
ARQUITETURA E ENGENHARIA CIVIL contemporânea: inovação, tecnologia e sustentabilidade

Adriano Mesquita Soares
(Organizador)

Direção Editorial

Prof.º Dr. Adriano Mesquita Soares

Organizador

Prof.º Dr. Adriano Mesquita Soares

Capa

AYA Editora

Revisão

Os Autores

Executiva de Negócios

Ana Lucia Ribeiro Soares

Produção Editorial

AYA Editora

Imagens de Capa

br.freepik.com

Área do Conhecimento

Engenharia

Conselho Editorial

Prof.º Dr. Aknaton Toczec Souza

Centro Universitário Santa Amélia

Prof.ª Dr.ª Andréa Haddad Barbosa

Universidade Estadual de Londrina

Prof.ª Dr.ª Andreia Antunes da Luz

Faculdade Sagrada Família

Prof.º Dr. Argemiro Midonês Bastos

Instituto Federal do Amapá

Prof.º Dr. Carlos López Noriega

Universidade São Judas Tadeu e Lab. Biomecatrônica - Poli - USP

Prof.º Me. Clécio Danilo Dias da Silva

Centro Universitário FACEX

Prof.ª Dr.ª Daiane Maria De Genaro Chirolí

Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Prof.ª Dr.ª Danyelle Andrade Mota

Universidade Federal de Sergipe

Prof.ª Dr.ª Déborah Aparecida Souza dos Reis

Universidade do Estado de Minas Gerais

Prof.ª Ma. Denise Pereira

Faculdade Sudoeste – FASU

Prof.ª Dr.ª Eliana Leal Ferreira Hellvig

Universidade Federal do Paraná

Prof.º Dr. Emerson Monteiro dos Santos

Universidade Federal do Amapá

Prof.º Dr. Fabio José Antonio da Silva

Universidade Estadual de Londrina

Prof.º Dr. Gilberto Zammar

Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Prof.ª Dr.ª Helenadja Santos Mota

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Baiano, IF Baiano - Campus Valença

Prof.ª Dr.ª Heloísa Thaís Rodrigues de Souza

Universidade Federal de Sergipe

Prof.ª Dr.ª Ingridi Vargas Bortolaso

Universidade de Santa Cruz do Sul

Prof.ª Ma. Jaqueline Fonseca Rodrigues

Faculdade Sagrada Família

Prof.º Dr. João Luiz Kovaleski

Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Prof.º Me. Jorge Soistak

Faculdade Sagrada Família

Prof.º Dr. José Enildo Elias Bezerra

Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia do Ceará, Campus Ubajara

Prof.º Me. José Henrique de Goes

Centro Universitário Santa Amélia

Prof.ª Dr.ª Karen Fernanda Bortoloti

Universidade Federal do Paraná

Prof.ª Dr.ª Leozenir Mendes Betim

Faculdade Sagrada Família e Centro de Ensino Superior dos Campos Gerais

Prof.ª Ma. Lucimara Glap

Faculdade Santana

Prof.º Dr. Luiz Flávio Arreguy Maia-Filho

Universidade Federal Rural de Pernambuco

Prof.º Me. Luiz Henrique Domingues

Universidade Norte do Paraná

Prof.º Me. Milson dos Santos Barbosa

Instituto de Tecnologia e Pesquisa, ITP

Prof.º Me. Myller Augusto Santos Gomes

Universidade Estadual do Centro-Oeste

Prof.ª Dr.ª Pauline Balabuch

Faculdade Sagrada Família

Prof.º Me. Pedro Fauth Manhães Miranda

Centro Universitário Santa Amélia

Prof.º Dr. Rafael da Silva Fernandes

Universidade Federal Rural da Amazônia, Campus Parauapebas

Prof.ª Dr.ª Regina Negri Pagani

Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Prof.º Dr. Ricardo dos Santos Pereira

Instituto Federal do Acre

Prof.ª Ma. Rosângela de França Bail

Centro de Ensino Superior dos Campos Gerais

Prof.º Dr. Rudy de Barros Ahrens

Faculdade Sagrada Família

Prof.º Dr. Saulo Cerqueira de Aguiar Soares

Universidade Federal do Piauí

Prof.ª Ma. Silvia Aparecida Medeiros

Rodrigues

Faculdade Sagrada Família

Prof.ª Dr.ª Silvia Gaia

Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Prof.ª Dr.ª Sueli de Fátima de Oliveira Miranda

Santos

Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Prof.ª Dr.ª Thaisa Rodrigues

Instituto Federal de Santa Catarina

Prof.º Dr. Valdoir Pedro Wathier

Fundo Nacional de Desenvolvimento Educacional, FNDE

© 2021 - **AYA Editora** - O conteúdo deste Livro foi enviado pelos autores para publicação de acesso aberto, sob os termos e condições da Licença de Atribuição Creative Commons 4.0 Internacional (**CC BY 4.0**). As ilustrações e demais informações contidas desta obra são integralmente de responsabilidade de seus autores.

A772 Arquitetura e engenharia civil contemporânea inovação, tecnologia e sustentabilidade [recurso eletrônico]. / Adriano Mesquita Soares (organizador) -- Ponta Grossa: Aya, 2021. 223 p. – ISBN 978-65-88580-77-6

Inclui biografia

Inclui índice

Formato: PDF

Requisitos de sistema: Adobe Acrobat Reader.

Modo de acesso: World Wide Web.

DOI 10.47573/aya.88580.2.48

1. Engenharia civil. 2. Materiais de construção. 3. Concreto. 4. Geração de energia fotovoltaica. 5. Sistemas de energia fotovoltaica. 6. Engenharia elétrica. 7. Energia solar. 8. Acidentes – Prevenção. 9. Estações meteorológicas. 10. Arquitetura. I. Soares, Adriano Mesquita. II. Título

CDD: 624

Ficha catalográfica elaborada pela bibliotecária Bruna Cristina Bonini - CRB 9/1347

International Scientific Journals Publicações de Periódicos e Editora EIRELI

AYA Editora©

CNPJ: 36.140.631/0001-53

Fone: +55 42 3086-3131

E-mail: contato@ayaeditora.com.br

Site: <https://ayaeditora.com.br>

Endereço: Rua João Rabello Coutinho, 557

Ponta Grossa - Paraná - Brasil

84.071-150

Análise da eficiência através do PVsyst de seguidores solares em sistemas de geração fotovoltaica conectados à rede

Efficiency analysis through PVsyst of solar trackers in grid-connected photovoltaic generation systems

Márcio Cândido Pereira

Centro Universitário Uniredentor

Rafael Lima de Oliveira

Centro Universitário Uniredentor

<http://lattes.cnpq.br/6212659806406513>

DOI: 10.47573/aya.88580.2.48.11

Resumo

A alta demanda energética e necessidade de descentralização das fontes de geração de energia requer que o desenvolvimento de tecnologias visando o aumento de desempenho de fontes renováveis também seja potencializado. O que corrobora com este entendimento é que a energia solar fotovoltaica possui grande oportunidade devido à sua facilidade de implementação e baixo impacto ambiental, inclusive em centros urbanos. A análise da eficiência de seguidores solares em sistemas fotovoltaicos conectados à rede permite que sejam aprimoradas as melhores técnicas e tecnologias disponíveis do mercado. Este artigo visa comparar matematicamente através da simulação em software específico e referências bibliográficas, quais são as vantagens na utilização de um sistema fotovoltaico com seguidores solares conectado à rede e quais devem ser as expectativas ao se adotar este tipo de tecnologia.

