

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA E
ELETRÔNICA**

BRUNO DE MARCO

**ANÁLISE DE GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA ENTRE USINAS
FOTOVOLTAICAS COM ESTRUTURA FIXA E RASTREAMENTO DE
UM EIXO NAS REGIÕES SUL E NORDESTE DO BRASIL**

Florianópolis

2023

BRUNO DE MARCO

**ANÁLISE DE GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA ENTRE USINAS
FOTOVOLTAICAS COM ESTRUTURA FIXA E RASTREAMENTO
DE UM EIXO NAS REGIÕES SUL E NORDESTE DO BRASIL**

Trabalho de Conclusão de Curso submetido ao Programa de
Graduação em Engenharia Elétrica para a obtenção do Grau
de Engenheiro Eletricista.

Orientadora: Marília Braga, Eng^a.

Florianópolis

2023

Bruno de Marco

**ANÁLISE DE GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA ENTRE USINAS
FOTOVOLTAICAS COM ESTRUTURA FIXA E RASTREAMENTO DE UM
EIXO NAS REGIÕES SUL E NORDESTE DO BRASIL**

Este Trabalho Conclusão de Curso foi julgado adequado para obtenção do Título de “Bacharel em Engenharia Elétrica” e aceito, em sua forma final, pelo Curso de Graduação em Engenharia Elétrica.

Florianópolis, 11 de julho de 2023



Documento assinado digitalmente

Miguel Moreto

Data: 14/07/2023 17:24:25-0300

CPF: ***.850.100-**

Verifique as assinaturas em <https://v.ufsc.br>

Prof. Miguel Moreto, Dr.
Coordenador do Curso de Graduação em Engenharia Elétrica

Banca Examinadora:

Eng. Marília Braga
Orientadora
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Hans Helmut Zurn, PhD
Universidade Federal de Santa Catarina

Eng. Gustavo Xavier de Andrade Pinto, Me.
Universidade Federal de Santa Catarina

AGRADECIMENTOS

Agradeço a minha orientadora neste trabalho Marília Braga pela oportunidade de ser o seu primeiro orientando.

Aos membros da banca, professor Hans Helmut Zurn e Gustavo Xavier de Andrade Pinto por terem dedicado tempo à avaliação deste trabalho.

Aos meus colegas do Laboratório Fotovoltaica pelo compartilhamento de conhecimento durante e após o período em que fui bolsista.

À minha família, por terem me proporcionado todo o suporte durante todos os momentos até aqui, em especial, agradeço a minha mãe Miriam Helena De Marco.

RESUMO

Este trabalho busca realizar um estudo para identificar qual a melhor opção de estrutura de fixação de módulos em solo, para usinas fotovoltaicas de 1 MW na região Sul e na região Nordeste do Brasil, a fim de obter o melhor aproveitamento do sistema e gerar o máximo de energia possível. O estudo consiste em simular no software PVsyst quatro usinas fotovoltaicas idênticas, que se diferenciam por usarem duas tecnologias de fixação de módulos diferentes e estarem localizadas em duas regiões brasileira diferentes: Sul e Nordeste. Cada uma dessas quatro usinas é composta por 2.700 módulos fotovoltaicos de 510 Wp e cinco inversores de 200 kW de potência, duas das quatro usinas utilizam estrutura fixa para os módulos fotovoltaicos e as outras duas usinas utilizam estrutura rastreamento de um eixo. Com base nos resultados obtidos através das simulações, foi verificado que uma usina fotovoltaica de 1 MW de potência instalada e que utiliza estrutura fixa para os módulos pode gerar aproximadamente 13,47% a mais de energia elétrica anualmente, quando instalada no Nordeste do Brasil ao invés do Sul. Enquanto que, uma usina fotovoltaica de 1 MW de potência instalada que utiliza estrutura rastreamento de um eixo para os módulos pode gerar aproximadamente 17,12% a mais de energia elétrica anualmente, quando instalada no Nordeste do Brasil ao invés do Sul. Em relação a maior geração anual, a usina com estrutura de rastreamento em um eixo no Nordeste teve o melhor desempenho dentre todas as usinas analisadas e a usina de menor geração energética foi a usina com estrutura fixa no sul do Brasil. Porém, vale ressaltar que, apesar da usina com estrutura fixa no sul ter a menor geração energética, talvez não seja um péssimo investimento para quem está pensando em adquirir uma usina FV de 1 MW nessa região do país, ficando como sugestão para trabalhos futuros o estudo da viabilidade econômica dessas usinas.

Palavras-chave: Energia Solar. Geração Distribuída. *Software* PVsyst.

ABSTRACT

This work seeks to carry out a study to identify the best option for a structure for fixing modules on the ground, for 1 MW photovoltaic power plants in the South and Northeast regions of Brazil, in order to obtain the best use of the system and generate the maximum amount of possible energy. The study consists of simulating in the PVsyst software four identical photovoltaic power plants, which differ in that they use two different module fixing technologies and are located in two different Brazilian regions: South and Northeast. Each of these four plants is composed of 2,700 photovoltaic modules of 510 Wp and five inverters of 200 kW of power, two of the four plants use a fixed structure for the photovoltaic modules and the other two plants use a single axis tracker structure. Based on the results obtained through the simulations, it was verified that a photovoltaic plant with 1 MW of power and which uses a fixed structure for the modules can generate approximately 13.47% more electricity annually, when installed in the Northeast of Brazil instead in the South. While a 1 MW photovoltaic plant that uses a single axis tracker structure for the modules can generate approximately 17.12% more electricity annually, when installed in the Northeast of Brazil instead of the South. Annual generation, the plant with a single axis tracker structure in the Northeast had the best performance among all the plants analyzed and the plant with the lowest performance was the plant with a fixed structure in the south of Brazil. However, it is noteworthy that, despite the plant with a fixed structure in the south having the lowest performance, perhaps it is not a bad investment for those who are thinking of acquiring a 1 MW PV plant in this region of the country, the study being a suggestion for future work. the economic viability of these plants.

Keywords: Solar Energy. Distributed Generation. Software PVsyst.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Matriz elétrica brasileira	16
Figura 2 - Evolução da Fonte Solar Fotovoltaica no Brasil	16
Figura 3 – Tipos de radiação solar.	17
Figura 4 – Experiência realizada por Becquerel.	18
Figura 5 – Relação entre as bandas em material condutor, semicondutor e isolante	19
Figura 6 – Esquema de funcionamento de um sistema fotovoltaico isolado.....	20
Figura 7 – Diagrama de um Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede Elétrica.....	21
Figura 8 – Célula fotovoltaica de silício cristalino	24
Figura 9 – Estrutura básica de uma célula de silício cristalino.....	24
Figura 10 – Módulo fotovoltaico de 72 células.....	26
Figura 11 – Vista explodida de um módulo fotovoltaico.....	26
Figura 12 – Inversor trifásico SIW500H	28
Figura 13 – Usina solar fotovoltaica com estrutura solo de inclinação fixa.	30
Figura 14 – Usina fotovoltaica com estrutura solo fixa especialmente modulada	30
Figura 15 – Componentes da estrutura fixa – vista superior	31
Figura 16 – Componentes da estrutura fixa – vista lateral direita.....	31
Figura 17 – Componentes da estrutura fixa – vista frontal.	31
Figura 18 – Parafuso da estrutura fixa	32
Figura 19 – Grampo intermediário da estrutura fixa	32
Figura 20 – Grampo de borda da estrutura fixa	32
Figura 21 – Usina fotovoltaica com estrutura rastreamento de um eixo.....	33
Figura 22 – Fileira da viga de torção	35
Figura 23 – Itens de rotação e regulação	35
Figura 24 – Braço	35
Figura 25 – Biela	36
Figura 26 – Correias para os módulos fotovoltaicos	36
Figura 27 – Conjunto de acionamento do rastreamento de um eixo	37
Figura 28 – Características gerais do conjunto de acionamento	37
Figura 29 – Sistema elétrico do rastreamento de um eixo	38
Figura 30 – Visão geral do rastreamento de um eixo e a identificação das partes e peças	38
Figura 31 – Irradiação Solar no Plano Horizontal em Itaquí	41
Figura 32 – Irradiação Solar no Plano Horizontal em Russas.....	41
Figura 33 – Pitch entre estruturas fixas	42

Figura 34 – Disposição dos módulos da usina com estrutura fixa no Sul do Brasil.....	44
Figura 35 – Disposição dos módulos da usina com estrutura de rastreamento de um eixo no Sul do Brasil.....	45
Figura 36 – Disposição dos módulos da usina com estrutura fixa no Nordeste do Brasil	45
Figura 37 – Disposição dos módulos da usina com estrutura de rastreamento de um eixo no Nordeste do Brasil	46
Figura 38 – Perdas relacionadas ao sistema.....	47
Figura 39 – Diagrama das perdas da usina com estrutura fixa no Sul do Brasil.....	49
Figura 40 – Índice de performance anual da usina com estrutura fixa no Sul do Brasil	50
Figura 41 – Diagrama das perdas da usina com estrutura de rastreamento de um eixo no Sul do Brasil	51
Figura 42 – Índice de performance anual da usina com estrutura de rastreamento de um eixo no Sul do Brasil	52
Figura 43 – Diagrama das perdas da usina com estrutura fixa no Nordeste do Brasil	53
Figura 44 – Índice de performance anual da usina com estrutura fixa no Nordeste do Brasil	54
Figura 45 – Diagrama das perdas da usina com estrutura de rastreamento de um eixo no Nordeste do Brasil	55
Figura 46 – Índice de performance anual da usina com rastreamento de um eixo no Nordeste do Brasil.....	56
Figura 47 – Desempenho mensal dos sistemas fotovoltaicos	60
Figura 48 – Irradiação mensal para os sistemas com estrutura fixa no sul e nordeste.....	62

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Resultados da simulação da usina com estrutura fixa no Sul do Brasil	57
Tabela 2 – Resultados da simulação da usina com estrutura rastreamento de um eixo no Sul do Brasil	58
Tabela 3 – Resultados da simulação da usina com estrutura fixa no Nordeste do Brasil	58
Tabela 4 – Resultados da simulação da usina com estrutura rastreamento de um eixo no Nordeste do Brasil	58
Tabela 5 – Geração anual e área das quatro usinas fotovoltaicas.	60
Tabela 6 – Comparação da geração anual das usinas FV com estrutura fixa	60
Tabela 7 – Comparação da geração anual das usinas FV com estrutura rastreamento de um eixo	62
Tabela 8 – Comparação da geração anual das usinas FV da mesma região do país	63

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

A	Ampère
a-Si	Silício Amorfo
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ABSOLAR	Associação Brasileira de Energia Solar Fotovoltaica
c-Si	Silício Cristalino
CA	Corrente Alternada
CC	Corrente Contínua
Cd	Cádmio
Cu	Cobre
DiffHor	Irradiação difusa horizontal
E_Grid	Energia injetada na rede
EArray	Energia efetiva na saída da matriz
FV	Fotovoltaico
G	Irradiância Solar
Ga	Gálio
GD	Geração Distribuída
GlobEff	Eficiência global, corrigido para IAM e sombreamento
GlobHor	Irradiação global horizontal
GlobInc	Incidência global no plano
Hz	Hertz
I	Índio
IAM	Ângulo de Incidência da Irradiância
kW	Quilowatt
kWh	Quilowatt-hora
kWh/m ²	Quilowatt-hora por metro quadrado
kWh/m ² /ano	Quilowatt-hora por metro quadrado por ano
LID	Light Induced Degradation
m-Si	Silício Multicristalino
m ²	Metro quadrado
mm	Milímetro
mono-Si	Silício Monocristalino
MPPT	Maximum Power Point Tracking

MW	Megawatt
MWh	Megawatt-hora
MWh/ano	Quilowatt-hora por ano
MWp	Megawatt pico
NBR	Norma Brasileira
PR	Performance Ratio (Taxa de Desempenho)
Se	Selênio
Si	Silício
STC	Condições Padrão de Teste
T_Amb	Temperatura ambiente
Te	Telúrio
V	Tensão
W/m ²	Watt por metro quadrado
Wh/m ²	Watt hora por metro quadrado
Wp	Watt pico
μc-Si	Silício Microcristalino

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	12
1.1	OBJETIVO GERAL	12
1.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	12
1.3	JUSTIFICATIVA	13
1.4	ESTRUTURA DO TRABALHO	14
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	15
2.1	CONTEXTO BRASILEIRO.....	15
2.2	RADIAÇÃO SOLAR.	17
2.3	EFEITO FOTOVOLTAICO	17
2.4	COMPONENTES DO SISTEMA FOTOVOLTAICO CONECTADOS À REDE	19
2.4.1	Módulos Fotovoltaicos.	19
2.4.2	Inversores	20
2.5	TIPOS DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS	22
2.5.1	Sistemas Fotovoltaicos Isolados	22
2.5.2	Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede Elétrica	27
2.6	TECNOLOGIAS DE INSTALAÇÃO PARA SOLO	28
2.6.1	Estrutura Fixa	29
2.6.2	Estrutura Rastreamento de um eixo - Seguidor Solar.....	33
3	METODOLOGIA E DESENVOLVIMENTO.....	40
3.1	SOFTWARE PVSYST	40
3.2	DADOS METEREOLÓGICOS NAS LOCALIDADES DE ESTUDO	40
3.2.1	Irradiação solar no plano horizontal em Itaqui - RS	40
3.2.2	Irradiação no plano horizontal em Russan - CE.....	41
3.3	LAYOUT DOS SISTEMAS	41
3.4	CARACTERÍSTICAS DAS USINAS FOTOVOLTAICAS AVALIADAS	42
3.4.1	Características da usina com estrutura fixa no Sul do Brasil	43
3.4.2	Características da usina com estrutura de rastreamento de um eixo no Sul do Brasil	45
3.4.3	Características da usina com estrutura fixa no Nordeste do Brasil	45
3.4.4	Características da usina com estrutura de rastreamento de um eixo no Nordeste do Brasil	46
3.5	FATORES DE PERDAS	47

4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	50
4.1	ANÁLISE DA GERAÇÃO DE ENERGIA DA USINA COM ESTRUTURA FIXA NO SUL DO BRASIL	50
4.2	ANÁLISE DA GERAÇÃO DE ENERGIA DA USINA COM RASTREAMENTO DE UM EIXO NO SUL DO BRASIL	50
4.3	ANÁLISE DA GERAÇÃO DE ENERGIA DA USINA COM ESTRUTURA FIXA NO NORDESTE DO BRASIL	50
4.4	ANÁLISE DA GERAÇÃO DE ENERGIA DA USINA COM RASTREAMENTO DE UM EIXO NO NORDESTE DO BRASIL	50
4.5	ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE USINAS	58
5	CONCLUSÃO.....	66
	REFERÊNCIAS.....	66

1. INTRODUÇÃO

A energia solar fotovoltaica é considerada uma fonte de energia limpa e renovável, por aproveitar a luz do sol para gerar energia elétrica. No Brasil, essa fonte de energia está em desenvolvimento acelerado, visto que representa 14,3% da matriz elétrica brasileira, considerando a potência instalada (ABSOLAR, 2023). O Brasil possui um vasto território de 8,5 milhões de metros quadrados, sendo 7 mil quilômetros de litoral, e fatores climáticos favoráveis para a geração solar, sendo que a irradiação solar incidente no território nacional é de 4,4 a 5,5 quilowatt-hora por metro quadrado (kWh/m²) (PEREIRA et al., 2017).

Os sistemas fotovoltaicos podem ser instalados sobre telhados, sobre o solo e até mesmo sobre a água, para cada local de instalação há uma tecnologia apropriada para fixar os módulos fotovoltaicos e resistir aos ventos mais fortes. Em relação às tecnologias utilizadas para fixar os módulos sobre o solo, existem soluções que mantêm a posição dos módulos estável e soluções que movimentam os módulos de acordo com o deslocamento do sol ao longo do dia.

O presente trabalho busca realizar um estudo que permita identificar qual a melhor opção de estrutura de fixação de módulos em solo, para usinas fotovoltaicas de 1 MW na região Sul e na região Nordeste do Brasil, que favoreça a maior geração de energia elétrica.

1.1 OBJETIVO GERAL

O objetivo desse trabalho é verificar a melhor opção de estrutura para usinas fotovoltaicas de 1 MW na região Sul e na região Nordeste do Brasil, a fim de obter o melhor aproveitamento do sistema e gerar o máximo de energia possível.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Definir as especificações a serem utilizadas nas simulações das usinas FV;
- Analisar a radiação solar na região Sul e Nordeste do Brasil.
- Analisar a geração de energia da usina fotovoltaica com estrutura fixa e de rastreamento de um eixo na região Sul do Brasil;
- Analisar a geração de energia da usina fotovoltaica com estrutura fixa e de rastreamento de um eixo na região Nordeste do Brasil;

- Comparar os resultados das simulações.

1.3 JUSTIFICATIVA

Para um Engenheiro Eletricista se faz necessário a busca por conhecimentos na área de energia solar fotovoltaica, visto que as perspectivas para o futuro dessa fonte de energia elétrica são muito positivas. Por ser uma fonte de energia renovável e por trazer economia para quem adquire o sistema, os brasileiros estão cada vez mais interessados em adquirir um gerador solar fotovoltaico, seja para residência ou empresa.

No Brasil, a regulamentação da geração distribuída iniciou-se pela Resolução Normativa nº 482/2012 da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL). Essa resolução estabeleceu as condições gerais para o acesso de micro e minigeração distribuída aos sistemas de distribuição de energia elétrica, incluindo a energia solar. Nela são definidos requisitos técnicos, procedimentos de conexão, formas de compensação de energia e outras diretrizes para a instalação e operação de sistemas fotovoltaicos conectados à rede.

A Resolução Normativa nº 482/2012 foi publicada em 17 de abril de 2012 pela ANEEL e representa um marco regulatório importante para a geração distribuída no Brasil. Ela criou um ambiente favorável para a expansão da energia solar, permitindo que os consumidores pudessem gerar sua própria energia e receber créditos pela energia excedente injetada na rede, os quais podem ser utilizados para abater o consumo em momentos de menor geração solar, como à noite. Em janeiro de 2022, foi promulgada a Lei 14.300/2022, estabelecendo o Marco Legal da Geração Distribuída e do SCEE, proporcionando um ambiente regulado e mais seguro para investidores. Após sete meses de atraso, em fevereiro de 2023, a ANEEL publicou a Resolução Normativa ANEEL nº 1059/2023, com o objetivo de aprimorar as regras de conexão, faturamento e operação das usinas de geração distribuída. No entanto, houve controvérsias, especialmente em relação aos consumidores classificados como B optante, que são atendidos em média tensão e faturados por uma tarifa específica. A nova regulamentação estabeleceu restrições para a participação desses consumidores no SCEE, limitando o envio e recebimento de excedentes de energia elétrica entre unidades consumidoras.

A geração distribuída em energia solar no Brasil é composta por dois tipos: microgeração e minigeração. A microgeração é caracterizada por sistemas fotovoltaicos com potência instalada de até 75 kilowatts (kW), enquanto a minigeração abrange sistemas com potência instalada superior a 75 kW e até 5 megawatts (MW). Ambas as formas de geração distribuída podem ser aplicadas em diferentes contextos, como residências, comércios, indústrias, propriedades rurais, condomínios e edifícios públicos.

