

**FACULDADE EDUFOR
CURSO: ENGENHARIA CIVIL**

WESLEY LEONARDO SILVA NUNES

**ESTUDO SOBRE GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA ATRAVÉS
DOS SISTEMAS FOTOVOLTAICOS ON-GRID E OFF-GRID**

**São Luís - MA
2022**

WESLEY LEONARDO SILVA NUNES

**ESTUDO SOBRE GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA ATRAVÉS
DOS SISTEMAS FOTOVOLTAICOS ON-GRID E OFF-GRID**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à
Faculdade Edufor de São Luís, como requisito
parcial para a obtenção do título de bacharel em
Engenharia Civil.

Orientador: Prof^a Mcs Franklin Roosevelt
Rodrigues do Ó

São Luís - MA
2022

N972e Nunes, Wesley Leonardo Silva

Estudo sobre geração de energia elétrica através dos sistemas fotovoltaicos on-grid e off-grid / Wesley Leonardo Silva Nunes – São Luis - MA, 2022.

41 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (ENGENHARIA CIVIL) — Faculdade Edufor - São Luís, 2022.

Orientador(a) : Franklin Roosevelt Rodrigues do Ó

1. Energia solar. 2. Sistema Fotovoltaica. 3. Geração de energia. I. Título.

FACULDADE EDUFOR SÃO LUÍS

CDU 621.47

WESLEY LEONARDO SILVA NUNES

**ESTUDO SOBRE GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA ATRAVÉS DOS
SISTEMAS FOTOVOLTAICOS ON-GRID E OFF-GRID**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à
Faculdade Edufor de São Luís, como requisito
parcial para a obtenção do título de bacharel em
Engenharia Civil.

BANCA EXAMINADORA

Prof. MSc. Franklin Roosevelt Rodrigues do Ó

Prof. MSc. José Átila Matos Aroucha Junior

Prof. Michel Angelo Fonseca Coelho

São Luís-MA, 2022

“Nossos fracassos são, às vezes, mais
frutíferos que nosso êxito” (Henry Ford)

RESUMO

Ao longo dos anos, a energia solar ganhou grande importância como uma fonte de energia renovável e econômica. Considerando seu alto custo inicial, muitas pessoas têm mostrado resistência em comprá-lo. À medida que a população cresce, cresce também a demanda de energia. Os meios sustentáveis são a alternativa escolhida e a energia solar fotovoltaica é uma delas. A energia solar fotovoltaica é uma das principais fontes de energia limpa para geração de eletricidade. Entretanto, os altos custos de instalação ainda são considerados como a principal limitação para a promoção deste tipo de energia. O objetivo deste trabalho é analisar a viabilidade econômica dos sistemas FV conectados a uma rede de geração de eletricidade residencial. Por meio de uma análise financeira do estudo, obtivemos resultados expressos e positivos em relação à geração de energia solar fotovoltaica, tendo um tempo de retorno calculado que leva a um rápido retorno sobre o valor se tratado para a execução do investimento.

Palavras-chave: Energia solar. Sistema Fotovoltaica. Geração de energia.

LEONARDO, WESLEY. **ESTUDO SOBRE GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA ATRAVÉS DOS SISTEMAS FOTOVOLTAICOS ON-GRID E OFF-GRID**. 2022. 44 folhas. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharel em Engenharia Civil) – Faculdade Edufor, São Luis, 2022..

ABSTRACT

Over the years, solar energy has gained great importance as a renewable and cost-effective energy source. Considering its high initial cost, many people have been reluctant to buy it. As the population grows, so does the demand for energy. Sustainable means are the chosen alternative and photovoltaic solar energy is one of them. Photovoltaic solar energy is one of the main sources of clean energy for electricity generation. However, the high installation costs are still considered as the main limitation for the promotion of this type of energy. The objective of this work is to analyze the economic viability of PV systems connected to a residential electricity generation network. Through a financial analysis of the study, we obtained express and positive results in relation to the generation of photovoltaic solar energy, having a calculated payback time that leads to a quick return on the value treated for the execution of the investment.

Keywords: Solar energy. Sytem Photovoltaic. Energy generation

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1: Representação do processo de conversão fotovoltaica	17
Figura 2: Evolução da Eficiência das Células Fotovoltaicas.	19
Figura 3: Camda célula solar	21
Figura 4: Nível de materiais semicondutores tipo P e N	22
Figura 5: Escala de radiação solar.....	26
Figura 6: Diagrama de um SFV residencial.....	30
Figura 7: Estrutura de um sistema FV fora da rede.	34
Figura 8: Estrutura de um sistema fotovoltaico On-Grid.....	35

LISTA DE QUADROS

Quadro 1: Definição de Energia Fotovoltaica.....	18
--	----

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica

IEEE – Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	13
2 A ENERGIA SOLAR COMO FONTE DE ENERGIA ALTERNATIVA	15
2.1 ENERGIA SOLAR	15
2.2 ENERGIA FOTOVOLTAICA.....	16
2.3 O EFEITO FOTOVOLTAICO	20
3 A RADIAÇÃO SOLAR.....	23
4 ENERGIA SOLAR	27
4.1 ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA	29
4.2 SISTEMA FOTOVOLTAICO OFF-GRID	34
4.3 SISTEMA FOTOVOLTAICO ON-GRID.....	34
4.4 COMPONENTES DO SISTEMA FOTOVOLTAICAS	35
4.5 DESEMPENHOS DO GERADOR FOTOVOLTAICO	39
5 IMPACTOS ECONÔMICOS.....	40
CONCLUSÃO.....	42
REFERÊNCIAS.....	43

1 INTRODUÇÃO

Dada a atual situação ambiental em que o planeta se encontra, estamos conscientes da crescente necessidade de utilizar fontes alternativas de energia para gerar eletricidade, já que muitas vezes se levantaram nas últimas décadas indicando que os combustíveis fósseis estão chegando ao fim e que essas fontes de energia têm um enorme impacto sobre o meio ambiente, levando à conclusão de que é essencial adotar soluções e tecnologias limpas que estejam de acordo com o conceito de desenvolvimento sustentável.

Uma dessas alternativas é o uso da energia solar, que pode ser utilizada de diversas maneiras, uma das quais é fotovoltaica, um sistema capaz de gerar eletricidade através da radiação solar.

Pode-se definir a energia solar fotovoltaica é um processo de captação da energia do sol através de dispositivos conhecidos como células fotovoltaicas, convertendo-a em eletricidade que funcionam utilizando o princípio do efeito fotovoltaico (ESG POWER,2022).

