



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO SEMI-ÁRIDO
PRÓ REITORIA DE GRADUAÇÃO
CENTRO MULTIDISCIPLINAR DE PAU DOS FERROS
INTERDISCIPLINAR EM CIÊNCIA E TECNOLOGIA

DAVID DUTRA RIBEIRO

**AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO DE UMA USINA FOTOVOLTAICA DE 62,7 kWp
INSTALADA NA UFERSA DE PAU DOS FERROS**

PAU DOS FERROS – RN

2020

DAVID DUTRA RIBEIRO

**AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO DE UMA USINA FOTOVOLTAICA DE 62,7 kWp
INSTALADA NA UFERSA DE PAU DOS FERROS**

Monografia apresentada à coordenação do curso de Interdisciplinar em Ciência e Tecnologia da Universidade Federal Rural do Semi-Árido – UFERSA, *campus* Pau dos Ferros, como requisito parcial para a obtenção do título de bacharel em Ciência e Tecnologia.

Orientador: Prof. Dr. Ádller de Oliveira Guimarães.

PAU DOS FERROS – RN

2020

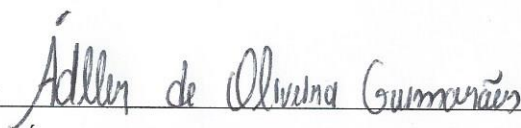
DAVID DUTRA RIBEIRO

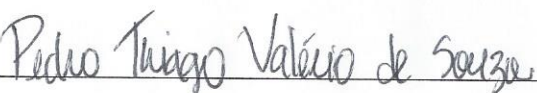
**AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO DE UMA USINA FOTOVOLTAICA DE 62,7 kWp
INSTALADA NA UFERSA DE PAU DOS FERROS**

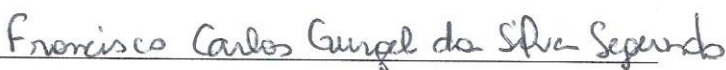
Monografia apresentada à coordenação do curso de Interdisciplinar em Ciência e Tecnologia da Universidade Federal Rural do Semi-Árido – UFERSA, *campus* Pau dos Ferros, como requisito parcial para a obtenção do título de bacharel em Ciência e Tecnologia.

Defendida em: 07 / 02 / 2020

BANCA EXAMINADORA


Adller de Oliveira Guimarães, Dr. (UFERSA)
Presidente


Pedro Thiago Valério de Souza, Me. (UFERSA)
Membro Examinador


Francisco Carlos Gurgel da Silva Segundo, Dr. (UFERSA)
Membro Examinador

© Todos os direitos estão reservados a Universidade Federal Rural do Semi-Árido. O conteúdo desta obra é de inteira responsabilidade do (a) autor (a), sendo o mesmo, passível de sanções administrativas ou penais, caso sejam infringidas as leis que regulamentam a Propriedade Intelectual, respectivamente, Patentes: Lei nº 9.279/1996 e Direitos Autorais: Lei nº 9.610/1998. O conteúdo desta obra tomar-se-á de domínio público após a data de defesa e homologação da sua respectiva ata. A mesma poderá servir de base literária para novas pesquisas, desde que a obra e seu (a) respectivo (a) autor (a) sejam devidamente citados e mencionados os seus créditos bibliográficos.

RR484 Ribeiro, David Dutra.
a Avaliação de desempenho de uma usina
 fotovoltaica de 62,7 kwp instalada na UFERSA de
 Pau dos Ferros / David Dutra Ribeiro. - 2020.
 52 f. : il.

 Orientador: Ádller de Oliveira Guimarães.
 Monografia (graduação) - Universidade Federal
Rural do Semi-árido, Curso de Ciência e
Tecnologia, 2020.

 1. Energia Solar. 2. Sistema fotovoltaico
conectado à rede. 3. Índices de mérito. 4. Análise
de desempenho. I. Guimarães, Ádller de Oliveira,
orient. II. Título.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, agradeço a Deus pelo completo acolhimento em cada oração feita. Agradeço a Ele por ter me dado uma força tão renovadora e resiliente que me fez não só progredir durante esta jornada, mas transmitir esse poder de entusiasmo àqueles que me rodeavam. Tudo isso foi realizado por linhas tortas, pois eu achava em determinado instante que tudo estava desabando. Com a realização deste trabalho, só tenho a confirmar novamente o quanto fui abençoado, de tal forma que nem me atribuo tamanho merecimento.

A realização de algo tão grandioso, feito por Deus, não poderia deixar de contar com a ajuda de anjos enviados por Ele. Dessa forma, me resta uma gratidão tão imensa aos meus pais, Izabel Maria Dutra Ribeiro e Francisco Humbergue Ribeiro, que nunca conseguirei lhes retribuir em tamanha proporção, pois me deram nada mais do que tudo para que eu pudesse continuar firme. Além deles, não posso deixar de citar meu irmão Fernando Dutra Ribeiro, que me aconselhou e forneceu, sem hesitar, sua energia em tantos momentos difíceis.

A ajuda necessária não para aí, pois, no desenrolar deste curso, conheci pessoas de grande coração e companheirismo. Se não fossem elas, também não teria conseguido chegar a escrever esse texto. O companheirismo destas vai desde diversos virotes estudando para provas e trabalhos, bem como nos momentos étlicos de lazer. Dentre essas estão Marcelo Tavares, Jorge Edson, João Hugo, John David, Murilo Feitosa, Pedro Ivan, Luan Barreto, José Luan, Janneson Lima, Rhuan Amorim, Luiz Aires, Karina Estrela, Breno Eduardo, Joelton Santana, Luiz Pordeus, Carlos Ramalho, Thiago Rosa e Igor Mateus.

Um agradecimento especial é direcionado à Monaliza Soares que, embora a tenha conhecido durante a reta final do curso, me deu a mão como nenhuma outra pessoa que conheci ao longo dessa trajetória, de forma que nunca pensei existir alguém tão disposto a ajudar outras pessoas em detrimento de suas próprias prioridades. É impossível quantificar minha gratidão por uma pessoa iluminada como ela, muito menos conseguir lhe retribuir um pouco disso.

Agradeço aos docentes que ultrapassaram a relação tradicional aluno-professor, tornando-se amigos de grande consideração, além de contribuírem com um manancial de conhecimentos que também transcendem as disciplinas. Estes são Otávio Paulino, Francisco Segundo e Ernandes Costa. Por fim, agradeço a todos os que, mesmo não sendo citados aqui, têm sua importância insubstituível, contribuindo diretamente para meu desenvolvimento pessoal e profissional.

RESUMO

Diante da necessidade de se diversificar a matriz energética mundial, as fontes alternativas surgem como importante opção. Dentre os diversos tipos de energias renováveis, encontra-se a energia solar, cujo potencial é vasto e deve ser incentivado o seu estudo para um melhor aproveitamento. Com essa justificativa, o presente trabalho se trata de uma análise acerca do desempenho de um sistema fotovoltaico localizado na UFRSA *campus* Pau dos Ferros. Em seguida, esta análise é comparada com outros dois sistemas localizados nos *campi* Angicos e Caraúbas. A pesquisa se baseia em fontes bibliográficas, como literaturas, trabalhos relacionados e resoluções normativas além de coleta de dados de geração de energia para uma análise de desempenho. Após a comparação entre as usinas, chegou-se à conclusão de que o melhor desempenho é registrado pelo *campus* Caraúbas.

Palavras-chave: Energia Solar. Sistema fotovoltaico conectado à rede. Índices de mérito. Análise de desempenho.

ABSTRACT

In view of the need to diversify the world energy matrix, alternative sources appear as an important option. Among the different types of renewable energies, there is the solar energy, whose potential is vast and its study should be encouraged for a better use. With this justification, the present work is an analysis about the performance of a photovoltaic system located at UFERSA campus Pau dos Ferros. Then, this analysis is compared with two other systems located on the Angicos and Caraúbas campuses. The research is based on bibliographic sources, such as literature, related works and normative resolutions, in addition to collecting energy generation data for performance analysis. After comparing the plants, it was concluded that the best performance is registered by the Caraúbas campus.

Keywords: Solar energy. Photovoltaic system connected on-grid. Merit ratings. Performance analysis.

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1 – Mapa de irradiação global horizontal diária no Brasil.
- Figura 2 – Esquema geral de um SA.
- Figura 3 – Esquema geral de um SFCR.
- Figura 4 – Circulação de corrente em uma célula fotovoltaica.
- Figura 5 – Tipos de células fotovoltaicas de silício.
- Figura 6 – Diagrama $I \times V$ e $P \times V$ de uma célula fotovoltaica de silício cristalino.
- Figura 7 – Sistema fotovoltaico com inversores tipo *string*.
- Figura 8 – Painéis solares da usina fotovoltaica da UFERSA *campus* Pau dos Ferros

LISTA DE GRÁFICOS

- Gráfico 1 – Irradiação média global horizontal (kWh/m²) sobre os três *campi*.
- Gráfico 2 – Energia gerada *versus* energia estimada.
- Gráfico 3 – *YF* gerado *versus* *YF* estimado.
- Gráfico 4 – *PR* gerado mensalmente *versus* *PR* médio anual.
- Gráfico 5 – *YF* gerado em Pau dos Ferros, Angicos e Caraúbas ao longo de 2019.
- Gráfico 6 – *PR* de Pau dos Ferros, Angicos e Caraúbas ao longo de 2019.

LISTA DE TABELAS

- Tabela 1 – Irradiação média global horizontal (kWh/m²) sobre a UFERSA de Pau dos Ferros.
- Tabela 2 – Irradiação média global horizontal (kWh/m²) sobre a UFERSA de Angicos.
- Tabela 3 – Irradiação média global horizontal (kWh/m²) sobre a UFERSA de Caraúbas.
- Tabela 4 – Dados da central geradora.
- Tabela 5 – Dados dos inversores.
- Tabela 6 – Valores máximos, mínimos e médios de energia gerada, *YF* e *PR* registrados na UFERSA de Pau dos Ferros em 2019.
- Tabela 7 – Valores máximos, mínimos e médios de energia gerada, *YF* e *PR* registrados nas usinas da UFERSA de Angicos, Caraúbas e Pau dos Ferros em 2019.

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas.
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
ASSECOM	Assessoria de Comunicação da UFERSA
BIG	Banco de Informações de Geração
GD	Geração Distribuída
MME	Ministério de Minas e Energia
NBR	Norma Brasileira de Regulamentação.
NREL	<i>National Renewable Energy Laboratory</i>
PR	<i>Performance Ratio</i>
PROINFA	Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica
RN	Rio Grande do Norte
SA	Sistemas Autônomos
SFCR	Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede Elétrica
SPPM	Seguimento do Ponto de Máxima Potência
STC	<i>Standard Test Conditions</i>
UFERSA	Universidade Federal Rural do Semi-Árido
UNSEGED	<i>United Nations Solar Energy Group for Environment and Development</i>
YF	<i>Final Yield</i>

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	13
1.1 OBJETIVOS	14
1.1.1 Geral	14
1.1.2 Específicos	14
1.2 DESCRIÇÃO DOS CAPÍTULOS	15
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	16
2.1 ENERGIA SOLAR: UMA CONTEXTUALIZAÇÃO INICIAL.....	16
2.2 TIPOS DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS.....	18
2.2.1 Sistemas fotovoltaicos autônomos.....	18
2.2.2 Sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica.....	19
2.3 EFEITO FOTOVOLTAICO	20
2.4 COMPONENTES DE UM SISTEMA FOTOVOLTAICO	21
2.4.1 A célula fotovoltaica	21
2.4.2 Módulos fotovoltaicos.....	24
2.4.3 Inversores de frequência para conexão à rede	25
2.5 REGULAMENTAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA.....	27
2.5.1 Geração distribuída.....	28
2.6 ÍNDICES DE MÉRITO	29
3 METODOLOGIA.....	31
3.1 CARACTERÍSTICAS DOS SISTEMAS EM ESTUDO	31
3.1.1 Levantamento de dados sobre irradiação	32
3.1.2 Dados sobre os módulos e inversores dos sistemas.....	34
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	36
4.1 ANÁLISE DOS ÍNDICES DE MÉRITO	36
4.2 COMPARATIVO DE GERAÇÃO COM OUTROS CAMPI	40

5 CONCLUSÃO	43
REFERÊNCIAS	44
ANEXO A – Folha de especificações do módulo fotovoltaico DUOMAX <i>Dual Glass</i> 72- Cell pertencente ao fabricante Trina Solar	47
ANEXO B – Folha de especificações do inversor de frequência <i>Sunny Tripower</i> pertencente ao fabricante SMA.....	49

1 INTRODUÇÃO

Os panoramas atuais relacionados à expansão da utilização de energias limpas indicam a crescente busca por suas fontes alternativas. Os motivos para isto estão diretamente relacionados à iminente escassez dos recursos não renováveis do planeta, o que demandou uma grande busca recente por alternativas de menor impacto. Essa busca, levando em consideração o momento atual, tem promovido redução de custos em virtude da melhoria da eficiência no processo produtivo, aumento de mercado, iniciativas governamentais, dentre diversos outros fatores relacionados (ESPOSITO; FUCHS, 2013).

A energia solar, juntamente com a energia eólica, deverá compor cerca de 30% de participação no mercado internacional até 2050 conforme mostram estudos realizados pelo *United Nations Solar Energy Group for Environment and Development* (UNSEGED) (LOPEZ, 2012). A enorme expansão do setor de energia solar é considerada atual, antes não aplicável à geração em grande escala, encontrando um espaço recente no chamado mercado por paridade de rede, que consiste em reduzir os custos da energia solar de forma que se mantenham iguais ou inferiores aos custos com a rede elétrica convencional. Com a ampliação deste mercado, além do crescimento de várias empresas responsáveis pela produção de células fotovoltaicas, o custo total pôde ser amplamente reduzido, o que viabiliza um maior número de empreendedores a investirem nessa área (TEIXEIRA; CARVALHO; LEITE, 2011).