Essas usinas de geração distribuída estão inseridas em um contexto de incentivo à energia solar e sustentabilidade no Brasil. A geração distribuída tem experimentado um crescimento significativo no país, impulsionado pelos benefícios econômicos, ambientais e sociais que proporciona. Além da redução nos custos de energia elétrica, a geração distribuída contribui para a redução das emissões de gases de efeito estufa e para a diversificação da matriz energética, promovendo a transição para uma matriz mais limpa e renovável.

No Brasil já é muito comum instalações de usinas fotovoltaicas acima de 1 MW e a tendência é crescer ainda mais, porém, como essas usinas demandam um alto capital para aquisição, qualquer investidor nesse segmento se preocupa em conseguir sempre maximizar a geração de energia. Diante desse fato, se torna imprescindível para o Engenheiro Eletricista que atua nessa área conhecer as soluções e tecnologias que existem no mercado para alcançar o melhor aproveitamento de uma usina fotovoltaica e gerar o máximo de energia possível.

1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO

Este trabalho apresenta a seguinte estrutura:

- O capítulo 1 apresenta a introdução, os objetivos e a justificativa para realização deste trabalho.
- O capítulo 2 apresenta a fundamentação teórica sobre a matriz elétrica brasileira, o efeito fotovoltaico, a natureza da radiação solar, os componentes de um sistema fotovoltaico, tipos de sistemas fotovoltaicos e as tecnologias de instalações.
- No capítulo 3 é apresentada a metodologia, onde são definidos as especificações a serem utilizadas nas usinas fotovoltaicas, são analisados as perdas relacionadas aos sistemas e analisado o índice de performance de cada usina FV.
- O Capítulo 4 apresenta os resultados das simulações e compara a geração das quatro usinas fotovoltaicas de 1 MW (fixa na região Sul, rastreamento de um eixo na região Sul, fixa na região Nordeste e rastreamento de um eixo na região Nordeste).
- Por fim, no Capítulo 5 é apresentada a conclusão do estudo realizado nesse trabalho.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

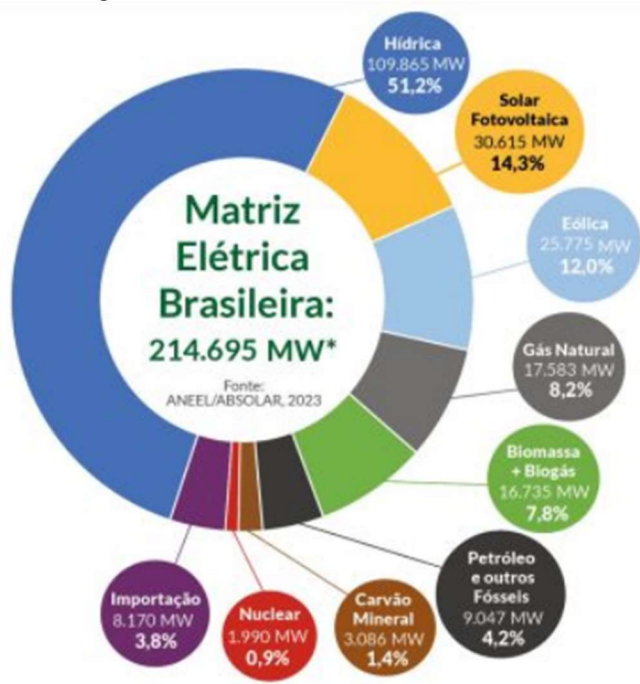
2.1 CONTEXTO BRASILEIRO

No Brasil 51,2% da geração de energia elétrica são provenientes de fontes hídricas (ABSOLAR, 2023), conforme expresso na Figura 1 a matriz elétrica brasileira. No entanto, mesmo este sendo um recurso limpo e renovável, a geração de energia elétrica por meio das usinas hidrelétricas causa grande impacto social e ambiental, além do mais, Pereira et. al. (2006) afirmam que os grandes reservatórios de água já estão sendo utilizados. Outro ponto negativo das hidrelétricas é a dependência das chuvas, diante de longos períodos sem chuvas se faz necessário a demanda por usinas termelétricas, que por consequência impacta no custo da energia. Para não depender dessas usinas e de fontes poluentes, os sistemas fotovoltaicos apresentam-se como uma boa alternativa, visto que o clima no Brasil é favorável o ano inteiro e o recurso solar é inesgotável, além disso, considera-se este um meio sustentável e que ajuda na redução dos impactos ambientais e sociais causados pelas fontes poluentes.

No cenário brasileiro atual, 21,184 GW (69%) da geração de energia solar provém de sistemas de geração distribuída, enquanto que 9,431 GW (31%) dimana de sistemas de geração centralizada (ABSOLAR, 2023). A Figura 2 demonstra a evolução da fonte solar fotovoltaica no Brasil.

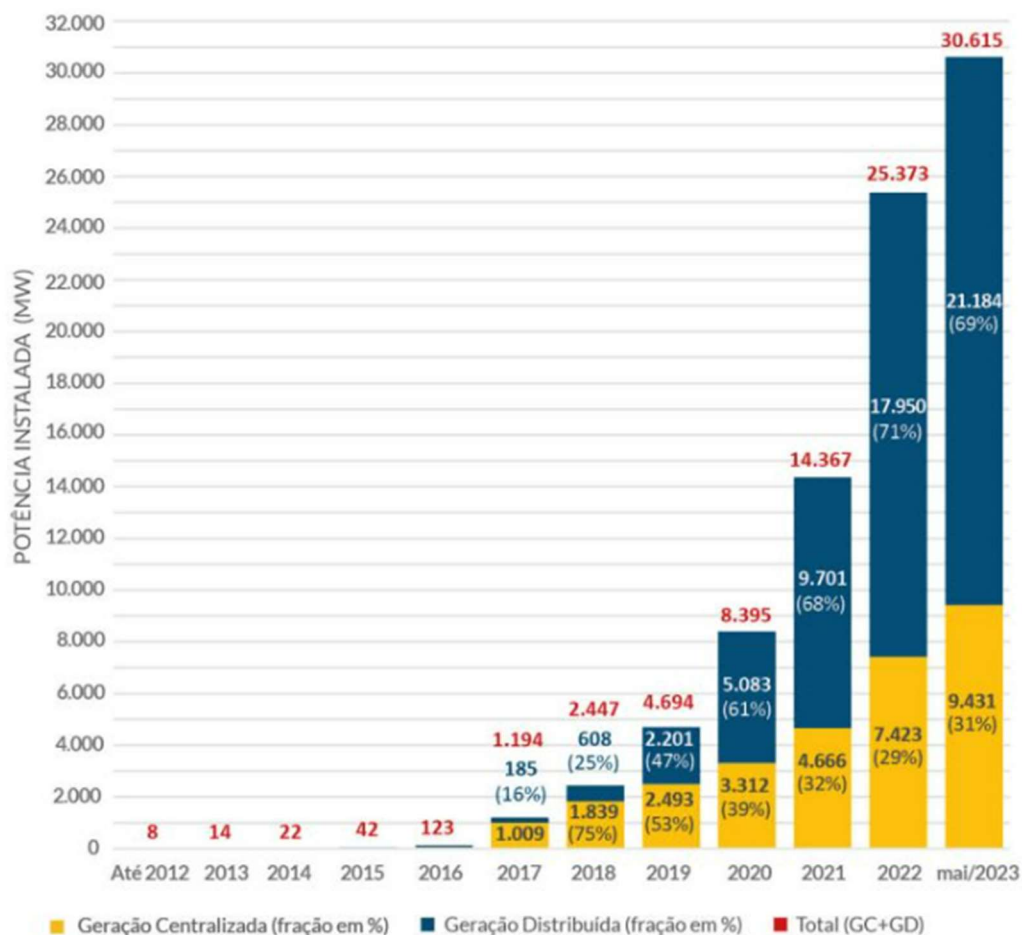
No dia 06 de janeiro de 2022, foi o publicado o novo Marco Legal da Geração Distribuída, no qual estabelece certas mudanças no Sistema de Compensação de Energia Elétrica (SCEE). Neste caso, os créditos gerados a partir das disbruidoras, antes não cobrados, referente ao excedente de geração de energia solar, passaram a ser taxados após a lei. O objetivo de tal cobrança é aracar com as despesas em relação à infraestrutura e investimentos da rede de distribuição (Fio B).

Figura 1 - Matriz elétrica brasileira.



Fonte: Adaptado de ABSOLAR, 2023.

Figura 2 – Evolução da Fonte Solar Fotovoltaica no Brasil



Fonte: Adaptado de ABSOLAR, 2023.

2.2 RADIAÇÃO SOLAR

Segundo Pinho e Galdino (2014), a radiação solar pode ser definida como Difusa, Direta ou Refletida, conforme ilustrado na Figura 3. A radiação difusa é aquela que se espalha pelo ar, pela poeira e pelo vapor d'água. A radiação direta é aquela que não enfrenta barreiras que impeçam ou reduzam sua passagem. A radiação refletida, também chamada de albedo, é aquela que reflete de uma superfície, como exemplo, superfícies formadas por neve, água ou asfalto.

Figura 3 - Tipos de radiação solar.



Fonte: Viana, 2010.

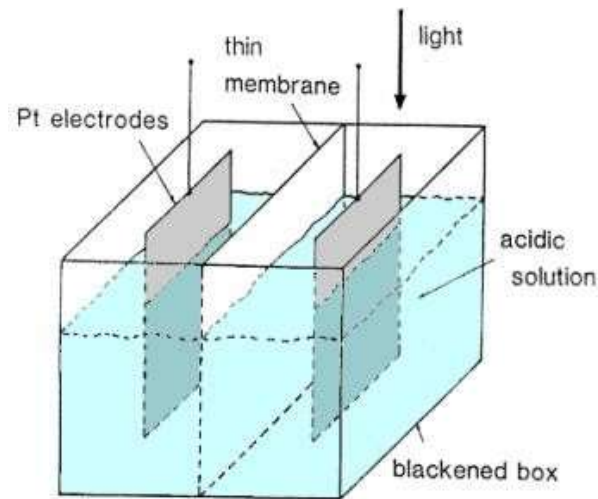
Radiação solar também pode significar irradiância solar (G) quando se refere ao valor instantâneo da radiação solar incidente sobre uma superfície, sua unidade de medida é representada em watt por metro quadrado [W/m^2], ou então significar irradiação solar quando a intenção é expressar a energia incidente durante um período de tempo, a unidade de medida usada para representar a irradiação solar é o watt hora por metro quadrado [Wh/m^2] (NBR 10899, 2006).

2.3 EFEITO FOTOVOLTAICO

O efeito fotovoltaico foi observado pela primeira vez em 1839 pelo físico francês Alexandre Edmond Becquerel, ele percebeu que placas metálicas produziam uma diferença de

potencial quando mergulhadas em uma solução ácida e expostas a luz solar, porém somente um século depois de sua descoberta foi que a tecnologia passou a ser integrada para geração de energia a partir do sol, através das células fotovoltaicas (PINA, 2013). A Figura 4 mostra a experiência realizada por Becquerel.

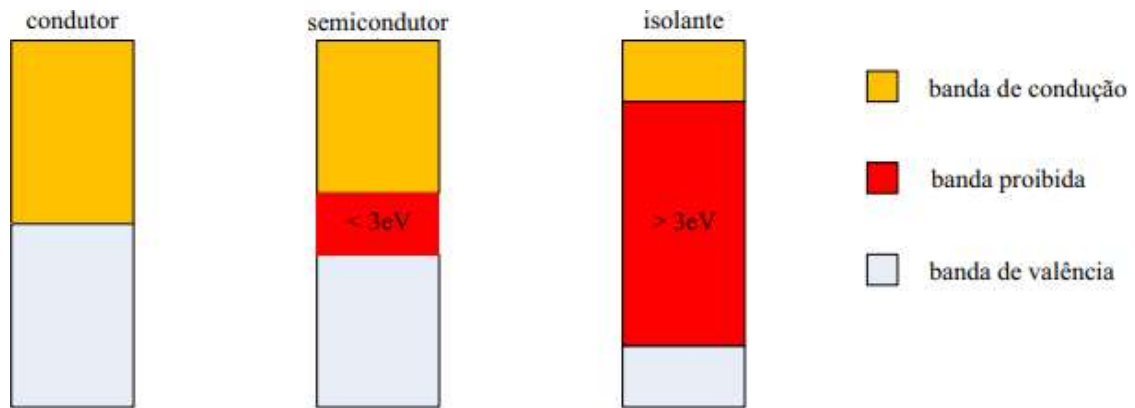
Figura 4 - Experiência realizada por Becquerel.



Fonte: (PINA, 2013).

Pinho e Galdino (2014) explicam que o efeito fotovoltaico é a conversão da luz solar em energia elétrica e que esse fenômeno ocorre pela diferença de potencial que existe em um material semicondutor quando aplicado uma luz sobre ele. Fisicamente, isso acontece devido à movimentação de elétrons entre as bandas de energia de um material semicondutor. Um semicondutor é assim chamado por possuir três bandas de energia: a de valência, onde é permitida a presença de elétrons; a de condução, sem a presença de elétrons; e a faixa que fica entre essas duas bandas, que é chamada de “bandgap” ou banda proibida. Os materiais semicondutores possuem uma banda de valência completa, uma de condução vazia e um *bandgap* médio de 1 eV (elétron-volt) entre elas. A geração de energia elétrica começa quando o semicondutor recebe fótons com energia superior ao bandgap, essa incidência faz os elétrons da banda de valência migrarem para a banda de condução (PINHO e GALDINO, 2014). A Figura 5 ilustra a relação entre essas bandas em material condutor, semicondutor e isolante.

Figura 5 - Relação entre as bandas em material condutor, semicondutor e isolante.



Fonte: PINHO e GALDINO, 2014.

2.4 TIPOS DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS

Nesta seção serão apresentados os tipos de sistemas fotovoltaicos no que diz respeito a sua conexão com a rede de elétrica. Neste sentido, podemos destacar dois tipos de sistema fotovoltaico: aqueles isolados da rede e aqueles conectados à rede, sendo que ambos são analisados em maior detalhe nas subseções seguintes.

2.4.1 Sistemas Fotovoltaicos Isolados

O sistema fotovoltaico isolado também é conhecido como sistema off-grid ou sistema autônomo, a característica principal desse sistema é funcionar sem depender da rede elétrica da concessionária. Esse tipo de sistema utiliza bancos de baterias que armazenam a energia gerada durante os períodos de Sol (URBANETZ, 2010). A energia armazenada nos bancos de bateria é consumida durante a noite ou nos momentos de ausência de radiação solar.

Um sistema fotovoltaico isolado geralmente é instalado em locais sem acesso à rede elétrica ou em locais onde o abastecimento energético é deficiente, ou ainda em locais onde não seja viável financeiramente se conectar à rede da concessionária. A energia fornecida através de um sistema isolado pode ser em corrente contínua, corrente alternada ou mista CC/CA, nos circuitos onde é necessário a corrente alternada utiliza-se um inversor para fazera conversão de CC para CA (PINHO e GALDINO, 2014). Faz parte também do sistema fotovoltaico isolado um controlador de carga, equipamento este responsável por controlar o carregamento do banco de baterias. A Figura 6 apresenta um desenho que ilustra o esquema de funcionamento de um sistema fotovoltaico isolado.

Figura 6 - Esquema de funcionamento de um sistema fotovoltaico isolado.



Fonte: ConSultrevi Solar, 2017.

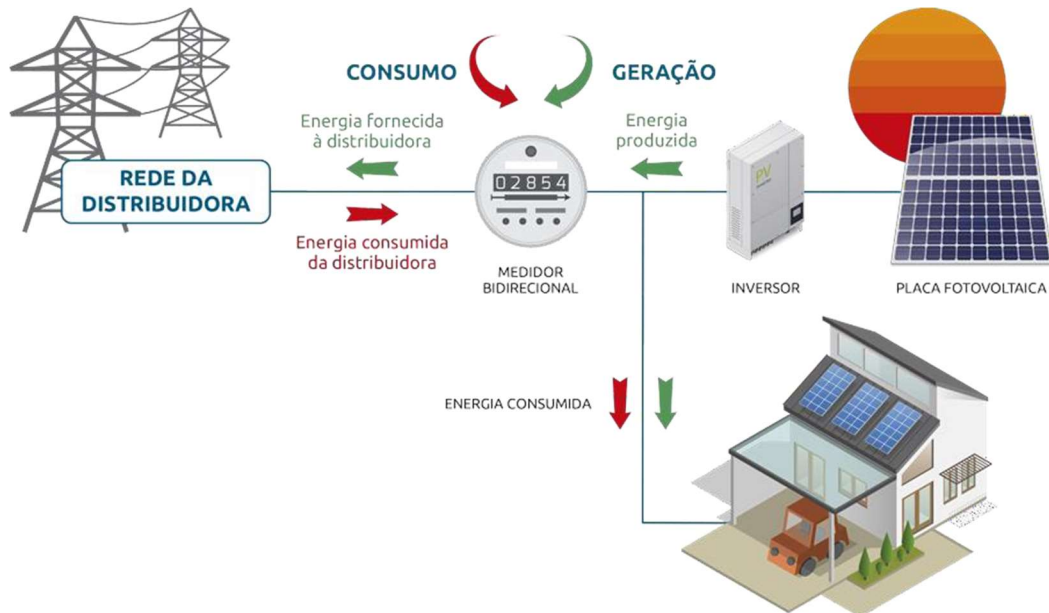
2.4.2 Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede Elétrica

Os sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica também são chamados de sistemas on-grid, esses sistemas não dependem dos bancos de baterias para funcionar, eles são conectados com a rede elétrica da concessionária e por este motivo, o sistema on-grid é indicado para as unidades consumidoras próximas da rede pública de energia. Pelo fato de dispensar o uso dos armazenadores de energia, o valor de aquisição desse tipo de sistema fotovoltaico se torna muito mais acessível (RÜTHER, 2004). O sistema on-grid é indicado para as unidades consumidoras próximas da rede pública de energia. A energia elétrica produzida pelos módulos fotovoltaicos é em forma de corrente contínua e passa pelo inversor para ser convertida em corrente alternada, após esta conversão, o circuito segue paralelamente ligado à rede da concessionária e ao quadro de distribuição da unidade consumidora. Inicialmente, essa energia produzida é consumida pelos aparelhos elétricos e eletrônicos da unidade consumidora (chamado de autoconsumo) e o excedente da energia é injetado na rede da distribuidora para ser consumida por outras unidades consumidoras também conectadas ao mesmo sistema de distribuição (Portal Solar, 2017). Esse excedente de energia elétrica injetado na rede gera um crédito energético ao proprietário do sistema fotovoltaico, crédito está que será utilizado para compensar a energia consumida da concessionária nos momentos de ausência da radiação solar, em um modelo chamado de *net metering*.

