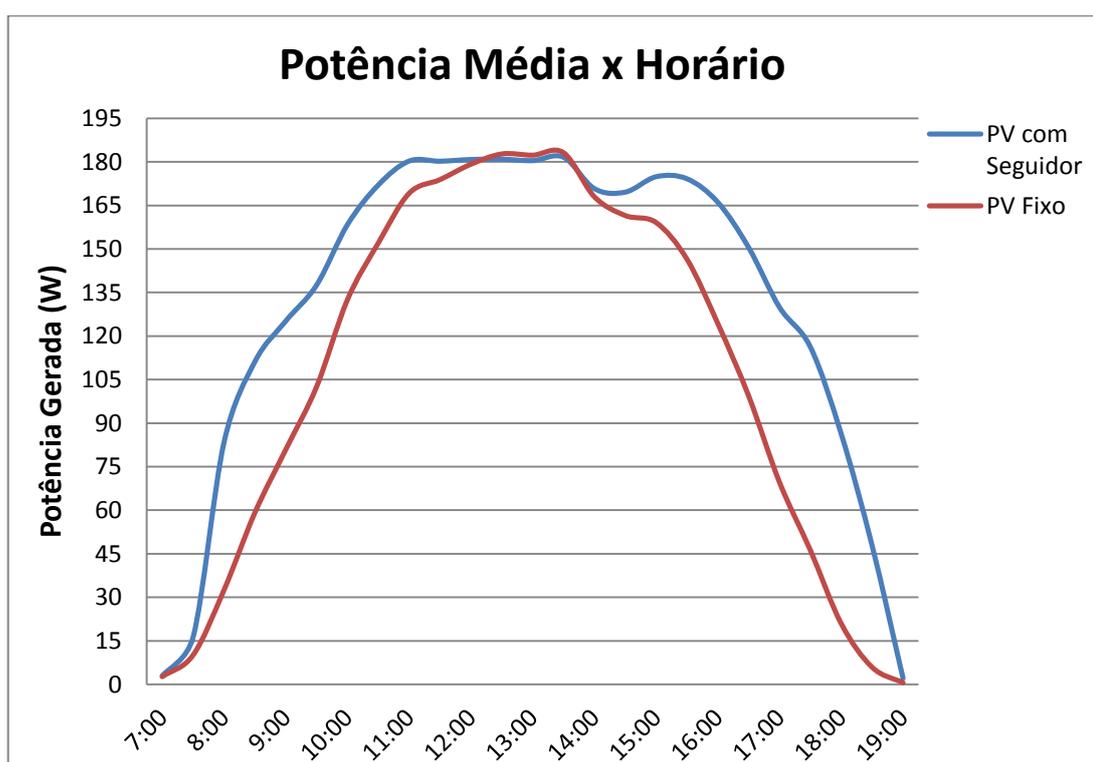
Fonte: O Autor.

Durante os 12 dias com chuva, a produção média diária do seguidor foi de 0,44 kWh e totalizou uma geração de 5,3 kWh, enquanto o painel fixo teve uma produção média diária de 0,38 kWh e produção total de 4,6 kWh. Nesse caso os valores foram mais próximos, o painel com seguidor teve uma produção de energia de 0,7 kWh a mais do que o fixo nessa condição climática, isso significa uma produção 15,22% superior do seguidor em relação ao fixo.

5.4 Resultado geral

Aqui é feita a comparação dos sistemas durante todo o período de 31 dias sob análise, uma média geral englobando as 3 condições climáticas abordadas anteriormente. Está mostrado na Figura 28 o resultado desse comparativo.

Figura 28 – Comparativo geral de potência média de geração do período em análise.



Fonte: O Autor.

A potência máxima fica próxima dos 185 W, porém o seguidor consegue atingi-la próximo das 11h enquanto o outro só atinge a partir das 13:30h, outra observação é de que a partir das 10h o seguidor já consegue fornecer 150 W e se mantém acima disso até as 16:30h, o painel fixo só fica acima dos 150 W entre 10:30h e 15h.

A Tabela 7 apresenta o resumo geral de geração durante esses 31 dias em questão.

Tabela 7 – Comparativo geral de Geração de energia do período em análise.

	PV com Seguidor	PV Fixo
Dias de análise	31	
Produção média diária	1,39 kWh	1,11 kWh
Produção total	43 kWh	34,4 kWh
Diferença percentual	25 %	

Fonte: O Autor.