Palavras-chave: energia solar. seguidores solares. on-grid.

Abstract

: The high energy demand and the need for decentralization of energy generation sources require that the development of technologies aimed at increasing the performance of renewable sources is also potentialized. What corroborates this understanding is that photovoltaic solar energy has a great opportunity due to its ease of implementation and low environmental impact, including in urban centers. The analysis of the efficiency of solar trackers in photovoltaic systems connected to the grid allows the improvement of the best techniques and technologies available on the market. This article aims to mathematically compare, through simulation in specific software and bibliographical references, what are the advantages of using a photovoltaic system with solar trackers connected to the grid and what the expectations should be when adopting this type of technology.

keywords: solar energy. solar tracker. on-grid.

INTRODUÇÃO

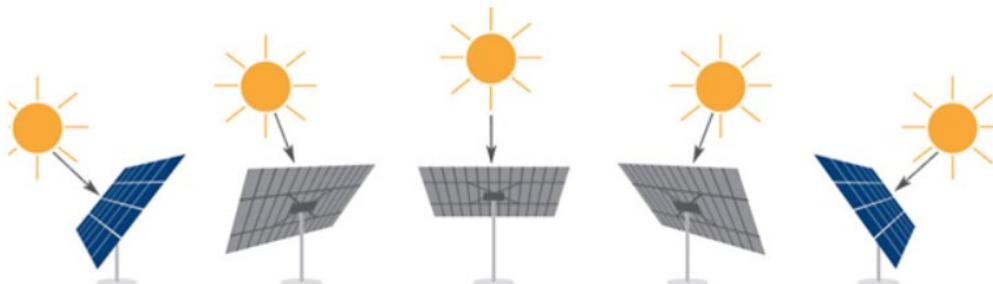
O desenvolvimento da humanidade, ao longo de muitos anos, garantiu melhores índices de conforto e longevidade devido a avanços na agricultura, na medicina, dentre outros. A partir destes, a densidade populacional no planeta vem aumentando e, com isso, também aumenta a procura por recursos energéticos, causando impactos ambientais que vêm sendo discutidos mundialmente, mediante a conscientização da gravidade da questão. Nesse sentido, a crescente preocupação com as questões ambientais e a conscientização mundial sobre a promoção do desenvolvimento em bases sustentáveis vêm estimulando a realização de pesquisas de desenvolvimento tecnológico que visam à incorporação dos efeitos da aprendizagem e a consequente redução dos custos de geração dessas tecnologias (FREITAS & DATHEIN, 2013).

A energia solar fotovoltaica é definida como a energia gerada através da conversão direta da radiação solar em eletricidade. Isto se dá, por meio de um dispositivo conhecido como célula fotovoltaica que atua utilizando o princípio do efeito fotoelétrico ou fotovoltaico (IMHOFF, 2007).

Os sistemas de seguidores solares, também conhecidos como rastreadores ou trackers, têm como objetivo aumentar a captação da radiação solar pelo painel fotovoltaico ao procurar sempre manter o painel perpendicular à radiação solar incidente, proporcionando desta maneira, uma situação mais favorável para o aproveitamento da energia solar.

Com base nestas informações, entende-se que é necessário que sejam estabelecidos parâmetros matemáticos de quais são os ganhos de um sistema utilizando trackers, onde é possível verificar o funcionamento simplificado na figura 1. Para isso, este estudo aborda simulações através do PVsyst que é um dos softwares mais precisos atualmente no dimensionamento de grandes centros de geração solar fotovoltaica, a fim de validar quais são estes ganhos.

Figura 1 – Seguidor solar exemplificado



Fonte: CANAL SOLAR, 2016

REFERENCIAL TEÓRICO

Módulo fotovoltaico

Em um sistema fotovoltaico os módulos são os elementos responsáveis pela conversão da radiação solar em eletricidade. A ABNT (NBR10899/TB-328) define o módulo fotovoltaico como sendo o “menor conjunto ambientalmente protegido de células solares interligadas, com o objetivo de gerar energia elétrica em corrente contínua”. O conjunto de células conectadas é encapsulado, de modo a oferecer proteção contra a intempérie (principalmente umidade) ao mesmo tempo em que possibilita um caminho ótico para a luz que chega até as mesmas. A maio-

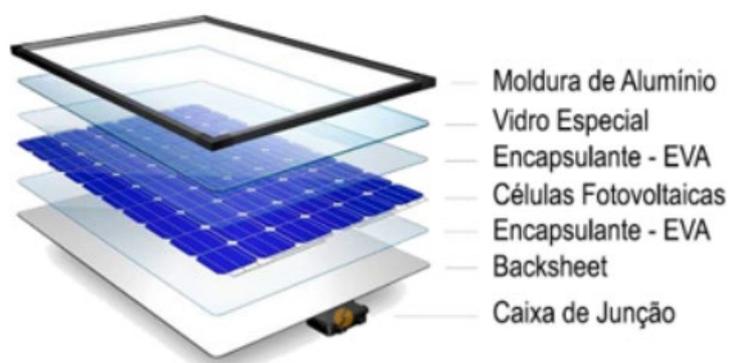
ria dos módulos contam ainda com uma moldura metálica que proporciona a necessária rigidez mecânica ao conjunto e facilita a fixação do módulo. (PRIEB, 2002).

Módulo fotovoltaico monofacial

É um módulo que possui a construção das células fotovoltaicas em apenas uma face, permitindo que apenas a irradiação acima do mesmo seja capaz de exercer o efeito fotovoltaico.

Atualmente é menos utilizado em grandes sistemas fotovoltaicos, como as Usinas Centralizadas que participam do mercado livre de energia. Isto se deve ao fato de que o custo para implementação desta tecnologia em comparação aos módulos bifaciais não está tão distante, levando os projetistas e investidores a utilizarem a segunda opção. A figura 2 descreve as principais características construtivas deste tipo de módulo.