Utiliza-se também para esse sistema fotovoltaico um medidor bidirecional, que tem como função registrar a energia elétrica consumida da concessionária e a energia elétrica injetada na rede. Os sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica são compostos basicamente pelo módulo fotovoltaico e o inversor, conforme mostra o diagrama da Figura 7.

Vale ressaltar que o modelo *net metering*, também conhecido como sistema de compensação de energia, é uma política que permite aos proprietários de sistemas de geração distribuída, gerar eletricidade em excesso e injetá-la na rede elétrica, recebendo créditos pela energia excedente produzida. Esses créditos podem ser utilizados posteriormente para abater o consumo de energia da mesma unidade consumidora em momentos em que a geração solar é insuficiente, como à noite.

Figura 7 - Diagrama de um Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede Elétrica.



Fonte: Inovacare SOLAR, 2021.

2.5 COMPONENTES DO SISTEMA FOTOVOLTAICO CONECTADOS À REDE

2.5.1 Módulos Fotovoltaicos

As células fotovoltaicas são os dispositivos capazes de converter a luz solar em energia elétrica através do efeito fotovoltaico e são elementos fundamentais dos módulos fotovoltaicos. Os principais materiais utilizados para a fabricação das células fotovoltaicas são:

- Silício: O silício é o material mais comum e amplamente utilizado na fabricação de células fotovoltaicas. Existem dois tipos principais de células de silício: cristalino (subdividido em mono e multi cristalino) e amorfo, sendo esse último não mais utilizado na fabricação de módulos fotovoltaicos.
 - Silício Monocristalino: O silício monocristalino é uma forma de silício com uma única estrutura cristalina contínua, o que resulta em uma maior eficiência na conversão de luz solar em eletricidade. No entanto, sua produção é mais complexa e custosa do que o silício policristalino.
 - Silício Multicristalino: O silício multicristalino é uma forma de silício que apresenta múltiplos cristais, resultando em uma estrutura menos uniforme em comparação com o silício monocristalino. É um material amplamente utilizado devido à sua disponibilidade e custo relativamente mais baixo.
- Telureto de Cádmio (CdTe): O telureto de cádmio é um material semicondutor composto por cádmio e telúrio. É utilizado na fabricação de células fotovoltaicas de filme fino e é conhecido por sua eficiência e custo relativamente baixo.
- CIGS: As células fotovoltaicas de CIGS (Cobre-Índio-Gálio-Selênio) são caracterizadas por sua eficiência, baixo custo, flexibilidade, tolerância ao sombreamento e capacidade de absorver uma ampla faixa do espectro solar. Essas células de filme fino, fabricadas depositando-se uma camada fina de materiais semicondutores diretamente em um substrato, oferecem a possibilidade de produção de painéis solares leves e flexíveis, permitindo sua adaptação a diferentes aplicações e superfícies.
- Perovskita: As células solares de perovskita são uma classe emergente de células fotovoltaicas com um material perovskita como camada ativa. A perovskita é um material de estrutura cristalina especial que tem demonstrado alto potencial de eficiência e baixo custo de produção. Contudo, esse tipo de célula ainda deve enfrentar um processo de amadurecimento tecnológico a nível de pesquisa antes de chegar ao mercado de módulos FV.

Como exposto, o material semiconductor mais utilizado na atualidade para produzir células fotovoltaicas é o silício (Si), os fatores que fazem o silício ser o material mais utilizado para essa finalidade são: não ser tóxico, ser relativamente barato e ser o segundo elemento mais abundante da Terra representando cerca de 28% da massa da crosta terrestre (BUTZ, 2004).

Existem vários tipos de células solares de silício com diferentes arquiteturas e tecnologias que visam aumentar a eficiência e melhorar o desempenho. Alguns desses tipos incluem PERC, n-type, TOPcon, HJT e IBC. Abaixo está uma descrição breve de cada um deles.

- PERC (Passivated Emitter and Rear Cell): As células solares PERC são uma evolução das células solares de silício convencionais. Elas possuem uma camada adicional de passivação na parte traseira da célula, o que ajuda a reduzir a recombinação de carga e melhorar a eficiência de conversão (SUNPOWER, 2023).
- n-type: As células solares de silício tipo n são fabricadas usando silício dopado com impurezas do tipo n, como fósforo. Essas células têm a vantagem de apresentar menor degradação de desempenho ao longo do tempo em comparação com as células tipo p (SINOVOLTAICS, 2023).
- TOPcon (Tunnel Oxide Passivated Contact): As células solares TOPcon são projetadas com um contato de passivação de óxido de silício na parte frontal e traseira da célula. Essa configuração permite uma melhor coleta de portadores de carga e redução das perdas por recombinação, resultando em uma maior eficiência. As células TOPcon são consideradas uma tecnologia de próxima geração, com potencial para alcançar altas eficiências de conversão (ECO GREEN ENERGY, 2023).
- HJT (Heterojunction Technology): As células solares HJT são baseadas em uma estrutura de junção hetero, que combina camadas finas de silício amorfo e cristalino. Essa configuração permite uma eficiente coleta de portadores de carga e uma redução significativa das perdas por recombinação (KANEKA, 2023).
- IBC (Interdigitated Back Contact): As células solares IBC são caracterizadas por terem contatos metálicos localizados na parte traseira da célula, eliminando a presença de fios de conexão na parte frontal. Isso resulta em menor sombreamento e perdas ópticas, além de melhorar a coleta de portadores de carga (SINOVOLTAICS, 2023).

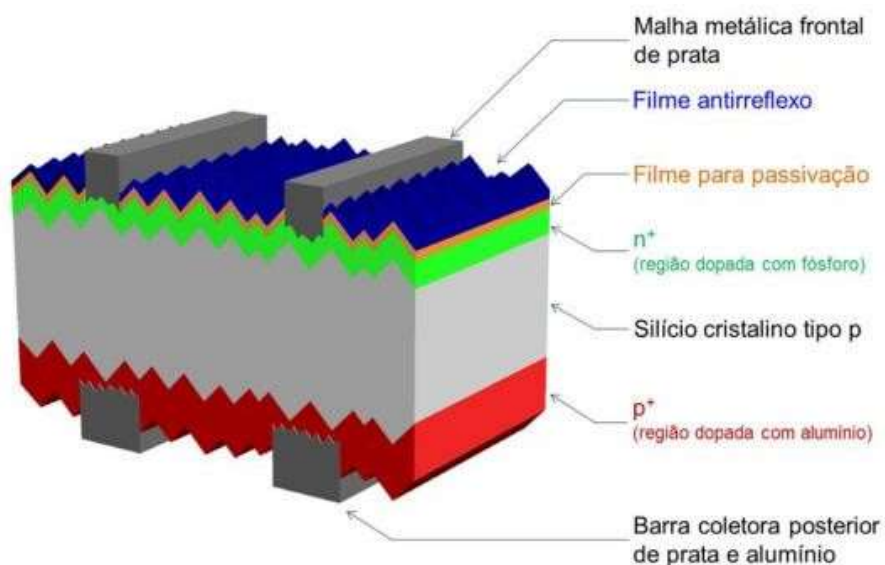
De acordo com Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems ISE (2023), a maior eficiência registrada para uma célula de silício monocristalino com uma única junção é 26,7%, sendo essa eficiência medida pela proporção da irradiação solar que incide sobre a própria superfície da célula que é convertida em energia elétrica. Na Figura 5 é apresentada uma célula fotovoltaica de silício cristalino e a Figura 6 ilustra uma estrutura básica de uma célula fotovoltaica de silício cristalino.

Figura 8 - Célula fotovoltaica de silício cristalino.



Fonte: PINHO e GALDINO, 2014.

Figura 9 - Estrutura básica de uma célula de silício cristalino.



Fonte: PINHO e GALDINO, 2014.

Segundo a definição feita pela ABNT (2013, p. 10), “o módulo fotovoltaico é uma unidade básica formada por um conjunto de células fotovoltaicas, interligadas eletricamente e encapsuladas, com o objetivo de gerar energia elétrica”. A potência nominal é a principal especificação de um módulo, ela é a potência de saída sob as condições-padrão de referência para ensaio ou STC (*Standard Test Conditions*), sendo essas: temperatura de célula de 25°C, irradiância de 1.000 W/m² e uma massa de ar de 1,5 (VIANA, 2010).

Um módulo fotovoltaico pode conter até 264 células fotovoltaicas (First Solar, 2022) conectadas eletricamente em série e/ou paralelo, a depender dos parâmetros elétricos (tensão, corrente e potência) mais adequados para a finalidade de aplicação.

Além do conjunto de células fotovoltaicas, para a fabricação de um módulo também são utilizados mais elementos. De acordo com Portal Solar (2021), faz parte da composição de um módulo fotovoltaico:

- Um vidro especial, com baixo teor de ferro e de alta transparência para deixar o máximo de luz passar através dele. Esse vidro tem espessura de 2mm a 4mm e é revestido com uma substância capaz de reduzir o reflexo da luz solar, a qualidade desse vidro também precisa ser boa o suficiente para resistir as mais fortes chuvas de granizo.
- O filme encapsulante, responsável por proteger as células contra os efeitos prejudiciais dos raios ultravioletas, temperaturas extremas e umidade, garantindo mais vida útil às células fotovoltaicas e fazendo com que o máximo de luz solar chegue até elas.
- A parte de trás do módulo pode ser composta por *backsheet* ou por vidro. Esses materiais são aplicados na parte posterior do módulo, tendo como função proteger todos os componentes internos, principalmente as células fotovoltaicas, e também agindo como um isolante elétrico. No caso de módulos bifaciais, a parte de trás do módulo é coberta por vidro ou por um *backsheet* transparente, viabilizando a geração de energia pela parte posterior do dispositivo.
- A caixa de junção, que fica colada na parte de trás dos módulos, é onde as células fotovoltaicas estão interconectadas eletricamente, contendo dentro dela os diodos de by-pass responsáveis pela segurança e bom funcionamento do módulo. A caixa de junção já acompanha os cabos e os conectores especiais usados para fazer a ligação dos módulos na instalação do sistema fotovoltaico.

- Moldura de alumínio anodizado, fundamental para tornar o módulo mais robusto, evitando que o mesmo não “torça” e quebre as células fotovoltaicas. A espessura desta moldura varia, sendo que hoje vemos módulos no mercado com molduras de 30 mm. É importante ressaltar que existem módulos sem moldura, geralmente aplicados em integrações para edificações.

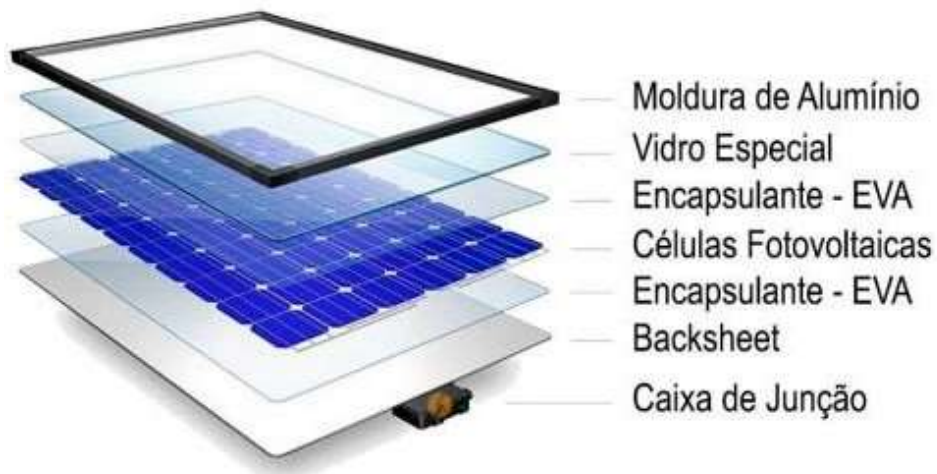
A Figura 10 apresenta uma fotografia real de um módulo FV de 72 células e a Figura 11 ilustra uma imagem produzida por computador de uma vista explodida de um módulo fotovoltaico, mostrando cada elemento que compõe sua construção.

Figura 10 - Módulo fotovoltaico de 72 células.



Fonte: FAIRTEC, 2019.

Figura 11 - Vista explodida de um módulo fotovoltaico.



Fonte: Portal Solar, 2021.

Em relação aos custos de fabricação de um módulo, estima-se que as células fotovoltaicas representam cerca de 60% do valor total, o vidro especial em torno de 10%, o filme encapsulante, o backsheet e a moldura representam, cada um deles, aproximadamente 8% e a caixa de junção por volta de 6% (Portal Solar, 2021b).

Para muitas aplicações um único módulo fotovoltaico não é suficiente, nesses casos, para chegar aos níveis de tensão e corrente desejados se faz necessária a instalação de um arranjo de módulos ligados em série e/ou paralelo, a quantidade de módulos e o esquema de ligação também são definidos com base no que for mais adequado para a finalidade de aplicação.

2.5.2 Inversores

O inversor é um equipamento eletrônico capaz de converter a energia elétrica de corrente contínua (CC) para corrente alternada (CA). A aplicação desse equipamento em um sistema fotovoltaico conectado à rede elétrica é indispensável, pois a energia elétrica produzida pelos módulos FV é em corrente contínua e a rede opera em corrente alternada.

Os inversores de sistemas fotovoltaicos quando conectados à rede da concessionária detectam a presença da rede e passam a operar injetando a energia elétrica diretamente na rede com amplitude, frequência e conteúdo harmônico adequado às cargas a serem alimentadas (VIANA, 2010). Em caso de desenergização da rede elétrica pela própria concessionária ou a desconexão do inversor da rede, ocasionará automaticamente o desligamento do inversor, interrompendo imediatamente o fornecimento de energia elétrica (PINHO e GALDINO, 2014).

Os tipos de inversores string mais empregados podem ser tanto monofásicos, quanto trifásicos:

- Inversores monofásicos são projetados para atender sistemas fotovoltaicos em residências e pequenos comércios, onde a demanda de energia é menor, comparado à edifícios comerciais ou indústrias. Dependendo do fabricante, a faixa de potências desses inversores pode variar de alguns quilowatts até pouco mais do que uma dezena de quilowatts e são fabricados para serem de fácil instalação e operação, possuindo interfaces de monitoramento de geração intuitivas para o consumidor final.

- Inversores trifásicos são geralmente projetados para sistemas fotovoltaicos de grande porte, como grandes comércios e indústrias., onde a demanda de energia elétrica é alta. São capazes de lidar com potências mais altas em comparação com inversores monofásicos, em função da redução da corrente nos circuitos, que passa a ser distribuída nas três fases. A faixa de potência dos inversores trifásicos é maior em comparação aos monofásicos, podendo variar de algumas dezenas de quilowatts a vários megawatts, dependendo da aplicação e do porte do sistema fotovoltaico.

A Figura 12 ilustra um inversor trifásico, fornecido pela empresa WEG S.A., modelo SIW500H

Figura 12 - Inversor trifásico SIW500H.



Fonte: WEG, 2023.

2.6 ESTRUTURAS DE FIXAÇÃO DE MÓDULOS FOTOVOLTAICOS PARA SOLO

Nesta seção serão apresentados os dois principais tipos de estruturas de fixação de módulos fotovoltaicos para solo. Neste sentido, podemos destacar dois tipos de estruturas: estrutura fixa e estrutura de rastreamento solar de um eixo, sendo que ambas são analisadas em maior detalhe nas subseções seguintes.

2.6.1 Estrutura Fixa

A estrutura fixa é utilizada para instalar os módulos fotovoltaicos sobre o solo, normalmente, em uma única posição ao longo de toda a vida útil da usina. Existem variações dessas estruturas que permitem ajustar o ângulo de inclinação dos módulos de acordo com cada estação do ano, para obter o máximo de geração de energia possível, porém o modelo de estrutura com inclinação fixa é o mais utilizado em sistemas fotovoltaicos sobre solo no Brasil (Aldo, 2020). A Figura 13 apresenta uma usina solar fotovoltaica com estrutura solo de inclinação fixa.

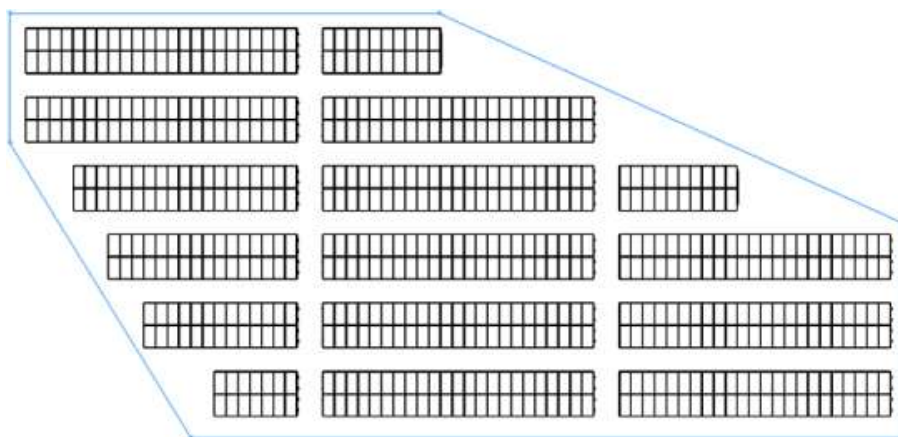
Figura 13 - Usina solar fotovoltaica com estrutura solo de inclinação fixa.



Fonte: CCS, 2023.

A estrutura fixa apresentada na Figura 12 é fabricada no Brasil pela empresa CCS, essa estrutura é projetada para fixar de dois em dois módulos fotovoltaicos lado a lado em orientação retrato, permitindo modular o comprimento da estrutura de acordo com o espaço disponível no terreno ou conforme a necessidade do cliente. A Figura 14 mostra uma usina fotovoltaica com estrutura solo fixa especialmente modulada para atender a área disponível no local.

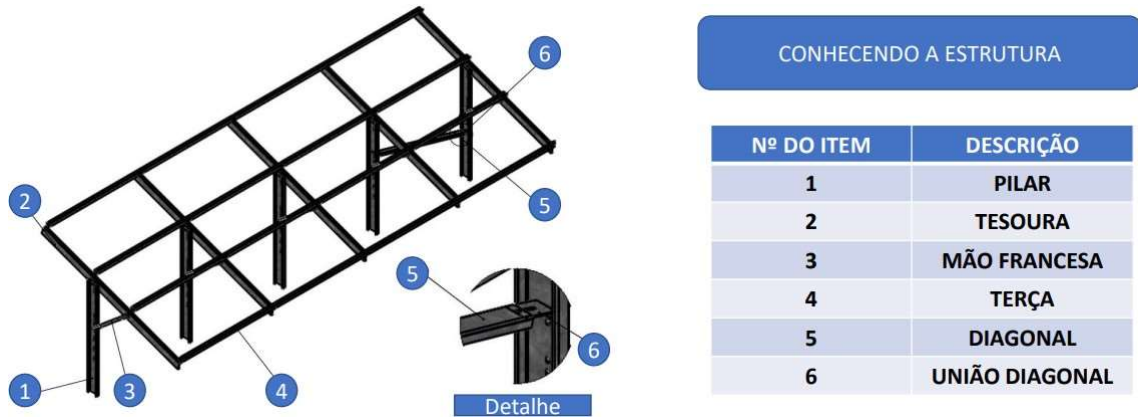
Figura 14 - Usina fotovoltaica com estrutura solo fixa especialmente modulada.