No Brasil, três fatores são cruciais para um potencial avanço da energia solar: forte irradiação solar, regulamentações favoráveis no setor, além de uma proximidade à paridade de rede em todo o território (ESPOSITO; FUCHS, 2013). A regulamentação do setor de energia solar é proveniente do órgão responsável Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL).

Na Região Nordeste, mais especificamente no estado do Rio Grande do Norte (RN), o potencial solar é indiscutivelmente vasto. Na região do alto oeste potiguar, mais especificamente no município de Pau dos Ferros, a irradiação solar global horizontal, que diz respeito à radiação recebida por uma superfície plana horizontal, ultrapassa os 6500 Wh/m²·dia em alguns meses do ano segundo dados do *website* LABREN¹.

Diante de tais panoramas e parâmetros, torna-se viável um estudo a respeito de fontes alternativas de energia, mais especificamente sobre a energia solar, que, assim como a energia eólica, possa ser expandido para grandes escalas. Além disso, espera-se que um futuro avanço

¹ Disponível em: http://labren.ccst.inpe.br/atlas_2017.html. Acesso em: 10 out. 2019,

nesse sentido contribua, não só para a redução de despesas com consumo de energia, mas também auxiliem na busca por um desenvolvimento cada vez mais sustentável dado o enorme potencial energético fornecido pela radiação solar.

Para um bom aproveitamento de tais oportunidades, é necessário inteirar-se a respeito das características construtivas e econômicas ligadas à geração fotovoltaica. Sendo assim, este trabalho se justifica na necessidade de contribuição com aspectos teóricos relacionados ao funcionamento de sistemas fotovoltaicos conectados à rede.

Desse modo, esta monografia se tratou de abordar aspectos teóricos, como bibliografias, trabalhos relacionados, resoluções normativas, dentre outros documentos que estão associados ao tema energia solar. Em seguida foi realizado um estudo de desempenho do sistema fotovoltaico da Universidade Federal Rural do Semi-Árido (UFERSA) de Pau dos Ferros. Por fim, através de um comparativo entre esta usina com as usinas solares de outros *campi* da UFERSA localizados em Angicos e Caraúbas, foram analisados parâmetros de desempenho destes sistemas, que são a produtividade anual e o rendimento global.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Geral

Analisar o desempenho do sistema fotovoltaico implantado na Universidade Federal Rural do Semi-Árido (UFERSA) de Pau dos Ferros.

1.1.2 Específicos

- Estudar os componentes básicos de funcionamento de um sistema solar fotovoltaico conectado à rede;
- Reunir e tratar dados de geração de energia associados à usina solar implantada no *campus* da UFERSA em Pau dos Ferros;
- Analisar o desempenho do sistema fotovoltaico da UFERSA *campus* Pau dos Ferros;
- Comparar os dados de geração de energia elétrica estimados com os dados reais de geração registrados e seus respectivos índices de mérito;
- Comparar os resultados obtidos com os índices de mérito de outras duas usinas fotovoltaicas instaladas nos *campi* Angicos e Caraúbas.

1.2 DESCRIÇÃO DOS CAPÍTULOS

Esta monografia é composta por cinco capítulos. O Capítulo 1 se trata de uma introdução a respeito do tema de estudo, incluindo uma problematização, justificativa e objetivos estabelecidos para o desenvolvimento deste trabalho.

No Capítulo 2, é abordada uma descrição teórica acerca da energia solar fotovoltaica, trazendo uma contextualização e normatizações sobre o tema. Além disso, é realizado um estudo sobre os tipos de sistemas fotovoltaicos e os dispositivos que os compõem. Por último, são tratados os índices de mérito, que são as ferramentas utilizadas para a avaliação de desempenho proposta neste trabalho.

O Capítulo 3 aborda parâmetros necessários relacionados aos sistemas fotovoltaicos estudados nesta monografia, que dizem respeito aos dados de irradiação e parâmetros sobre os componentes de cada sistema. Com essas informações, é possível realizar a análise de desempenho objetivada.

O Capítulo 4 se trata da apresentação dos resultados do estudo de desempenho dos sistemas analisados, trazendo também uma discussão sobre todos os dados obtidos.

Por fim, no Capítulo 5, o estudo é concluído e são exibidas sugestões para trabalhos futuros. Após a conclusão, são exibidas as referências e anexos do trabalho.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Dentre as diversas formas de se obter energia elétrica, pode-se citar que a imensa maioria delas é proveniente do Sol, de forma direta ou indireta (PINHO; GALDINO, 2014). A luz solar, não só é diretamente aproveitada para a geração de eletricidade, como também pode ser utilizada, por exemplo, para o aquecimento de fluidos ou ambientes, através do processo denominado aquecimento solar passivo. O potencial disponibilizado pelo Sol é tão grande que é possível dizer que a radiação solar que incide sobre o planeta Terra durante um único dia representa o consumo energético humano ao longo de 27 anos (LOPEZ, 2012).

Define-se, segundo a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), por meio da norma técnica NBR 10899:2013, p. 7, radiação solar como sendo a “forma de transferência de energia advinda do sol, através da propagação de ondas eletromagnéticas (ou fótons)”. A radiação solar, mais especificamente a luz solar, se desmembra em uma fração direta e uma fração difusa, de modo que a fração direta acompanha a trajetória solar, causando sombras bem definidas sobre algum objeto, enquanto a fração difusa se espalha pela atmosfera atingindo direções aleatórias (TORRES, 2012).

Na prática, parece ilógico estar desperdiçando todo o potencial energético fornecido pelo Sol em troca de poluição e fontes esgotáveis. No entanto, a verdade é que há grande complexidade quando se trata do aproveitamento dessa energia de forma eficiente. Os sistemas fotovoltaicos atuais conseguem ter apenas uma baixa eficiência devido tanto a fatores construtivos quanto a fatores climáticos (LOPEZ, 2012). É notório, portanto, que o avanço da civilização se dará diante de um aproveitamento cada vez maior do manancial energético provido pelo Sol, visto que se apresenta como uma energia pura, limpa e abundante, possibilitando uma contribuição para a preservação ambiental a partir do aumento de sua utilização em lugar das energias não renováveis (COMETTA, 2004).

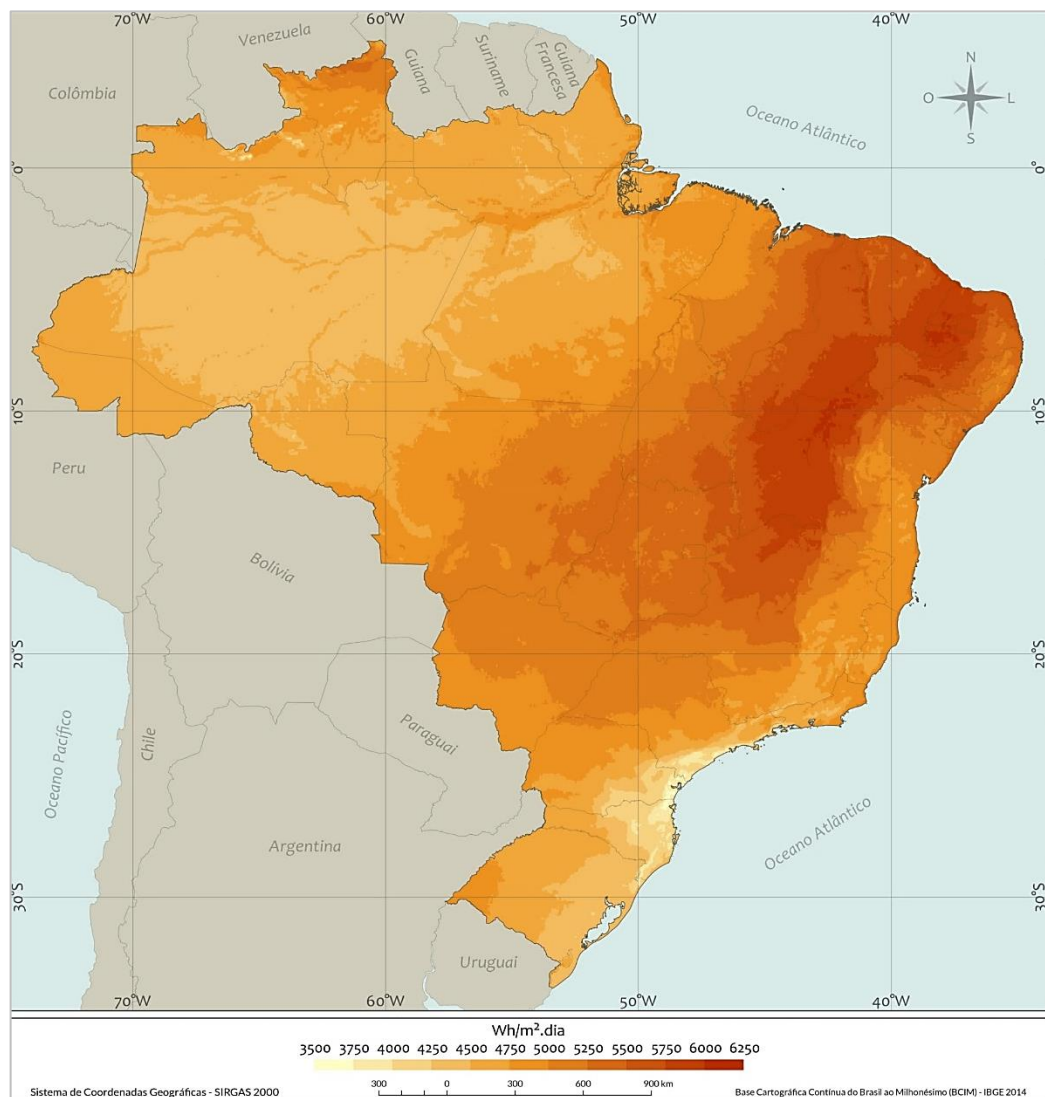
Dessa maneira, este capítulo irá tratar de uma contextualização sobre o panorama da energia solar no Brasil, bem como irá abordar aspectos teóricos e normativos associados à sistemas fotovoltaicos e seus componentes seguidos de um estudo dos índices de mérito.

2.1 ENERGIA SOLAR: UMA CONTEXTUALIZAÇÃO INICIAL

No Brasil, a contribuição da geração de energia solar para o quadro energético atual é de 1,4 % com um total de 2,47 GW de capacidade instalada em dados de 01 de fevereiro de

2020 fornecidos pelo Banco de Informações de Geração (BIG²) disponibilizado pela ANEEL. A região Nordeste é responsável por grande parte da recepção da luz solar que incide sobre o país, com uma irradiação global média de 5,9 kWh/m², maior valor entre as cinco regiões atuais (WANDERLEY, 2017). A Figura 1 ilustra o valor médio diário de irradiação global horizontal sobre o Brasil.

Figura 1 – Mapa de irradiação global horizontal diária no Brasil.



Fonte: Pereira *et al* (2017).

O potencial solar do Brasil é tradicionalmente conhecido, visto que é um país de regiões tropicais bem definidas. Entretanto, a expansão do uso da energia solar fotovoltaica só veio

² O Banco de Informações de Geração (BIG) dispõe de dados referentes à matriz energética brasileira, dentre outros, sendo atualizados diariamente. É possível acessar o BIG por meio do endereço <https://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/capacidadebrasil.cfm> acessado em 01 fev. 2020.

começar a crescer com visibilidade a partir de 2012 com a resolução nº 482/2012 da ANEEL, cuja regulamentação passou a permitir a expansão da micro e minigeração distribuída. Este tipo de geração diz respeito à possibilidade de um consumidor conseguir retornar à rede elétrica o excedente de geração do seu sistema e receber um retorno em forma de créditos com a concessionária (ANEEL, 2016).

Pode-se destacar um relevante avanço da energia solar no Brasil, que se deu a partir da facilitação a pequenos e médios empreendimentos, bem como o estímulo proporcionado por iniciativas governamentais iniciadas pelo Ministério de Minas e Energia (MME) em conjunto com a empresa Eletrobrás e a ANEEL, como é o exemplo do Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica (PROINFA), dentre outros.

Com o aumento do mercado, houve uma maior participação de empresas do setor, contribuindo para a competitividade, reduzindo assim custos e aumentando seus lucros. Vale ressaltar o incentivo promovido à obtenção do silício de alta pureza, matéria prima ligada à construção das células solares, relacionando-se diretamente com a redução de custos, proporcionando assim uma maior acessibilidade à comunidade (TORRES, 2012).

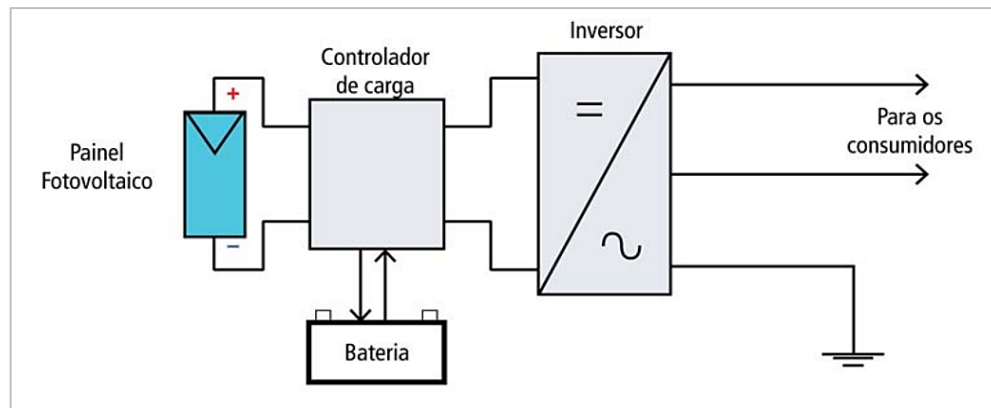
2.2 TIPOS DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS

A resolução normativa ABNT NBR 10899:2013, p. 7, define sistema fotovoltaico como sendo o “conjunto de elementos que geram e fornecem eletricidade pela conversão de energia solar”. É possível subdividi-lo em sistema fotovoltaico autônomo (SA) e sistema fotovoltaico conectado à rede elétrica (SFCR), os quais são descritos nesta seção.