Uma questão que atualmente é motivo de preocupação em todo o mundo é a sustentabilidade. O uso consciente dos recursos naturais é o objetivo, conforme (CORREA, [s.d.]), estes recursos podem ser utilizados para geração de vários tipos de energia, incluindo a elétrica utilizada para uso residencial e industrial. A energia solar é, portanto, uma boa maneira de trabalhar com o futuro do planeta e da economia. Os modelos mais simplificados de aproveitamento da energia solar incluem painéis solares fotovoltaicos, que servem para aquecer água para uso em residências. Porém, a energia solar vai muito mais longe com o chamado sistema solar fotovoltaico. Nele possuem células fotovoltaicas que captam a energia da radiação solar e a convertem em eletricidade através de um dispositivo geralmente feito de silício, um processo semelhante ao das luzes LED. Esta energia pode ser usada como fonte para vários dispositivos eletrônicos em residências e especialmente na indústria, que é o principal consumidor de eletricidade (SOLARVOLT, 2020).

De acordo com (ANEEL), no Brasil estima-se que até 2024, cerca de 1,2 milhões de geradores de energia fotovoltaica serão instalados em empresas e residências. Isto corresponde a 15% da matriz energética do país. Estima-se que o

mercado de energia solar vai movimentar cerca de 100 bilhões na economia brasileira e criar cerca de 1 milhão de empregos até 2030 (DUSOL, 2019).

Os sistemas fotovoltaicos (PVS) são uma tecnologia que pode fornecer eletricidade sustentável e reduzir a carga de combustíveis fósseis sobre o meio ambiente, e têm atraído cada vez mais atenção nos últimos anos. A indústria que utiliza energia solar pode definitivamente ser considerada como a melhor opção para as necessidades energéticas futuras, pois se sobressaem em termos de disponibilidade, custo-benefício, acessibilidade, capacidade e eficiência em comparação com outras fontes renováveis de energia (KANNAN; VAKEESAN, 2016).

Os sistemas solares consistem na instalação de painéis fotovoltaicos, conectados em paralelo à rede residencial/empresa, removendo a necessidade de alterar as instalações já existentes. A energia gerada tem o consumo dentro da residência ou empresa e seu excedente é injetado diretamente na rede de distribuição. O medidor de eletricidade é substituído por um medidor bidirecional, medindo a energia que foi gerada e a energia que foi consumida. No final do mês, os clientes recebem uma conta diferenciada que mostra seu consumo e produção. Toda a energia excedente produzida pelo cliente gerará um crédito que poderá ser utilizado dentro de 60 meses. A economia nas contas de eletricidade pode chegar a 95% (TECNOLUZ, SA).

Assim, foi realizado o seguinte questionamento: Economicamente seria viável a implantação do sistema fotovoltaico na geração de energia elétrica para uso residencial?

O objetivo geral foi analisar a viabilidade econômica dos sistemas Fotovoltaico conectado a uma rede de geração de eletricidade residencial.

Os objetivos específicos foram: Conceituar a energia solar fotovoltaica em residência, Apresenta o método aplicado da energia solar fotovoltaico em residência e analisar os tipos de sistema fotovoltaico.

Para a elaboração desta pesquisa sera realizada uma revisão por meio do método de pesquisa bibliográfico. Serão realizadas consultas em livros, revistas e que abordam o tema proposto, bem como trabalhos científicos como artigos publicados. Serão utilizadas bases de dados com o Google Acadêmico e em site confiáveis, para tanto as palavras-chaves utilizadas nas pesquisas serão energia solar; sistema fotovoltaico; geração de energia.

2 A ENERGIA SOLAR COMO FONTE DE ENERGIA ALTERNATIVA

A Energia Solar é uma fonte que depende diretamente da irradiação solar, sua geração começa da captação dos raios solares, e com a ajuda de equipamentos, transforma os raios capturados em outra fonte de energia.

Conforme Motta (2005), a radiação sofrida em determinado ponto da superfície nunca vai ser igual à constante solar, pois sofrerá algumas influências, são elas a Latitude, Condições do céu, a hora do dia e a estação do ano em que se encontra o ambiente comparado.

A Conversão de Raios Solar em energia nos permite várias opções de aplicações em sistemas domésticos, como por exemplo, em ar condicionado, chuveiros, comunicação, veículos, bombeamento de água e até mesmo para a recarga de baterias.

2.1 ENERGIA SOLAR

Porem ao se falar em energia solar é importante ressaltar que ela não é uma fonte de energia nova, pois vem ao longo dos anos sendo estudada. Segundo Cerveira (2012), ao passar do tempo, foram efetuadas diversas experiências no campo de aproveitamento solar para produção de energia, no começo os resultados não foram satisfatórios, mas ao passar dos anos foi considerado haver condições para aplicação com rendimentos satisfatórios para a produção em grandes escalas, comparado com outras fontes de produção de energia.

A utilização de energia solar começou a aparecer aproximadamente durante o início do século XX, que de acordo com revistas da época, teria sido no ano de 1930, ao qual esse aproveitamento teria acometido alguns interesses em universidades do EUA, com o intuito de promover a obtenção de água quente para usos sanitários domésticos nas zonas mais isoladas das grandes cidades, aos quais na época tinham grandes custos e dificuldades para o abastecimento de combustíveis convencionais (CERVEIRA, 2012).

Através do aproveitamento dos raios solares pode se destacar duas principais fontes de energia renováveis que vem sendo estudadas e utilizadas, sendo elas a: Energia solar térmica (Efeito Termossifão) e Energia solar elétrica (Fotovoltaica).

2.2 ENERGIA FOTOVOLTAICA

A comercialização de sistemas fotovoltaicos iniciou-se no Brasil no final da década de 70, na área de telecomunicações, com a produção de módulos a partir de células importadas dos Estados Unidos (MME, 2009).

Quando a empresa Heliodinâmica iniciou as atividades no Brasil, na década de 80, estava em vigor uma Lei intitulada de “Lei da informática”, criada com a intenção de preservar o mercado interno para fornecedores nacionais de equipamentos e programas de computador e telecomunicação (MME, 2009).

Com o advir do tempo problemas foram aparecendo na área de geração de energia no Brasil e no mundo, problemas esses relacionados ao meio ambiente e a falta de financiamentos nos setores energéticos renováveis. O conselho nacional do meio ambiente CONAMA (2017), estabelece um padrão nacional no que se refere licenciamento ambiental. No entanto propõe-se o uso racional da energia utilizando fontes alternativas que diminuam o impacto, na área social, econômica e ambiental.

De acordo com os dados atualizados da ANEEL (2022), o Brasil possui 25.405 usinas de geração de energia de diferentes tipos (eólica, hidrelétrica, solar, termelétrica e termonuclear).

Até então 22.980 estão em operação, gerando 190.367.989,45 KW de potência, 362 estão em desenvolvimento e outras 2.063 estão com a sua construção prevista (ANEEL, 2022).

Cerca de 57,62% do suprimento de energia elétrica do país provém de geração hidráulica, gerada por 724 centrais hidrelétricas em operação no Brasil, das quais 534 são empreendimentos de pequeno porte (ANEEL, 2022).