Fonte: CCS, 2016.

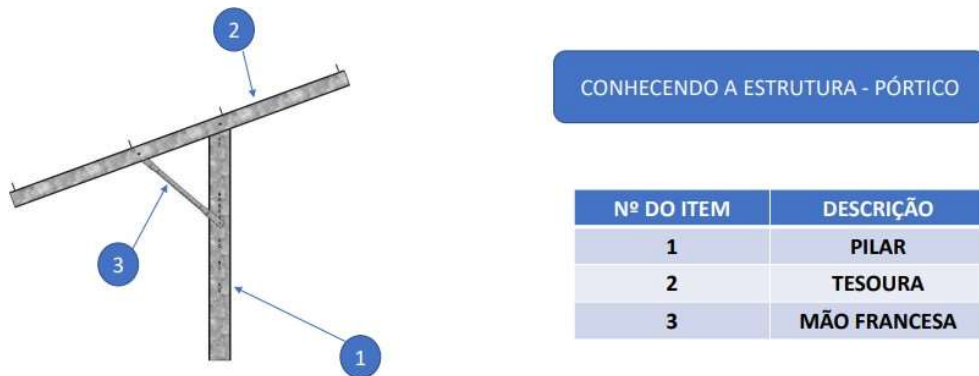
De acordo com a CCS (2020), essas estruturas fixas são constituídas basicamente por pilares, tesouras, mãos francesas, terças, diagonais e uniões diagonais. Nas Figuras 15, 16 e 17 é possível visualizar cada um desses componentes integrados na estrutura fixa.

Figura 15 - Componentes da estrutura fixa – vista superior.



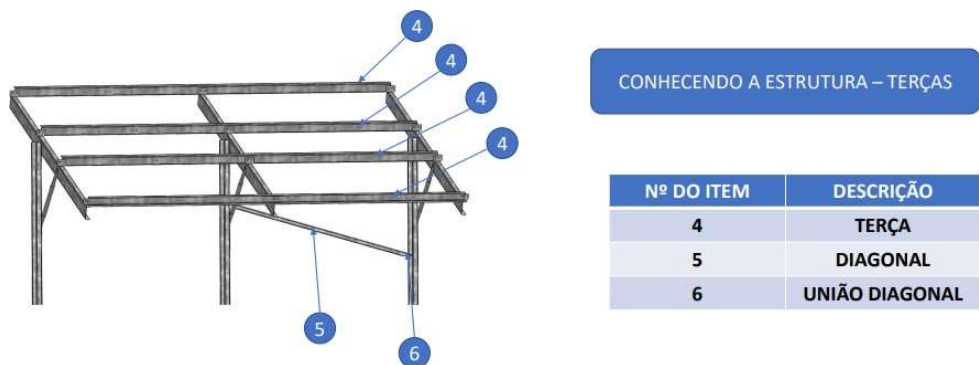
Fonte: CCS, 2020.

Figura 16 - Componentes da estrutura fixa – vista lateral direita.



Fonte: CCS, 2020.

Figura 17 - Componentes da estrutura fixa – vista frontal.



Fonte: CCS, 2020.

Além desses componentes mostrados nas Figuras 14, 15 e 16, também fazem parte dessa estrutura os parafusos que fixam cada um desses componentes e os grampos intermediários e de bordas usados para prender os módulos fotovoltaicos sobre a estrutura fixa. As Figuras 17, 18 e 19 ilustram, respectivamente, o parafuso, o grampo intermediário e o grampo de borda que compõem a estrutura fixa.

Figura 18 - Parafuso da estrutura fixa.



Fonte: CCS, 2020.

Figura 19 - Grampo intermediário da estrutura fixa.



Fonte: CCS, 2020.

Figura 20 - Grampo de borda da estrutura fixa.



Fonte: CCS, 2020.

A CCS (2016) ainda afirma que as estruturas fixas para solo, fabricadas por eles, são projetadas para suportar cargas aerodinâmicas conforme NORMA ABNT NBR 6123 e são galvanizadas a fogo conforme NORMA ABNT NBR 6323.

2.6.2 Estrutura de Rastreamento Solar em um Eixo

A estrutura de rastreador, também conhecida como seguidor solar ou apenas rastreamento de um eixo, é outra solução desenvolvida para instalar os módulos fotovoltaicos sobre o solo, porém esta possui um diferencial tecnológico: o rastreamento de um eixo é projetado para movimentar os módulos fotovoltaicos acompanhando a trajetória solar ao longo do dia. Neste caso, o eixo do rastreador é posicionado na direção norte-sul, permitindo a movimentação dos módulos fotovoltaicos de leste a oeste durante o dia, seguindo a trajetória solar. Esse movimento é feito basicamente por um conjunto de acionamento rotativo que move lateralmente um sistema de biela com o objetivo de captar mais energia incidente e maximizar a geração (STi Norland, 2020).

Já a estrutura de rastreador de dois eixos possui movimento em dois planos, permitindo um direcionamento mais preciso dos módulos fotovoltaicos em relação ao sol. No entanto, embora os rastreadores de dois eixos possam oferecer uma maximização na captação de energia solar, eles também apresentam um custo mais elevado devido à sua complexidade e maior necessidade de manutenção.

Diferente da estrutura fixa, a estrutura de rastreamento de um eixo é projetada para fixar de um a dois módulos fotovoltaicos lado a lado em orientação retrato e só permite modular o comprimento da estrutura até 60 m (metros) (STi Norland, 2020). A Figura 21 apresenta uma usina fotovoltaica com estrutura de rastreamento de um eixo contendo um módulo fotovoltaico lado a lado.

Figura 21 - Usina fotovoltaica com estrutura de rastreamento de um eixo.

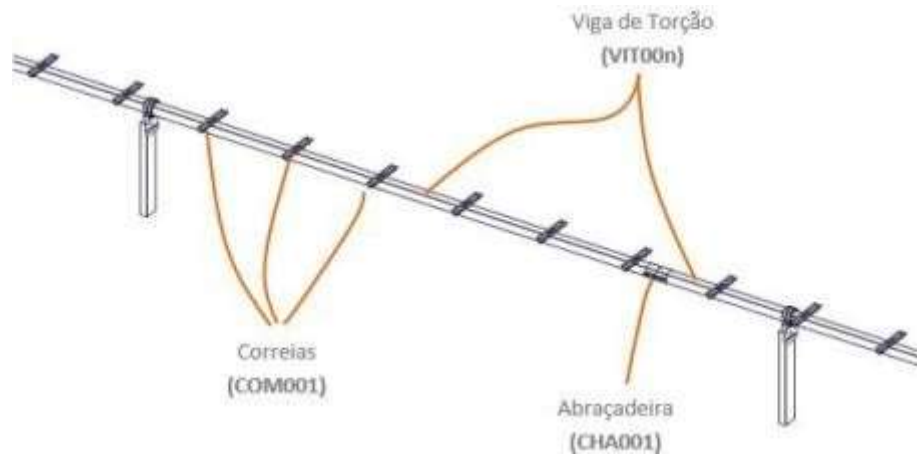


Fonte: STi Norland, 2020.

A estrutura de rastreamento de um eixo apresentada na Figura 20 é fabricada pela empresa STi Norland, modelo STi-H250. Esse de rastreamento de um eixo é constituído por três grupos principais: conjunto estrutural, conjunto de acionamento e sistema elétrico (STi Norland, 2020).

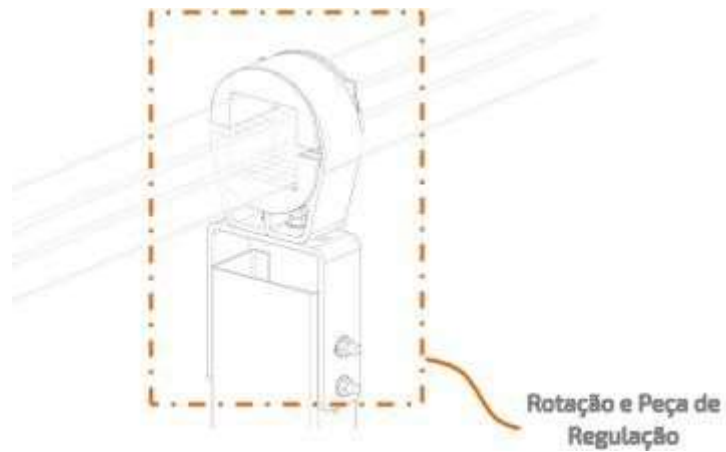
O conjunto estrutural é formado principalmente por vigas de seção quadradas e peças de articulações, responsável por transmitir os esforços e os movimentos e sustentar os módulos fotovoltaicos. As Figuras 22, 23, 24, 25 e 26 apresentam, respectivamente, a fileira da viga de torção, itens de rotação e regulação, braço, biela e as correias para os módulos fotovoltaicos. Todos esses elementos são parte do conjunto estrutural do rastreamento de um eixo.

Figura 22 - Fileira da viga de torção.



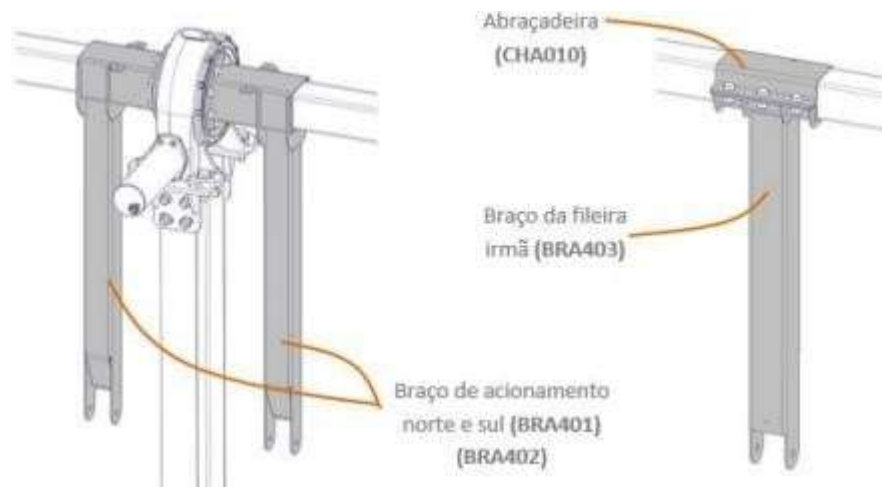
Fonte: STi Norland, 2020.

Figura 23 - Itens de rotação e regulação.



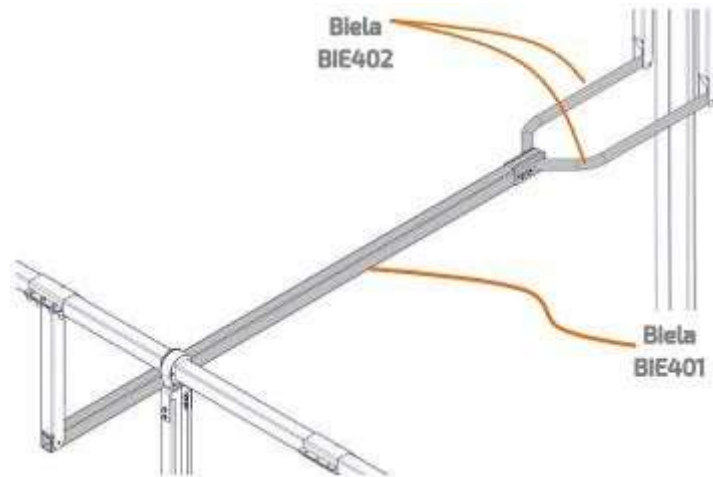
Fonte: STi Norland, 2020.

Figura 24 – Braço.



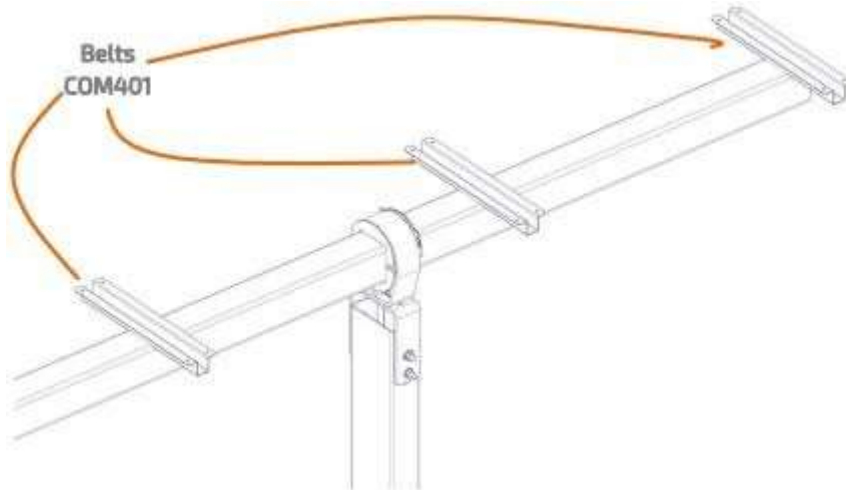
Fonte: STi Norland, 2020.

Figura 25 - Biela.



Fonte: STi Norland, 2020.

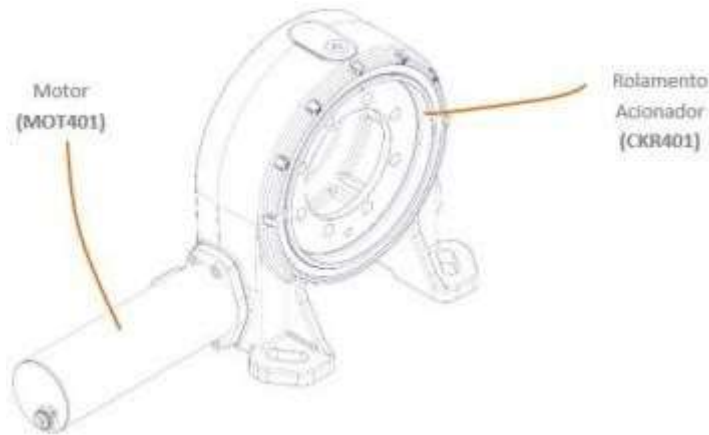
Figura 26 - Correias para os módulos fotovoltaicos.



Fonte: STi Norland, 2020.

O conjunto de acionamento é composto por um motorreductor e por uma engrenagem principal, gerenciando automaticamente a posição dos módulos fotovoltaicos otimizando totalmente a geração de energia. Esse conjunto de acionamento é responsável por movimentar o conjunto de vigas de torque, através da biela, seguindo o sentido do sol (STi Norland, 2020). A Figura 27 ilustra o conjunto de acionamento e a Figura 28 mostra as características gerais deste conjunto.

Figura 27 - Conjunto de acionamento do rastreamento de um eixo.



Fonte: STi Norland, 2020.

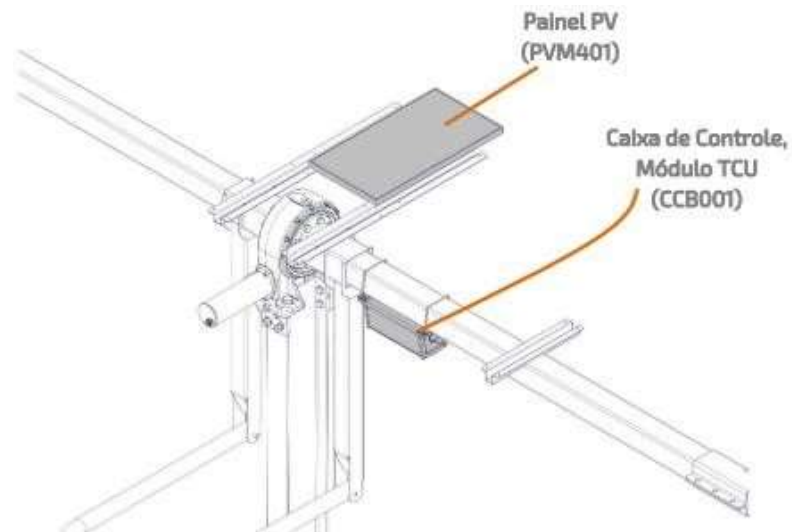
Figura 28 – Características gerais do conjunto de acionamento.

Motorreductor	Tensão Nominal	24 V
	Velocidade Nominal	1.568 RPM
	Corrente Nominal	5,6 A
	Potência Nominal	88 W
Rolamento Giratório	Classe IP	66
	Aperto máximo de torque	45 KNm
	Precisão de Giro	0,2°
	Lubrificação	Graxa
	Classe IP	65

Fonte: STi Norland, 2020.

O sistema elétrico é formado pelo módulo fotovoltaico utilizado para alimentar o motorreductor e pela caixa de controle, que inclui o inclinômetro e as peças auxiliares. A Figura 29 apresenta o sistema elétrico do rastreamento de um eixo.

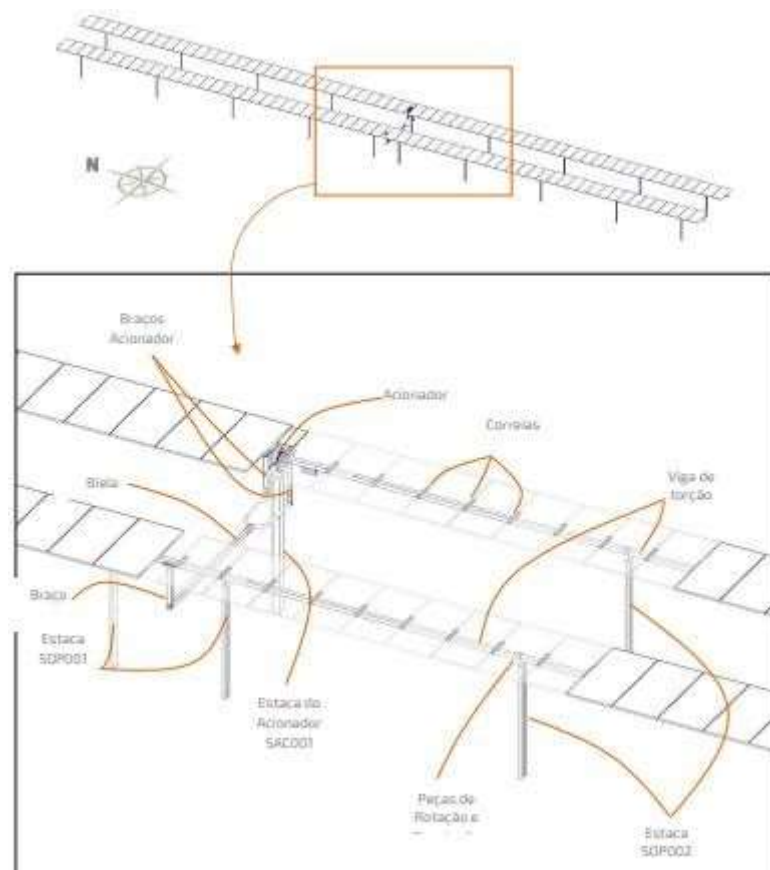
Figura 29 – Sistema elétrico do rastreamento de um eixo.