2.2.1 Sistemas fotovoltaicos autônomos

Os sistemas fotovoltaicos autônomos (SA), ou sistemas *off-grid*, também denominados sistemas isolados ou sistemas remotos, consistem em instalações que necessitam de armazenamento de energia para uso posterior. Para isso, são utilizados sistemas de armazenamento de energia (banco de baterias). De maneira geral, esses tipos de sistemas são de pequeno porte e estão localizados onde não há rede elétrica por perto (RIBEIRO, 2012). A Figura 2 esquematiza um sistema fotovoltaico autônomo.

Figura 2 – Esquema geral de um SA.



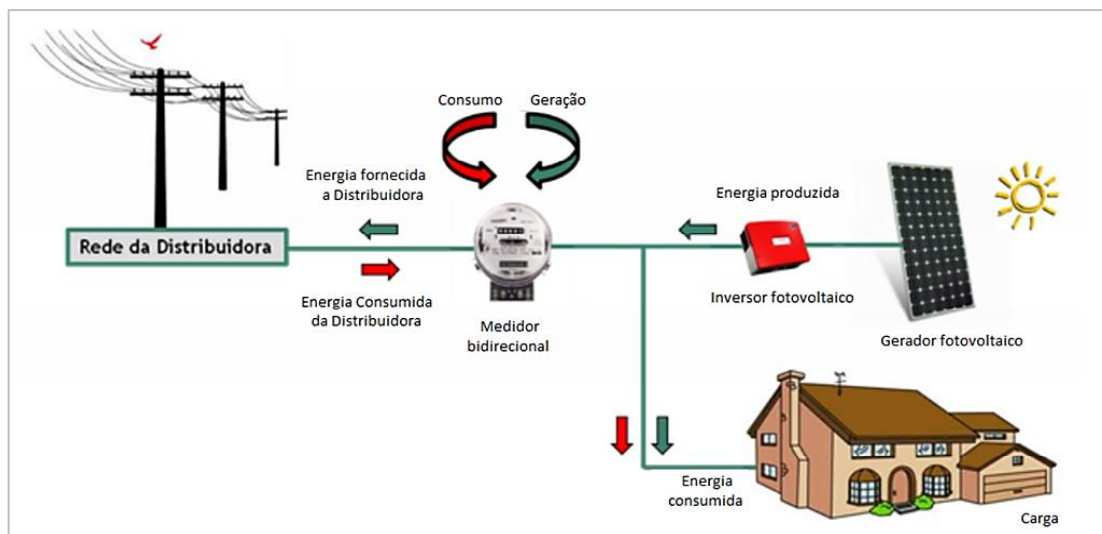
Fonte: LAMBERTS *et al* (2010).

Outros dispositivos utilizados neste tipo de sistema, de acordo com a Figura 2, são o controlador de carga, cuja finalidade é gerenciar o uso da energia armazenada pelas baterias, e o inversor, que é utilizado somente quando há a necessidade de operar cargas que utilizam corrente alternada, a exemplo de motores elétricos (TORRES, 2012). As baterias e o controlador de carga são componentes essenciais em um SA, entretanto maiores detalhes sobre estes dispositivos não são abordados neste trabalho.

2.2.2 Sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica

Os sistemas fotovoltaicos conectados à rede (SFCR), ou sistemas *on-grid*, dizem respeito aos sistemas que geram energia elétrica e a fornecem para rede elétrica local, que, em troca disso, retorna benefícios ao consumidor proprietário do sistema. Os principais componentes que integram esse tipo de sistema, para além do painel fotovoltaico, são o inversor de frequência juntamente com o relógio bidirecional (SCHENKEL, 2015). A Figura 3 ilustra didaticamente um SFCR.

Figura 3 – Esquema geral de um SFCR.



Fonte: SCHENKEL (2015).

De acordo com a Figura 3, o inversor atua disponibilizando condições energéticas adequadas para utilização pela rede elétrica local. O inversor se conecta ao relógio bidirecional, que é um dispositivo que permite a passagem de corrente em ambos os sentidos, registrando valores consumidos e distribuídos para a rede. Em benefício de uma geração excedente, o proprietário recebe créditos da concessionária, podendo consumi-los em condições adequadas (SCHENKEL, 2015).

Vale ressaltar que os parâmetros do inversor devem estar em conformidade com os requisitos normativos estabelecidos pela rede local à qual está conectado, que possui normas técnicas para isso, variando entre os estados brasileiros de acordo com a concessionária correspondente (RIBEIRO, 2012).

2.3 EFEITO FOTOVOLTAICO

O efeito fotovoltaico consiste num processo de transformação de energia luminosa em energia elétrica. O fenômeno ocorre quando radiação luminosa incide sobre a superfície de determinados materiais semicondutores. Especificamente, os fótons que constituem a radiação, ao incidirem, liberam energia capaz de romper as ligações químicas presentes na estrutura do semicondutor, liberando cargas elétricas (ZILLES *et al*, 2012).

O efeito fotovoltaico foi primeiramente observado pelo físico francês Edmond Becquerel, em 1839, e seus estudos foram posteriormente aprofundados em meio ao setor de telecomunicações e fontes alternativas de energia. A geração de energia solar fotovoltaica está

intrinsecamente ligada ao efeito fotovoltaico, sendo realizada por meio das células solares, que são a unidade básica de um módulo fotovoltaico (LOPEZ, 2012).

O semicondutor presente nas células é escolhido com base em características de absorção de radiação, custo de fabricação e fatores de impacto ambiental. O material semicondutor deve possuir a capacidade de absorver energia proveniente da radiação e transferi-la, em partes, para os elétrons, gerando pares de portadores de carga, isto é, pares elétron-lacuna. Para isso, é necessário fornecer um excesso de elétrons ao material, estimulando assim um deslocamento dos portadores, os quais são impulsionadas por um campo elétrico, possibilitando a ocorrência do efeito fotovoltaico (ZILLES *et al*, 2012).

2.4 COMPONENTES DE UM SISTEMA FOTOVOLTAICO

Um sistema fotovoltaico pode ser subdividido em diversos componentes, em que alguns destes estão presentes em certos tipos de sistema ao passo que são ausentes em outros, dando espaço para novos dispositivos. Somente os geradores fotovoltaicos estão presentes em todos os tipos de sistema. Segundo a ABNT NBR 10899:2013, p. 7, os dispositivos que compõem um sistema fotovoltaico podem ser “inversores, controladores de carga, dispositivos para controle, supervisão e proteção, armazenamento de energia elétrica, fiação, fundação e estrutura de suporte”.

Dessa forma, nesta seção, são abordados os dispositivos básicos presentes em um SFCR, o que exclui as baterias e os controladores de carga, visto que não se aplicam aos projetos estudados neste trabalho.

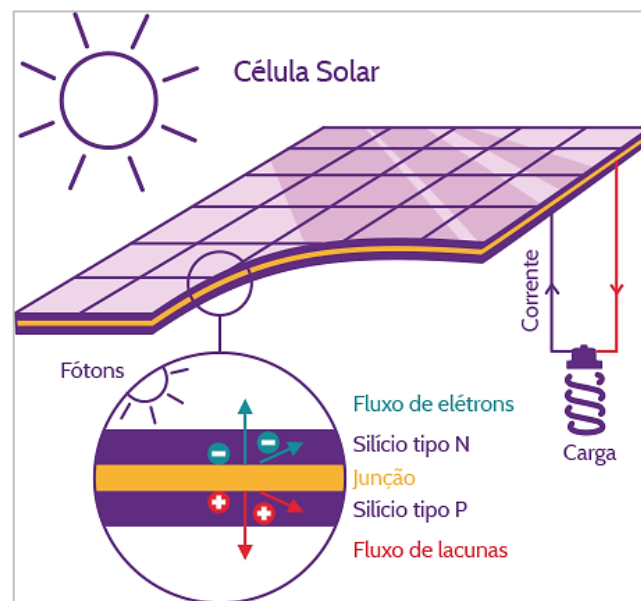
2.4.1 A célula fotovoltaica

A célula fotovoltaica, ou célula solar, é o dispositivo básico responsável por receber a radiação solar e transformá-la em energia elétrica. Seu circuito interno é formado por materiais semicondutores (RIBEIRO, 2012).

Em se tratando de células compostas por silício, que são as mais comuns em razão da abundância deste material e tecnologia desenvolvida no processo, duas camadas semicondutoras são encontradas internamente. Uma é dopada por um átomo pentavalente, ficando com excesso de elétrons (fósforo), e a outra camada com um átomo trivalente (boro), em que se obtém deficiência de elétrons (LOPEZ, 2012).

As camadas com excesso e deficiência de elétrons são denominadas tipo N e tipo P respectivamente. Estando combinadas por uma junção P-N, é possível montar um circuito que, através da presença da radiação solar incidente sobre a célula juntamente com uma determinada carga acoplada, resulte na fotocorrente (ZILLES *et al*, 2012). A Figura 4 ilustra o fluxo de corrente em uma célula fotovoltaica.

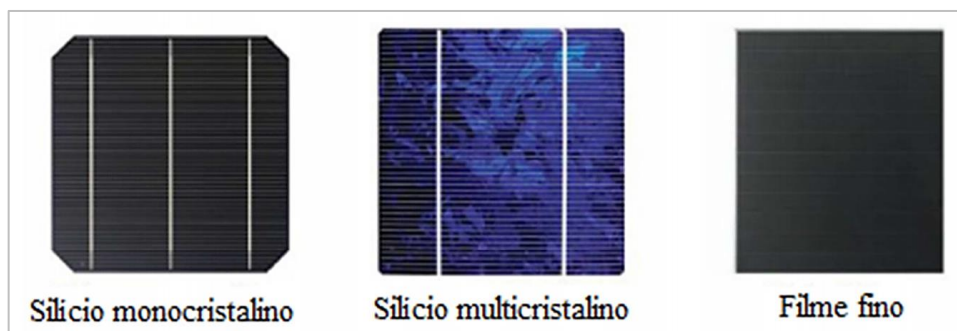
Figura 4 – Circulação de corrente em uma célula fotovoltaica.



Fonte: RINNOVABILE (2016).

Quanto aos tipos de células fotovoltaicas de silício, é possível classificá-las em policristalinas, monocristalinas e de filmes finos. A Figura 5 ilustra os diferentes tipos de células fotovoltaicas compostas por silício.

Figura 5 – Tipos de células fotovoltaicas de silício.



Fonte: SCHENKEL (2015).

As células policristalinas, ou multicristalinas, contêm diversos cristais que recebem fusão e são posteriormente solidificados. São as mais baratas, pois são produzidas mediante um procedimento de menor rigor, porém com baixa eficiência. Seu uso é o mais comum a níveis de mercado (SIQUEIRA, 2013).

As células monocristalinas, por outro lado, recebem maior processamento, sendo compostas por pastilhas finas. A eficiência é maior, porém também com maior custo que as policristalinas. São utilizadas em empreendimentos que requerem alta eficiência (RIBEIRO, 2012).

Por último, as células de silício dispostas em filmes finos e flexíveis consistem em dispositivos versáteis, sendo normalmente aplicadas em projetos de pequena escala. A eficiência das células é bastante reduzida em razão da estrutura amorfa (SIQUEIRA, 2013).

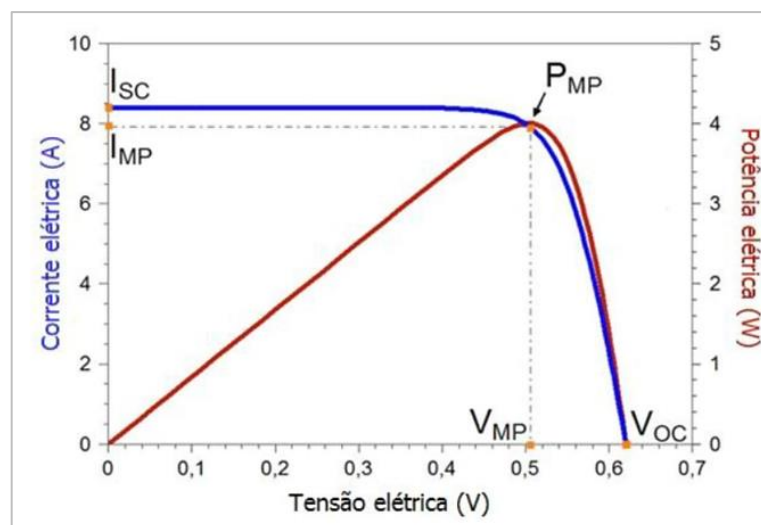
De acordo com a empresa *National Renewable Energy Laboratory* (NREL) (2020), até o ano de 2020, as eficiências recordes, obtidas com o avanço da tecnologia de fabricação das células de silício, são de 27,6 % para células monocristalinas concentradas, 22,8 % para células policristalinas e 21,2 % para células com filmes finos.

Dos principais parâmetros de circuito em células fotovoltaicas é possível citar a tensão de circuito aberto (V_{OC}), dada em Volts, que diz respeito à máxima tensão que pode ser produzida em um módulo fotovoltaico. Como complemento, há também a corrente de curto circuito (I_{SC}), dada em Ampères, que é a corrente máxima de operação quando a tensão entre os terminais do módulo é nula (PINHO; GALDINO, 2014).

Outro parâmetro de destaque é a potência no ponto de máxima potência (P_{MP}), expressa em Watts, que é o ponto em que o módulo opera com a melhor produtividade possível de acordo com as condições padrão de teste (*Standard Test Conditions* – STC). Estas condições baseiam-se em valores de 1000 W/m² de irradiância, 1,5 para massa de ar e temperatura de 25 ° C. Além disso, é possível expressar a tensão no ponto de máxima potência (V_{MP}) e a corrente no ponto de máxima potência (I_{MP}) (ZILLES *et al*, 2012).