Figura 2 – Modelo construtivo de um módulo fotovoltaico monofacial

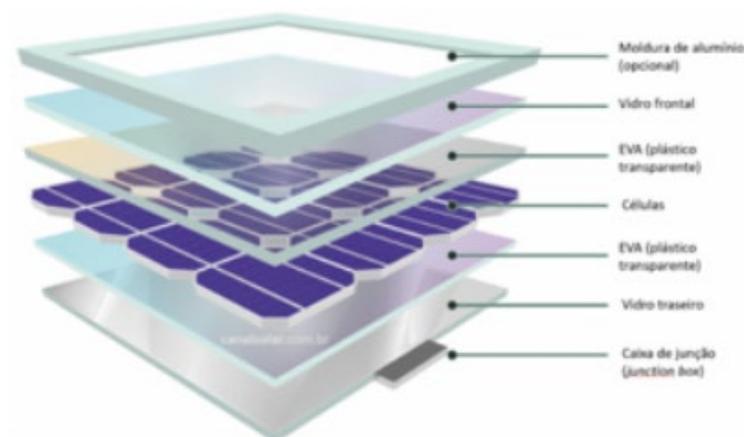


Fonte: CANAL SOLAR, 2016

Módulo fotovoltaico bifacial

Como pode ser observado na figura 3, os painéis fotovoltaicos bifaciais possuem células fotovoltaicas com duas faces em vez de uma para absorver a energia solar radiante. Eles se utilizam do efeito do Albedo, onde a luz solar refletida do solo ou de alguma superfície é absorvida e a partir da qual o painel bifacial é capaz de oferecer um aumento de potência em sua saída. Sob condições de teste padrão (STC), painéis bifaciais podem gerar 30% a mais de energia, fazendo uso de sua superfície traseira. (PORTAL SOLAR, 2016).

Figura 3 – Modelo construtivo de um módulo fotovoltaico bifacial



Fonte: CANAL SOLAR, 2019

Inversor solar

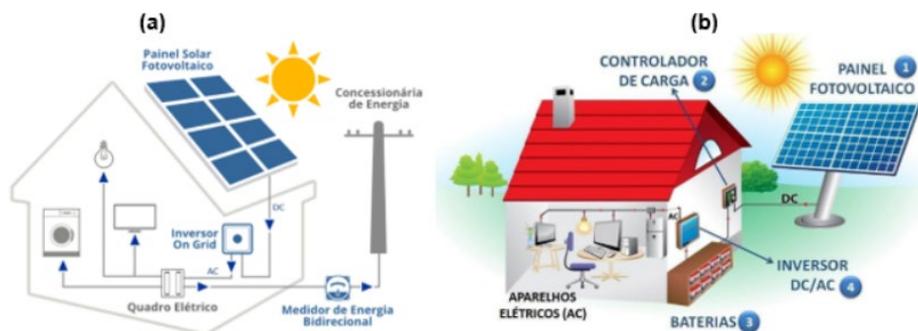
O inversor solar é o equipamento usado para converter a energia gerada pelos painéis solares, de corrente contínua (CC) em corrente alternada (CA), possibilitando o uso da energia elétrica gerada pela energia solar fotovoltaica. (PORTAL SOLAR, 2016)

Enquanto os módulos fotovoltaicos são responsáveis pela captação da energia do sol e conversão em energia elétrica em corrente contínua, os inversores são responsáveis por converter esta energia em corrente alternada para que possa ser transmitida, distribuída e utilizada pela maioria dos equipamentos.

Tipos de inversores

Atualmente existem 3 tipos de inversores solares fotovoltaicos, utilizados para cada tipo de situação.

Figura 4 - Esquema de ligação inversor fotovoltaico on-grid (a) e off-grid(b)



Fonte: CASA SOLAR, 2019

Inversores on-grid

São os inversores que se conectam diretamente à rede de distribuição, sem a possibilidade de armazenamento da energia que eventualmente seja excedente durante a geração, conforme demonstra a figura 4a.

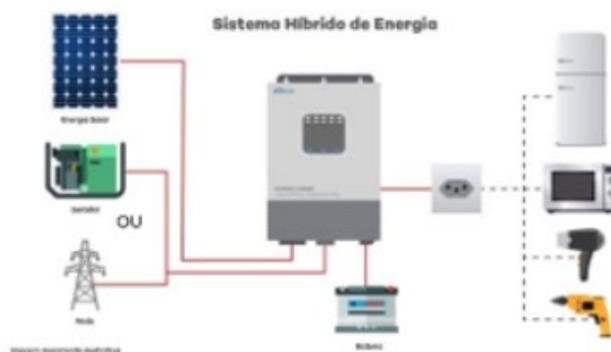
Inversores off-grid

São inversores que não possuem qualquer ligação com a rede de distribuição, onde toda a energia gerada e excedente passa pelo armazenamento em baterias para posterior utilização, como é mostrado na figura 4b.

Inversores híbridos

Como um sistema on-grid comum, este é capaz de injetar a energia excedente na rede de distribuição da concessionária. Todavia, é possível também armazenar a energia gerada em bancos de baterias, como mostra a figura 5, a fim de suprir a necessidade da unidade consumidora em momentos em que a concessionária não está disponível para tal, como por exemplo em casos de falta de energia durante a noite, onde não há geração por parte dos painéis fotovoltaicos.

Figura 5 – Esquema de ligação inversor fotovoltaico OFF-GRID



Fonte: NEO SOLAR, 2018

Estruturas de fixação

Estrutura fixa

Como o próprio nome já diz, estruturas fixas para usinas fotovoltaicas são aquelas que mantêm os módulos limitados a apenas um ângulo de inclinação e um azimuth. As principais aplicações para este tipo de solução são os sistemas de telhado e pequenas usinas de solo, onde não é indicado ou financeiramente atraente implementar um sistema fotovoltaico com tracker. A figura 6 mostra um exemplo de estrutura fixa de solo do tipo monoposte.

Figura 6 - Estrutura fixa concretada para usinas de solo



Fonte: Autoria própria, 2020

Estrutura tracker

Sistemas com seguidores solares geram mais energia do que os sistemas fixos. Isto ocorre devido ao aumento da exposição direta aos raios solares, onde esse ganho pode alcançar valores de 10 a 25%. De certa forma e com as devidas características, faz sentido dizer que um sistema com seguidor solar que aumenta em 25% a produção de energia é semelhante a um sistema fixo 25% maior (contém mais painéis fotovoltaicos). A figura 7 demonstra a aplicação em uma usina de geração distribuída.

Figura 7 - Estrutura tracker 1 eixo para usinas de solo



Fonte: SOLSTÍCIO ENERGIA, 2019

METODOLOGIA DA PESQUISA

Problemática

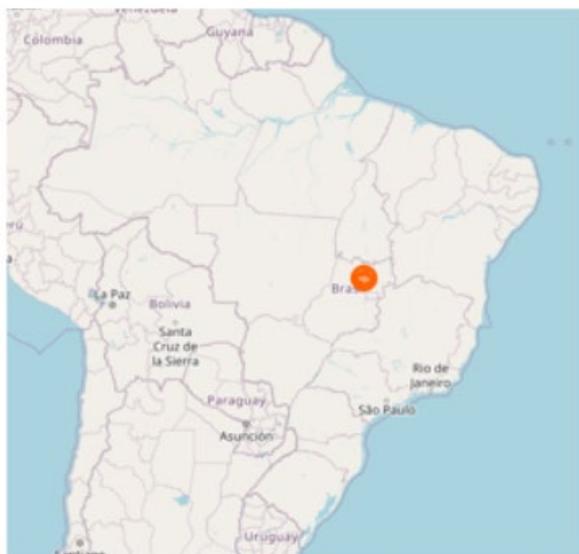
Com o intuito de validar os dados sobre os ganhos de produção de energia pelos sistemas com rastreadores, esta pesquisa visou simular através do software PVsyst quais são as variáveis que são alteradas quando dois sistemas idênticos, apenas com estruturas de fixação diferentes e instalados em diversas regiões do Brasil, são comparados. Para isto, inicialmente foi simulado um sistema para a cidade de Niquelândia, município de Goiás no Brasil por estar localizada em uma região central do país. Os dados das condições e equipamentos implementados para todas as análises são especificados na figura 8 e tabelas de 1 a 5.