Fonte: STi Norland, 2020.

A Figura 30 ilustra uma visão geral do rastreamento de um eixo e a identificação das partes e peças que compõe esta estrutura, modelo STi-H250, da fabricante STi Norland.

Figura 30 - Visão geral do rastreamento de um eixo e a identificação das partes e peças.



Fonte: STi Norland, 2020.

É importante destacar que a estrutura com rastreamento em sistemas fotovoltaicos é consideravelmente mais complexa em comparação com a estrutura fixa. A adição do rastreamento de um eixo ou de dois eixos permite que os módulos fotovoltaicos sigam o movimento do sol ao longo do dia, maximizando a captura de luz solar direta. No entanto, essa funcionalidade aumenta a complexidade do sistema, exigindo uma manutenção mais cuidadosa e frequente, além de custos de implantação e manutenção mais elevados.

3. METODOLOGIA E DESENVOLVIMENTO

A metodologia desse trabalho consiste em simular no *software* PVsyst a geração anual de energia de quatro usinas fotovoltaicas semelhantes, que se diferenciam apenas por usarem duas tecnologias de fixação de módulos diferentes e estarem localizadas em duas regiões brasileira diferentes: Sul e Nordeste.

A análise também será abordada pelo cálculo da PR (Performance Ratio), no qual fornece o percentual de desempenho que corresponde à parcela de energia que foi entregue em relação ao máximo valor possível. A equação abaixo apresenta o equacionamento para o cálculo da PR, uma relação entre a energia produzida pelo sistema (E , em kWh), a irradiância global de referência (G , padrão de 1000 W/m²), a potência nominal do sistema (P_{nom} , em kWp) e a irradiação no plano dos módulos (H_{POA} , em kWh/m²).

$$PR = \frac{E \times G}{P_{nom} \times H_{POA}}$$

3.1 SOFTWARE PVSYST

O PVsyst é um software muito usado na indústria solar para simular e analisar sistemas fotovoltaicos. Ele é essencial para o projeto e otimização de diferentes tipos de sistemas solares, desde residenciais até comerciais e industriais.

Com o PVsyst, é possível realizar análises detalhadas de desempenho, dimensionar corretamente os sistemas, simular sombreamentos, estimar a produção de energia, calcular perdas e até analisar aspectos econômicos.

Com ele, é possível modelar a geometria e a configuração do sistema solar, ajustar as características dos módulos solares e inversores, e considerar os dados climáticos do local, como radiação solar e temperatura além de gerar relatórios completos sobre o desempenho e a viabilidade do sistema (PVSYST, 2023).

3.2 DADOS METEREOLÓGICOS NAS LOCALIDADES DE ESTUDO

Nesta seção, serão apresentados os dados de irradiação mensal para as cidades de Itaquí – RS e Russas – CE. Os dados foram obtidos a partir do Centro de Referência para Energia Solar Sérgio Brito (CRESESB).

O CRESESB é um centro de pesquisa e referência no Brasil que realiza medições e disponibiliza dados de irradiação solar em diversas regiões do país.

Os dados de irradiação solar fornecidos pelo CRESESB são obtidos por meio de estações meteorológicas e equipamentos especializados que medem a radiação solar incidente

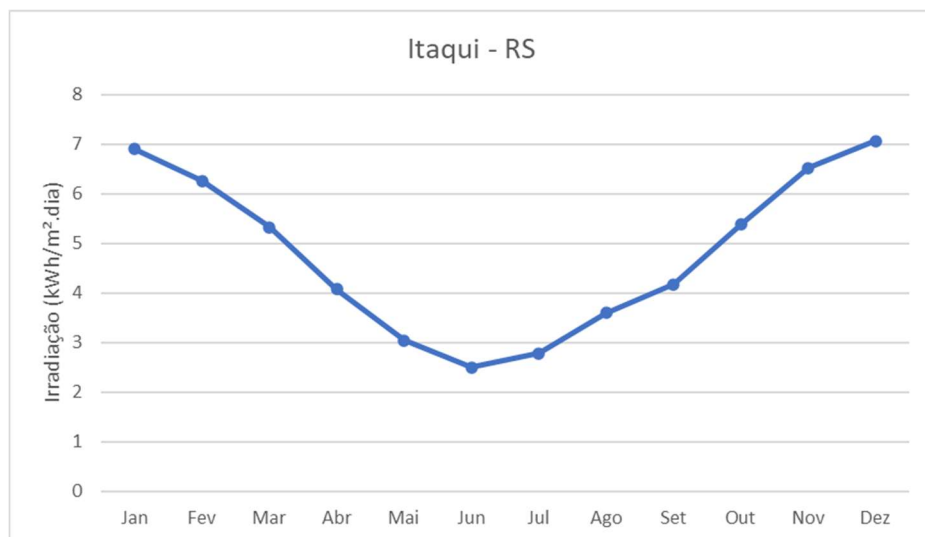
em uma determinada área. Essas medições são feitas com base em parâmetros como a radiação global horizontal, a radiação direta normal e a radiação difusa. O CRESESB foi atualizado com o banco de dados do Atlas Brasileiro de Energia Solar - 2ª Edição, que foi produzido pelo Centro de Ciência do Sistema Terrestre (CCST) do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), através do seu Laboratório de Modelagem e Estudos de Recursos Renováveis de Energia (LABREN) (CCST/LABREN/INPE, 2017). O Atlas Brasileiro de Energia Solar disponibiliza uma base de dados de radiação solar produzida a partir de um total de 17 anos de imagens de satélite - desde 1999 até 2015.

Durante as simulações no software PVsyst, foram utilizados dados de irradiância e temperatura obtidos da base de dados da Meteonorm. O Meteonorm permite o acesso a séries temporais históricas de irradiância solar, temperatura, umidade, precipitação e vento utiliza, ou seja, utiliza uma ampla variedade de fontes de dados meteorológicos, como estações meteorológicas, satélites, modelos climáticos globais e dados históricos de longo prazo.

3.2.1 Irradiação solar no plano horizontal em Itaqui - RS

A Figura 31 demonstra a irradiação mensal em kWh/m².dia para a cidade de Itaqui – RS.

Figura 31 - Irradiação Solar no Plano Horizontal em Itaqui – RS.

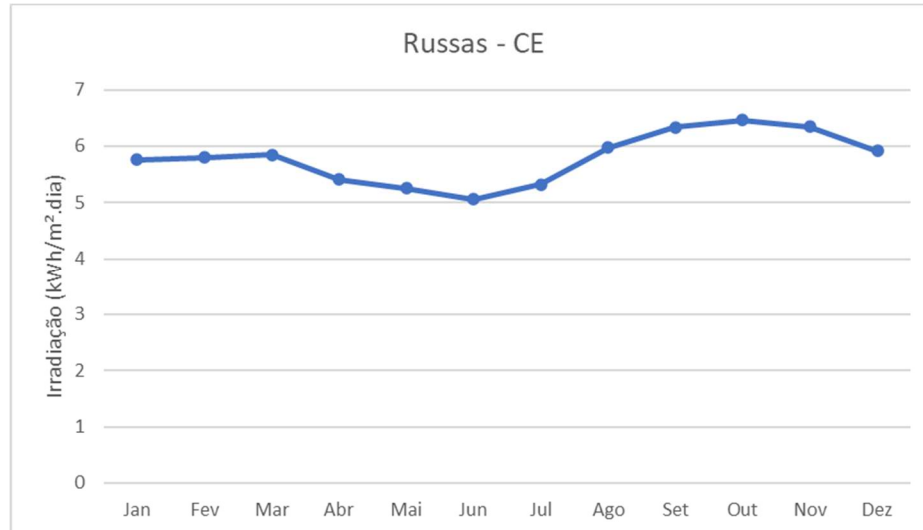


Fonte: CRESESB, 2023.

3.2.2 Irradiação solar no plano horizontal em Russas – CE

A Figura 32 demonstra a irradiação mensal em kWh/m².dia para a cidade de Russas – CE.

Figura 32 - Irradiação Solar no Plano Horizontal em Russas – CE.



Fonte: CRESESB, 2023.

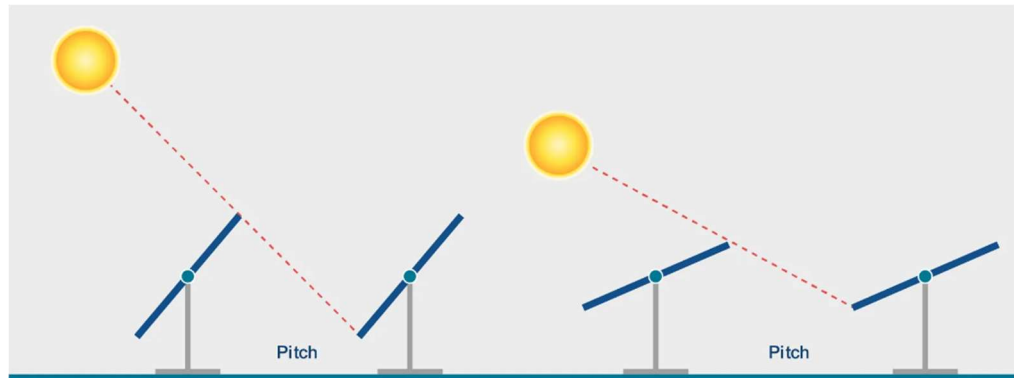
3.3 LAYOUT DOS SISTEMAS

Para a análise atual, é de suma importância definir a distância de passo (*pitch*) entre estruturas de fixação. O *pitch* pode ser definido como a distância entre dois pontos consecutivos, da estrutura, como pode ser observado na Figura 33.

O *pitch* ideal de uma planta será a distância que reduz o sombreamento da matriz tanto quanto possível, garantindo que o espaço possa acomodar painéis suficientes para atender à capacidade de geração necessária do local. A distância ideal pode variar consideravelmente entre os sites, dependendo da localização geográfica, do tipo de estrutura, bem como da configuração do site (RatedPower, 2023).

Tal distância pode ser calculada de acordo com a expressão $d = L \left(\cos \alpha + \frac{\sin \alpha}{\tan \beta} \right)$, onde d é a distância de passo em metros, L é a altura do módulo em metros, α é o ângulo de inclinação do módulo e β trata-se do ângulo do Sol com relação ao plano horizontal no solstício de inverno, dia com maior projeção de sombras no ano em função da baixa altitude solar.

Figura 33 – Pitch entre estruturas.



Fonte: Rated Power, 2023.

De acordo com o *datasheet* do módulo Trina modelo TSM- 510DE18M(II), empregado na análise, a altura é de 2,176 metros, enquanto que a inclinação do módulo e o ângulo do sol em relação ao plano horizontal é de 20° e 37° . Logo, o *pitch* considerado será de 2,87 metros. A altura considerada para a estrutura fixa e de rastreamento foi de 1,4 metros.

A área total dos sistemas é de 6.450,96 m². O cálculo considerou a área do módulo fotovoltaico (2,87m x 1,098m) multiplicado pela quantidade de módulos dos sistemas (2.700 módulos). Os detalhes do layout das usinas serão apresentados na subseção 4.2.

3.4 CARACTERÍSTICAS DAS USINAS FOTOVOLTAICAS AVALIADAS

As quatro usinas fotovoltaicas possuem o mesmo dimensionamento, apenas se diferenciam na estrutura utilizada para fixação dos módulos e no local de instalação. Cada uma dessas quatro usinas é composta por 2.700 módulos fotovoltaicos, modelo TSM-510DE18M(II), fabricados pela Trina Solar, com potência nominal de 510 Wp e uma área de 2,41 m².

Cada sistema foi dividido em 100 *strings* de 27 módulos, resultando em uma potência nominal (STC) de 1,377 MWp, gerando uma tensão máxima de 1.061 volts (V) e uma corrente máxima de 1.182 ampères (A).

Para cada usina foram utilizados cinco inversores de 200 kW de potência, modelo SUN2000-215KTL-H0, da fabricante chinesa Huawei Technologies, com faixa de tensão de funcionamento entre 500-1500 V e corrente máxima por MPPT de 30 A, produzindo uma tensão de saída de 800 V em uma frequência de 60 hertz (Hz).

Duas das quatro usinas utilizam estrutura fixa para os módulos fotovoltaicos, modelo ESP-G5, da fabricante CCS, com inclinação fixa em 20° e com a face dos módulos posicionada em direção ao norte geográfico. As outras duas usinas utilizam estrutura de rastreamento de um eixo, modelo STI-H250, da fabricante STi Norland, com inclinação variável entre -50° até $+50^\circ$ (de leste a oeste), sem inclinação no eixo norte-sul.

A estrutura fixa padrão possui furos no pilar onde a inclinação pode ser regulada conforme projeto. Atualmente os furos são especificados para as inclinações de 5° , 8° , 11° , 14° , 17° e 20° . Sabe-se que, para maximizar a geração de energia em um sistema fotovoltaico, a inclinação dos módulos deve estar próximo à latitude no qual o sistema está instalado. No entanto, o objetivo da análise atual é obter um comparativo entre a geração de energia elétrica entre usinas fotovoltaicos com a mesma configuração, incluindo a inclinação destas.

Vale ressaltar que, a motivação principal para a análise atual, foi devido à um erro na montagem das estruturas de fixação localizadas na cidade de Russas – CE. O erro foi propagado durante toda a usina e descoberto no encerramento da instalação. Neste caso, aproximadamente 90% da instalação contava com estruturas de fixação com inclinação de 20° . Portanto, houve uma demanda para se obter uma estimativa de geração do sistema com uma inclinação não otimizada.

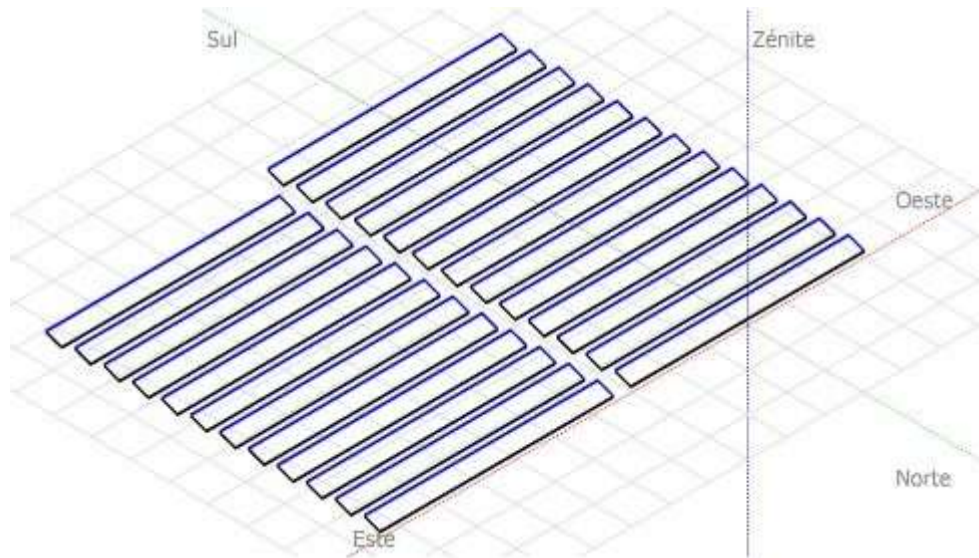
Sendo assim, os resultados aqui apresentados refletem a situação específica deste sistema, o qual não está com inclinação otimizada para o seu local de instalação.

3.4.1 Características da usina com estrutura fixa no Sul do Brasil

Para as usinas no Sul do Brasil foi escolhido como local de simulação a cidade de Itaquí, no estado do Rio Grande do Sul, no bairro Itaó (Latitude: -29.25° , Longitude -55.98°). A irradiação global horizontal que incide sobre essa localidade é de $1.756,6 \text{ kWh/m}^2/\text{ano}$.

Para maximizar a geração dessa usina, os módulos fotovoltaicos precisam necessariamente estar direcionados para o norte. A Figura 34 ilustra a simulação da disposição dos módulos sobre o terreno.

Figura 34 – Disposição dos módulos da usina com estrutura fixa no Sul do Brasil.



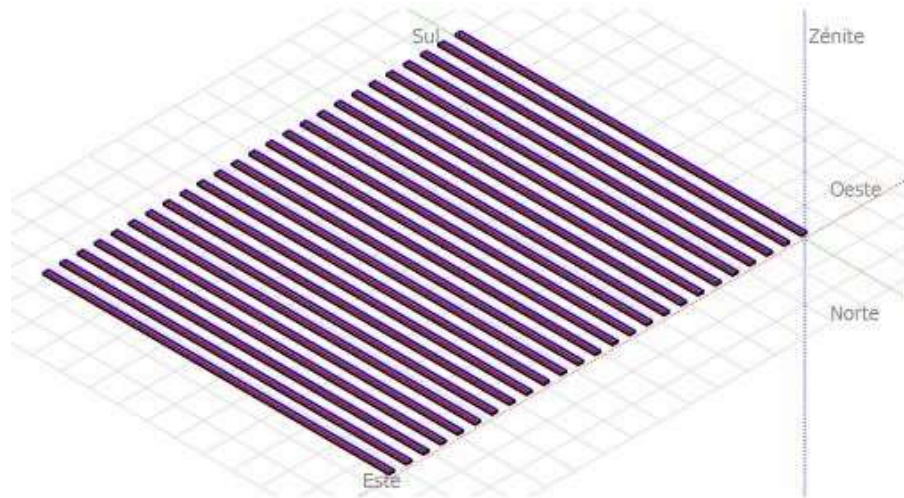
Fonte: Autor, 2023.

3.4.2 Características da usina com estrutura de rastreamento de um eixo no Sul do Brasil

Conforme já exposto, esta usina fotovoltaica com estrutura de rastreamento de um eixo também foi simulada na cidade de Itaqui, no estado do Rio Grande do Sul, bairro Itaó (Latitude: -29.25° , Longitude -55.98°), pois para fins de comparação, a irradiação global horizontal precisa ser a mesma para as duas usinas no Sul (fixa e de rastreamento de um eixo).

Conforme mencionado anteriormente, neste caso, o eixo dos rastreadores estão na direção norte-sul, permitindo a movimentação dos módulos fotovoltaicos de leste a oeste durante o dia, seguindo a trajetória solar. A Figura 31 ilustra a simulação da disposição dos módulos sobre o terreno.

Figura 35 – Disposição dos módulos da usina com estrutura de rastreamento de um eixo no Sul do Brasil.