A potência de pico (P_N), ou potência nominal, dada em Wp (watts-pico), diz respeito à potência de saída fornecida por um painel sob condições padrão de teste (STC). Por fim, a eficiência (η) diz respeito a uma medida do quão efetiva, em valor percentual, é a geração de energia elétrica proveniente do módulo (PINHO; GALDINO, 2014). A Figura 6 ilustra a representação gráfica dos parâmetros de tensão, corrente e potência expressos nesta subseção.

Figura 6 – Diagrama I x V e P x V de uma célula fotovoltaica de silício cristalino.



Fonte: PINHO; GALDINO (2014).

A curva superior expressa a relação I x V enquanto a curva que inicia na origem do sistema de coordenadas ilustra a relação P x V. Além disso, o ponto em que a derivada P em relação a V é nula corresponde ao ponto de máxima potência da célula fotovoltaica, destacado por P_{MP} na Figura 6. Este ponto representa o ajuste em que a célula fotovoltaica produz mais energia de acordo com as condições de tensão e corrente impostas (PINHO; GALDINO, 2014).

2.4.2 Módulos fotovoltaicos

O módulo fotovoltaico é definido, segundo a ABNT NBR 10899:2013, p. 6, como a “unidade básica formada por um conjunto de células fotovoltaicas, interligadas eletricamente e encapsuladas, com o objetivo de gerar energia elétrica”. O motivo das associações entre várias células é aumentar a potência elétrica do sistema, visto que há baixa potência em uma célula unitária.

Os módulos fotovoltaicos, além das células, são também compostos por vidro de alta resistência, o qual fornece proteção mecânica às células. Além disso, utiliza-se um material antirreflexo com o objetivo de maximizar a absorção de radiação pelos módulos. Camadas de silício são também utilizadas para formar a junção P-N das células juntamente com uma malha metálica que promove o contato entre as camadas. Por fim, faz parte do módulo a estrutura metálica que o sustenta mecanicamente, que pode ser subdividida em diferentes grupos (RIBEIRO, 2012).

Na associação de células em paralelo, a tensão elétrica V sobre cada célula é a mesma. Contudo, à medida em que se aumenta a quantidade n de células, é necessária uma maior corrente elétrica I de alimentação, isto é,

$$V = V_1 = V_2 = \dots = V_n , \quad (1)$$

$$I = I_1 + I_2 + \dots + I_n . \quad (2)$$

Já em série, a corrente não muda, visto que o terminal negativo de uma célula é conectado ao terminal positivo de outra e vice-versa. Assim, com o aumento da quantidade n de células, a tensão total é dada pela soma das tensões sobre cada célula (PINHO; GALDINO, 2014). Matematicamente, tem-se

$$I = I_1 = I_2 = \dots = I_n , \quad (3)$$

$$V = V_1 + V_2 + \dots + V_n . \quad (4)$$

A configuração série é a mais utilizada no mercado devido às menores perdas por aquecimento (PINHO; GALDINO, 2014).

2.4.3 Inversores de frequência para conexão à rede

Os inversores de frequência, ou conversores, são dispositivos que permitem converter um sinal de corrente elétrica, transformando-o de contínuo para alternado, ou vice-versa. Em aplicações fotovoltaicas conectadas a uma rede elétrica, utiliza-se o inversor DC/AC, o qual converte a corrente contínua, originada no sistema fotovoltaico, em corrente alternada, adequando-se à rede e ao consumo doméstico. Dessa forma, nesse tipo de sistema, o inversor deve ser ajustado para a frequência e nível de tensão do sinal fornecido pela rede (RIBEIRO, 2012).

A rede elétrica funciona com uma bateria para a unidade consumidora, não havendo, portanto, a necessidade de armazenamento de energia. Para que isso seja possível, é acoplado um relógio bidirecional ao inversor, o qual registra valores de geração e de consumo da instalação (RIBEIRO, 2012).

Dentre outras funcionalidades importantes que constituem os inversores, cabe citar os circuitos de seguimento do ponto de máxima potência (SPPM), os quais são responsáveis por

identificar a situação em que a geração de energia, pelos módulos, é ótima. Uma geração ótima depende de fatores climáticos, como ausência de sombreamento, sujeira, poeira, dentre outros (ZILLES *et al*, 2012).

Além disso, os inversores possuem circuitos que protegem contra danos elétricos, que sincronizam e filtram sinais, bem como circuitos anti-ilhamento, que são responsáveis por verificar se a rede elétrica está ativada ou não, impedindo o inversor de injetar corrente em caso de desligamento da rede elétrica, o que pode ocorrer em manutenções realizadas pela concessionária ou faltas elétricas (SCHENKEL, 2015).

De acordo com o tipo de inversor, ou inversores, de um sistema fotovoltaico, é possível classificá-lo em inversor central, *string*, *multistring* ou microinversor.

O inversor central consiste na conexão de um único inversor a um arranjo fotovoltaico, ligando-se também à rede.

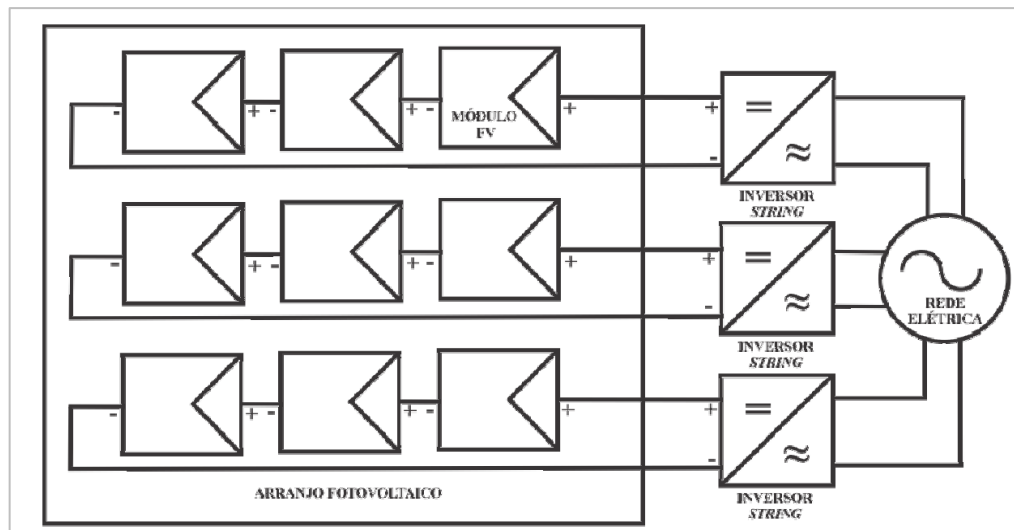
Os inversores tipo *string* são utilizados quando um arranjo fotovoltaico é acoplado a dois ou mais inversores e à rede, conectando cada inversor individualmente a uma série de módulos (SCHENKEL, 2015).

Os inversores *multistring* consistem na adição de um inversor principal às *strings*, em que estes últimos trabalham apenas com corrente contínua, enquanto o inversor principal converte toda a geração em nível alternado.

A última configuração, que utiliza microinversores, passou a ser utilizada mais recentemente, a qual consiste na utilização de um único microinversor para cada painel, trabalhando, portanto, de maneira individual (SCHENKEL, 2015).

Cada uma das topologias apresentadas contém diferentes vantagens e desvantagens, que podem estar no custo, eficiência, confiabilidade etc. O sistema estudado nesta monografia apresenta uma conexão do tipo *string*, que é ilustrada na Figura 6.

Figura 7 – Sistema fotovoltaico com inversores tipo *string*.



Fonte: SCHENKEL (2015).

Na configuração ilustrada na Figura 7, o sistema consegue obter melhor eficiência do que o tipo central devido cada inversor obter o melhor ajuste para SPPM dos módulos aos quais está associado. Esta disposição também retira a necessidade de uso de diodos de bloqueio, que são utilizados em sistemas com inversor central. Este componente evita que a corrente circule para os módulos, os quais se encontram todos interligados ao inversor central. Com o uso de inversores *string*, as diferentes séries de módulos não se interligam, evitando o uso dos diodos, os quais ocasionariam maiores perdas ao sistema (SCHENKEL, 2015).

Perdas por sombreamento, sujeira, poeira e *mismatch* (incompatibilidade entre SPPMs de diferentes células) também são reduzidas, visto que cada inversor irá rastrear as melhores condições de geração da sua respectiva série, ao invés de um inversor para o sistema inteiro. Uma outra vantagem é que, em caso de falha em um dos inversores, o restante continuará operando normalmente. Por outro lado, a desvantagem desta topologia está no alto custo de implantação devido à maior quantidade de inversores do que no sistema com inversor central (SCHENKEL, 2015).

2.5 REGULAMENTAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

A Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) é o órgão responsável pela regulamentação de energia elétrica em todo o Brasil. Nesse contexto, as energias renováveis, mais especificamente a energia solar, necessitam ser regulamentadas para que sejam normatizadas e estimulada a sua expansão (ANEEL, 2016). Dessa forma, a ANEEL estabeleceu

o mecanismo denominado de geração distribuída (GD), que é tratado nesta seção, trazendo sua definição, detalhes e perspectivas futuras.

2.5.1 Geração distribuída

Em abril de 2012, a ANEEL publicou uma Resolução Normativa nº 482/2012, que regulamenta a micro e minigeração distribuídas, bem como dá outras disposições. Segundo a norma, estas nomenclaturas derivam do termo geração distribuída, que diz respeito à energia elétrica, seja proveniente de fontes renováveis ou não, gerada e distribuída por empreendimentos de pequeno porte localizados próximos aos centros consumidores.

Com o objetivo de estimular a expansão energética do país, uma das vantagens viabilizadas pela norma é a possibilidade dada aos consumidores de produzir sua própria energia, injetando-a na rede e sendo beneficiados com redução nas despesas com energia elétrica através do Sistema de Compensação de Energia Elétrica (ANEEL, 2016).

A resolução nº 482/2012 foi revisada pela ANEEL na Resolução Normativa nº 687/2015, a qual revisou definições, prazos, valores de demanda etc. Uma das mudanças é a de que, caso consiga produzir mais do que consome, o proprietário receberá créditos em quantidade de energia que podem ser utilizados em um prazo máximo de até 60 meses.

O consumidor recebe também a opção de utilizar os créditos em outras unidades consumidoras que estejam registradas no seu titular e sejam contempladas pela mesma distribuidora, sendo isto denominado de autoconsumo remoto. Além disso, é possível realizar uma geração compartilhada, que consiste na possibilidade de fornecer energia excedente, proveniente de micro e minigeração, a várias unidades consumidoras distribuídas em locais diferentes do ponto de localização da usina (ANEEL, 2015). Por fim, outra possibilidade é a geração em condomínios, que viabiliza a repartição de créditos com a geração entre os condôminos, sem a necessidade de reduzir a fatura do próprio condomínio.

De acordo com a revisão feita pela ANEEL, as definições de micro e minigeração também foram atualizadas. A microgeração caracteriza empreendimentos com potência instalada de até 75 kW e a minigeração compreende a faixa de 75 kW até 3 MW para fonte hídrica e 5 MW para os outros tipos de geração. A ANEEL destaca que a iniciativa de geração é de total responsabilidade do consumidor, cabendo a este analisar a relação entre custo e benefício que será adquirida de acordo com o empreendimento (ANEEL, 2016).

A regulamentação ainda exige que consumidores que estão classificados no grupo B (nível de tensão elétrica de fornecimento inferior a 2,3 kV) devem pagar valores relativos aos

custos de disponibilidade, que diz respeito a um valor em reais equivalente a 30 kWh (monofásico), 50 kWh (bifásico) e 100 kWh (trifásico). Além disso, consumidores do grupo A (tensão de fornecimento igual ou superior a 2,3 kV) contribuem com uma parcela de fatura que diz respeito à demanda contratada. Dessa maneira, é necessário pagar o valor correspondente à essas quantidades de energia, mesmo que a energia gerada seja superior ao valor consumido, logo não é possível zerar a conta de energia (NASCIMENTO, 2019).

A revisão feita pela ANEEL na norma nº 482/2012, que culminou na norma nº 687/2015, estabeleceu que uma nova revisão deveria ser feita em 2019, entrando em vigor a partir de 2020. A nova proposta sugere reavaliação do sistema de compensação já estabelecido considerando os avanços do setor de micro e minigeração distribuída.

As regras atuais estabelecem que um consumidor que gera sua própria energia não precisa arcar com tarifas e encargos associados ao fornecimento provido pela rede elétrica relativos ao excedente gerado no sistema. Por outro lado, estes valores recaem sobre consumidores que dependem somente da rede. Nesse sentido, as novas regulamentações propõem uma maior equalização destes custos entre os que geram ou não sua própria energia. As tarifas e encargos associados ao fornecimento de energia pela rede elétrica seriam, portanto, aplicados às novas aquisições de micro e minigeração a partir de 2020. Empreendimentos já existentes seriam contemplados pelas regras atuais até o final de 2030 (AID, 2019).

2.6 ÍNDICES DE MÉRITO

Os índices de mérito, no que diz respeito à engenharia dos sistemas de geração fotovoltaica, são parâmetros de desempenho utilizados como uma forma de estudo do comportamento dos painéis solares. Dessa maneira, uma boa ou má otimização da geração pode ser detectada por esses indicadores, apontando para a necessidade ou não de uma manutenção ou reconfiguração para melhor aproveitamento da radiação (NARIMATU; CRIBARI; GUIMARÃES, 2018).

Antes de abordar as equações associadas aos índices de mérito, faz-se necessário obter a energia estimada (E_e) do sistema, que está presente na Equação (5) como sendo

$$E_e = R \cdot A_m \cdot \eta_m \cdot \eta_i \cdot n_{dm} \cdot N_m , \quad (5)$$

onde,

- R corresponde à taxa média de irradiação solar, dada em $(\text{kWh}/\text{m}^2) \cdot t$. O valor de t é inteiro, podendo ser dado em dias, meses ou anos a depender da proposta de análise;
- A_m é a área do módulo em m^2 ;
- η_m e η_i correspondem às respectivas eficiências do módulo e do inversor, ambas dadas em valores percentuais;
- n_{dm} é a quantidade de intervalos de tempo (dias, meses ou anos);
- N_m diz respeito à quantidade de módulos do sistema.