Tabela 1 – Localização utilizada para simulação

Item	Descrição
Cidade	Niquelândia
Estado	Goiás
País	Brasil
Latitude	-14,33° S
Longitude	-48,35° O
Albedo	20%
Fuso horário	UTC-3
Dados meteorológicos	METEONORM

Fonte: Parâmetros de simulação adotados pelo projetista, 2021

Figura 8 - Localização de Niquelândia – Goiás – Brasil



Fonte: OpenStreetMap, 2021

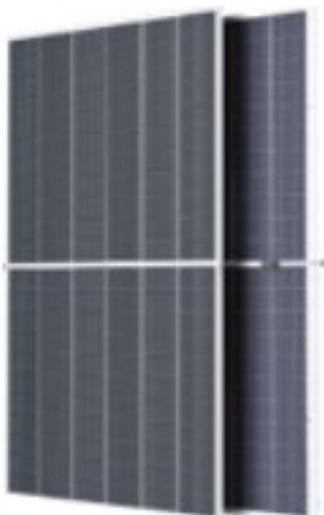
Tabela 2 – Características dos módulos TRINA TSM-660DEG21C.20

Item	Valor	Parâmetro
Potência	660	Wp
Faces sensíveis	2	uni
Largura	1,30	m
Altura	2,38	m
Número de células	132	Uni.
Sup. bruta módulo	3,11	m ²
Sup. sensível módulo	2,91	m ²
Temperatura referência	25	°C
Irradiância GRef	1000	W/m ²
Vco	45,9	V
Vmpp	37,6	V
Pmpp	661,9	W
Efic_mod.	21,3	%
Efic_cel.	22,7	%
Imp	17,62	A
Isc	18,45	A
Imp	17,35	A
Coef. Temp.	-0,34	%/°C
Quantidade	1856	Uni.
Pot. CC total	1225	kWp

Fonte: Datasheet do equipamento, 2020

A figura 9 apresenta visualmente as características do módulo fotovoltaico adotado para as simulações.

Figura 9 - Módulo fotovoltaico bifacial TRINA-660Wp



Fonte: Datasheet do equipamento, 2020

Tabela 3 – Características dos Inversores SUNGROW SG125HV_IEC auto efficiency

Item	Valor	Parâmetro
Modo de operação	MPPT	tecnologia
Conexão	ON-GRID	tecnologia
Vmin CC	860	V
Vmax CC	1550	V
Vmax x grupo CC	1550	V
Tensão rede CA	600	V
Frequência op.	50/60	Hz
Pnom DC	125	kW
Pmáx DC	150	kW
Pnom AC	125	kW
Pmáx AC	125	kW
Inom AC	120	A
Imáx AC	120	A
Eficiência máxima	98,9	%
Eficiência méd. UE	98,7	%
Quantidade	8	Uni.
Pot. CA total	1000	kW
FDI	1,25	%

Fonte: Datasheet do equipamento, 2017

A figura 10 apresenta visualmente as características do inversor solar adotado para as simulações.

Figura 10 - Inversor solar MPPT SUNGROW 125kW



Fonte: Datasheet do equipamento, 2017

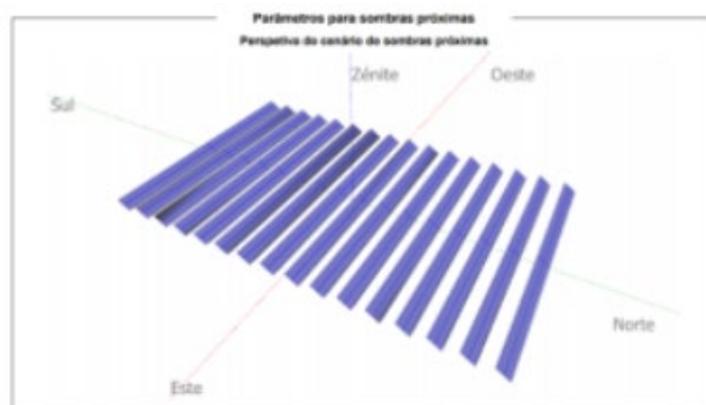
A tabela 4 descreve todas as características implementadas para a simulação das estruturas fixas de solo. A figura 11 apresenta a simulação 3D do layout adotado.

Tabela 4 – Características das estruturas fixas de solo genéricas

Item	Característica
Plano das células	Fixo
Inclinação	14°
Eixo	L-O
Azimute	0°
Altura acima solo	1,5m
Pitch	8m
Largura shed.	4,85m
GCR	59,9%
Sombra estrutura	5%
Mismatch	1%

Fonte: Parâmetros de simulação adotados pelo projetista, 2021

Figura 11 - Disposição em 3D das estruturas fixas



Fonte: Autoria própria, 2021

A tabela 5 sintetiza todas as características do sistema de tracker implementado na simulação.

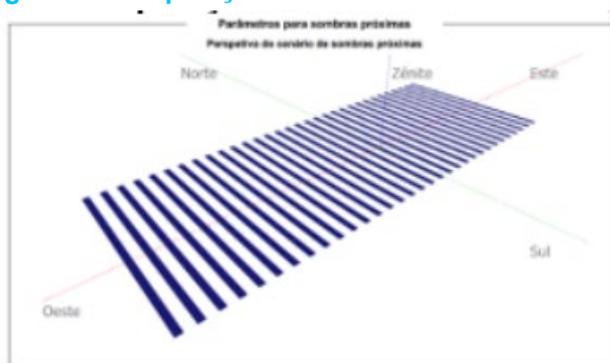
Tabela 5 – Características das estruturas tracker genéricas

Item	Característica
Plano das células	Variável
Inclinação	-60°/+60°
Eixo	N-S
Azimute	-90/90°
Altura acima solo	1,5m
Pitch	6m
Largura shed.	2,40m
GCR	40,1%
Sombra estrutura	5%
Mismatch	1%

Fonte: Parâmetros de simulação adotados pelo projetista, 2021

De forma análoga a estrutura fixa, foi produzido um modelo em 3D também para as simulações das estruturas tracker. A figura 12 demonstra como foi montado o arranjo.