O sistema com seguidor consegue gerar 43 kWh com produção média diária de 1,39 kWh, contra 34,4 kWh gerados pelo painel fixo e produção média diária de 1,11 kWh durante os 31 dias, isso implica numa diferença de 8,6 kWh gerados a mais pelo seguidor. Portanto, para esse cenário analisado com 8 dias de sol, 11 dias nublados e 12 dias de chuva, o resultado foi de uma geração de energia 25% superior do painel com seguidor em relação ao fixo.

Até aqui foram feitas comparações apenas de eficiência de geração, sem mencionar o consumo gerado pelo sistema seguidor com seus motores e circuito de controle. Para tornar o resultado mais preciso, será levado em consideração o consumo da fonte 12 V que alimenta o sistema seguidor, ou seja, o consumo necessário para o seguidor completar seu ciclo.

Com a utilização de um wattímetro digital foi possível medir o consumo de energia em um dia de sol, onde o seguidor trabalha normalmente, fazendo todo o percurso da trajetória solar.

Obteve-se um consumo de 100 Wh/dia, a partir disso será refeita a análise para encontrar o desempenho nos dias de sol e nublados, pois estas condições mostraram maior impacto na geração total de energia, representando 87,67% da produção, lembrando também que é onde o seguidor desenvolve melhor seu papel, já que nos dias de chuva permanece em posição de proteção na maior parte do tempo.

5.4.1 DIAS DE SOL

Considerando os resultados obtidos anteriormente, será aplicado na produção total um desconto de 0,8 kWh equivalente ao período de 8 dias de sol, o valor resultante será considerado como produção total corrigida ou produção total líquida.

A Tabela 8 mostra o novo resultado para os dias de sol levando em conta a energia consumida pelo seguidor.

Tabela 8 – Comparativo de energia corrigida nos dias de sol.

	PV com Seguidor	PV Fixo
Dias de análise	8	
Produção média diária	2,36 kWh	1,89 kWh
Produção total líquida	18,9 kWh	15,1 kWh
Diferença percentual	25,16 %	

Fonte: O Autor.

O valor líquido total de energia entregue pelo seguidor durante os 8 dias de sol ficou em 18,9 kWh e o ganho que antes era de 30,46% em relação ao fixo caiu para 25,16%, ainda continua com uma diferença de 3,8 kWh superior ao fixo, que é bem considerável quando se trata de ganho em eficiência.

5.4.2 DIAS NUBLADOS

Para os dias nublados, foram considerados 11 dias, isso significa um consumo de 1,1 kWh durante o período pelo sistema seguidor.

A Tabela 9 mostra o novo resultado para os dias nublados levando em conta a energia consumida pelo seguidor.

Tabela 9 – Comparativo de energia corrigida nos dias nublados.

	PV com Seguidor	PV Fixo
Dias de análise	11	
Produção média diária	1,54 kWh	1,34 kWh
Produção total líquida	16,9 kWh	14,7 kWh
Diferença percentual	14,96 %	

Fonte: O Autor.

A energia líquida entregue pelo seguidor foi de 16,9 kWh durante os 11 dias nublados, enquanto o outro entregou 14,7 kWh, isso resulta num valor de 2,2 kWh a mais que o sistema fixo, o ganho que era de 22,45%, após o valor corrigido fica em 14,96%.

Para os dias de chuva não foi possível obter um valor médio de consumo do seguidor, visto que é uma condição que torna o dia muito irregular na questão de seguimento solar, pois o seguidor fica desligado em períodos sem luminosidade mínima, além disso, tiveram dias de chuva pesada sem sol nenhum e dias com períodos intermitentes de chuva e sol. Como descrito anteriormente, os dias de chuva causaram pouco impacto na geração, mesmo sendo o maior período com 12 dias, significou apenas 12,32% da energia gerada, então serão desconsiderados nessa etapa do cálculo.

5.4.3 RESULTADO GERAL CORRIGIDO

Para essa análise serão considerados os 8 dias de sol somados aos 11 dias nublados, ou seja, um total de 19 dias. Considerando os valores já corrigidos anteriormente para esses casos, agora serão somados.

A Tabela 10 mostra o resultado de desempenho da soma dos períodos de sol e nublados.