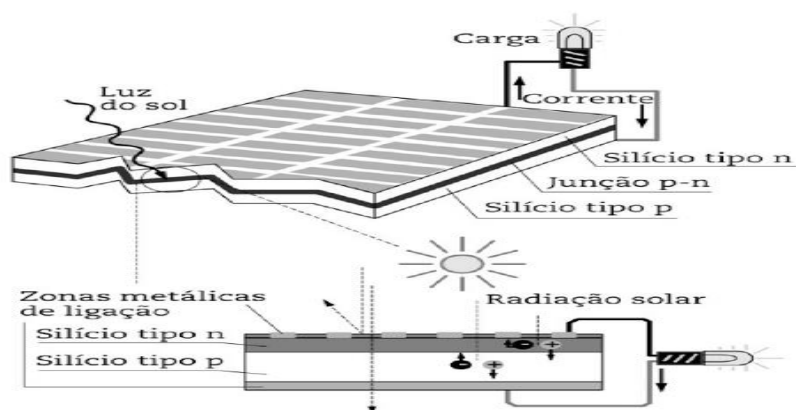
Apesar da importância dessa fonte, a conjuntura do setor elétrico brasileiro da demanda, escassez de oferta e restrições financeiras, socioeconômicas e ambientais à expansão do sistema gerador hidráulico nos demonstra que o suprimento futuro de energia elétrica exigirá maior aproveitamento de fontes alternativas (ANEEL, 2012).

A crise energética em 1973 aumentou a necessidade de estudar novas formas de energia, assim os pesquisadores pararam de estudar a energia solar só no espaço e pensaram em como trazer essa energia para a terra (PINHO; GALDINO, 2014 apud CEPEL, 2014).

Energia Solar Fotovoltaica é uma fonte de energia renovável obtida pela conversão de energia luminosa em energia elétrica. Não podendo jamais ser confundida com aquecimento solar, pois ele possui um princípio de funcionamento completamente distinto.

A energia solar fotovoltaica é feita através da conversão da radiação solar em eletricidade (efeito fotovoltaico) por meios de materiais semicondutores, como exemplo do silício. Existem no mercado vários semicondutores de conversão fotovoltaica. Os mais usados entre eles são: o silício amorfo e o cristalino. Conforme a Figura 1 do autor Zilles et al. (2012); ao qual ilustra o fenômeno da conversão de uma célula fotovoltaica.

Figura 1: Representação do processo de conversão fotovoltaica



Fonte: ZILLES et al. (2012).

Conforme Sampaio (2015), a energia solar fotovoltaica pode ser conceituada por diversos autores de formas diferentes, porém, com o mesmo sentido, desta forma a Quadro 1, com bases a diversos autores citados por Sampaio (2015), pode-se definir energia Fotovoltaica.

Quadro 1: Definição de Energia Fotovoltaica

Autor	Conceito de energia solar fotovoltaica
Green (2000)	É a conversão direta da luz solar em eletricidade.
Surek (2005)	Energia baseada na tecnologia de semicondutores que converte luz solar em eletricidade.
Hoffmann (2006)	É o método mais elegante para produzir eletricidade através da conversão da luz solar.
Rockett (2010)	Energia que converte a luz solar diretamente em eletricidade por meio de uma junção de diodo único (ou várias junções).
Kui-Qing e Shuit-Tong (2011)	Geração direta de energia elétrica a partir da luz solar.
Silveira, Tunas e Lama (2013)	Fonte de energia renovável obtida pela conversão de energia solar luminosa em energia elétrica.
Peng, Lu e Yang (2013)	Energia que gera eletricidade a partir da energia solar.
Tyagi <i>et al.</i> (2013)	Conversão direta da radiação solar em eletricidade.
Mundo-Hernández <i>et al.</i> (2014)	Fonte de energia que converte a luz em eletricidade diretamente, sem emissões de gases ou ruídos.

Fonte: SAMPAIO, 2015.

Segundo Pinho citado por Galdino (2014), as principais tecnologias aplicadas para a produção de células e módulos fotovoltaicas são classificadas em três gerações, sendo elas a primeira geração divididas entre o Silício Monocristalino (m-Si) e Silício Policristalino, que representam maior parte de placas existentes no mercado, por serem consideradas tecnologias confiáveis e melhor eficiência comercialmente disponíveis.

A Segunda Geração é denominada de Filmes Finos e são divididas em três cadeias, sendo elas o Silício Amorfo (a-Si), disseleneto de cobre e índio (CIS) e telureto de cádmio (CdTe). Sendo essa com uma eficiência de geração menor que a primeira classe, porém com uma modesta participação no mercado (PINHO; GALDINO, 2014).

A Terceira Classe segundo Pinho; Galdino (2014), se encontram em fase de Pesquisa e Desenvolvimento e estão divididas em três cadeias de produção, sendo elas a primeira cadeia, a célula fotovoltaica multijunção e célula fotovoltaica para concentração (CPV), a segunda sendo a Célula sensibilizada por corante (DSSC) e a terceira a Célula orgânica ou poliméricas (OPV).

De acordo com o IEEE – Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos a terceira geração é definida como:

Célula que permitem uma utilização mais eficiente da luz solar que as células baseadas em um único band-gap eletrônico. De forma geral, a terceira

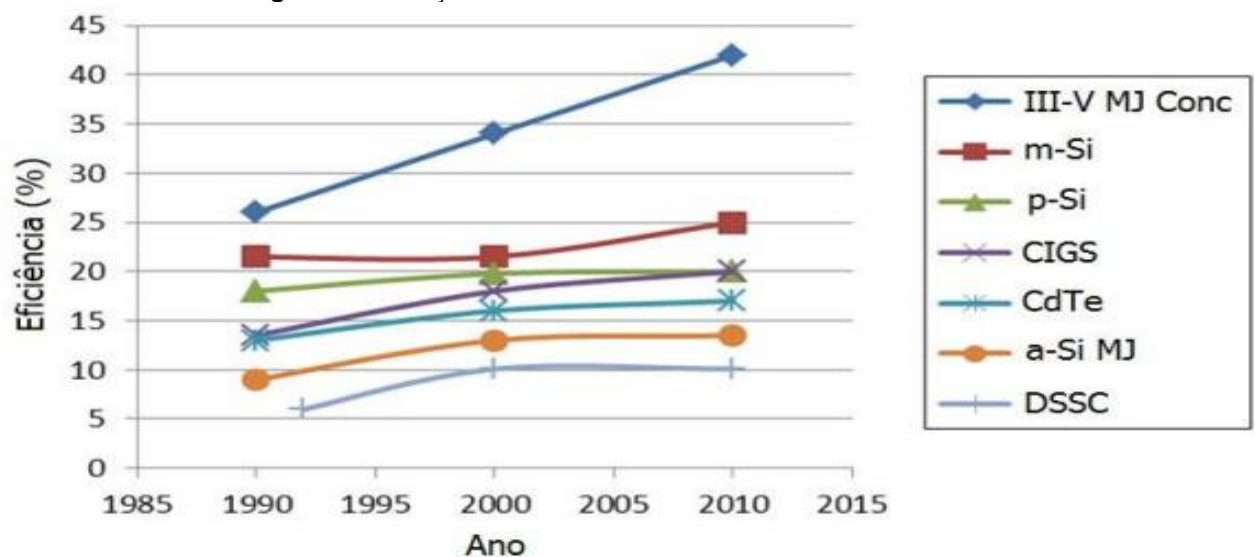
geração deve altamente eficiente, possuir baixo custo/watt e utilizar materiais abundantes e de baixa toxicidade. (IEEE,2014).