Figura 12 - Disposição em 3D das estruturas tracker



Fonte: Autoria própria, 2021

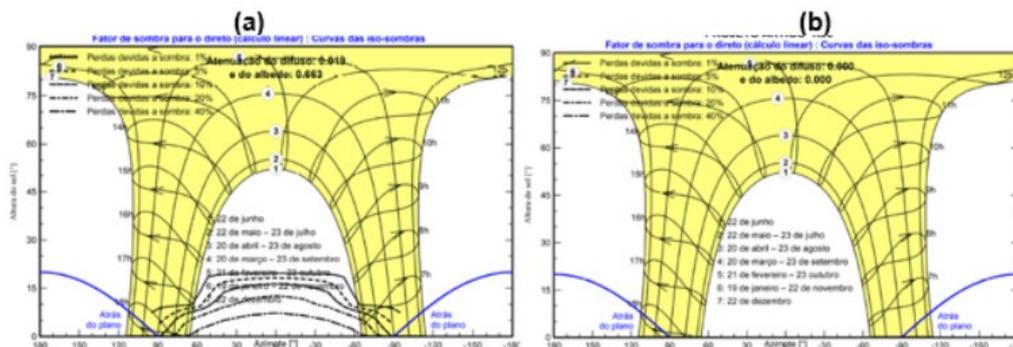
Simulação local

Sombreamento

Para que fosse feita a análise de geração e demais parâmetros pertinentes ao estudo comparativo entre as estruturas utilizadas, foram inseridos todos os dados mencionados na problemática.

Como a principal característica de um sistema com trackers é o não sombreamento dos módulos em qualquer período do dia, o comparativo da figura 13 é importante para que se perceba a diferença através do mapa de sombras mútuas, ou seja, aquelas geradas pelas próprias estruturas do SFV à frente de uma mesa.

Figura 13 - Curvas das iso-sombras (sombreamento mútuo) dos diferentes sistemas



Fonte: Autoria própria, 2021

Como pode ser percebido, nota-se que na figura 13a (SFV fixo), há sombreamento mútuo das estruturas ao longo do dia, principalmente durante o inverno. Por outro lado, a figura 13b (SFV tracker), demonstra o comportamento de um sistema utilizando estruturas de tracker, onde em nenhuma parte do dia ou do ano há sombreamento nos painéis fotovoltaicos.

Dados principais

O software PVsyst foi capaz de gerar um resumo geral de todos os dados principais da simulação. Os quadros comparativos seguem nas figuras 14 e 15.

Figura 14 - Resultados principais da simulação para estrutura fixa

	GlobHor kWh/m²	DiffHor kWh/m²	T_Amb °C	GlobInc kWh/m²	GlobEff kWh/m²	EArray MWh	E_Grid MWh	PR rácio
Janeiro	178.9	93.51	23.79	168.4	166.1	191.0	185.7	0.900
Fevereiro	155.1	76.67	23.74	151.1	147.9	169.0	164.2	0.887
Março	164.9	87.89	23.54	167.8	162.4	187.1	181.9	0.885
Abril	159.8	57.48	23.08	172.2	165.5	187.6	179.2	0.850
Maio	162.8	46.11	21.98	186.2	184.8	211.4	205.4	0.901
Junho	156.2	32.92	20.32	185.0	182.0	210.1	204.1	0.901
Julho	169.6	32.41	20.43	198.9	193.7	222.7	216.4	0.888
Agosto	194.1	33.04	22.09	218.0	210.2	237.1	230.4	0.863
Setembro	187.2	65.23	23.89	196.8	195.2	218.4	212.3	0.881
Outubro	185.9	81.43	24.96	184.1	180.3	204.4	198.7	0.881
Novembro	164.4	83.38	23.37	155.5	150.4	174.9	170.0	0.892
Dezembro	173.9	91.17	23.67	161.8	154.6	180.9	169.5	0.855
Ano	2052.7	781.25	22.90	2145.8	2093.2	2304.7	2317.8	0.882

Fonte: Autoria própria, 2021

Figura 15 - Resultados principais da simulação para estrutura tracker

	GlobHor kWh/m²	DiffHor kWh/m²	T_Amb °C	GlobInc kWh/m²	GlobEff kWh/m²	EArray MWh	E_Grid MWh	PR rácio
Janeiro	178.9	93.51	23.79	212.7	212.9	228.0	221.5	0.850
Fevereiro	155.1	76.67	23.74	186.4	184.8	199.3	193.5	0.847
Março	164.9	87.89	23.54	200.3	196.6	215.9	209.8	0.855
Abril	159.8	57.48	23.08	204.2	198.3	218.5	208.6	0.834
Maio	162.8	46.11	21.98	211.2	211.4	240.8	233.9	0.904
Junho	156.2	32.92	20.32	205.6	203.8	235.4	228.7	0.908
Julho	169.6	32.41	20.43	225.1	220.9	253.8	246.7	0.895
Agosto	194.1	33.04	22.09	259.7	252.2	284.8	278.8	0.870
Setembro	187.2	65.23	23.89	239.3	239.5	262.7	255.2	0.871
Outubro	185.9	81.43	24.96	233.7	231.6	251.5	244.4	0.854
Novembro	164.4	83.38	23.37	199.8	196.0	215.1	209.0	0.854
Dezembro	173.9	91.17	23.67	211.0	204.8	222.3	208.1	0.805
Ano	2052.7	781.25	22.90	2588.9	2552.8	2828.0	2736.1	0.863

Fonte: Autoria própria, 2021

Ao ser efetuada a análise dos quadros, na coluna “E-grid” é possível observar a diferença da geração entre os sistemas ao longo do ano. Neste sentido, quando é feita a operação de diferença entre energia injetada na rede, obtém-se a tabela 6.

Tabela 6 – Diferença de geração entre sistema fixo e tracker

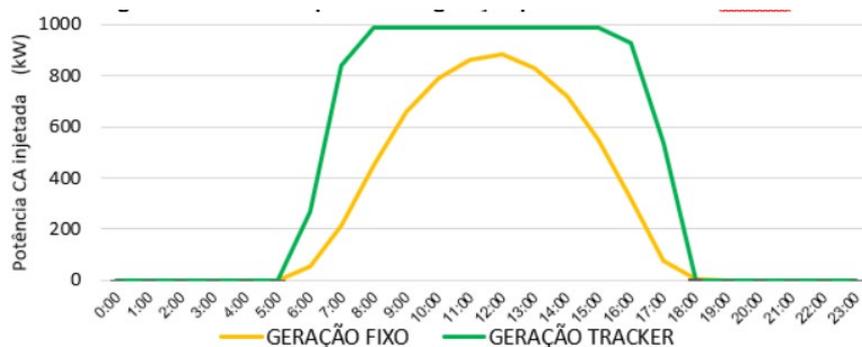
Item	Valor	Unidade
Geração (P50) fixo (1º ano)	2.317,8	MWh
Geração (P50) tracker (1º ano)	2.716,1	MWh
Diferença	418,3	MWh
Diferença %	17,2	%

Fonte: Autoria própria, 2021

Através da simples observação dos valores mencionados na tabela 6, é possível identificar um ganho de 17,2% em valores de geração utilizando-se o mesmo sistema gerador, com a única diferença da implementação das estruturas de tracker.

De maneira complementar, foi realizada uma análise comparativa da geração de dois sistemas em um mesmo dia do ano, próximo ao solstício de verão. Desta forma, obteve-se o gráfico descrito na figura 16.