O parâmetro que determina a produtividade de um sistema fotovoltaico é chamado produtividade anual, ou *Final Yield* (YF). Este indicativo correlaciona a energia gerada (E_g) em kWh durante um determinado período com a potência instalada (P_i) na usina, dada em kWp (NARIMATU; CRIBARI; GUIMARÃES, 2018). Matematicamente, tem-se

$$YF = \frac{E_g}{P_i} . \quad (6)$$

Por outro lado, outro indicativo de desempenho é denominado rendimento global, ou *Performance Ratio* (PR). Este parâmetro correlaciona a energia gerada (E_g), em kWh, com a energia estimada (E_e), também em kWh. O valor é multiplicado por 100, retornando assim uma estimativa percentual (NARIMATU; CRIBARI; GUIMARÃES, 2018). Logo, este índice relaciona a energia gerada com a energia disponível para o sistema, sendo expresso por

$$PR = \frac{E_g}{E_e} \cdot 100 \% . \quad (7)$$

Quanto mais próximo de 100 % for o valor de PR , melhor é a geração energética, o que, na prática, não acontece devido a perdas que não se podem evitar no sistema. Entretanto, em sistemas com boa eficiência, este valor é usualmente maior que 80 %. Ambos os índices de mérito (YF e PR) destacados neste estudo podem ser utilizados como comparativo entre diferentes sistemas fotovoltaicos, valendo ressaltar que não são parâmetros absolutos, mas que auxiliam no monitoramento da usina (NARIMATU; CRIBARI; GUIMARÃES, 2018).

3 METODOLOGIA

Nesta monografia, em primeiro lugar, aspectos teóricos foram abordados, como bibliografias, trabalhos relacionados, resoluções normativas, dentre outros. Após isso, foi feito um levantamento de dados sobre a usina de geração fotovoltaica da UFERSA *campus* Pau dos Ferros, abordando detalhes sobre o projeto local, bem como registros de geração da instituição durante o ano de 2019.

Obtido o levantamento, realizou-se o cálculo dos índices de mérito da usina local, bem como de outras duas usinas instaladas na UFERSA de Angicos e Caraúbas, comparando seus resultados.

3.1 CARACTERÍSTICAS DOS SISTEMAS EM ESTUDO

Nesta seção, são exibidas as grandezas envolvidas para o cálculo dos índices de mérito, em que estes foram obtidos para os três sistemas em estudo. Entretanto, maiores detalhes são voltados ao *campus* Pau dos Ferros, cujo foco é maior, ao passo que os demais *campi* servirão como análise comparativa.

A usina solar da UFERSA *campus* Pau dos Ferros está localizada no endereço da BR 226, km 405, Bairro São Geraldo, município de Pau dos Ferros no estado do Rio Grande do Norte. Mais especificamente, a localização geográfica do empreendimento é definida pela latitude 06° 06' 21" S e longitude 036° 36' 56" W. A Figura 8 ilustra a disposição dos painéis solares instalados na usina da UFERSA *campus* Pau dos Ferros.

Figura 8 – Painéis solares da usina fotovoltaica da UFERSA *campus* Pau dos Ferros.



Fonte: usinasolar.ufersa.edu.br (2020).

3.1.1 Levantamento de dados sobre irradiação

De acordo com os dados do site do Atlas Brasileiro de Energia Solar - 2ª Edição (2017), é possível obter as informações médias sobre vários tipos de irradiação que incidem mensal e anualmente no Brasil (PEREIRA *et al*). Analisando então o endereço disponível no *website* LABREN³ correspondente à célula 49133, que contempla a Universidade Federal Rural do Semi-Árido (UFERSA) *campus* Pau dos Ferros no estado do Rio Grande do Norte (RN), é possível obter a irradiação média global horizontal (R), utilizada para o cálculo da energia estimada (E_e). Para cada mês do ano, é possível levantar a Tabela 1 a partir dos dados relacionados. Em seguida são expostos os valores de R associados aos *campi* Angicos e Caraúbas.

Tabela 1 – Irradiação média global horizontal (kWh/m²) sobre a UFERSA de Pau dos Ferros.

Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul
5,934	5,963	6,006	5,663	5,314	5,022	5,372
Ago	Set	Out	Nov	Dez	Anual	
6,043	6,415	6,599	6,614	6,099	5,920	

Fonte: Autor (2020).

Em seguida, com relação aos demais *campi* estudados, são geradas as Tabelas 2 e 3 correspondentes ao valor de irradiação para cada município durante todos os meses do ano de 2019, assim como foi expresso para o município de Pau dos Ferros na Tabela 1. Esses dados serão necessários para análise dos índices de mérito entre os *campi* estudados, a qual é apresentada na seção sobre resultados e discussões.

Os dados de irradiação sobre as usinas de Angicos e Caraúbas foram respectivamente obtidos pelos endereços 50673 e 50284 das células do *website* LABREN, mesma fonte utilizada para os dados de Pau dos Ferros. Com o objetivo de obter estimativas aceitáveis, os dias em que a usina foi desativada foram desconsiderados para efeito de cálculo.

³ Disponível em: http://labren.ccst.inpe.br/atlas_2017.html. Acesso em: 18 nov. 2019.

Tabela 2 – Irradiação média global horizontal (kWh/m²) sobre a UFERSA de Angicos.

Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul
5,916	5,909	5,982	5,649	5,265	4,812	5,085
Ago	Set	Out	Nov	Dez	Anual	
5,814	6,269	6,479	6,445	6,014	5,803	

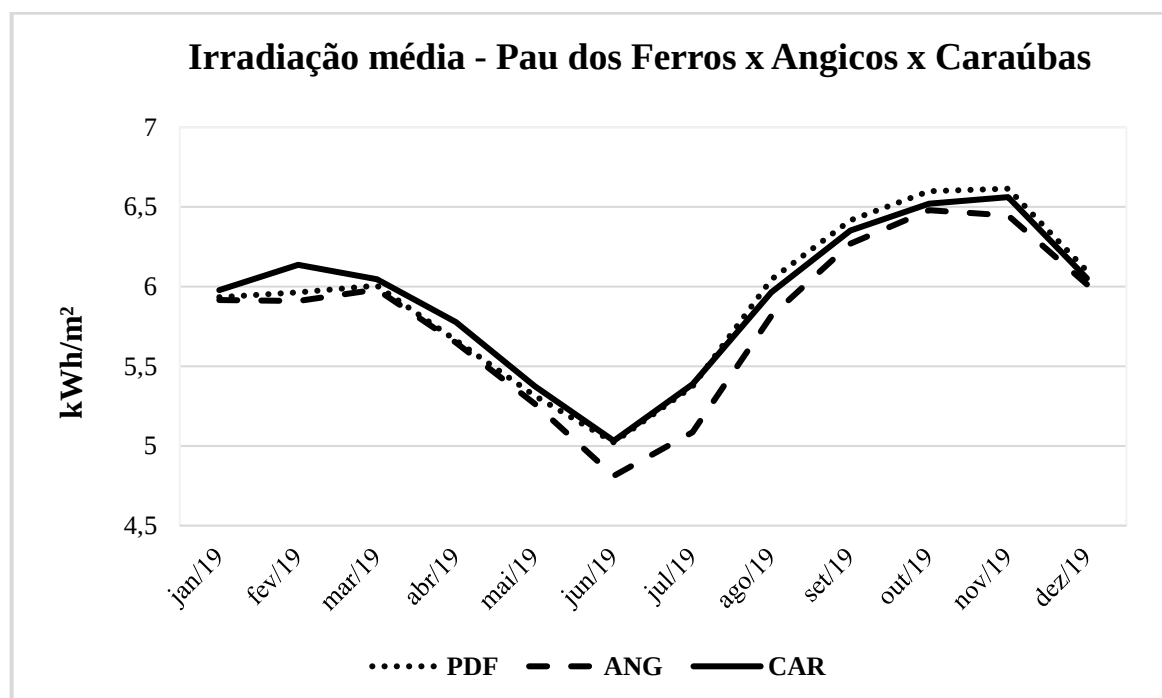
Fonte: Autor (2020).

Tabela 3 – Irradiação média global horizontal (kWh/m²) sobre a UFERSA de Caraúbas.

Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul
5,978	6,137	6,045	5,777	5,374	5,032	5,388
Ago	Set	Out	Nov	Dez	Anual	
5,964	6,352	6,520	6,561	6,052	5,932	

Fonte: Autor (2020).

O Gráfico 1 resume os dados das Tabelas 1, 2, 3, que correspondem à média de irradiação global horizontal em 2019 sobre os três *campi* estudados, em forma de linhas ao longo do ano.

Gráfico 1 – Irradiação média global horizontal (kWh/m²) sobre os três *campi*.

Fonte: Autor (2020).

3.1.2 Dados sobre os módulos e inversores dos sistemas

Quanto aos dados associados aos módulos e inversores, nas Tabelas 4 e 5, são expostos alguns parâmetros correspondentes à ficha técnica do sistema fotovoltaico do *campus* Pau dos Ferros, fornecendo também o valor de eficiência associado a cada dispositivo empregado, que não consta diretamente na ficha técnica.

Os dados sobre eficiência dizem respeito aos módulos e inversores, cujos valores foram obtidos por meio do catálogo informativo associado ao modelo e fabricante destes equipamentos, sendo informados nos anexos A e B respectivamente. As eficiências dos equipamentos são utilizadas no cálculo da energia estimada (E_e).

Tabela 4 – Dados da central geradora.

Tipo:	Solar fotovoltaica
Número de módulos:	190
Área do arranjo (m²):	372,4
Área de um único módulo (m²):	1,96
Fabricante e modelo dos módulos:	Trina Solar DUOMAX <i>Dual Glass 72-Cell module 330 sW</i>
Potência de pico do módulo (Wp):	330
Potência de pico total (kWp):	62,7
Azimute:	339°
Ângulo de inclinação:	10°
Tipo de instalação do arranjo:	Em solo
Eficiência dos módulos (%):	16,8

Fonte: usinasolar.ufersa.edu.br (2019) adaptado pelo autor.

Tabela 5 – Dados dos inversores.

Tipo:	Conectado à rede
Número de Inversores:	2+1
Fabricante e modelo:	SMA <i>Sunny Tripower</i> 25000TL (02 unid.) + 15000TL (01 unid.)
Potência (kW):	2x25 + 1x15
Tensão de Operação (Vca):	380 f-f
Eficiência do inversor de 15kWp (%):	98,4
Eficiência dos inversores de 25kWp (%):	98,3

Fonte: usinasolar.ufersa.edu.br (2019) adaptado pelo autor.

Com relação aos sistemas fotovoltaicos de Angicos e Caraúbas, tem-se as mesmas especificações descritas em relação à usina de Pau dos Ferros, visto que os sistemas são idênticos, estando apenas dispostos em diferentes localidades.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A partir do levantamento de dados obtido na seção sobre metodologia, realizou-se nesta o tratamento necessário para calcular os índices de mérito do sistema fotovoltaico da UFERSA *campus* Pau dos Ferros. Por fim, foi realizado um panorama comparativo entre os índices de mérito deste sistema com os índices de outras duas usinas fotovoltaicas instaladas nos *campi* da UFERSA de Angicos e Caraúbas respectivamente.

4.1 ANÁLISE DOS ÍNDICES DE MÉRITO

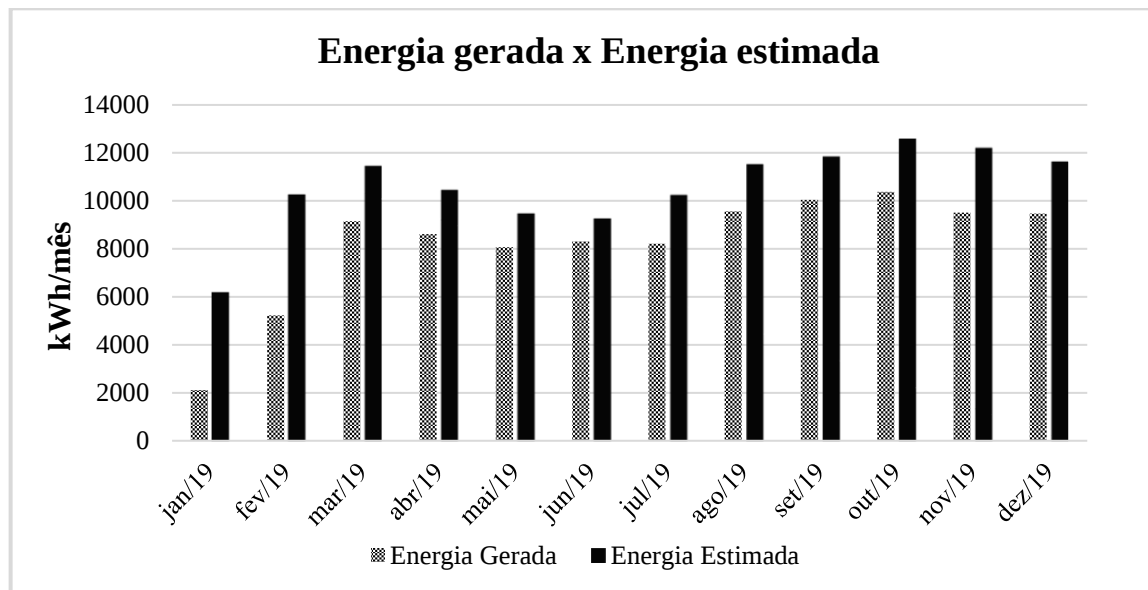
De acordo com os dados levantados nas Tabelas 4 e 5, bem como os dados irradiação global horizontal (R) expressos na Tabela 1 e os valores de geração obtidos no site de acompanhamento das usinas⁴, é possível calcular a energia estimada (E_e), o rendimento global (PR) e a produtividade anual (YF) durante cada mês de 2019 para a usina de Pau dos Ferros.

Utilizando a Equação (5), tem-se que o valor de R é diferente para cada mês, sendo obtidos doze resultados para E_e ao longo de 2019. A área dos módulos (A_m), conforme a Tabela 4 é de 372,4 m². A eficiência dos módulos (η_m) é de 16,8 %.