A energia solar fotovoltaica pode ser aproveitada de duas formas isoladas ou conectadas à rede elétrica. As células fotovoltaicas são constituídas por um material semicondutor (silício) onde são adicionadas substâncias, chamadas dopantes, para o desenvolvimento de um meio adequado ao estabelecimento do efeito fotovoltaico, isto é, conversão direta da potência associada à radiação solar em potência elétrica DC (Castro, 2002).

Conforme Aldabó (2002), a eficiência do sistema depende da fração de energia solar que atinge a célula e que é convertida em potência elétrica, tensão X corrente. A eficiência máxima é obtida quando a potência é máxima. O mesmo afirma devido aos testes realizados em laboratório demonstraram que a vida útil dos módulos fotovoltaicos é superior a 20 anos. Os demais componentes do sistema apresentam vida útil variável: baterias entre 5 a 15 anos, e os componentes eletrônicos em torno de 10 anos.

A tecnologia fotovoltaica, com o passar dos anos, tem mostrado um potencial para tornar se uma das fontes de eletricidade predominantes no planeta, com um crescimento contínuo e robusto mesmo em tempos de crise econômica e financeira. A Figura 2 mostra a evolução da eficiência de produção de energia das principais células fotovoltaica no período dos anos de 1985 a 2010.

Figura 2: Evolução da Eficiência das Células Fotovoltaicas.



Fonte: PINHO; GALDINO (2014).

Desse modo espera-se que esse crescimento continue, baseado pela conscientização sobre as vantagens da energia fotovoltaica. (ABINEE, 2012).

No final de 2009, a capacidade instalada acumulada de sistemas fotovoltaicos eram de aproximadamente 23 GW. Um ano depois era de 40 GW. Em 2011, mais de 69 GW estão instalados no mundo, podendo produzir 85 TWh de eletricidade a cada ano. Esse volume de energia é suficiente para abastecer a necessidade anual de mais de 20 milhões de casas (ABINEE, 2012).

2.3 O EFEITO FOTOVOLTAICO

Conhecemos o efeito fotovoltaico desde 1839 quando Edmond Becquerel o descreveu como o aparecimento de uma diferença de potencial nos polos de uma estrutura de material semicondutor, produzida pela absorção da luz. (TIRADENTES, 2006).

O Efeito fotovoltaico dá-se em materiais da natureza denominados semicondutores, que são materiais que conduzem eletricidade de forma mais efetiva que os isolantes e menos do que os condutores (BRAGA, 2008).

Na Tabela periódica, os elementos semicondutores pertencem principalmente aos grupos 14 a 16, incluindo o Silício, Arsênio, Germânio, Carbono, Fósforo, Selênio e Telúrio. Além desses existem diversos compostos Binários, ternários e até quaternários, incluindo diversos grupos da tabela periódica, que também são denominados semicondutores (PINHO; GALDINO, 2014).

As células fotovoltaicas são mais encontradas e fabricadas por Silício, seus átomos se caracterizam por possuírem quatro elétrons que se ligam aos vizinhos, formando uma rede de estrutura cristalina (BRAGA, 2008).

A Forma encontrado do Silício é em areia, que através de um processo complexo é transformado em um cristal, porem somente uma célula construída de cristal puro não produzirá energia elétrica, pois os elétrons passariam para a banda de condução, mas acabariam por se combinar com as lacunas, não originando qualquer tipo de corrente elétrica (CASTRO, 2002).

Para que haja corrente elétrica é necessário que exista um campo elétrico, ou seja uma DDP em as duas zonas das células, através da combinação do Silício com

outros materiais conhecido pelo processo de dopagem é possível a criação de duas camadas na célula (CASTRO, 2002).

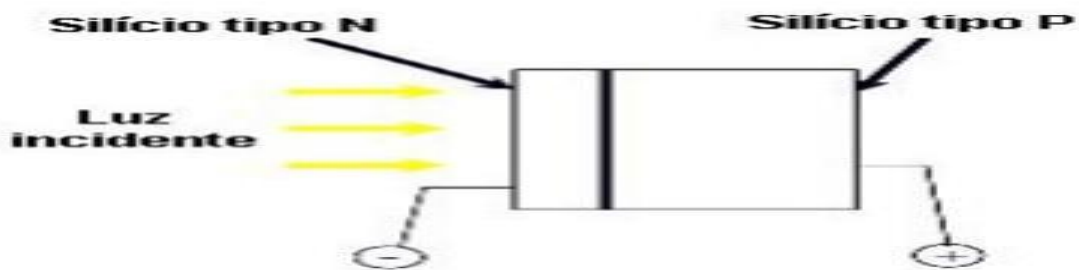
O Boro é o material dopante que irá criar a zona P, ele possui três elétrons na banda de valência que irá se ligar com os quatros átomos vizinhos do silício, com isso causará ausência de um elétron e criará uma lacuna (CASTRO, 2002).

O Fosforo é o material que será usado para criar a zona N, Ele possui cinco elétrons na sua banda de valência, ele criará quatro ligações covalentes com os átomos do silício, deixando assim um elétron livre que circulará entre o material. (CASTRO, 2002).

Além do Boro (B), podem ser usados o Gálio (Ga), Alumínio (Al) e o Índio (In), que são denominados como impurezas aceitadoras de elétrons ou dopantes do tipo P. (PINHO; GALDINO, 2014).

Com isso forma-se uma placa que terá um esquema semelhante à Figura 3.