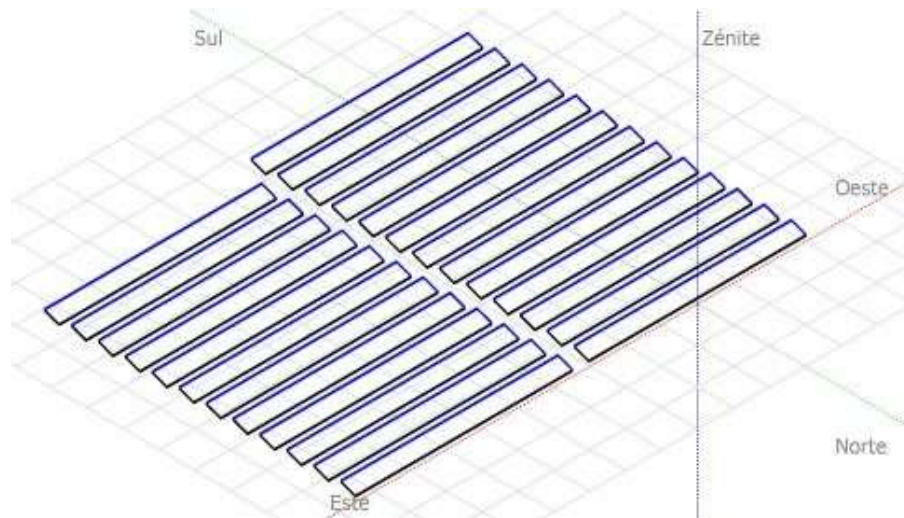
Fonte: Autor, 2023.

3.4.3 Características da usina com estrutura fixa no Nordeste do Brasil

Para as usinas no Nordeste do Brasil foi escolhido como local de simulação a cidade de Russas, no estado do Ceará, bairro Tabuleiro do Catavento (Latitude: $-4,92^\circ$, Longitude $-37,97^\circ$). A irradiação global horizontal que incide sobre essa localidade é de $2.112,8 \text{ kWh/m}^2/\text{ano}$.

Como já mencionando, para maximizar a geração dessa usina, os módulos fotovoltaicos precisam necessariamente estar direcionados para o Norte. A Figura 36 ilustra a simulação da disposição dos módulos desta usina sobre o terreno.

Figura 36 – Disposição dos módulos da usina com estrutura fixa no Nordeste do Brasil.



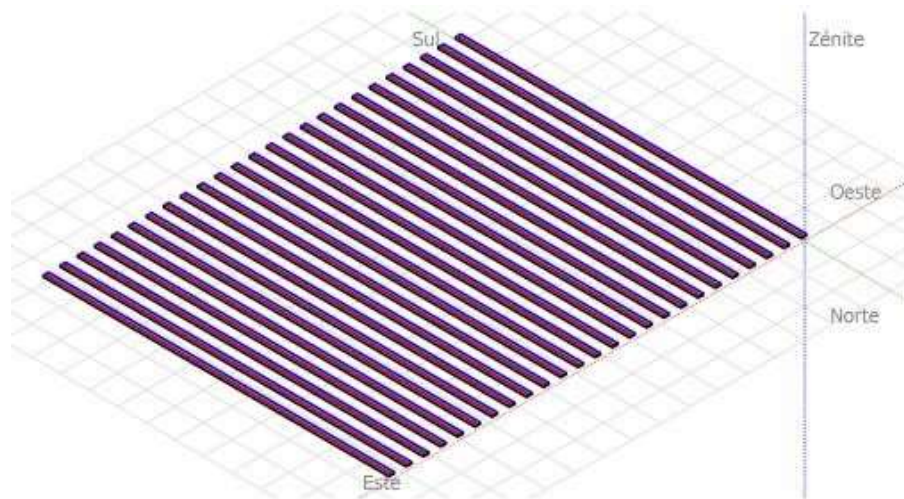
Fonte: Autor, 2023.

3.4.4 Características da usina com estrutura de rastreamento de um eixo no Nordeste do Brasil

Conforme já exposto, esta usina fotovoltaica com estrutura de rastreamento de um eixo também foi simulada na cidade de Russas, no estado do Ceará, no bairro Tabuleiro do Catavento (Latitude: -4.92° , Longitude -37.97°), porque para os fins de comparação, a irradiação global horizontal precisa ser a mesma para as duas usinas no Nordeste (fixa e de rastreamento de um eixo).

Conforme mencionado anteriormente, neste caso, o eixo dos rastreadores estão na direção norte-sul, permitindo a movimentação dos módulos fotovoltaicos de leste a oeste durante o dia, seguindo a trajetória solar. A Figura 37 ilustra a simulação da disposição dos módulos sobre o terreno.

Figura 37 – Disposição dos módulos da usina com estrutura de rastreamento de um eixo no Nordeste do Brasil.



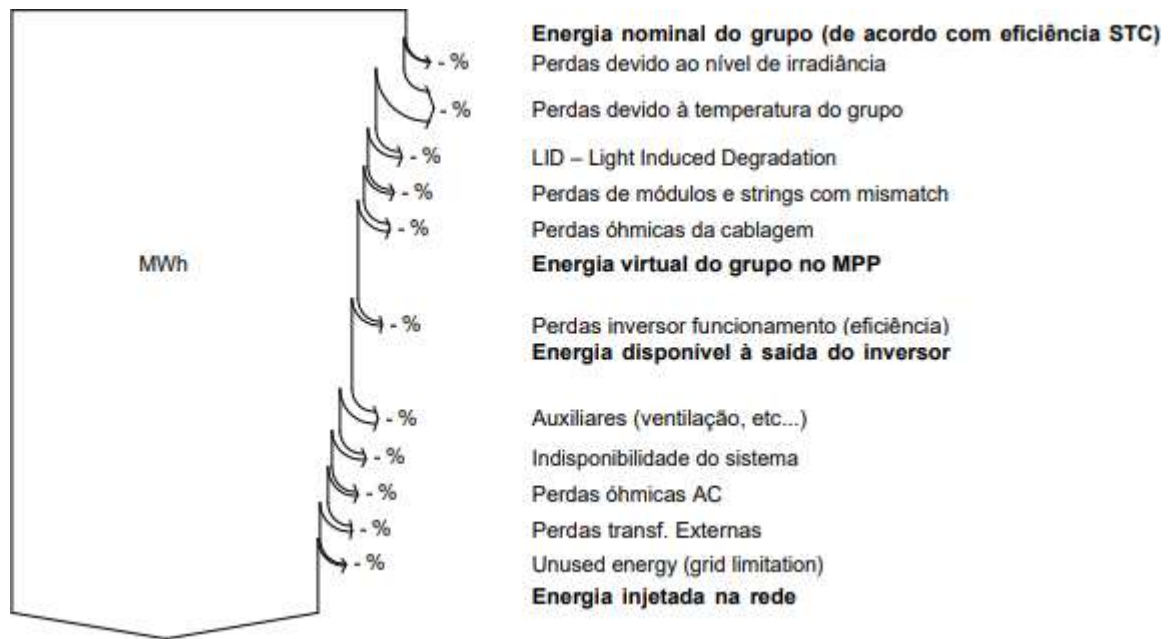
Fonte: Autor, 2023.

3.5 FATORES DE PERDAS

A fim de se obter resultados mais próximos da realidade, durante a simulação precisamos considerar as perdas relacionadas aos sistemas, visto que elas afetam diretamente a produção de energia elétrica.

O diagrama da Figura 38 demonstra todas essas perdas relacionadas ao sistema, sendo que os parágrafos subsequentes detaham melhor a origem de cada uma delas.

Figura 38 - Perdas relacionadas ao sistema.



Fonte: Autor, 2023.

As perdas devido ao nível de irradiância são aquelas relacionadas às condições climáticas do local, que podem diminuir o nível de irradiância e conseqüentemente reduzir a capacidade de geração de energia dos módulos fotovoltaicos. Como já mencionado, o teste de módulos fotovoltaicos é submetido a uma irradiância de 1.000 W/m^2 , e sua potência nominal e eficiência são dados para este nível de incidência solar. Contudo, a eficiência da conversão de energia não é constante para diferentes níveis de irradiância: em função de características elétricas dos módulos, em baixas irradiâncias os mesmos tendem a possuir baixa eficiência, fazendo com que a potência de saída não varie linearmente com o nível de incidência solar. Esta perda busca quantificar a redução de geração em momentos quando a irradiância no local onde o módulo está instalado é menor do que 1.000 W/m^2 .

Perdas devido à temperatura do grupo são aquelas ocasionadas pelo aumento da temperatura dos módulos fotovoltaicos, o sistema perde rendimento quando a temperatura dos módulos está elevada, ou seja, para temperaturas acima de $25 \text{ }^\circ\text{C}$ estabelecida na STC.

A perda por efeito LID é uma perda de desempenho dos módulos decorrente das primeiras horas de exposição ao sol, essa perda é típica dos módulos de silício cristalino e está relacionada à qualidade da fabricação dos *wafers* de silício.

Perdas de módulos e strings com mismatch são causados pela combinação de módulos não iguais em um mesmo arranjo. Mesmo que um conjunto de módulos seja do mesmo modelo e classe de potência, cada módulo possui suas características elétricas próprias, que desviam ligeiramente das dos demais. Essas diferenças de características devem estar dentro do limite de tolerância recomendado pelo fabricante do módulo, mas mesmo assim ocasionam em descasamentos elétricos entre os módulos do conjunto, ocasionando em perdas.

Em uma string, as perdas por mismatch são limitadas pela corrente do módulo que possui menor corrente enquanto que, em um arranjo de strings em paralelo, as perdas por mismatch são ocasionadas pela diferença de tensão entre elas. Sombreamentos parciais, acúmulo de resíduos ou degradação de algum dos painéis também afetam o desempenho da usina.

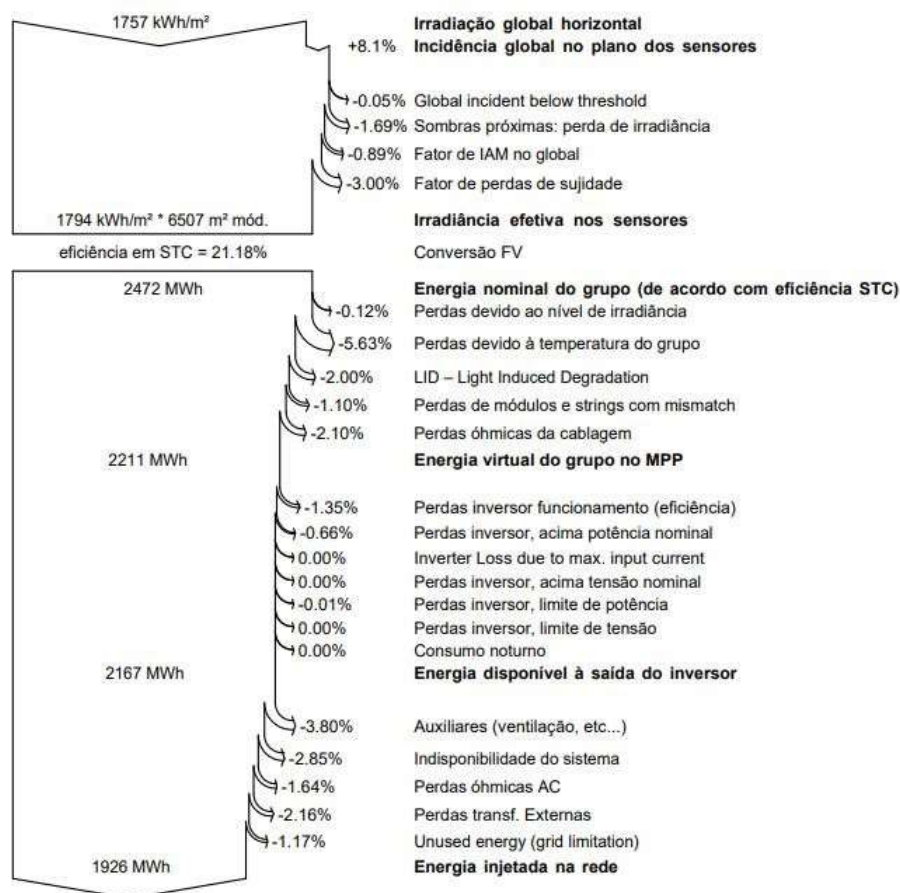
As perdas ôhmicas são as perdas que ocorrem por efeito Joule nos condutores e conectores que compõe o sistema.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Análise da geração de energia da usina com estrutura fixa no Sul do Brasil

A Figura 39, extraída do *software* PVsyst, mostra o diagrama dos fatores de perdas estimados para este sistema e o impacto que eles causam na geração de energia.

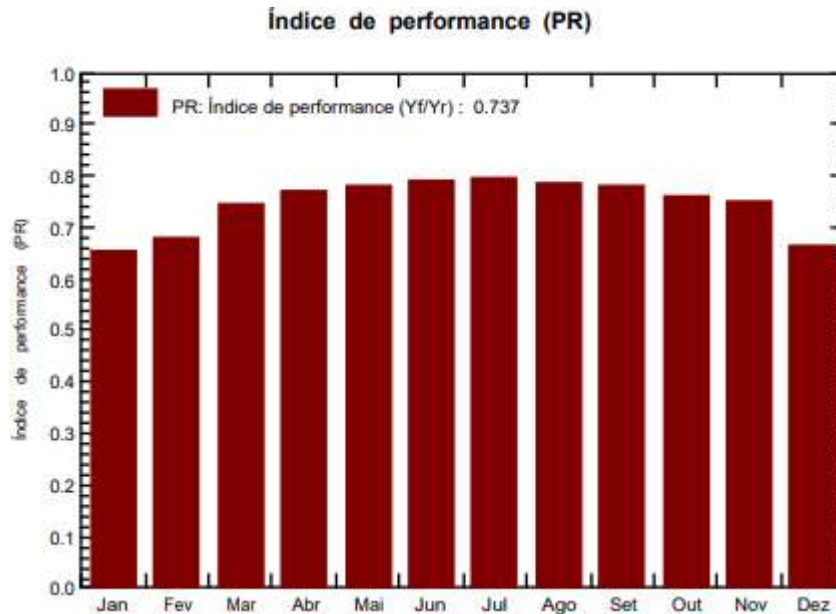
Figura 39 – Diagrama das perdas da usina com estrutura fixa no Sul do Brasil.



Fonte: Autor, 2023.

Observando o diagrama apresentado na Figura 35, constatamos que a geração de energia em condições STC é de 2.472 MWh/ano, e a geração de energia em condições reais é de 1.926 MWh/ano. O índice de performance anual desta usina é de 73,7%, esse valor também foi obtido através do *software* PVsyst. A Figura 40 apresenta o índice de performance anual da usina fotovoltaica com estrutura fixa no Sul do Brasil.

Figura 40 - Índice de performance anual da usina com estrutura fixa no Sul do Brasil.

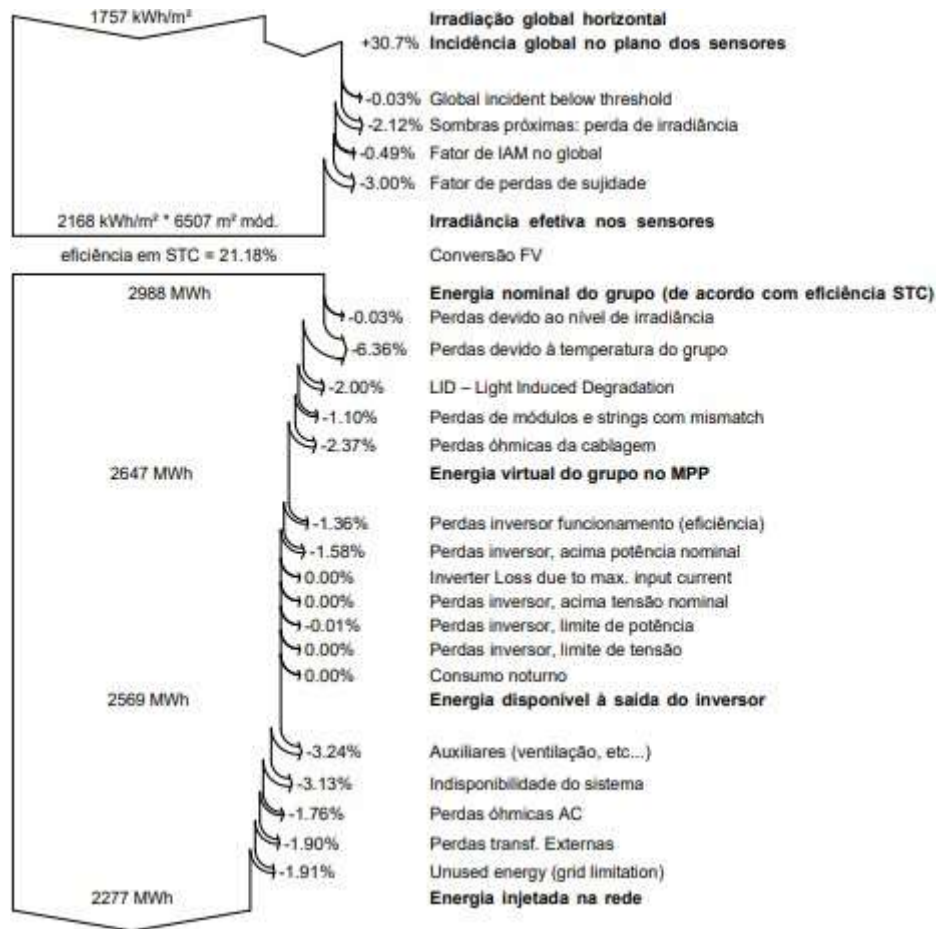


Fonte: Autor, 2023.

4.2 Análise da geração de energia da usina com rastreamento de um eixo no Sul do Brasil

A Figura 41 mostra o diagrama dos fatores de perdas estimados para esta usina e o impacto que eles causam na geração de energia.

Figura 41 – Diagrama das perdas da usina com estrutura de rastreamento de um eixo no Sul do Brasil.



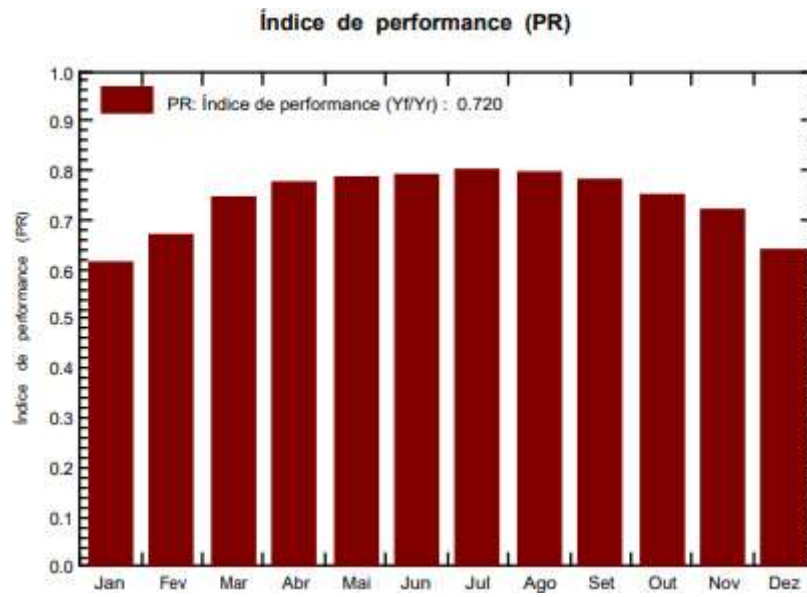
Fonte: Autor, 2023.