Já para os inversores, uma média aritmética foi realizada com as eficiências (η_i) dos três inversores do sistema, obtendo um valor de 98,33 %. O número de módulos (n_{dm}), conforme a Tabela 4, é 190 e o número de dias no mês (N_m) varia de acordo com o mês de análise.

Feito o cálculo, obtém-se os gráficos ao longo de 2019 que relacionam a energia gerada (E_g), obtida pelo site de acompanhamento da usina, com a energia estimada (Gráfico 2), o YF gerado com o YF estimado (Gráfico 3) e, por último, a projeção do PR (Gráfico 4).

⁴ Disponível em: <https://usinasolar.ufersa.edu.br/>. Acesso em 01 jan. 2020.

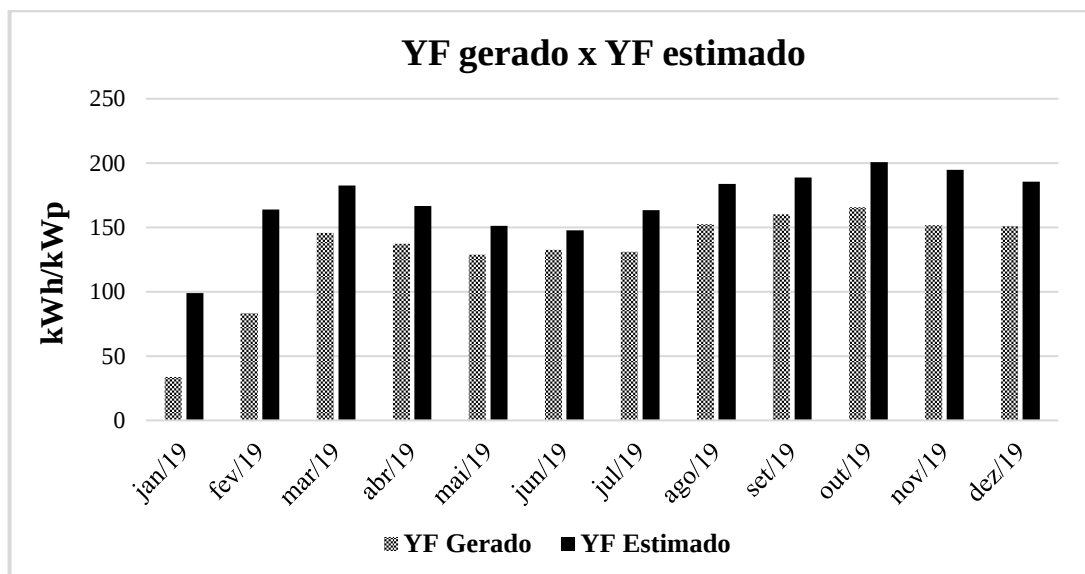
Gráfico 2 – Energia gerada versus energia estimada.

Fonte: Autor (2020).

De acordo com o Gráfico 2, é perceptível um baixo valor na média de geração energética durante o mês de janeiro em comparação com outros meses, o que pode ser principalmente explicado pelo desligamento da usina durante os quatorze primeiros dias do mês. Embora o período ocioso não tenha sido levado em consideração nos cálculos de E_e , o fato de não produzir acaba reduzindo a energia total gerada.

Com relação ao mês de fevereiro, assim como nos dias em que a usina operou em janeiro, identifica-se uma baixa produção em relação à energia estimada. Os demais dias ao longo do ano em que não houve produção de energia foram os dias 22 e 23 de maio. No restante dos meses do ano, a produção real se aproximou mais do valor estimado, em que uma maior geração foi registrada durante os meses finais do ano, possivelmente devido à maior irradiação.

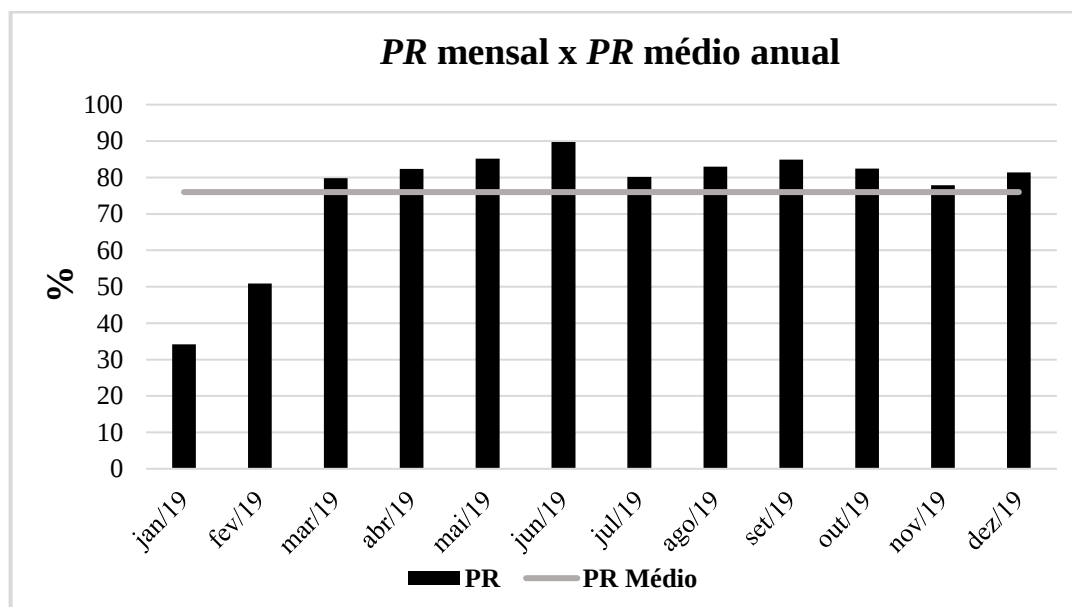
Em seguida, no Gráfico 3, com o objetivo de verificar a eficiência do sistema, comparou-se a produtividade anual (YF) gerada com a produtividade anual estimada para cada mês do ano.

Gráfico 3 – YF gerado versus YF estimado.

Fonte: Autor (2020).

Verifica-se, de acordo com o Gráfico 3, que, assim como a energia estimada, a produtividade de cada mês foi mais próxima do valor estimado durante todo o ano, exceto durante janeiro e fevereiro.

É possível analisar, como complemento, o rendimento global (*PR*) da usina e traçar o Gráfico 4 abaixo, o qual exibe também sua média anual através de uma linha horizontal constante.

Gráfico 4 – PR gerado mensalmente versus PR médio anual.

Fonte: Autor (2020).

Analisando o Gráfico 4, percebe-se que o aproveitamento médio anual realizado pelo sistema em 2019 é de 75,98 %. A Tabela 6 expressa os valores máximos, mínimos e médios para cada parâmetro analisado nos gráficos desta seção, evidenciando o respectivo mês de registro.

Tabela 6 – Valores máximos, mínimos e médios de energia gerada, *YF* e *PR* registrados na UFERSA de Pau dos Ferros em 2019.

	<i>E_g</i> (kWh)	<i>YF</i> (kWh/kWp)	<i>PR</i> (%)
Valor máximo	10379,07 (Out)	165,54 (Out)	89,71 (Jun)
Valor mínimo	2120,06 (Jan)	33,81 (Jan)	34,16 (Jan)
Média anual	8221,54	131,12	75,98

Fonte: Autor (2020).

De acordo com a Tabela 6, percebe-se que o mês de maior produção de energia, bem como de maior produtividade foi outubro. O mês de maior aproveitamento do potencial disponibilizado foi junho e o mês de menor aproveitamento de todos os três parâmetros analisados foi janeiro.

Segundo ABINEE (2012), existem diversos fatores associados às perdas atuantes no sistema, os quais fazem com que o valor real de geração seja menor do que o valor estimado, sendo estes por exemplo:

- Perdas por aquecimento nos cabos;
- Perdas nos inversores durante a conversão CC para CA;
- Prováveis sombreamentos sobre os painéis;
- Provável acúmulo de poeira ou sujeira, o que compromete a absorção de radiação pelos módulos;
- Diminuição da eficiência dos módulos em função da elevação de temperatura no sistema;
- Desligamentos do sistema, os quais decorrem de eventuais manutenções ou quebra de componentes;
- Impossibilidade de aproveitamento constante do ponto de máxima potência de cada célula individualmente.

4.2 COMPARATIVO DE GERAÇÃO COM OUTROS CAMPI

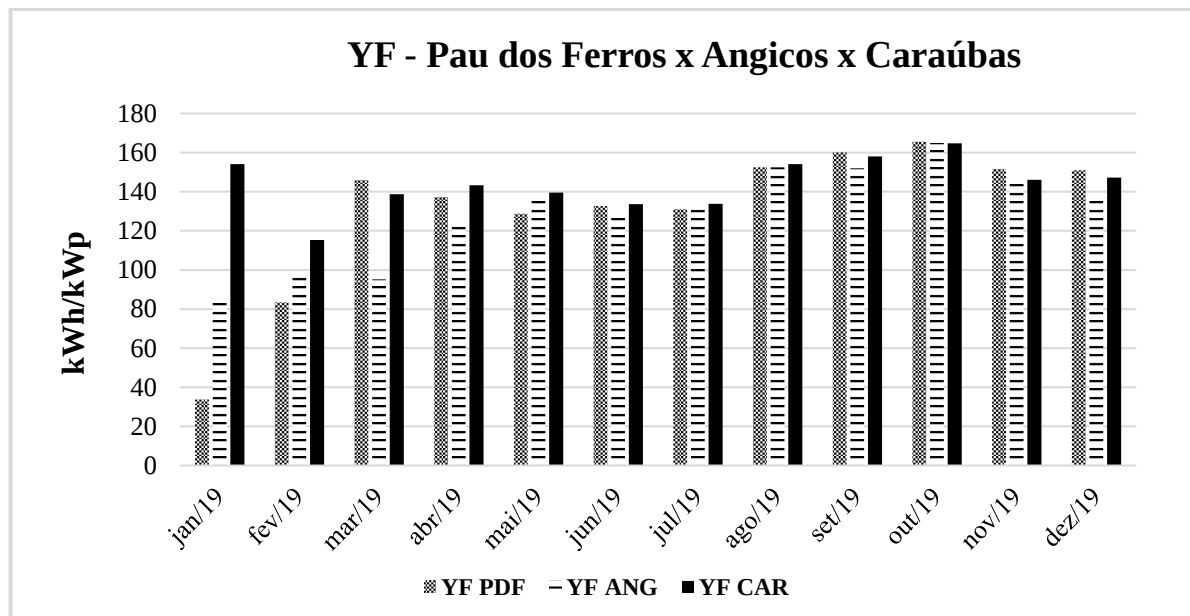
Após realizada a análise dos índices de mérito da UFERSA de Pau dos Ferros, foi feita uma projeção gráfica comparativa entre os índices de mérito locais com os índices de mérito calculados para as usinas dos *campi* da UFERSA situados nos municípios de Angicos e Caraúbas, ambos pertencentes ao estado do Rio Grande do Norte.

Para efeito de cálculo da energia estimada (E_e), tem-se que ambas as usinas de Angicos e Caraúbas apresentam parâmetros construtivos numericamente iguais aos de Pau dos Ferros, variando apenas a irradiação média global horizontal (R) que incide sobre cada usina.

Os dias em que a usina de Angicos não operou foram apenas os dias 26 e 28 de maio. Já em Caraúbas, o sistema foi desligado em 17 e 18 de fevereiro, 25 de maio e 19 e 20 de novembro. Ressalta-se novamente que esses dias foram descartados para o cálculo de E_e .

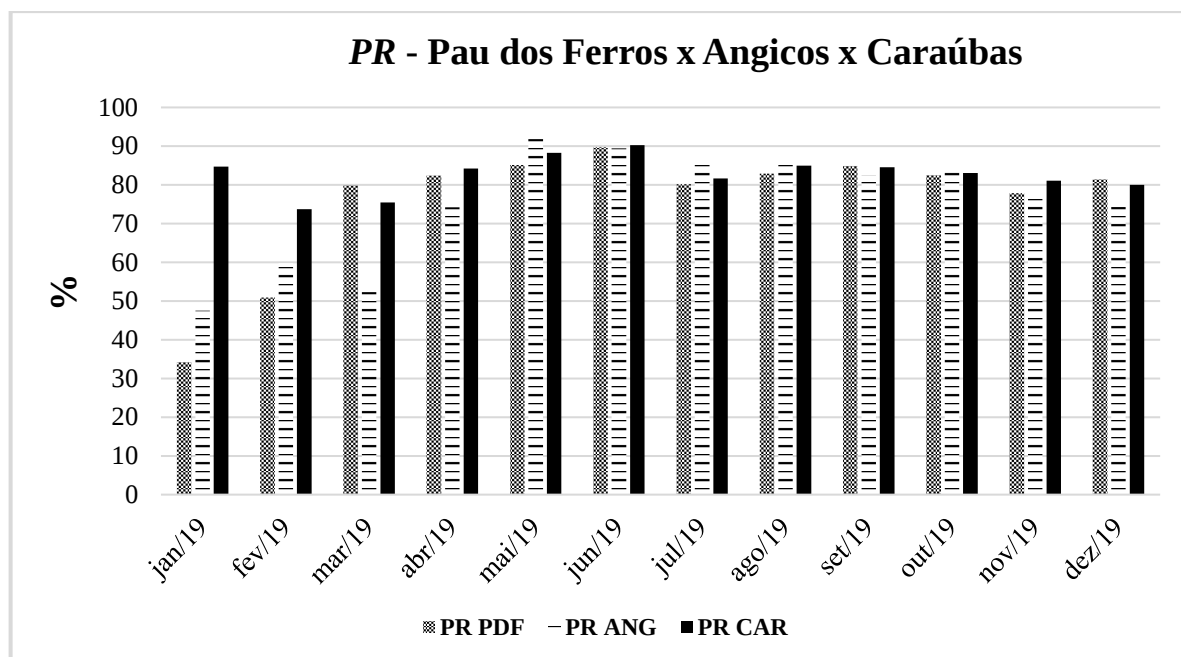
Com os índices de irradiação obtidos, juntamente com os dados de geração disponibilizados no endereço virtual de cada usina, durante os meses de 2019, é possível traçar Gráficos 5 e 6, que são um comparativo para os valores de produtividade anual (YF) e de rendimento global (PR) gerados individualmente por cada *campus*.