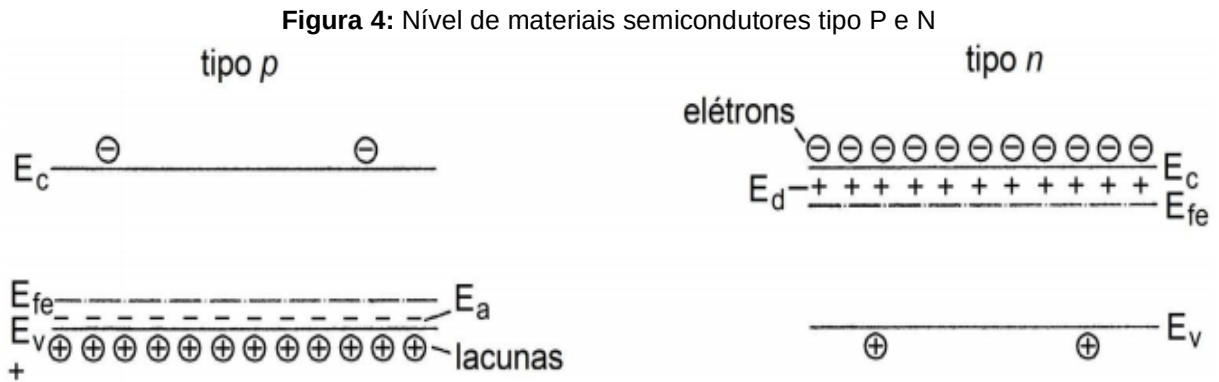
Figura 3: Camda célula solar



Fonte: NASCIMENTO (2004).

Separadamente, ambas as zonas são eletricamente neutras. Porém quando unidas, forma-se um campo elétrico devido aos elétrons livres do silício tipo N que ocupam os vazios da estrutura do silício tipo P. Incidindo luz sobre a célula fotovoltaica, os fótons chocam-se com outros elétrons da estrutura do silício dando fornecimento de energia e os transformando em condutores. Dado o campo elétrico gerado pela junção P-N, os elétrons são orientados e fluem da camada “P” para a camada “N” (NASCIMENTO, 2004).

A Figura 4 representa os níveis de elétrons dos materiais semicondutores já dopados por boro e fósforo do tipo P e N respectivamente.



Fonte: PINHO; GALDINO (2014).

Quando a Região da união é iluminada os fótons com energia igual ou maior ao material semiconductor utilizado podem ser absorvidos e produzirem elétrons livres. Ou seja, os fótons arrancam elétrons das ligações covalentes, formando pares elétron-lacunas que serão acelerados por efeito do campo em sentido oposto (SEGUEL, 2009).

Com isso basta realizar a junção dos terminais externos das células com um material metálico, fechando o ponto positivo e o negativo da placa estabelecendo uma corrente elétrica chamada de fotocorrente, a qual estará presente enquanto houver radiação solar incidindo no semiconductor (ZILLES et al., 2012).

Importante ressaltar que as placas FV por si só não serão capazes de armazenar nenhum tipo de energia, ela somente irá produzir energia instantânea enquanto houve a incidência da radiação solar nas células. Segundo o site Portal Solar (2017), a luz do sol demora cerca de 8 minutos e 20 segundos para percorrer a trajetória do sol até os painéis solares no telhado de uma residência, esse tempo será o tempo resposta de uma geração instantânea de energia.

3 A RADIAÇÃO SOLAR

Radiação solar é a designação dada à energia radiante emitida pelo Sol que é transmitida sob a forma de radiação eletromagnética, fornecendo luz e calor ao Planeta Terra (PERAZA, 2013).

A Densidade média anual mundial do fluxo energético proveniente da radiação solar (irradiância solar), quando medida num plano perpendicular a direção de reflexão é chamada de constante solar e tem um valor de 1.367 W/m^2 . (PINHO; GALDINO, 2014).

Com a propagação da radiação solar na atmosfera, ocorre o espalhamento e a absorção de parte dessa radiação, resultando numa irradiância de aproximadamente 1000 W/m^2 ao meio dia solar na superfície terrestre em dias sem nuvens, sendo que tal valor é utilizado como padrões para testes (PERAZA, 2013).

A Radiação solar ao penetrar na atmosfera terrestre sofre alterações na intensidade e polarização sendo influenciada por vários processos, como o espalhamento causado por gotas d'água, poeiras, gases presentes na atmosfera e por sucessivos processos de absorção e reflexão no solo ou em superfícies líquidas (PERAZA, 2013).

A Maior parte da energia solar que chega à atinge a superfície da terra é transmitida diretamente e alcança o solo sem dispersão. Em um dia considerado de céu limpo, sem aparição de nuvens, este componente de radiação solar constitui a principal forma de irradiância solar (PERAZA, 2013).

O Brasil tem um alto índice de radiação solar, principalmente no Nordeste. Na região semiárida estão os melhores índices com valores de 1.752 a 2190 W/m^2 por ano de radiação. Essa característica coloca o país em vantagem com relação aos países industrializados no auge da utilização da energia fotovoltaic (PORTAL SOLAR, 2017).

O atlas brasileiro de energia solar menciona Abreu et al. (2006) para informar que apesar das diferentes características climáticas observadas no Brasil, pode-se observar que a média anual de irradiação global apresenta boa uniformidade, com médias anuais relativamente altas em todo país.

No território brasileiro é recebido elevados índices de irradiação solar, quando comparado com países europeus, onde a tecnologia fotovoltaica é disseminada para

produção de energia elétrica. Constata-se, entretanto, um Avanço tecnológico em busca de novas tecnologias para o crescimento (PINHO; GALDINO, 2014).

Diversos Fatores influenciam no funcionamento de um sistema solar fotovoltaico, e é fundamental o conhecimento de cada um desses fatores para poder iniciar-se uma análise da quantidade de energia que é possível ser gerada por determinado sistemas instalados em determinados locais, além da possibilidade de permitir o monitoramento de possíveis problemas e imperfeições que possa vir a acontecer futuramente com o sistema. Para isso é necessário a realização de uma simulação de um sistema fotovoltaico (imaginário) utilizando dados e estatísticas (reais) da irradiância solar horizontal, temperatura média ambiental e velocidade dos ventos da área específica em qual se quer aplicar o projeto (RUSCHEL et al., 2015).

Os dois fatores principais que afetam a eficiência da conversão da radiação solar em energia são a temperatura de operação e a intensidade da irradiação solar incidente sobre a célula FV. Sendo esse último fator afetado tanto pela nebulosidade local, como pela angulação de instalação da célula em relação ao sol (PERAZA, 2013).

Outro parâmetro que podem afetar o rendimento do conjunto de módulos solares fotovoltaicos, também denominado gerador fotovoltaico, é o parâmetro de radiação solar, que depende fundamentalmente da localização geográfica da instalação, bem como de sua inclinação e orientação (RUTHER, 2004).

Os efeitos da inclinação e orientação relativos ao rendimento do gerador dependem da razão entre a radiação direta e difusa locais, bem como da fração de albedo (reflexão dos arredores), que é característica do ambiente onde se encontra a instalação. Como regra, a inclinação perfeita em relação à horizontal para incidência solar em regime anual é dada pela latitude da localidade onde vai ser instalado o módulo (RUTHER, 2004).

Para a correta instalação das placas se faz necessário a obtenção de conhecimento sobre os índices de irradiação solar no local, uma vez que a claridade do dia varia em partes de algumas regiões do país ao longo do ano, devido ao fato de ocorrerem mudanças nas estações do ano (fenômeno este que acontece pelo distanciamento do Sol com a Terra) e também por fatores meteorológicos (ANEEL, 2012).