Figura 16 - Curva comparativa de geração para sistema fixo X tracker



Fonte: Autoria própria, 2021

Para que fosse obtida a curva de geração diária, foi inserido no software que as curvas calculadas deveriam ser no dia 26/12, um dia que apresentava céu totalmente livre de nuvens, dentro do banco de dados METEONORM, utilizado em todos os cálculos.

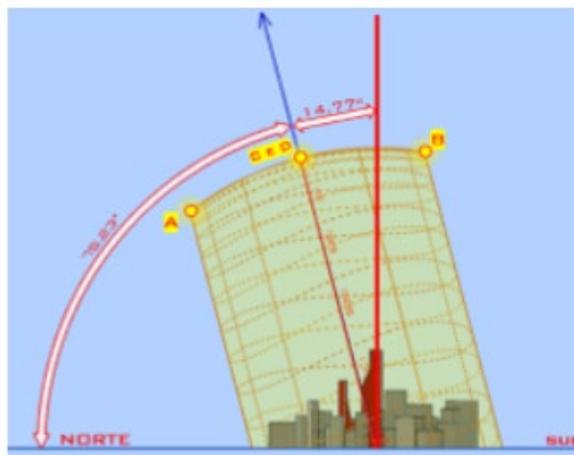
Nota-se que o sistema tracker consegue iniciar a geração de energia em potência quase nominal muito antes de um sistema fixo. Além disso, no início e ao final do dia a geração de energia com um sistema fixo cai drasticamente devido à alta diferença entre o ângulo perpendicular da face do módulo em relação ao sol e também devido às sombras mútuas geradas pelo próprio SFV.

Simulação nacional

Para que fosse possível estabelecer a fidelidade das informações quanto aos ganhos de um sistema tracker, foi elaborada uma simulação com um total de 68 cidades pelo Brasil. O critério inicial para a escolha das cidades foi justamente a latitude dos locais para que fossem obtidas correlações entre esta variável e a geração através deste tipo de tecnologia. Todos os parâmetros e equipamentos do sistema fotovoltaico foram mantidos conforme o item 3.1 deste artigo, alterando-se apenas os locais de instalação e o ângulo dos módulos nas estruturas fixas, que deve ser igual à latitude. A figura 17 exemplifica o motivo pelo qual é recomendada a utiliza-

ção do mesmo ângulo de latitude para o SFV fixo, o valor medido refere-se à Niquelândia – GO, que possui latitude aproximada de 14°.

Figura 17: Variação do ângulo do sol em relação ao norte durante o ano



Fonte: Aurtoria própria, 2021

Os pontos estabelecidos na figura 17 referem-se aos 4 marcos anuais dos valores extremos e intermediários da trajetória do sol. O ponto “A” refere-se à altura do sol para a localidade escolhida durante o SOLSTÍCIO DE INVERNO. Ou seja, o ponto mínimo da variação durante o ano. Já o ponto “B” demonstra o ângulo do sol no SOLSTÍCIO DE VERÃO, ou seja, o momento onde a altura do sol às 12:00 é a maior do ano em relação ao norte. Para os pontos “C” e “D” nota-se a média entre os extremos, que são denominados EQUINÓCIOS, marcos que tem o papel de sinalizar o início do outono e primavera. Instalar o SFV com o mesmo ângulo da latitude representa posicionar as faces dos módulos exatamente perpendiculares aos pontos “C” e “D”. Dessa forma, o sistema consegue captar de maneira regular a irradiação tanto no extremo do verão, quanto no extremo do inverno.

Cidades simuladas

A tabela 6 demonstra quais foram as cidades escolhidas e todos os valores mais relevantes obtidos através das simulações.

Tabela 6 – Dados obtidos através das simulações

Cidade	Estado	Latitude (DD)	Longitude (DD)	Índice solarimétrico anual (kWh/m ²)	Geração SFV fixo (kWh/ano) ano1	Geração SFV tracker (kWh/ano) ano1	Ganho %	PR Fixo	PR Tracker
ALTINHO	PE	-8.488720°	-36.059359°	1928	2085396	2443028	17,15%	87,82%	83,53%
ANAJÁS	PA	-0.986348°	-49.940877°	1753	1892460	2195454	16,01%	88,03%	84,39%
APIAÍ	SP	-24.512709°	-48.845513°	1676	1929653	2175965	12,76%	87,31%	84,99%
BALISA	AP	-0.474824°	-52.475725°	1872	2017164	2355080	16,75%	88,01%	84,01%
BALNEÁRIO CAMBORIÚ	SC	-26.996801°	-48.635492°	1664	1922312	2184664	13,65%	87,88%	86,25%
BALSAS	MA	-7.526359°	-46.050558°	1951	2107985	2475991	17,46%	86,80%	83,47%
BARREIRAS	BA	-12.047180°	-45.071734°	2100	2311860	2736914	18,39%	87,32%	83,83%
BARROQUINHA	CE	-3.024976°	-41.132901°	2014	2166836	2594676	19,74%	87,64%	84,57%
BELA VISTA DO PIAUÍ	PI	-7.971285°	-41.871703°	2053	2209823	2649575	19,90%	86,72%	83,31%
BELÉM	PA	-1.446472°	-48.482710°	1875	2031435	2396080	17,95%	88,29%	85,03%
BELO HORIZONTE	MG	-19.939542°	-43.948658°	1933	2204964	2561075	16,15%	87,43%	84,92%
BOM JESUS DE GOIÁS	GO	-18.213474°	-49.735540°	2022	2283354	2672343	17,04%	87,10%	84,25%
CAÇAPAVA DO SUL	RS	-30.512556°	-53.488564°	1777	2058475	2401026	16,64%	86,40%	85,27%
CAETITE	BA	-14.063570°	-42.490108°	2149	2353527	2805078	19,19%	86,63%	83,11%
CAMPO DO TENENTE	PR	-25.985790°	-49.683404°	1752	2031608	2320227	14,21%	87,34%	85,24%