Tabela 10 – Comparativo de energia corrigida para dias de sol mais dias nublados.

	PV com Seguidor	PV Fixo
Dias de análise	19	
Produção média diária	1,88 kWh	1,56 kWh
Produção total líquida	35,8 kWh	29,8 kWh
Diferença percentual	20,13 %	

Fonte: O Autor.

Então somando os dois cenários, o seguidor consegue fornecer 35,8 kWh contra os 29,8 kWh, isso dá uma produção líquida de 6 kWh superior nesse período de 19 dias, ou seja, um ganho de 20,13% do seguidor em relação ao fixo.

Deve-se ter em mente que esse resultado obtido é corresponde apenas para esse cenário analisado. Para diferentes condições como: maior número de dias de sol, diferentes estações do ano, períodos menos chuvosos, entre outros, devem ser feitas novas análises. Dessa forma, sugere-se que sejam utilizados os dados de ganho de geração por dia típico, no caso ensolarado ou nublado, para casos de

prospecção em outras instalações. Nesse caso para dia ensolarado o ganho médio diário ficou em 25,16% e para dias nublados, ficou em 14,96%.

6 CONCLUSÃO

A partir do grande volume de energia elétrica com origem fotovoltaica no Brasil (cerca de 35 GW instalados), o objetivo deste trabalho foi fazer uma comparação de rendimento na geração, durante um período de 31 dias, entre um sistema fotovoltaico que utiliza seguidor solar em dois eixos e um sistema fotovoltaico fixo inclinado para o Norte, ambos com a mesma capacidade de geração, sob mesmas condições climáticas.

Foram levantados dados de geração nesses 31 dias e depois de feito o tratamento dos dados foi possível chegar aos valores de ganho na geração bruta, o seguidor conseguiu ser superior em todas as condições climáticas abordadas (o que era esperado), obtendo um ganho médio geral de 25%. Feito isso, foi retirado do cálculo o consumo de energia referente ao funcionamento do seguidor, nessa etapa foram eliminados os dias de chuva, pois não geram impacto significativo na análise, visto que o seguidor fica inoperante nessas condições. Com isso chegou-se a um ganho efetivo de 20,13% somando as condições de sol e nubladas, sendo que se comparadas individualmente, no período ensolarado o seguidor obteve ganho médio diário de 25,16% e no período nublado ganho de 14,96%.

Com esses resultados, torna-se possível avaliar a utilização desse sistema para outras regiões, com diferentes períodos ensolarados e nublados levando em consideração o ganho médio diário para cada condição climática. O que, comparativamente com o ganho de rendimento, aponta para um ganho efetivo em recurso energético disponível.

Dessa forma, o trabalho atingiu o objetivo geral que era fazer a comparação de desempenho dos sistemas de geração fotovoltaica numa instalação real. Sendo que o sistema com seguidor se mostrou superior, com ganho líquido médio de 20,13% em relação ao fixo durante o período de teste na região analisada, o que o torna um atrativo comercial desde que seu custo de instalação e manutenção fique abaixo dessa diferença percentual quando comparado com o sistema convencional. Também foi constatado que em regiões onde predominam períodos de sol, o sistema seguidor terá um rendimento ainda maior, mesmo descontando as perdas por temperatura acima da nominal dos painéis.

Como trabalhos futuros, é necessário fazer um estudo econômico do ganho efetivo da geração de energia elétrica quantificado em valores monetários para

descontar do investimento maior do seguidor, revelando a recuperação do investimento e permitindo avaliar custos de manutenção ao longo da vida útil dos equipamentos.

REFERÊNCIAS

ANEEL, Agência Nacional de Energia Elétrica. 2023. **BEM – Balanço Energético Nacional 2023**. Disponível em: < www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-748/topico-681/BEN_Síntese_2023_PT.pdf>. Acesso em: 25 out. 2023.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA - ANEEL. **Atlas de Energia Elétrica do Brasil**. 3ª edição, Brasília, 2008.

Associação Brasileira de Energia Solar Fotovoltaica – ABSOLAR. Disponível em: <www.absolar.org.br>. Acesso em: 20 de nov. 2023.