Analisamos que a usina fotovoltaica com estrutura de rastreamento de um eixo no Sul do Brasil, exatamente na mesma localidade da usina com estrutura fixa no Sul e exatamente com a mesma potência nominal, apresenta uma melhor geração, em torno de 18,22% a mais de energia injetada na rede. Outro detalhe analisado, por receber radiação durante um período maior, os módulos da usina com de rastreamento de um eixo aquecem mais e o sistema como um todo sofre maiores perdas por esse fator temperatura.

Verificando o diagrama apresentado na Figura 37, constatamos que a geração de energia desta usina em condições STC é de 2.988 MWh/ano, e a geração de energia em condições reais é de 2.277 MWh/ano. O índice de performance anual da usina em questão, obtido através do *software* PVsyst, é de 72%.

A Figura 42 apresenta o índice de performance anual da usina com rastreamento de um eixo no Sul do Brasil.

Figura 42 - Índice de performance mensal da usina com estrutura de rastreamento de um eixo no Sul do Brasil.

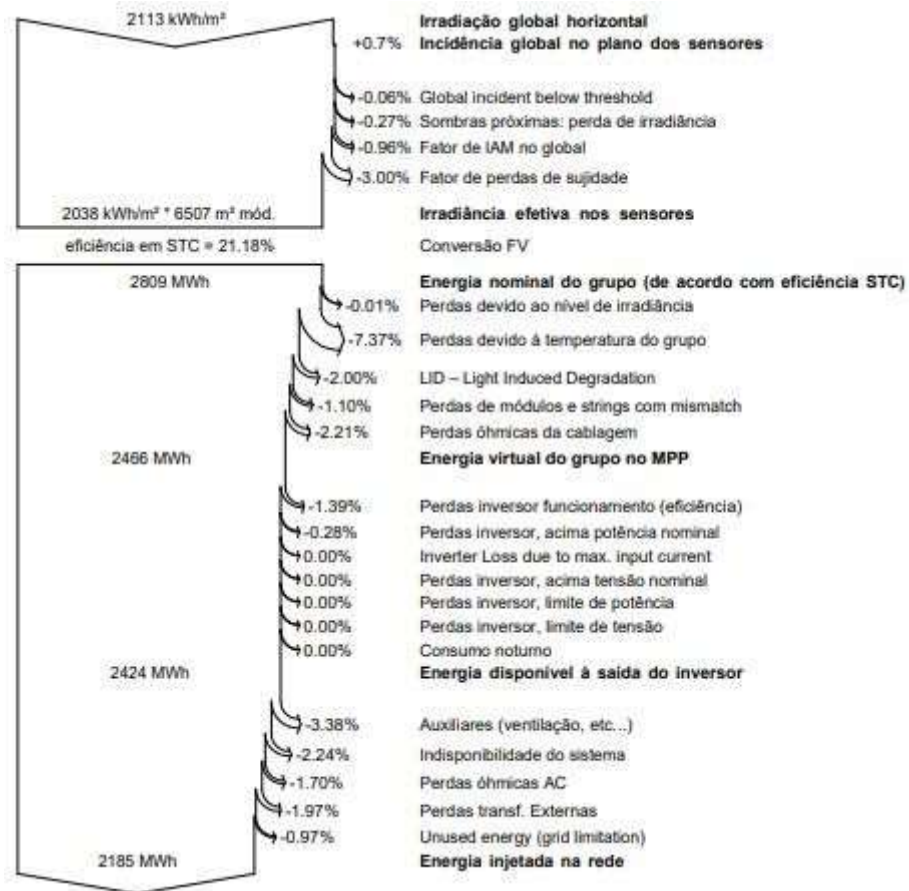


Fonte: Autor, 2023.

4.3 Análise da geração de energia da usina com estrutura fixa no Nordeste do Brasil

A Figura 43, extraída do *software* PVSyst, mostra o diagrama dos fatores de perdas estimados para esta usina fotovoltaica e o impacto que eles causam na geração de energia.

Figura 43 – Diagrama das perdas da usina com estrutura fixa no Nordeste do Brasil.



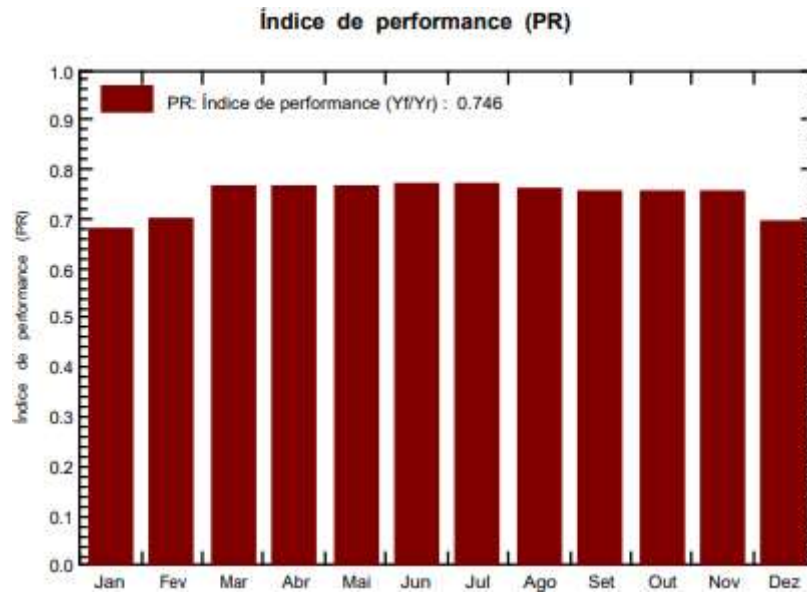
Fonte: Autor, 2023.

Analisamos que esta usina apresenta uma maior geração de energia em comparação a mesma usina no Sul, mas isso já era esperado, visto que o Nordeste brasileiro está mais próximo da linha do equador, portanto, nesta região do país os raios de sol incidem com mais intensidade. Porém, em comparação com a usina de estrutura de rastreamento de um eixo no Sul, percebemos que a usina de estrutura fixa no Nordeste gera menos energia, em torno de 4% a menos.

Verificando o diagrama apresentado na Figura 39, constatamos que a geração de energia desta usina em condições STC é de 2.809 MWh/ano, e a geração de energia em condições reais é de 2.185 MWh/ano. O índice de performance anual da usina em questão, obtido através do *software* PVsyst, é de 74,6%.

A Figura 44 apresenta o índice de performance anual da usina fotovoltaica com estrutura fixa no Nordeste do Brasil.

Figura 44 – Índice de performance mensal da usina com estrutura fixa no Nordeste do Brasil.

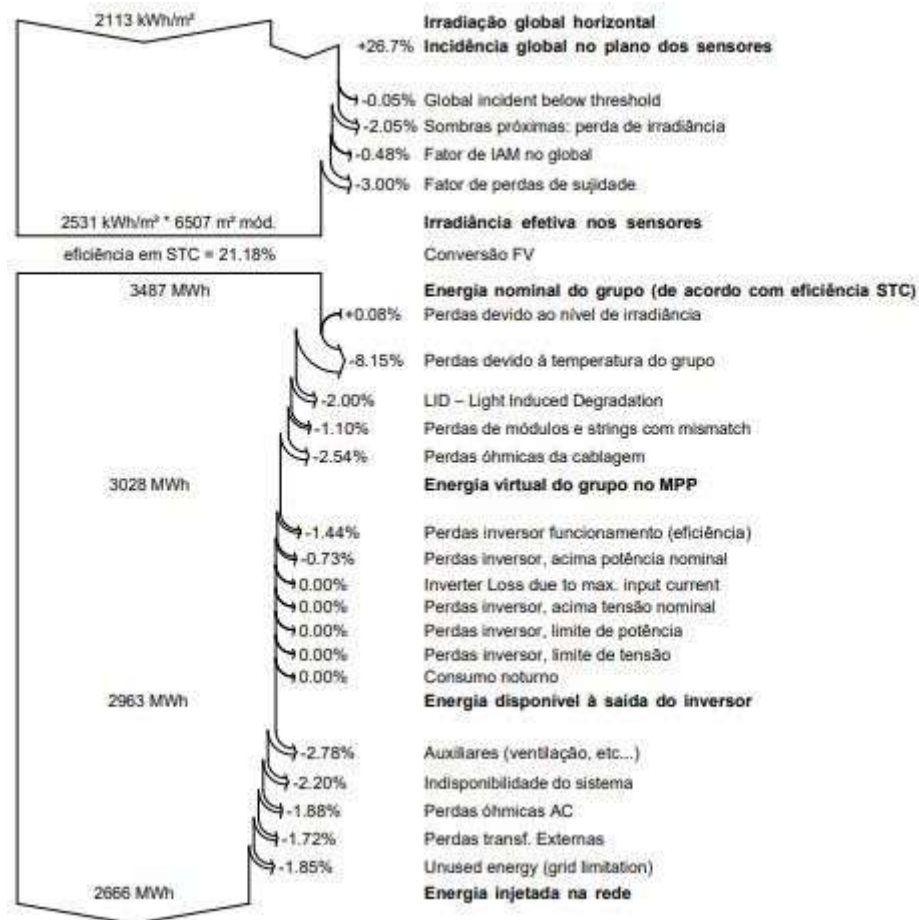


Fonte: Autor, 2023.

4.4 Análise da geração de energia da usina com rastreamento de um eixo no Nordeste do Brasil

A Figura 45 mostra o diagrama dos fatores de perdas estimados para esta usina fotovoltaica e o impacto que eles causam na geração de energia.

Figura 45 – Diagrama das perdas da usina com estrutura de rastreamento de um eixo no Nordeste do Brasil.

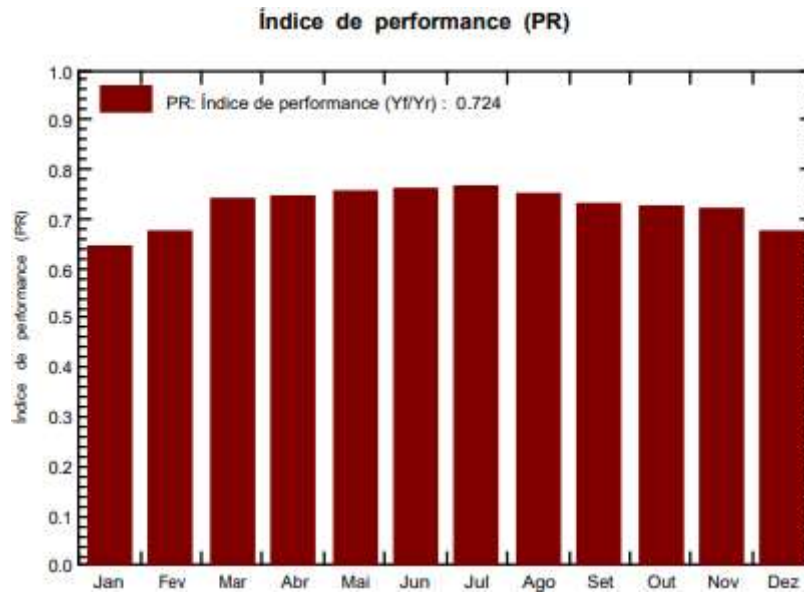


Fonte: Autor, 2023.

Observa-se que a usina fotovoltaica com estrutura de rastreamento de um eixo no Nordeste do Brasil, exatamente na mesma localidade da usina com estrutura fixa no Nordeste e exatamente com a mesma potência nominal, apresenta uma melhor geração, em torno de 22% a mais de energia injetada na rede. E da mesma forma que acontece no Sul, os módulos com rastreamento de um eixo no Nordeste também recebem radiação durante um período maior e, portanto aquecem mais, logo o sistema como um todo sofre perdas por esse fator temperatura.

Verificando o diagrama apresentado na Figura 41, constatamos que a geração de energia desta usina em condições STC é de 3.487 MWh/ano, e a geração de energia em condições reais é de 2.666 MWh/ano. O índice de performance anual da usina em questão, obtido através do *software* PVsyst, é de 72,4%. A Figura 46 apresenta o índice de performance anual da usina fotovoltaica com estrutura de rastreamento de um eixo no Nordeste do Brasil.

Figura 46 – Índice de performance mensal da usina com rastreamento de um eixo no Nordeste do Brasil.



Fonte: Autor, 2023.

4.5 Análise comparativa entre usinas

A análise dos resultados consiste em comparar a produção das quatro usinas fotovoltaicas de 1 MW e verificar a melhor solução para quem buscar maximizar a produção de energia, levando em consideração, além da energia gerada, a área total necessária para instalação da usina. As Tabelas 1, 2, 3 e 4 apresentam os resultados das simulações no PVsyst, respectivamente, da usina com estrutura fixa no Sul do Brasil, da usina com estrutura de rastreamento de um eixo no Sul do Brasil, da usina com estrutura fixa no Nordeste do Brasil e da usina com estrutura de rastreamento de um eixo no Nordeste do Brasil.

Tabela 1 - Resultados da simulação da usina com estrutura fixa no Sul do Brasil.

	GlobHor kWh/m ²	DiffHor kWh/m ²	T_Amb °C	GlobInc kWh/m ²	GlobEff kWh/m ²	EArray MWh	E_Grid MWh	PR
Janeiro	214.6	66.00	26.85	205.5	194.4	223.8	184.4	0.652
Fevereiro	175.1	59.50	25.93	178.4	168.6	198.2	166.8	0.679
Março	164.9	55.30	24.54	181.5	171.9	203.0	185.6	0.743
Abril	123.8	44.70	20.61	149.1	141.3	173.4	158.2	0.771
Mai	94.0	38.70	16.53	119.2	112.6	142.0	128.3	0.781
Junho	75.2	33.70	14.60	98.4	92.5	119.1	106.8	0.788
Julho	87.5	36.30	13.94	115.3	108.6	139.9	126.5	0.797
Agosto	111.8	42.80	16.06	137.8	130.3	163.8	149.0	0.785
Setembro	125.6	51.80	16.93	141.1	133.4	166.1	151.2	0.778
Outubro	168.2	61.50	20.91	175.4	166.0	201.6	184.1	0.762
Novembro	195.6	64.00	22.57	189.8	179.1	213.4	195.4	0.748
Dezembro	220.3	69.50	25.12	206.8	195.3	229.5	189.7	0.666
Ano	1756.6	623.80	20.36	1898.2	1794.0	2173.9	1925.9	0.737

Fonte: Autor, 2023.

Tabela 2 - Resultados da simulação da usina com estrutura de rastreamento de um eixo no Sul do Brasil.

	GlobHor kWh/m ²	DiffHor kWh/m ²	T_Amb °C	GlobInc kWh/m ²	GlobEff kWh/m ²	EArray MWh	E_Grid MWh	PR
January	214.6	66.00	26.85	279.8	265.3	285.7	236.6	0.614
February	175.1	59.50	25.93	229.9	217.4	249.6	211.3	0.667
March	164.9	55.30	24.54	217.3	205.5	241.8	222.4	0.743
April	123.8	44.70	20.61	164.0	154.8	191.6	175.6	0.777
May	94.0	38.70	16.53	121.2	114.1	144.8	131.0	0.785
June	75.2	33.70	14.60	95.8	90.0	116.6	104.5	0.792
July	87.5	36.30	13.94	113.7	106.9	138.7	125.6	0.802
August	111.8	42.80	16.06	147.3	138.8	176.2	160.9	0.793
September	125.6	51.80	16.93	161.6	152.1	190.2	174.0	0.782
October	168.2	61.50	20.91	218.9	206.7	245.6	225.8	0.749
November	195.6	64.00	22.57	259.7	245.8	279.0	257.8	0.721
December	220.3	69.50	25.12	285.8	270.8	301.7	251.0	0.638
Year	1756.6	623.80	20.36	2295.1	2168.3	2561.5	2276.7	0.720

Fonte: Autor, 2023.

Tabela 3 - Resultados da simulação da usina com estrutura fixa no Nordeste do Brasil.

	GlobHor kWh/m ²	DiffHor kWh/m ²	T_Amb °C	GlobInc kWh/m ²	GlobEff kWh/m ²	EArray MWh	E_Grid MWh	PR
Janeiro	178.7	70.30	27.72	170.1	162.7	194.6	159.2	0.680
Fevereiro	162.4	66.00	27.66	158.1	151.3	181.5	152.0	0.698
Março	181.3	69.70	27.31	181.6	173.9	208.3	190.8	0.763
Abril	162.3	63.90	26.58	167.7	160.7	192.5	176.4	0.764
Mai	162.8	58.30	27.18	172.7	165.6	198.7	182.2	0.766
Junho	151.8	53.80	26.17	162.9	156.2	188.5	172.6	0.770
Julho	164.8	55.20	26.62	176.3	169.1	204.4	187.6	0.773
Agosto	185.0	58.30	26.72	193.5	185.7	220.7	203.1	0.762
Setembro	189.8	62.10	26.74	192.4	184.6	218.0	200.6	0.757
Outubro	200.3	65.70	27.50	196.7	188.6	223.3	204.9	0.756
Novembro	190.3	69.30	27.42	182.1	174.4	207.3	190.0	0.758
Dezembro	183.3	73.40	28.02	173.0	165.4	199.8	166.1	0.697
Ano	2112.8	766.00	27.14	2127.2	2038.1	2437.6	2185.4	0.746

Fonte: Autor, 2023.

Tabela 4 - Resultados da simulação da usina com estrutura de rastreamento de um eixo no Nordeste do Brasil.

	GlobHor kWh/m ²	DiffHor kWh/m ²	T_Amb °C	GlobInc kWh/m ²	GlobEff kWh/m ²	EArray MWh	E_Grid MWh	PR
Janeiro	178.7	70.30	27.72	222.4	210.1	240.2	198.0	0.646
Fevereiro	162.4	66.00	27.66	203.2	191.6	223.1	188.9	0.675
Março	181.3	69.70	27.31	231.1	218.2	255.0	235.2	0.739
Abril	162.3	63.90	26.58	204.1	192.7	227.5	209.5	0.746
Mai	162.8	58.30	27.18	207.2	196.0	233.7	215.5	0.755
Junho	151.8	53.80	26.17	192.0	181.6	218.9	201.5	0.762
Julho	164.8	55.20	26.62	211.6	200.4	241.2	222.6	0.764
Agosto	185.0	58.30	26.72	237.7	225.3	264.8	244.8	0.748
Setembro	189.8	62.10	26.74	243.2	230.4	265.2	245.2	0.732
Outubro	200.3	65.70	27.50	256.8	243.2	277.7	256.4	0.725
Novembro	190.3	69.30	27.42	236.6	223.6	254.3	234.5	0.720
Dezembro	183.3	73.40	28.02	230.3	217.5	254.9	214.4	0.676
Ano	2112.8	766.00	27.14	2676.3	2530.6	2956.4	2666.5	0.724

Fonte: Autor, 2023.