É então a partir do conhecimento desses diversos fatores que deverá iniciar-se o cálculo para comparar qual deverá ser o tipo de célula a ser melhor empregadas nas placas Fotovoltaicas (ANEEL, 2012).

Tendo em vista que a corrente elétrica e a tensão dependem da irradiação solar incidente, uma vez que com o aumento da irradiação solar aumenta linearmente a corrente elétrica gerada por uma célula fotovoltaica, enquanto a tensão de circuito aberto aumenta de forma logarítmica, se mantida na mesma temperatura (PINHO; GALDINO, 2014).

Para facilitar a obtenção de conhecimentos de comportamentos de sistemas fotovoltaicos, estão sendo desenvolvidas ao longo dos anos diversas ferramentas computacionais, um exemplo de ferramenta desenvolvida no Brasil, é o PVSIZE criado pelo (LABSOL) que auxilia o usuário em sistemas fotovoltaicos isolados. Já o software CREARRAY, criado pelo mesmo laboratório permite análises de comportamentos de arranjos de módulos fotovoltaicos sujeitos a diversas condições e combinações. Para os tipos de sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica, foi desenvolvido um software de simulação de comportamento chamado FVCONNECT, uma vez que esse último fornece um comportamento médio, já que os dados climáticos são obtidos através de médias anuais anteriores e dados estáticos compatíveis ao local estudado (RUSCHEL et al., 2015).

Segundo Ruschel et al. (2015) a temperatura de operação de um módulo fotovoltaico é totalmente em função da radiação solar incidente, da velocidade do vento e das características térmicas do material aplicado, onde matematicamente pode ser obtido o resultado através da equação mostrada a seguir:

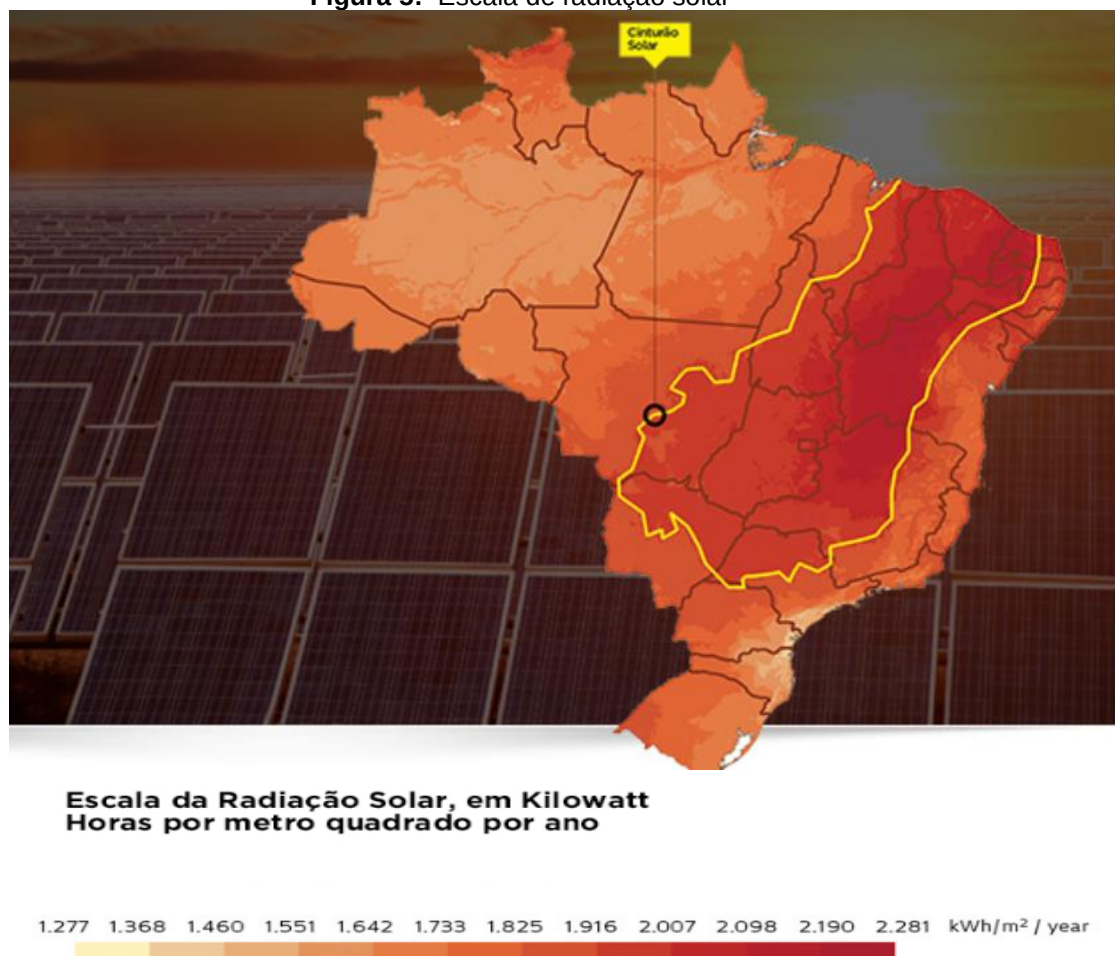
$$mcp \frac{dT_m}{dt} = (\tau\alpha) GA - \eta GA - (hc1 + hcv2) A (T_m - T_a) - hr1 A (T_m - T_{céu}) - hr2 A (T_m - T_b)$$

Onde m indica a massa do módulo fotovoltaico, t o tempo, T_m sua temperatura, ec_p a capacidade térmica por unidade de massa, ao qual se refere ao calor específico do módulo. O elemento $\tau\alpha$ é a energia efetiva absorvida da radiação solar pelo módulo fotovoltaico, dada por G, A é área total que participa da transferência de calor, T_a é a temperatura ambiente onde a placa está ou estará sendo aplicada, $T_{céu}$ Temperatura equivalente ao Céu, T_b Temperatura da parte de trás do Módulo e η é a eficiência da

conversão fotovoltaica. Os coeficientes h_{c1} , h_{cv2} , h_{r1} e h_{r2} , são os coeficientes de transferência de calor por convecção na parte superior e posterior da placa e os coeficientes de transferência de calor por radiação nos lados superior e posterior do módulo respectivamente (RUSCHEL et al., 2015).

A radiação solar é muito importante para a energia solar fotovoltaica e o Brasil tem um potencial muito bom para a energia solar. A radiação solar é a energia radiante liberada pelo sol, que é transmitida à terra sob a forma de ondas eletromagnéticas.