CAMPO FORMOSO	BA	-10.502376°	-40.320186°	2015	2201897	2597608	17,97%	88,05%	84,08%
CAMPO GRANDE	MS	-20.462519°	-54.614878°	1998	2257043	2643869	17,14%	86,65%	84,22%
CANARANA	MT	-13.540441°	-52.273480°	2043	2262707	2675652	18,25%	86,94%	84,23%
COLATINA	ES	-19.537399°	-40.627398°	1762	1976863	2279627	15,32%	87,85%	85,20%
COXIM	MS	-18.502548°	-54.748158°	2037	2283761	2689317	17,76%	86,83%	84,48%
CUIABÁ	MT	-15.580758°	-56.083288°	2055	2277764	2687759	18,00%	86,84%	84,05%
CURITIBA	PR	-25.501999°	-49.262112°	1709	1962540	2237614	14,02%	86,99%	84,66%
CURRAL ALTO	RS	-33.000000°	-52.864852°	1725	2010234	2354390	17,12%	85,94%	86,69%
ESTRELA	RS	-29.493180°	-51.952150°	1751	2036971	2353522	15,54%	87,01%	86,35%
FLORES DA CUNHA	RS	-29.029505°	-51.186472°	1820	2097007	2427635	15,77%	86,15%	84,37%
FORTALEZA	CE	-3.788585°	-38.520305°	1989	2150130	2545899	18,41%	88,05%	84,73%
GUARANTÁ DO NORTE	MT	-9.952955°	-54.910083°	2020	2188218	2582562	18,02%	86,30%	83,34%
IMBUÍ	SC	-27.491271°	-49.423160°	1666	1913019	2192096	14,59%	87,21%	85,05%
ITAMARAJO	BA	-17.031613°	-39.533373°	1777	1969415	2270249	15,28%	87,73%	84,50%
ITATIRA	CE	-4.530187°	-39.624499°	1948	2097448	2472886	17,90%	87,59%	83,36%
JANUÁRIA	MG	-15.482424°	-44.368925°	2076	2318848	2736910	18,03%	87,43%	84,46%
JARAGUÁ DO SUL	SC	-26.502562°	-49.096424°	1677	1942237	2200871	13,32%	88,03%	86,43%
JENIPAÚBA	MA	-2.074462°	-44.546538°	1894	2046330	2397306	17,15%	88,09%	84,91%
JUÍNA	MT	-11.421909°	-58.768707°	2053	2262683	2672578	18,12%	87,52%	84,47%
LAGES	SC	-27.816403°	-50.320607°	1787	2072703	2394455	15,52%	86,98%	85,29%
LEOPOLDINA	MG	-21.515203°	-42.630761°	1926	2190814	2541175	15,99%	87,49%	85,29%
MACAPÁ	AP	0.000000°	-51.072140°	1837	1977912	2312204	16,90%	87,96%	84,66%
MARAGOGI	AL	-9.000000°	-35.218613°	1925	2098454	2476903	18,03%	88,37%	84,93%
MIRANORTE	TO	-9.513345°	-48.586521°	1945	2111168	2490559	17,97%	86,41%	83,38%
MONÇÃO	MA	-3.489577°	-45.251171°	1855	2006716	2340638	16,64%	87,91%	84,56%
MOSSORÓ	RN	-5.165455°	-37.354921°	2056	2183269	2606534	19,39%	86,32%	83,08%
MOSTARDAS	RS	-31.104647°	-50.917529°	1788	2073313	2431053	17,25%	86,67%	86,34%
MURIAÉ	MG	-21.126296°	-42.394594°	1935	2207594	2566317	16,25%	87,74%	85,74%
NIQUELÂNDIA	GO	-14.472582°	-48.458753°	2053	2317517	2736486	18,08%	88,11%	85,85%
PETROPOLIS	RJ	-22.510881°	-43.176394°	1743	1977161	2252955	13,95%	87,25%	84,21%
PINHEIRO MACHADO	RS	-31.582186°	-53.377372°	1752	2036851	2366780	16,20%	86,13%	85,61%
PONTA GROSSA	PR	-25.051897°	-50.163247°	1852	2143437	2467246	15,11%	87,11%	84,94%
PORTO ALEGRE	RS	-29.994614°	-51.171123°	1744	2023144	2333948	15,36%	86,93%	86,04%
RIO DE JANEIRO	RJ	-23.013009°	-43.320558°	1781	2029988	2325476	14,56%	87,68%	85,41%
RIO GRANDE	RS	-32.039412°	-52.101602°	1733	2018385	2344804	16,17%	86,36%	86,31%
RONDONÓPOLIS	MT	-16.457242°	-54.628876°	2024	2247546	2638718	17,40%	86,59%	84,04%
SALVADOR	BA	-13.001553°	-38.493081°	1921	2097630	2467322	17,62%	87,90%	84,28%
SANTA RITA DE CÁSSIA	BA	-10.999223°	-44.513493°	2085	2290194	2716171	18,60%	87,53%	84,03%
SANTA VITÓRIA DO PALMAR	RS	-33.500000°	-53.355099°	1721	2003845	2350031	17,28%	85,75%	86,56%
SANTOS	SP	-23.959185°	-46.336899°	1934	1987345	2456998	23,63%	87,39%	84,34%
SÃO CARLOS	SP	-22.024444°	-47.891061°	1736	2013392	2289589	13,72%	88,55%	86,46%
SÃO JOÃO DOS PATOS	MA	-6.494939°	-43.702122°	1944	2190757	2603006	18,82%	88,88%	85,18%
SÃO PAULO	SP	-23.522216°	-46.575205°	1939	2041014	2445187	19,80%	86,11%	83,30%
ST. AMARO DO MARANHÃO	MA	-2.502837°	-43.251821°	1796	1997738	2377464	19,01%	89,53%	85,22%
TAGUATINGA	TO	-12.410476°	-46.436421°	2043	2263871	2664411	17,69%	87,61%	84,29%
TAIM	RS	-32.500000°	-52.581920°	1717	2011154	2344777	16,59%	86,36%	87,00%
TAUÁ	CE	-5.999983°	-40.297701°	1986	2134777	2534861	18,74%	87,16%	83,29%
TEIXEIRA DE FREITAS	BA	-17.545103°	-39.737416°	1778	1966757	2273712	15,61%	87,71%	84,39%
TERESINA	PI	-5.137212°	-42.742102°	2003	2146982	2553034	18,91%	86,86%	83,85%
UBERLÂNDIA	MG	-18.923500°	-48.241455°	2036	2305550	2701415	17,17%	87,07%	84,24%
VACARIA	RS	-28.501317°	-50.934438°	1873	2167629	2520568	16,28%	86,55%	84,52%
VALPARAÍSO DE GOIÁS	GO	-16.074217°	-47.990097°	2032	2265486	2652349	17,08%	86,65%	83,36%
XINGUARA	PA	-7.099681°	-49.942733°	1920	2076237	2457601	18,37%	86,82%	83,72%

Fonte: Autoria própria, 2021

Análise estatística

A figura 18 exemplifica quais foram as localidades que de maneira interativa foram inseridas no POWER BI para uma análise refinada dos pontos selecionados.

Figura 18 - Distribuição dos pontos simulados no Brasil



Fonte: Autoria própria, 2021

Com base nos dados contidos na tabela 6 foi possível estabelecer alguns parâmetros estatísticos para que fosse possível uma melhor interpretação dos resultados. A tabela 7 traz a análise estatística destes dados.