Legendas das Tabelas 1, 2, 3 e 4:

GlobHor: Irradiação global horizontal;

DiffHor: Irradiação difusa horizontal;

T_Amb: Temperatura ambiente ;

GlobInc: Incidência global no plano;

GlobEff: Eficácia global, corrigido para IAM e sombreamento;

EArray: Energia efetiva na saída da matriz;

E_Grid: Energia injetada na rede;

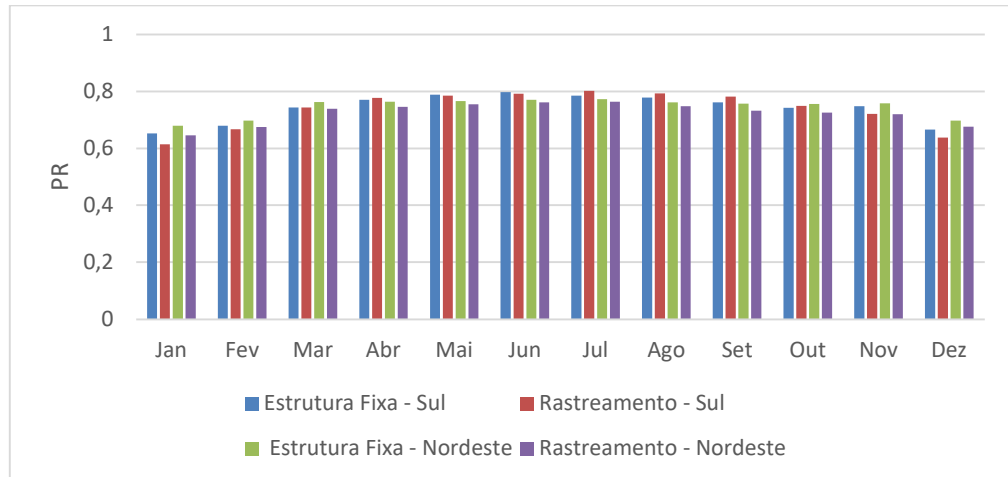
PR: Performance Ratio (índice de performance);

Os resultados contidos nas Tabelas 1, 2, 3 e 4 estão resumidos na Figura 47, onde é possível observar o índice de performance mês a mês ao longo de um ano inteiro. Analisando esses dados, percebemos que no período de inverno é quando o índice de performance alcança os níveis mais altos. Isso prova que a baixa temperatura climática favorece o melhor desempenho do sistema, mas em contrapartida, são nesses meses que a incidência de irradiação é menor, resultando em menos energia elétrica produzida mesmo com aumento no índice de performance.

Adicionalmente, é importante ressaltar que no Nordeste, onde as temperaturas são mais elevadas e os dias mais ensolarados ao longo do ano, os sistemas fotovoltaicos podem apresentar menor sazonalidade, ou seja, variações menos pronunciadas na geração de energia ao longo das estações. Isso se deve ao fato de que a região tende a ter uma maior disponibilidade de radiação solar durante todo o ano. No entanto, é importante considerar as perdas devido à temperatura elevada, já que o calor excessivo pode reduzir a eficiência dos módulos fotovoltaicos, resultando em perdas de desempenho.

Já na região Sul, que apresenta um clima mais temperado e variações climáticas mais acentuadas entre as estações do ano, pode haver uma maior sazonalidade na geração de energia solar. As variações na incidência de irradiação solar ao longo das estações, devido às mudanças na trajetória solar, podem resultar em variações significativas na geração de energia solar. No entanto, as perdas devido à temperatura tendem a ser menores na região Sul, uma vez que as temperaturas mais baixas podem beneficiar o desempenho dos módulos fotovoltaicos.

Figura 47 – Desempenho mensal dos sistemas fotovoltaicos.



Fonte: Autor, 2023.

Das quatro tabelas extraímos os valores anuais da coluna “E_Grid” (energia injetada na rede), os quais são resumidos na Tabela 5.

Tabela 5 - Geração anual das quatro usinas fotovoltaicas.

	Geração anual estimada (MWh/ano)
Usina com estrutura fixa no sul do Brasil	1.925,90
Usina com estrutura tracker no sul do Brasil	2.276,70
Usina com estrutura fixa no nordeste do Brasil	2.185,40
Usina com estrutura tracker no nordeste do Brasil	2.666,50

Fonte: Autor, 2023.

Com os números da geração anual estimada de cada usina fotovoltaica, é possível analisar a diferença na geração das usinas com a mesma tecnologia de estrutura, mas que se diferenciam pelo local de instalação. A Tabela 6 mostra a comparação da geração anual das duas usinas FV com estrutura fixa.

Tabela 6 – Comparação da geração anual das duas usinas FV com estrutura fixa.

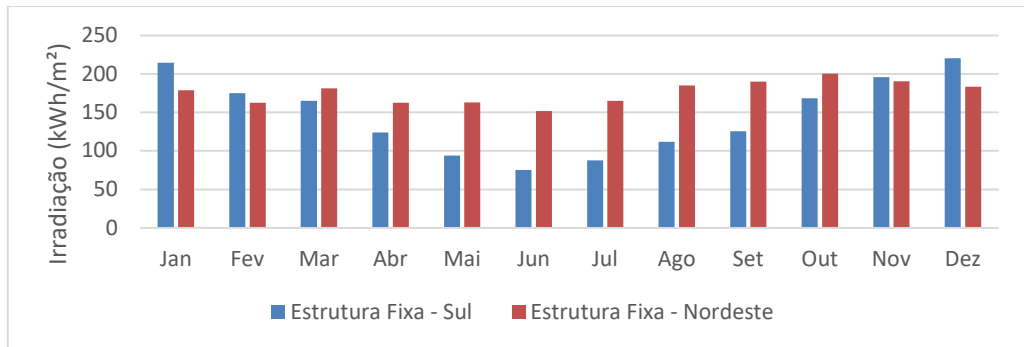
Com estrutura fixa		
Local	MWh/ano	Diferença na geração anual
Itaqui - RS	1.925,90	13,47%
Russas - CE	2.185,40	

Fonte: Autor, 2023.

Conforme podemos analisar pela Tabela 6, uma usina fotovoltaica de 1 MW de potência que utiliza estrutura fixa para os módulos pode gerar aproximadamente 13,47% a mais de energia elétrica anualmente, quando instalada no Nordeste do Brasil ao invés do Sul. Como já mencionado na seção 4.2, a inclinação ideal para o sistema fotovoltaico deve ser próximo à latitude do local onde o mesmo será instalado. Para o caso dos sistema com estrutura fixa instalado em Russas – CE, a inclinação ideal seria próxima de 4.92° enquanto que, para a estrutura fixa instalada em Itaqui – RS, a inclinação ideal seria próxima de 29.25° . A inclinação não otimizada, em ambos sistemas, permite que a diferença de geração de energia aumente, tendo em vista que a inclinação não otimizada afeta a captura eficiente da irradiação solar incidente nos módulos fotovoltaicos.

Além deste fato, há mais um ponto importante para destacar, de acordo com Figura 48, ao compararmos a geração de energia destas duas usinas nos meses de novembro a fevereiro, percebemos que a usina FV do Sul do Brasil recebeu mais irradiação que a usina no Nordeste em todos esses quatro meses do ano e, conseqüentemente, gerou mais energia elétrica nesse período. Isso acontece porque nesses meses do ano o sol está abaixo da linha do equador, portanto, para que a usina no Nordeste gerasse mais que a do Sul nesses meses, seria preciso orientar a posição dos módulos FV para o Sul, mas como se trata de estrutura fixa, na prática isso é inviável.

Figura 48 – Irradiação mensal para os sistemas com estrutura fixa no sul e nordeste.



Fonte: Autor, 2023.

A Tabela 7 mostra a comparação da geração anual das duas usinas fotovoltaicas com estrutura de rastreamento de um eixo.

Tabela 7 – Comparação da geração anual das usinas FV com estrutura de rastreamento de um eixo.

Com estrutura tracker		
Local	MWh/ano	Diferença na geração anual
Itaqui - RS	2.276,70	17,12%
Russas - CE	2.666,50	

Fonte: Autor, 2023.

Conforme podemos analisar pela Tabela 7, uma usina fotovoltaica de 1 MW de potência instalada que utiliza estrutura de rastreamento de um eixo para os módulos pode gerar aproximadamente 17,12% a mais de energia elétrica anualmente, quando instalada no Nordeste do Brasil ao invés do Sul.

A Tabela 8 mostra a comparação da geração anual das usinas fotovoltaicas da mesma região do país.

Tabela 8 – Comparação da geração anual das usinas FV da mesma região do país.

Local	MWh/ano		Diferença na geração anual
	Fixa	Tracker	
Itaqui - RS	1.925,90	2.276,70	18,21%
Russas - CE	2.185,40	2.666,50	22,01%

Fonte: Autor, 2023.

Conforme podemos analisar pela Tabela 8, uma usina fotovoltaica de 1 MW de potência, no Sul do Brasil, que utiliza estrutura de rastreamento de um eixo para os módulos, pode gerar aproximadamente 18,21% a mais de energia elétrica anualmente quando comparada a uma usina com estrutura fixa de mesma potência e mesmos equipamentos elétricos (módulos, inversores, etc.).

O resultado é o semelhante para as usinas de 1 MW no Nordeste brasileiro, a usina com estrutura de rastreamento de um eixo gera mais do que a usina com estrutura fixa, porém aqui a diferença de geração entre elas é maior, em torno de 22% a mais de energia gerada com o uso do rastreamento de um eixo.

É importante ressaltar que, embora um sistema de rastreamento solar possa resultar em uma geração de energia maior em comparação a um sistema fixo, ele também apresenta custos de implantação e manutenção mais elevados. A análise econômica desempenha um papel crucial na determinação da viabilidade de cada sistema em diferentes regiões.

A análise econômica leva em consideração fatores como o custo inicial de implantação, os custos de operação e manutenção ao longo da vida útil do sistema, a diferença na geração de energia e os benefícios financeiros resultantes. Essa análise permite avaliar qual sistema proporcionará um retorno financeiro mais favorável em cada região específica.

No caso da região Nordeste, onde a vantagem energética da geração solar é potencialmente maior devido às condições climáticas favoráveis, o sistema de rastreamento solar pode se mostrar mais viável. No entanto, é importante considerar os custos adicionais associados ao sistema de rastreamento, como a complexidade da estrutura e a necessidade de dispositivos de rastreamento e controle.

Em resumo, a escolha entre um sistema de rastreamento solar e um sistema fixo depende não apenas do aumento na geração de energia, mas também da análise econômica abrangente que leve em conta os custos e os benefícios de cada opção. É essencial avaliar cuidadosamente todos os fatores envolvidos antes de tomar uma decisão sobre qual sistema é mais vantajoso para uma determinada região.

Outro ponto interessante observado durante a análise dos resultados foi que, nos meses de junho e julho, a usina com estrutura fixa no Sul do Brasil gerou mais energia que a usina com rastreamento de um eixo no Sul. Este feito não ocorreu nas usinas do Nordeste, nesta região do Brasil a usina com estrutura de rastreamento de um eixo gerou mais energia elétrica que a usina com estrutura fixa em todos os meses do ano.

5. CONCLUSÃO

Este trabalho buscou realizar um estudo para identificar qual a melhor opção de estrutura de fixação de módulos em solo para usinas fotovoltaicas de 1 MW na região Sul e na região Nordeste do Brasil, que favoreça a maior geração de energia elétrica.

Através das simulações no PVsyst foi possível descobrir o potencial de geração de energia elétrica que cada usina fotovoltaica é capaz de alcançar, permitindo estimar para os doze meses do ano a energia injetada na rede, o nível de irradiação e o índice de performance dos sistemas, além de outros dados complementares e não menos importantes.

Com os dados coletados do PVsyst foi possível realizar a comparação entre as usinas e descobrir quais usinas geram mais energia e quais geram menos. Em questão de maior geração anual, a usina com estrutura de rastreamento de um eixo no Nordeste teve o melhor desempenho dentre todas as usinas analisadas, e a usina de menor geração energética foi a usina com estrutura fixa no sul do Brasil.

Vale lembrar que, apesar da usina com estrutura fixa no sul ter a menor geração energética, talvez não seja um péssimo investimento para quem está pensando em adquirir uma usina FV de 1 MW nessa região do país, ficando como sugestão para trabalhos futuros o estudo da viabilidade econômica dessas usinas e, também, o uso de módulos bifaciais ao invés de módulos monofaciais.

REFERÊNCIAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 10899: Energia Solar Fotovoltaica – Terminologia**. Rio de Janeiro. 2006.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA. **Infográfico ABSOLAR**. Disponível em: <<https://www.absolar.org.br/mercado/infografico/>>. Acesso em: 20 jun. 2023.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Energia solar fotovoltaica - terminologia: NBR 10899**. Rio de Janeiro, 2013. v. 02, p. 10.

BUTZ, S. **Science of earth systems**. Clifton Park, New York: Delmar Learning, 2004. 680 p.

Corrente Elétrica Contínua e Alternada (CC e CA). **Portal Solar**. Disponível em: <<https://www.portalsolar.com.br/corrente-eletrica-continua-cc-alternada-ca>>. Acesso em: 16 mai. 2021.

Estrutura fixa de solo ESP. **CCS**, 2023. Disponível em: <<https://ccstechnology.com.br/>>. Acesso em: 20 mai. 2023.

Inversor Trifásico SIW500H. **WEG**, 2021. Disponível em: <https://www.weg.net/catalog/weg/BR/pt/Automa%C3%A7%C3%A3o-e-Controle-Industrial/Drives/Inversores-Solares-Fotovoltaicos/Inversor-String-SIW500H/Inversor-String-SIW500H/p/MKT_WDC_BRAZIL_INVERTERSTRING_SIW500H/>. Acesso em: 17 out. 2021.

Manual de Manutenção STi-H250 - Versão 05. **STi Norland**, 2020.

Manual de montagem – rev. 20, estrutura fixa para painel fotovoltaico ESP-G5. **CCS**, 2023. Disponível em: <<https://ccstechnology.com.br/wp-content/uploads/2023/03/MANUAL-DE-MONTAGEM-ESP-G1-CLAMP-HIBRIDO-REV.04-CCS.pdf>>. Acesso em: 20 mai. 2023.

Passo a Passo da Fabricação do Painel Solar. **Portal Solar**. Disponível em: <<https://www.portalsolar.com.br/passo-a-passo-da-fabricacao-do-painel-solar.html>>. Acesso em: 18 mai. 2023.

PEREIRA, E. B.; MARTINS, F. R.; ABREU, S. L.; RÜTHER, R. **Atlas Brasileiro de Energia Solar**. São José dos Campos: INPE, 2006.

PEREIRA, E. B.; MARTINS, F. R.; GONÇALVES, A. R.; COSTA, R. S.; LIMA, F. J. L.; RÜTHER, R.; ABREU, S. L.; TIEPOLO, G. M.; PEREIRA, S. V.; SOUZA, J. G. **Atlas brasileiro de energia solar**. São José dos Campos: INPE, 2017. 88 p.

PINA, J. A. **Optimização de Células Fotovoltaicas**. Tese (Mestrado em Engenharia Microelectrónica e Nanotecnologias). Universidade Nova de Lisboa, Faculdade de Ciências e Tecnologia. Lisboa, 2013.

PINHO, J. T.; GALDINO, M. A. **Manual de engenharia para sistemas fotovoltaicos**. CRESESB. Rio de Janeiro, 2014.

Produtos sustentáveis auxiliam na recuperação do meio ambiente. **FAIRTEC – Feira Tecnológica da Construção Civil**, 2019. Disponível em: <<https://www.fairtec.com.br/home.php>>. Acesso em: 18 mai. 2021.

Projetos Realizados. **CCS**, Araçariguama, 2021. Disponível em: <<https://ccstechnology.com.br/>>. Acesso em: 18 mai. 2023.

RÜTHER, R. **EDIFÍCIOS SOLARES FOTOVOLTAICOS: O Potencial da Geração Solar Fotovoltaica Integrada a Edificações Urbanas e Interligada à Rede Elétrica Pública no Brasil**. 1. ed. Florianópolis: UFSC/LABSOLAR, 114p. 2004.

SISTEMA FOTOVOLTAICO “OFF GRID”. **Consultrevi Solar**, 2017. Disponível em: <<https://consultrevisolar.com.br/sistema-fotovoltaico-off-grid/>>. Acesso em: 26 mar. 2023.

SOUZA, J. P. de. **Módulos Fotovoltaicos - Perdas por Mismatch em Sistemas Fotovoltaicos**. Ecori Energia Solar, 2019. Disponível em: <<https://www.ecorienergiasolar.com.br/artigo/modulos-fotovoltaicos---perdas-por-mismatch-em-sistemas-fotovoltaicos/>>. Acesso em: 16 jan. 2023.

Tecnologia. **Inovacare SOLAR**, 2021. Disponível em: <<https://inovacare.solar/tecnologia/>>. Acesso em: 26 mai. 2021.

Tudo sobre estrutura solar fotovoltaica. **Aldo**, Maringá, 2020. Disponível em: <<https://www.aldo.com.br/categoria/energia-solar/produtos/estrutura-solar/>>. Acesso em: 18 fev. 2023.

URBANETZ JR, J. **Sistemas Fotovoltaicos Conectados a Redes de Distribuição Urbanas: Sua Influência na Qualidade da Energia elétrica e Análise dos Parâmetros que Possam Afetar a Conectividade**. Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2010.

VIANA, T. S. **Potencial de geração de energia elétrica com sistemas fotovoltaicos com concentrador no Brasil**. (Tese de Doutorado). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFSC, Florianópolis, 2010.

Células PERC. **SUNPOWER**, 2023. Disponível em: <<https://us.sunpower.com/solar-resources/what-perc-solar-cell-technology#:~:text=PERC%20solar%20cells%20are%20modified,back%20side%20of%20the%20cell>>. Acesso em: 04 jul. 2023.

Células n-type. **Sinovoltaics**, 2023. Disponível em: <<https://sinovoltaics.com/learning-center/solar-cells/n-type-solar-cells/#:~:text=An%20N%2Dtype%20solar%20cell,front%20side%20facing%20the%20sun.>>. Acesso em 04 jul. 2023.

Células TOPcon. **Eco Greenenergy**, 2023. Disponível em: <<https://www.eco-greenenergy.com/the-complete-guide-to-topcon-technology/#:~:text=What%20is%20TOPCon%20technology%3F,material%20used%20to%20dope%20it.>>. Acesso em 04 jul. 2023.

Células HJT. **Kaneka Energy Solutions**, 2023. Disponível em: <<https://www.kanekaenergysolutions.com/what-is-heterojunction-technology-hjt-in-the-solar-industry/#:~:text=HJT%20cells%20combine%20two%20different,reflects%20off%20the%20below%20layers.>>. Acesso em 04 jul. 2023.

Células IBC. **Sivoltaics**, 2023. Disponível em: <[https://sinovoltaics.com/learning-center/solar-cells/ibc-solar-cells/#:~:text=The%20IBC%20solar%20cells%20\(Interdigitated,rear%20side%20of%20the%20device.](https://sinovoltaics.com/learning-center/solar-cells/ibc-solar-cells/#:~:text=The%20IBC%20solar%20cells%20(Interdigitated,rear%20side%20of%20the%20device.)>. Acesso em 04 jul. 2023.

Pitch. **Rated Power**, 2023. Disponível em: <<https://ratedpower.com/blog/pitch-distance/>>. Acesso em 04 jul. 2023.