Figura 5: Escala de radiação solar



Fonte: ADEEL (2019)

4 ENERGIA SOLAR

A energia solar é a conversão da radiação solar em energia elétrica, utilizando a tecnologia de painéis solares com células fotovoltaicas. A energia produzida pode ser utilizada diretamente para aquecer água ou como eletricidade para uso doméstico ou industrial (ANELL 2022, *apud* MELIN; CAMIOTO, 2019, p. 91).

O uso de células fotovoltaicas tem desempenhado um papel decisivo no programa espacial. Isto levou a avanços significativos na tecnologia fotovoltaica e, como resultado, os processos de fabricação foram melhorados, aumentando a eficiência e o peso das células. Com a crise energética global de 1973/74, o interesse em encontrar novas formas de produção de energia levou a que o uso de células fotovoltaicas não se limitasse ao programa espacial, mas fosse intensamente estudado e utilizado para o fornecimento de energia no ambiente terrestre (GUIMARÃES, 2016, p. 36).

Na opinião de Melin e Camioto (2019), a produção de energia renovável está aumentando em todo o mundo. Um dos objetivos é atender às necessidades crescentes da população e cumprir os compromissos assumidos na 21ª Conferência das Partes (COP21) em Paris, em 2015, que foi um evento importante. Os países participantes se comprometeram a reduzir as emissões de gases de efeito estufa de fontes tradicionais (combustão do carvão) e a limitar o aumento das temperaturas médias globais a dois graus Celsius. Neste contexto, a energia solar tem recebido muita atenção porque é uma fonte de energia limpa, abundante e pouco explorada em todo o planeta.

O Brasil recebe luz solar suficiente para atender sozinho a todas as necessidades do país. Entretanto, não atraiu pessoas para instalar sistemas fotovoltaicos devido ao investimento inicial. Portanto, a importância dos incentivos governamentais é discutida a fim de aumentar efetivamente a produção solar fotovoltaica no Brasil.

O uso da energia solar tem muitas vantagens: (i) é uma fonte ilimitada de energia; (ii) existe em todo o mundo; (iii) não produz ruído ou gases; (iv) tem um baixo impacto ambiental; (v) seus módulos têm uma vida útil de aproximadamente 30 anos, requerem manutenção mínima e podem eventualmente ser reciclados; e (vi) a energia instalada pode ser aumentada a qualquer momento simplesmente adicionando

módulos (WANDERLEY; CAMPOS, 2013 apud MELIN; CAMIOTO 2019, p. 90). Há muitos estudos sobre energia solar na literatura, mas o foco principal é a produção de energia fotovoltaica. O uso desta fonte de energia, além de contribuir para uma redução significativa das emissões de gases de efeito estufa, oferece vantagens significativas em termos de segurança do fornecimento de energia e desenvolvimento econômico (MELIN; CAMIOTO, 2019).

Os sistemas de energia solar envolvem a instalação de painéis com células fotovoltaicas, geralmente nos telhados e fachadas de casas e edifícios. Procuram-se localizações solares ideais para capturar a radiação solar e convertê-la em eletricidade para as instalações instaladas. Quaisquer excedentes são injetados na rede de energia convencional, gerando créditos energéticos (GUIMARÃES, 2016).

“O uso vigoroso da energia produzida pelo sol, inesgotável na escala temporal da Terra, tanto como fonte de calor como de luz, é uma das alternativas energéticas mais promissoras que nos permitirá enfrentar os desafios do novo milênio” (GUIMARÃES, 2016, p. 33).

Os autores também acrescentam.

Esta forma de energia do sol pode ser utilizada através de sistemas ativos, como aquecedores solares de água; uso passivo, através da absorção de calor pelos edifícios; através de sistemas solares térmicos, que combinam aquecimento líquido com geradores mecânicos, e através da tecnologia fotovoltaica, que converte a energia solar diretamente em eletricidade (REIS et al., 2005 apud GUIMARÃES, 2016, p. 34).

A conversão da energia solar em eletricidade, por outro lado, ocorre através do efeito da radiação eletromagnética em certos materiais semicondutores, destacando os efeitos termoelétricos e fotovoltaicos (GUIMARÃES, 2016). O efeito termoelétrico é a diferença potencial causada pela junção de dois metais sob certas condições. Enquanto isso, na fotovoltaica, os fótons contidos na luz solar são convertidos em eletricidade através do uso de células solares. Dos vários processos que utilizam energia solar, os mais utilizados atualmente são o aquecimento de água e a geração de energia fotovoltaica (MELIN; CAMIOTO, 2019).

Este é o que é considerado promissor. Ela converte a energia renovável mais abundante disponível no planeta em energia sem produzir resíduos e sem queimar combustíveis fósseis. Isto ajuda a proteger a biosfera e a camada de ozônio. De acordo com os mesmos autores, os sistemas solares fotovoltaicos estão sendo cada vez mais incorporados em novos projetos de construção. Portanto, é visto como uma opção para os consumidores que procuram economizar dinheiro em suas contas de eletricidade. É também uma opção para os consumidores que procuram incentivar a conservação dos ecossistemas através de recursos limpos e renováveis.

De acordo com Guimarães (2016), o Brasil tem uma grande vantagem quando se trata de energia solar. O país tem uma boa localização geográfica e uma alta incidência do insumo mais importante para o uso desta tecnologia, que é o sol. Isto é ainda mais pronunciado no nordeste do país. Além disso, o Brasil possui uma abundância de silício, a matéria-prima utilizada para a fabricação de células fotovoltaicas, atrás apenas da China.

4.1 ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA

A energia solar fotovoltaica vem da radiação solar recebida pela Terra. A quantidade recebida é influenciada por diferentes fatores, tais como: temperatura, vegetação, quantidade de nuvens durante o dia e a quantidade de gases no ar. Apesar disto, é possível converter esta radiação em energia fotovoltaica. Seu uso aumentou nos últimos anos porque é uma fonte de energia renovável que não causa danos ambientais (PORTAL ENERGIA, 2017).

O Brasil está perto do Equador e tem um grande potencial para produzir este tipo de energia. Entretanto, devido a sua vasta extensão territorial, apresenta diferenças no valor da radiação solar recebida. Esta variação, baseada em um estudo realizado pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), no qual se pode observar que algumas partes das regiões nordeste e sudeste têm maior radiação. Os valores mostrados no mapa são médias anuais de irradiação horizontal (INPE, 2017).