Tabela 7 – Análise estatística

Parâmetro	Índice solarimétrico anual (kWh/m ²)	Geração Tracker (kWh/ano)	Ganho Tracker X fixo %	PR Fixo	PR Tracker
Média	1893,14	360029,05	17,01%	87,27%	84,70%
Erro padrão	16,00528426	6236,169577	0,23%	0,09%	0,12%
Mediana	1923	361684	17,15%	87,28%	84,51%
Desvio padrão	131,9829551	51424,77173	0,018577044	0,007422616	0,009863101
Curtose	-1,269686723	-0,643612639	1,465225024	0,137937019	-0,474159618
Assimetria	-0,092232187	-0,25336401	0,216130196	0,310783763	0,443270002
Intervalo	485	223341	10,86%	0,0378	0,0392
Mínimo	1664	246312	12,76%	85,75%	83,08%
Máximo	2149	469653	23,63%	89,53%	87,00%
Amostra	68	68	68	68	68

Fonte: Autoria própria, 2021

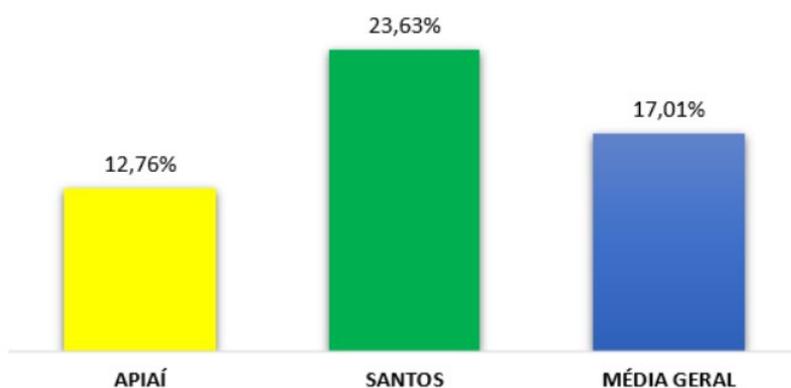
DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Ao serem observadas as tabelas 6 e 7 foi possível estruturar algumas considerações importantes sobre o uso de SFV fixos e SFV trackers.

Em todos os casos onde foi implementado o sistema tracker, invariavelmente obteve-se o ganho de produção de energia ao longo do ano. A figura 19 apresenta os valores máximos e

mínimos obtidos durante os estudos.

Figura 19 - Ganho percentual mínimo, máximo e médio da amostra simulada



Fonte: Autoria própria, 2021

É importante ressaltar que todos os valores foram simulados com base em um único tipo de sistema, com módulos e inversores limitados. A depender da tecnologia e dos equipamentos utilizados, existe a possibilidade da variação dos percentuais de ganho entre relação aos modelos neste artigo aplicados.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Ao fim das análises, é possível afirmar que a utilização de estruturas tracker em usinas de solo pode ser o diferencial necessário para que sejam viabilizados grandes projetos. Com a economia da quantidade de módulos necessários para que obtenha a mesma geração de energia, o CAPEX e OPEX são beneficiados em grande escala.

É notável que existem diversas variáveis dentro do contexto de rendimento de uma UFV com trackers. Entretanto, também é matematicamente improvável que as expectativas quanto ao seu uso sejam quebradas. Esta afirmativa é ancorada em casos de UFVs já instaladas ao longo do país com tecnologias semelhantes às que foram implementadas neste estudo. Além é claro da amostra significativa de simulações nos mais diversos locais onde foi possível observar um comportamento semelhante entre as partes.

A base de dados contida neste estudo poderá, tão logo seja necessário, fazer parte de análises econômicas entre investidores e projetistas de UFVs de modo que a estatística envolvida seja fator determinante para a tomada de decisões quanto à implementação de projetos nas mais diversas localidades.

Sendo assim, este estudo também é um convite às partes interessadas na implementação de empreendimentos desta classe para que sejam acrescidos ao estudo estatístico dados reais em relação às localidades descritas, de modo a revalidar todos os cálculos e parâmetros presentes nesta pesquisa.

REFERÊNCIAS

- BRAGA, Renata. Energia solar fotovoltaica: Fundamentos e aplicações. 2008. Disponível em: < <http://repositorio.poli.ufrj.br/monografias/monopoli10001103.pdf>>. Acesso em 19 nov. 2021.
- CANAL SOLAR. Entenda os módulos solares bifaciais. 2019. Disponível em: <https://canalsolar.com.br/entenda-os-modulos-solares-bifaciais/>>. Acesso em 19 nov. 2021.
- ELÉTRICA RACIONAL. Geração de Tensão e Corrente Alternada Trifásica. 2020. Disponível em: < <https://eletricaracional.com/geracao-de-tensao-e-corrente-alternada-trifasica/> >. Acesso em 19 nov. 2021.
- ESPAÇO IEEE. Energia solar fotovoltaica de terceira geração. 2014. Disponível em: < <http://www.ieee.org.br/wp-content/uploads/2014/05/energia-solar-fotovoltaica-terceira-geracao.pdf>>. Acesso em 19 nov. 2021.
- FREITAS, G.C.; DATHEIN, R. As energias renováveis no Brasil: uma avaliação acerca das implicações para o desenvolvimento socioeconômico e ambiental. Revista Nexos Econômicos, v. 7, n. 1, p. 71-94, 2013.
- IMHOFF, J. (2007) "Desenvolvimento de conversores estáticos para sistemas fotovoltaicos autônomos", Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria – RS.
- MINHA CASA SOLAR. Inversor Solar: Tudo o que você precisa saber está aqui. 2019. Disponível em: < <http://blog.minhacasasolar.com.br/inversor-solar-tudo-o-que-voce-precisa-saber-esta-aqui/>>. Acesso em 19 nov. 2021.
- OCA SOLAR ENERGIA. Sistema fotovoltaico híbrido entenda o que é. 2021. Disponível em: < <https://www.ocaenergia.com/blog/energia-solar/sistema-fotovoltaico-hibrido-entenda-o-que-e/> >. Acesso em 19 nov. 2021.
- PRIEB, C.(2002) “Desenvolvimento de um sistema de ensaio de módulos fotovoltaicos”, Dissertação (mestrado). Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre – RS.
- PORTAL SOLAR. Passo a passo da fabricação do painel solar. 2018. Disponível em: < <https://www.portalsolar.com.br/passa-a-passo-da-fabricacao-do-painel-solar.html> >. Acesso em 19 nov. 2021.
- PORTAL SOLAR. Seguidor solar - tracker: vantagens e desvantagens parte 1. 2016. Disponível em: < <https://s3.us-east-2.amazonaws.com/legacy.portalsolar.com.br/Content/EditorImages/images/Seguidor-Solar-Rastreador-Solar-tracker.jpg> >. Acesso em 19 nov. 2021.
- PVSYST USER GUIDE. Manual de instruções PVsyst. 2021. Disponível em: < <https://www.pvsyst.com/help/>>. Acesso em 19 nov. 2021.
- SOLSISTÍCIO ENERGIA. Tecnologias: tudo sobre os seguidores solares. 2019. Disponível em: < <https://www.solsticioenergia.com/2019/10/23/trackers-seguidores-solares/> >. Acesso em 19 nov. 2021.
- SUNPATH3D. Plugin para análise de sombreamentos. 2021. Disponível em: < <http://andrewmarsh.com/apps/staging/sunpath3d.html>>. Acesso em 19 nov. 2021.

“Embora ninguém possa voltar atrás e fazer um novo começo, qualquer um pode começar agora e fazer um novo fim.” (Francisco Cândido Xavier)



AYA EDITORA
2021