Gráfico 5 – YF gerado em Pau dos Ferros, Angicos e Caraúbas ao longo de 2019.



Fonte: Autor (2020).

Gráfico 6 – PR de Pau dos Ferros, Angicos e Caraúbas ao longo de 2019.



Fonte: Autor (2020).

Analisando ambos os Gráficos 5 e 6, percebe-se que a usina de Caraúbas, na maioria dos meses, apresenta melhores índices para *YF*. Durante o mês de março, bem como a partir de setembro, os índices de *YF* são maiores em Pau dos Ferros. Para o índice *PR*, o valor é mais disputado entre os *campi*, de forma que sempre há algum mês em que uma das usinas obtém melhor *PR*, com destaque recorde de 91,8 % obtido em maio pela usina de Angicos. Com a Tabela 7, é possível comparar diretamente os valores máximos, mínimos e médios de cada município seguidos de seu mês de registro.

Tabela 7 – Valores máximos, mínimos e médios de energia gerada, *YF* e *PR* registrados nas usinas da UFERSA de Angicos, Caraúbas e Pau dos Ferros em 2019.

	Município	E_g (kWh)	YF (kWh/kWp)	PR (%)
Valor máximo	Pau dos Ferros	10379,07 (Out)	165,54 (Out)	89,71 (Jun)
	Angicos	10337,25 (Out)	164,87 (Mai)	91,83 (Out)
	Caraúbas	10327,78 (Out)	164,72 (Out)	90,24 (Jun)
Valor mínimo	Pau dos Ferros	2120,06 (Jan)	33,81 (Jan)	32,26 (Jan)
	Angicos	5363,90 (Jan)	85,55 (Jan)	47,54 (Jan)
	Caraúbas	7234,05 (Fev)	115,37 (Fev)	73,69 (Fev)
Média anual	Pau dos Ferros	8221,54	131,12	75,98
	Angicos	8093,05	129,08	75,34
	Caraúbas	9033,36	144,07	82,66
Total	Pau dos Ferros	98658,54	-	-
	Angicos	97116,56	-	-
	Caraúbas	108400,28	-	-

Fonte: Autor (2020).

Percebe-se então que, de acordo com a Tabela 7, a maior média quantitativa de energia gerada entre os três *campi* foi obtida no *campus* Caraúbas, com 108 MWh totais ao fim do ano. Além disso, Caraúbas também obteve melhor média anual para *YF* e *PR*, com 144,07 kWh/kWp e 82,66 % respectivamente. O mês em que houve maior geração de energia pelos três *campi* foi outubro, ao passo que as menores produções estão entre janeiro e fevereiro.

Os motivos pelos quais houve diferenciação entre os resultados de cada usina podem estar relacionados principalmente à taxa média de irradiação global horizontal (*R*), visto que os meses de melhor *YF* de cada *campus* coincidem com os meses de maior estimativa para *R*, salvo algumas exceções, como é o caso de março. Neste mês, a usina de Pau dos Ferros obteve melhor *YF* e *PR* apesar de um menor *R*. Por outro lado, mais fatores importantes podem ter sido consideravelmente influentes, como a presença de poeira e/ou sujeira, umidade do ar, temperatura, ângulo de inclinação dos módulos, orientação dos painéis, dentre outros.

5 CONCLUSÃO

A partir de um estudo dos componentes básicos de um sistema fotovoltaico conectado à rede, bem como da contribuição com aspectos teóricos e normativos relacionados ao panorama atual da micro e minigeração no Brasil, foi possível obter e fornecer conhecimento sobre o tema energia solar fotovoltaica.

Além disso, realizou-se o estudo dos índices de mérito produtividade anual (*YF*) e rendimento global (*PR*), que permitem analisar o desempenho de sistemas fotovoltaicos. Com isso, foi possível comparar estes parâmetros, obtidos a partir do sistema fotovoltaico instalado na UFERSA *campus* Pau dos Ferros, com os índices de outros dois *campi* da mesma universidade situados em Angicos e Caraúbas.

De acordo com a análise feita em cada usina, é perceptível uma boa competitividade entre os três sistemas, visto que, ao longo dos meses de 2019, as melhores médias dos índices de mérito oscilam entre cada usina. Entretanto, a usina que apresentou melhor desempenho total foi a situada em Caraúbas, pois obteve melhores médias de geração de energia, *YF* e *PR*. Destaca-se uma produção total, na usina da UFERSA *campus* Caraúbas, de cerca de 10 MWh a mais do que as outras duas usinas localizadas nos *campi* Angicos e Pau dos Ferros.

Sendo assim, esta monografia pode servir de embasamento para futuros estudos, que podem ser realizados objetivando a verificação minuciosa das variáveis que influenciam na produção divergente entre os sistemas, já que apresentam semelhança na maioria de suas características construtivas.

REFERÊNCIAS

- Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL. **Cadernos Temáticos ANEEL Micro e Minigeração Distribuída**: Sistema de Compensação de Energia Elétrica. 2016. Disponível em:
<https://www.aneel.gov.br/documents/656877/14913578/Caderno+tematico+Micro+e+Minigera%C3%A7%C3%A3o+Distribuida+-+2+edicao/716e8bb2-83b8-48e9-b4c8-a66d7f655161>. Acesso em: 6 out. 2019.
- Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL. Resolução Normativa N° 482 de 2012 da ANEEL, 2012.
- Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL. Resolução Normativa N° 687 de 2015 da ANEEL, 2015.
- AID. **Revisão das regras de geração distribuída entra em consulta pública**. 2019. Disponível em: https://www.aneel.gov.br/sala-de-imprensa-exibicao/-/asset_publisher/XGPXSqdMFHrE/content/revisao-das-regras-de-geracao-distribuida-entra-em-consulta-publica/656877. Acesso em: 10 jan. 2020.
- Assessoria de Comunicação da UFERSA – ASSECOM. **Ufersa prepara maratona de inaugurações de obras**. 2019. Disponível em:
<https://assecom.ufersa.edu.br/2019/01/16/ufersa-prepara-maratona-de-inauguracoes-de-obras/>. Acesso em 12 out. 2019.
- Associação Brasileira da Indústria Elétrica e Eletrônica – ABINEE. **Propostas para Inserção da Energia Solar Fotovoltaica na Matriz Elétrica Brasileira**. Site da Associação Brasileira da Indústria Elétrica e Eletrônica. Disponível em:
<http://www.abinee.org.br/informac/arquivos/profotov.pdf>, 2012. Acesso em: 18 jan. 2020.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT. **NBR 10899**: Energia solar fotovoltaica – Terminologia. Rio de Janeiro, 2013.
- Banco de Informações de Geração – BIG. **Matriz de Energia Elétrica**. Disponível em:
<https://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/OperacaoCapacidadeBrasil.cfm>. Acesso em: 01 fev. 2020.
- COMETTA, Emilio. **Energia solar**. São Paulo: Editora Hemus, 2004.

ESPOSITO, Alexandre Siciliano; FUCHS, Paulo Gustavo. Desenvolvimento tecnológico e inserção da energia solar no Brasil. **Revista do BNDES**, Rio de Janeiro, n. 40, p. 85-113, dez. 2013.

Laboratório de Modelagem e Estudos de Recursos Renováveis de Energia – LABREN. **Atlas Brasileiro de Energia Solar - 2ª Edição (2017)**. Disponível em: http://labren.ccst.inpe.br/atlas_2017.html. Acesso em: 18 nov. 2019.

LOPEZ, Ricardo Aldabó. **Energia Solar para Produção de Eletricidade**. São Paulo: Artliber, 2012.

NARIMATU, Beatrice Ryie Shimoura; CRIBARI, Felipe Alvim; GUIMARÃES, Warley Teixeira. **Avaliação de desempenho de um sistema fotovoltaico comercial de 14,56 kWp no município de Serra**. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENERGIA SOLAR, 7., 2018, Gramado. **Anais**. Gramado: Centro Universitário Faesa, 2018.

NASCIMENTO, Mario Elias Carvalho do. **Avaliação econômica de sistemas fotovoltaicos conectados à rede para empreendimentos do agronegócio**. 2019. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Energia na Agricultura) - Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Cascavel-PR, 2019.

National Renewable Energy Laboratory – NREL. **Best Research-Cell Efficiency Chart**. Disponível em: <https://www.nrel.gov/pv/cell-efficiency.html>. Acesso em: 13 fev. 2020.

PEREIRA, Enio Bueno *et al.* **Atlas Brasileiro de Energia Solar**. 2. ed. São José dos Campos: MICTIC, 2017.

PINHO, João Tavares; GALDINO, Marco Antônio. **Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos**. Rio de Janeiro: CEPEL/CRESESB, 2014.

RIBEIRO, Uirê Guimarães Veira. **Estudo de Viabilidade Econômica de Instalação de Fontes de Energia Renováveis Baseadas em Células Fotovoltaicas Para o Uso Residencial**. Orientador: Rogério Andrade Flauzino. 2012. Trabalho de conclusão de curso (Engenharia Elétrica com Ênfase em Sistemas de Energia e Automação) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2012.

SCHENKEL, Gabriela. **Monitoramento e análise de um sistema fotovoltaico conectado à rede com uso de microinversor**. Orientador: Prof. Dr. João Batista Dias. 2015. Dissertação de Mestrado (Bacharel em Engenharia Civil) - Universidade do Vale do Rio dos Sinos, São Leopoldo, 2015.

SIQUEIRA, Luciana Maria Paulo de. **Viabilidade da microgeração de energia elétrica em uma residência por um sistema composto por painéis fotovoltaicos conectados à rede.** Orientador: Luís Otávio Cocito de Araújo. 2013. Trabalho de conclusão de curso (Bacharel em Engenharia Civil) - Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2013.

TEIXEIRA, Alexandre de Almeida; CARVALHO, Matheus Costa; LEITE, Leonardo Henrique de Melo. Análise de viabilidade para a implantação do sistema de energia solar residencial. 2011. **Revista E-xacta**. Disponível em: www.unibh.br/revistas/exacta/. Acesso em: 10 out. 2019.

TORRES, Regina Célia. **Energia solar fotovoltaica como fonte alternativa de geração de energia elétrica em edificações residenciais.** Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2012.

UFERSA. **Geração de Energia Elétrica.** Disponível em: <https://usinasolar.ufersa.edu.br/geracao-de-energia-eletrica/>. Acesso em: 01 jan. 2020.

WANDERLEY, Silvaney Stonny Cordeiro. **Energia solar fotovoltaica: potencial nordestino com enfoque em Alagoas e seus impasses políticos e econômicos para a micro e minigeração distribuída.** Trabalho de conclusão de curso – Universidade Federal de Alagoas (UFAL), Santana do Ipanema, 2017.

ZILLES, Roberto *et al.* **Sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica.** São Paulo: Oficina de Textos, 2012.

ANEXO A – Folha de especificações do módulo fotovoltaico DUOMAX Dual Glass 72-Cell pertencente ao fabricante Trina Solar

Mono **Multi** Solutions

THE DUOMAX

DUAL GLASS 72-CELL MODULE



72 CELL
MULTICRYSTALLINE MODULE

320-340W
POWER OUTPUT RANGE

17.3%
MAXIMUM EFFICIENCY

0~+5W
POSITIVE POWER TOLERANCE

Founded in 1997, Trina Solar is the world's leading comprehensive solutions provider for solar energy. we believe close cooperation with our partners is critical to success. Trina Solar now distributes its PV products to over 60 countries all over the world. Trina is able to provide exceptional service to each customer in each market and supplement our innovative, reliable products with the backing of Trina as a strong, bankable partner. We are committed to building strategic, mutually beneficial collaboration with installers, developers, distributors and other partners.