BLASZCZAK, V. Análise de Eficiência de Painel Fotovoltaico com Sistema Tracker Seguidor Solar. Disponível em: <rd.uffs.edu.br/bitstream/prefix/1695/1/BLASZCZAK.pdf>. Acesso em: 29 set. 2023.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. **Diretrizes do programa nacional de pequenas centrais hidrelétricas**. Rio de Janeiro: Eletrobrás, 1982.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. Disponível em: <www.mme.gov.br>. Acesso em: 17 mar. 2021.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. Empresa de Pesquisa Energética. Disponível em: <www.epe.gov.br>. Acesso em: 22 mar. 2021.

CALCA, Marcus Vinicius Contes *et al.* Análise de mercado de sistemas de energia solar fotovoltaica com ênfase na área rural brasileira. Disponível em: <www.researchgate.net/publication/367329893_Analise_de_mercado_de_sistemas_de_energia_solar_fotovoltaica_com_ênfase_na_area_rural_brasileira>. Acesso em: 29 set. 2023.

Canadian Solar. Disponível em: <www.canadiansolar.com>. Acesso em: 25 out. 2023.

CONTEUDISTA. Entenda como funciona o seguidor solar (Tracker) – Energia Solar. Disponível em: <energes.com.br/seguidor-solar-tracker>. Acesso em: 29 set. 2023.

CORTEZ, R. Sistema de seguimento solar em produção de energia fotovoltaica. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Engenharia Universidade do Porto. Cidade de Portugal, p. 94. 2023.

Deye Inversores. Disponível em: <www.deyeinversores.com.br>. Acesso em: 28 set. 2023.

DUNLAP, R.A. Sustainable energy. Halifax: Dalhousie University, 2015.

Efeito Fotoelétrico x Efeito Fotovoltaico: Diferenças. Disponível em: <www.portalsolar.com.br/efeito-fotoeletrico-efeito-fotovoltaico>. Acesso em: 12 out. 2023.

Google Maps. Disponível em: <www.google.com.br/maps/place/28%C2%B020'55.0%22S+53%C2%B030'18.3%22W>. Acesso em: 28 set. 2023.

INVESTRS. **Energias Renováveis.** Disponível em: <investrs.rs.gov.br/conteudo/interna/onde-investir/energias-renovaveis/>. Acesso em: 23 out. 2023.

MAUAD, Frederico Fábio *et al.* **Energia Renovável no Brasil:** Análise das principais fontes energéticas renováveis brasileiras. São Carlos: EESC/USP, 2017.

PEREIRA, E. B.; MARTINS, F. R.; GONÇALVES, A. R.; COSTA, R. S.; LIMA, F. L.; RÜTHER, R.; ABREU, S. L.; TIEPOLO, G. M.; PEREIRA, S. V.; SOUZA, J. G. **Atlas brasileiro de energia solar.** 2.ed. São José dos Campos: INPE, 2017. 80p. Disponível em: <<http://doi.org/10.34024/978851700089>>. Acesso em: 20 nov. 2023

Plano decenal de expansão de energia 2030. Brasília: MME; Rio de Janeiro: EPE, 2021. Disponível em: <www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-

abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-490/PDE%202030_RevisaoPosCP_rv2.pdf>. Acesso em: 19 mar.2021.

QualyAgro. Disponível em <www.qualyagro.com.br>. Acesso em: 16 de out. 2023.

RIO GRANDE DO SUL. **Atlas Solar**. Secretaria de Minas e Energia, UFRGS, UERGS, 2018.

SOLARMAN. Disponível em: <www.solarmanpv.com>. Acesso em: 15 de nov. 2023.

SunEarthTools. Cálculo da posição do sol para cada local sobre a terra a qualquer hora do dia. Disponível em: <www.sunearthtools.com >. Acesso em: 28 set. 2023.

VILLALVA, M.G. **Energia solar fotovoltaica: conceitos e aplicações**. 3. ed. São Paulo: Érica, 2015.

ZAUZA, Silvana. **Estudo para encontrar ponto de equilíbrio econômico na implantação de geração de energia elétrica com fontes renováveis na área rural**. Orientador: Mauro Rodrigues. 2018. 84 f. TCC (Graduação) – Curso de Engenharia Elétrica, Departamento de Engenharia, Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul, Santa Rosa, 2018. Disponível em: <bibliodigital.unijui.edu.br:8443/server/api/core/bitstreams/25fb9622-6b53-4191-b92c-5ef7a37d202a/contente>. Acesso em: 1 out. 2023.