Comprehensive Products And System Certificates

IEC61215/IEC61730/UL1703/IEC61701/IEC62716
ISO 9001: Quality Management System
ISO 14001: Environmental Management System
ISO14064: Greenhouse gases Emissions Verification
OHSAS 18001: Occupation Health and Safety Management System










Trinasolar



Highly reliable due to stringent quality control

- PID resistant and free of snail trails
- Increased module robustness to minimize micro-cracks
- 100% EL double inspection



Enhanced safety

- Fire class A certified by TUV Rheinland according to fire test IEC 61730-2/MST 23
- Certified for fire type13 (UL 1703)



Increased value

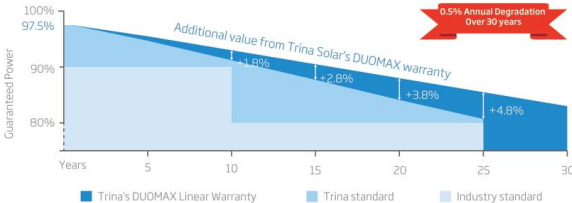
- Higher maximum system voltage reduces BOS costs
- 30 year linear warranty
- 0.5% annual degradation
- Low thermal coefficients for more energy production at higher temperatures



Certified to withstand the most challenging environmental conditions

- Module coating resistant to sand, acid, and alkali
- 2400 Pa wind load
- 5400 Pa snow load
- 35 mm hail stones at 97 km/h

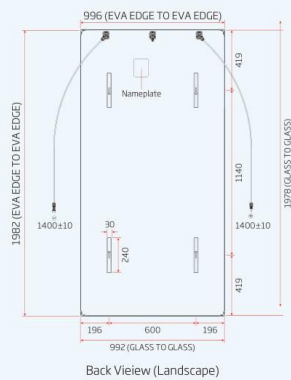
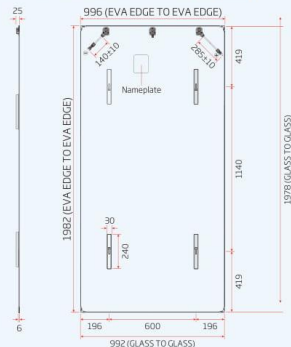
Trina Solar's DUOMAX Linear Performance Warranty



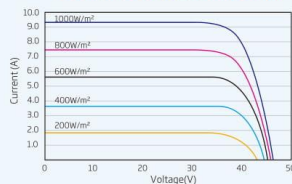
Years	Trina's DUOMAX Linear Warranty (%)	Trina standard (%)	Industry standard (%)
0	97.5%	97.5%	97.5%
10	97.0%	96.5%	96.0%
15	96.5%	96.0%	95.5%
20	96.0%	95.5%	95.0%
25	95.5%	95.0%	94.5%
30	95.0%	94.5%	94.0%

PRODUCTS	INSTALLATION METHODS	POWER RANGE
TSM-PEG14	Clamp	320-340W
TSM-PEG14.40	Gecko Grip	320-340W

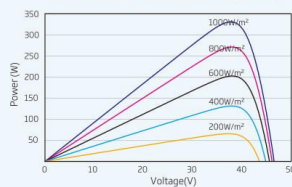
DIMENSIONS OF PV MODULE(mm)



I-V CURVES OF PV MODULE(335W)



P-V CURVES OF PV MODULE(335W)



ELECTRICAL DATA (STC)

Peak Power Watts- P_{MAX} (W)*	320	325	330	335	340
Power Output Tolerance- P_{MAX} (W)	0 ~ +5				
Maximum Power Voltage- V_{MPP} (V)	37.2	37.4	37.6	37.8	38.0
Maximum Power Current- I_{MPP} (A)	8.60	8.69	8.78	8.87	8.95
Open Circuit Voltage- V_{OC} (V)	45.4	45.6	45.8	46.0	46.2
Short Circuit Current- I_{SC} (A)	9.23	9.27	9.31	9.35	9.39
Module Efficiency η_m (%)	16.3	16.6	16.8	17.1	17.3

STC: Irradiance 1000W/m², Cell Temperature 25°C, Air Mass AM1.5.
*Measuring tolerance: $\pm 3\%$.

ELECTRICAL DATA (NOCT)

Maximum Power- P_{MAX} (Wp)	237	241	245	249	252
Maximum Power Voltage- V_{MPP} (V)	34.4	34.6	34.8	35.0	35.2
Maximum Power Current- I_{MPP} (A)	6.90	6.97	7.04	7.11	7.18
Open Circuit Voltage- V_{OC} (V)	42.0	42.2	42.4	42.6	42.8
Short Circuit Current- I_{SC} (A)	7.45	7.48	7.52	7.55	7.58

NOCT: Irradiance at 800W/m², Ambient Temperature 20°C, Wind Speed 1m/s.

MECHANICAL DATA

Solar Cells	Multicrystalline 156.75 × 156.75 mm (6 inches)
Cell Orientation	72 cells (6 × 12)
Module Dimensions	1978 × 992 × 6 mm (77.9 × 39.1 × 0.236 inches) 1982 × 996 × 6 mm with edge banding (78.0 × 39.2 × 0.236 inches) 1984 × 998 × 7.6 mm with corner protector (78.1 × 39.3 × 0.299 inches) (Std)*
Weight	28.0 kg (61.7 lb)
Front Glass	2.5 mm (0.10 inches), High Transmission, AR Coated Heat Strengthened Glass
EVA	White
Back Glass	2.5 mm (0.10 inches), Heat Strengthened Glass
Frame	Frameless
J-Box	IP 67 or IP 68 rated
Cables	Photovoltaic Technology Cable 4.0 mm ² (0.006 inches ²) Portrait: 140/285 mm (5.5/11.2 inches) Landscape: 1400/1400 mm (55.1/55.1 inches)
Connector	UTX/MC4 EVO2/TS4**

*Not apply to slide-in solution project.

**Please refer to regional datasheet for specified connector.

TEMPERATURE RATINGS

NOCT (Nominal Operating Cell Temperature)	44°C ($\pm 2^\circ\text{C}$)
Temperature Coefficient of P_{MAX}	-0.41%/°C
Temperature Coefficient of V_{OC}	-0.32%/°C
Temperature Coefficient of I_{SC}	0.05%/°C

MAXIMUM RATINGS

Operational Temperature	-40 ~ +85°C
Maximum System Voltage	1500V DC (IEC)
	1000V DC (UL)
Max Series Fuse Rating	15A

(DO NOT connect Fuse in Combiner Box with two or more strings in parallel connection)

WARRANTY

10 year Product Workmanship Warranty
30 year Linear Power Warranty

(Please refer to product warranty for details)

PACKAGING CONFIGURATION

Modules per box: 33 pieces
Modules per 40' container: 726 pieces

MORE OPTIONS

More Options	☐ Compact AR Coating
	☐ POE (Polyolefin Elastomer) Adhesive

ANEXO B – Folha de especificações do inversor de frequência *Sunny Tripower* pertencente ao fabricante SMA

SUNNY TRIPOWER 15000TL / 20000TL / 25000TL



Efficient

- Maximum efficiency of 98.4%

Safe

- DC surge arrester (SPD type II) can be integrated

Flexible

- DC input voltage of up to 1000 V
- Multistring capability for optimum system design
- Optional display

Innovative

- Cutting-edge grid management functions with Integrated Plant Control
- Reactive power available 24/7 (Q on Demand 24/7)

SUNNY TRIPOWER 15000TL / 20000TL / 25000TL

The versatile specialist for large-scale commercial plants and solar power plants

The Sunny Tripower is the ideal inverter for large-scale commercial and industrial plants. Not only does it deliver extraordinary high yields with an efficiency of 98.4%, but it also offers enormous design flexibility and compatibility with many PV modules thanks to its multistring capabilities and wide input voltage range.

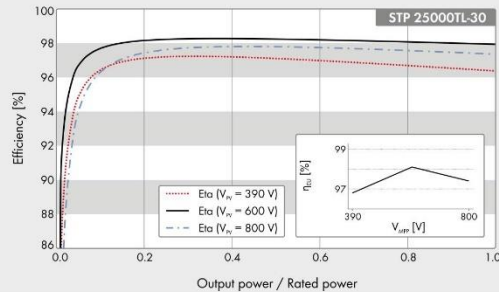
The future is now: the Sunny Tripower comes with cutting-edge grid management functions such as Integrated Plant Control, which allows the inverter to regulate reactive power at the point of common coupling. Separate controllers are no longer needed, lowering system costs. Another new feature—reactive power provision on demand (Q on Demand 24/7).

SUNNY TRIPOWER

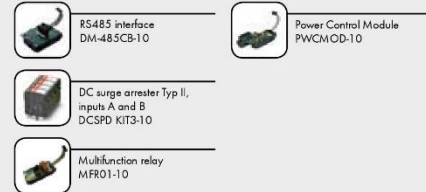
15000TL / 20000TL / 25000TL

Technical Data	Sunny Tripower 15000TL
Input (DC)	
Max. generator power	27000 Wp
DC rated power	15330 W
Max. input voltage	1000 V
MPP voltage range / rated input voltage	240 V to 800 V / 600 V
Min. input voltage / start input voltage	150 V / 188 V
Max. input current input A / input B	33 A / 33 A
Number of independent MPP inputs / strings per MPP input	2 / A:3; B:3
Output (AC)	
Rated power (at 230 V, 50 Hz)	15000 W
Max. AC apparent power	15000 VA
AC nominal voltage	3 / N / PE; 220 V / 380 V 3 / N / PE; 230 V / 400 V 3 / N / PE; 240 V / 415 V
AC voltage range	180 V to 280 V
AC grid frequency / range	50 Hz / 44 Hz to 55 Hz 60 Hz / 54 Hz to 65 Hz
Rated power frequency / rated grid voltage	50 Hz / 230 V
Max. output current / rated output current	29 A / 21.7 A
Power factor at rated power / Adjustable displacement power factor	1 / 0 overexcited to 0 underexcited
THD	≤ 3%
Feed-in phases / connection phases	3 / 3
Efficiency	
Max. efficiency / European Efficiency	98.4% / 98.0%
Protective devices	
DC-side disconnection device	●
Ground fault monitoring / grid monitoring	● / ●
DC surge arrester (Type II) can be integrated	○
DC reverse polarity protection / AC short-circuit current capability / galvanically isolated	● / ● / -
All-pole sensitive residual-current monitoring unit	●
Protection class (according to IEC 62109-1) / overvoltage category (according to IEC 62109-1)	1 / AC: III; DC: II
General data	
Dimensions (W / H / D)	661 / 682 / 264 mm (26.0 / 26.9 / 10.4 inch)
Weight	61 kg (134.48 lb)
Operating temperature range	-25 °C to +60 °C (-13 °F to +140 °F)
Noise emission (typical)	51 dB(A)
Self-consumption (at night)	1 W
Topology / cooling concept	Transformerless / Opticool
Degree of protection (as per IEC 60529)	IP65
Climatic category (according to IEC 60721-3-4)	4K4H
Maximum permissible value for relative humidity (non-condensing)	100%
Features / function / Accessories	
DC connection / AC connection	SUNCLIX / spring-cage terminal
Display	○
Interface: RS485, Speedwire / Webconnect	○ / ●
Data interface: SMA Modbus / SunSpec Modbus	● / ●
Multifunction relay / Power Control Module	○ / ○
OptiTrac Global Peak / Integrated Plant Control / Q on Demand 24/7	● / ● / ●
Off-Grid capable / SMA Fuel Save Controller compatible	● / ●
Guarantee: 5 / 10 / 15 / 20 years	● / ○ / ○ / ○
Planned certificates and permits	ANRE 30, AS 4777, BDEW 2008, C10/11 2012, CE, CEI 0-16, CEI 0-21, DEWA 2.0, EN 50438:2013*, G59/3, IEC 60068-2-x, IEC 61727, IEC 62109-1/2, IEC 62116, MEA 2013, NBR 16149, NEN EN 50438, NRS 0972-1, PEA 2013, PPC, RD 1699/413, RD 661/2007, Res. n° 7/2013, SI4777, TOR D4, TR 3.2.2, UTE C15-712-1, VDE 0126-1-1, VDE AR-N 4105, VFR 2014
* Does not apply to all national appendices of EN 50438	
Type designation	STP 15000TL-30

Efficiency Curve



Accessory



● Standard features ○ Optional features — Not available
Data at nominal conditions
Status: October 2017

Technical Data

Input (DC)

Max. generator power
DC rated power
Max. input voltage
MPP voltage range / rated input voltage
Min. input voltage / start input voltage
Max. input current input A / input B
Number of independent MPP inputs / strings per MPP input

Output (AC)

Rated power (at 230 V, 50 Hz)
Max. AC apparent power
AC nominal voltage
AC voltage range
AC grid frequency / range
Rated power frequency / rated grid voltage
Max. output current / Rated output current
Power factor at rated power / Adjustable displacement power factor
THD
Feed-in phases / connection phases

Efficiency

Max. efficiency / European Efficiency

Protective devices

DC-side disconnection device
Ground fault monitoring / grid monitoring
DC surge arrester (Type II) can be integrated
DC reverse polarity protection / AC short-circuit current capability / galvanically isolated
All-pole sensitive residual-current monitoring unit
Protection class (according to IEC 62109-1) / overvoltage category (according to IEC 62109-1)

General data

Dimensions (W / H / D)
Weight
Operating temperature range
Noise emission (typical)
Self-consumption (at night)
Topology / cooling concept
Degree of protection (as per IEC 60529)
Climatic category (according to IEC 60721-3-4)
Maximum permissible value for relative humidity (non-condensing)

Features / function / Accessories

DC connection / AC connection
Display
Interface: RS485, Speedwire/Webconnect
Data interface: SMA Modbus / SunSpec Modbus
Multifunction relay / Power Control Module
OptiTrac Global Peak / Integrated Plant Control / Q on Demand 24/7
Off-Grid capable / SMA Fuel Save Controller compatible
Guarantee: 5 / 10 / 15 / 20 years
Certificates and permits (more available on request)

* Does not apply to all national appendices of EN 50438

Type designation

Sunny Tripower 20000TL

36000 W_p
20440 W
1000 V
320 V to 800 V / 600 V
150 V / 188 V
33 A / 33 A
2 / A:3; B:3

Sunny Tripower 25000TL

45000 W_p
25550 W
1000 V
390 V to 800 V / 600 V
150 V / 188 V
33 A / 33 A
2 / A:3; B:3

3 / N / PE; 220 V / 380 V
3 / N / PE; 230 V / 400 V
3 / N / PE; 240 V / 415 V
180 V to 280 V
50 Hz / 44 Hz to 55 Hz
60 Hz / 54 Hz to 65 Hz
50 Hz / 230 V
29 A / 29 A
36.2 A / 36.2 A
1 / 0 overexcited to 0 underexcited
≤ 3%
3 / 3

98.4% / 98.0%

98.3% / 98.1%

●
● / ●
○
● / ● / —
●
I / AC; III; DC: II

661 / 682 / 264 mm (26.0 / 26.9 / 10.4 inch)
61 kg (134.48 lb)
-25 °C to +60 °C (-13 °F to +140 °F)
51 dB(A)
1 W
Transformerless / Opticool
IP65
4K4H
100%

SUNCLIX / spring-cage terminal
○
○ / ●
● / ●
○ / ○
● / ● / ●
● / ●
● / ○ / ○ / ○

ANRE 30, AS 4777, BDEW 2008, C10/11:2012, CE, CEI 0-16, CEI 0-21, DEWA 2.0, EN 50438 2013*, G59/3, IEC 60068-2-xx, IEC 61727, IEC 62109-1/2, IEC 62116, MEA 2013, NBR 16149, NEN EN 50438, NRS 0972-1, PEA 2013, PPC, RD 1699/413, RD 661/2007, Res. n°7:2013, SI4777, TOR D4, TR 3 2 2, UTE C15712-1, VDE 0126-1-1, VDE-AR-N 4105, VFR 2014

STP 20000TL-30

STP 25000TL-30