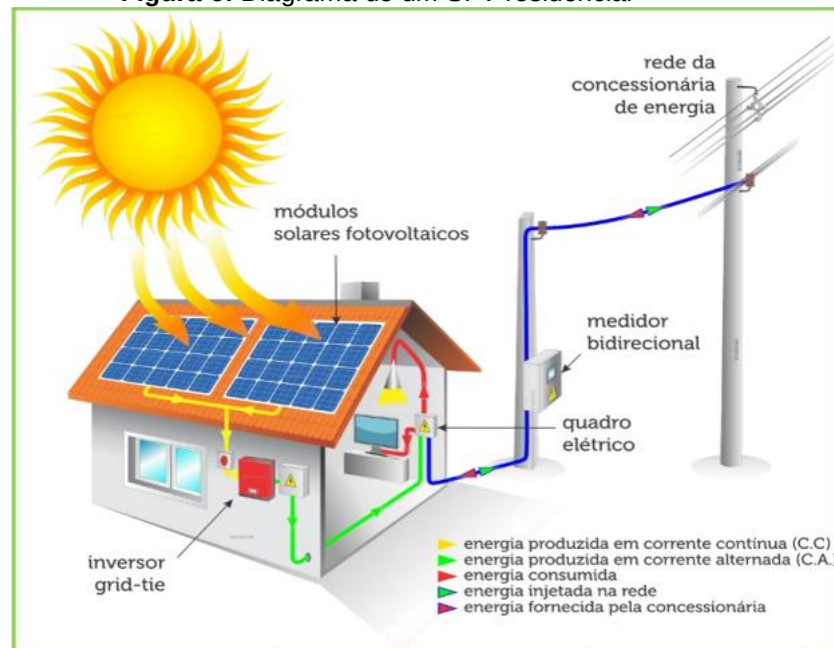
A energia solar pode ser utilizada para a produção de energia térmica e elétrica. Para este último uso, as células fotovoltaicas (produzidas principalmente a partir de silício e incorporadas em painéis solares) convertem a luz solar em eletricidade, que

no caso de sistemas de geração distribuída é alimentada na rede principal (SCHAFFER; BRUN, 2017).

Existem atualmente quatro tipos de painéis solares fotovoltaicos no mercado: monocristalinos, policristalinos, amorfos e híbridos, cada um com vantagens e desvantagens em termos de desempenho, eficiência, confiabilidade, custo e flexibilidade (RADOMES; ARANGO, 2017). No entanto, neste estudo, não foi feita distinção entre estas tecnologias de painel.

A Figura 1 mostra um esquema do funcionamento de uma usina elétrica residencial cativa, bem como a interconexão de seus componentes no conceito geral de comutadores.

Figura 6: Diagrama de um SFV residencial



Fonte: Azul Sol Energia Solar (2020)

A Figura 1 mostra um diagrama esquemático de um SFV conectado à rede, no qual o SFV residencial está conectado à rede. Há também os chamados sistemas "fora da rede", que operam fora da rede e têm um apêndice para o armazenamento de energia (baterias).

A energia solar fotovoltaica (PSE) é obtida através da conversão direta da luz solar em energia elétrica, conhecida como efeito fotovoltaico. Descrito pelo físico francês Edmond Becquerel em 1839, este efeito é caracterizado por uma diferença potencial entre as duas extremidades da estrutura de um material semicondutor,

criada pela absorção da luz solar, ou seja, há uma liberação e transferência de elétrons na interação da luz solar com o material, criando uma diferença potencial. Os FSEs são usados principalmente para gerar eletricidade em residências para substituir a energia fornecida por concessionárias ou cooperativas de energia (SILVA, CARMO, 2017).

As formas de fornecimento e produção de ESFs são divididas em PV distribuído e centralizado. De acordo com Bortoloto et al (2017), há dois tipos de operação associados à geração distribuída: fora da rede e conectada à rede. Por outro lado, a operação centralizada é caracterizada por uma grande usina elétrica ou parque solar fornecendo energia fotovoltaica à rede (PEREIRA, 2019).

Os sistemas de operação fora da rede são isolados e independentes da rede de distribuição ou rede cooperativa, e utilizam baterias conectadas para armazenar a energia capturada. O sistema consiste em um módulo de geração de energia (inversor e controlador de carga) e um módulo de armazenamento de energia (baterias). O controlador de carga é responsável por evitar o acúmulo de carga excessiva de energia nas baterias, que armazenam a energia restante, e o inversor converte a corrente contínua (CC) em corrente alternada (CA) (ALVES, 2019).

Ao contrário dos sistemas fora da rede, os sistemas conectados à rede são conectados à rede. Nestes tipos, o inversor converte a corrente contínua em corrente alternada e sincroniza toda a produção com a rede pública. Assim que há um excesso de energia, ela é enviada para a rede de distribuição pública tradicional e o relógio do contador gira na direção oposta, gerando créditos para o consumidor (PEREIRA, 2019).

No Brasil, esses créditos gerados tomam a forma de descontos na tarifa mensal para uso residencial, comercial ou industrial, sujeitos apenas às taxas obrigatórias da ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica) e às exigências contratuais. De acordo com o Portal Solar (2021), os consumidores com sistemas conectados à rede podem economizar até 95% em suas contas de energia. Estes sistemas também são vantajosos para aqueles que desejam que seus projetos estejam próximos à rede. Por outro lado, os sistemas fora da rede podem ser benéficos para os consumidores cujas casas ou indústrias estão longe da rede de transmissão.

Conforme o INPE (2017), na geração concentrada, grandes instalações são instaladas em estruturas metálicas fixas e inclinadas para o chão ou movidas sobre

um eixo seguindo o trajeto da linha de visão do sol. A energia solar fotovoltaica concentrada é e deve continuar a ser um dos principais pilares do crescimento da fonte no país, embora ainda não seja amplamente utilizada.

A maioria dos sistemas centralizados é instalada em terra, mas também podem ser instalados em lagos, represas ou oceanos, e são conhecidos como plantas solares flutuantes (PEREIRA, 2019). Atualmente, foram criadas plantas híbridas, ou seja, utilizando outras plantas próximas, sejam eólicas, hidrelétricas ou outras fontes renováveis (STRANGUETO, 2016).

Quanto à produção descentralizada, é necessário ter equipamentos que convertam a radiação solar em eletricidade, já que a energia gerada pelos painéis solares é corrente contínua, enquanto a energia consumida nas residências ou na indústria e transmitida pela rede é corrente alternada.

A conversão da radiação solar em eletricidade através de módulos com células solares é conhecida como solar fotovoltaica. A tecnologia é baseada no efeito fotovoltaico observado pela primeira vez por Edmund Becquerel em 1839, quando ele descobriu que duas placas de platina imersas em uma solução ácida geram eletricidade quando expostas à luz solar (LACCHINI, 2017).

As células fotovoltaicas consistem em três camadas: Junções tipo N (negativo), tipo P (positivo) e PN. Quando expostas à radiação solar, uma tensão é gerada entre as camadas tipo N e tipo P separado por uma junção PN isolante, de modo que o fluxo de elétrons entre as camadas tipo P e tipo N ocorre através de um condutor elétrico, levando à aquisição da energia elétrica gerada pelo processo fotovoltaico (BARBOSA, 2018).

A energia solar fotovoltaica vem de fontes de energia limpa e se caracteriza principalmente por sua modularidade, a capacidade de escalar sobre uma ampla gama de potência instalada e por ser um sistema estático com baixa manutenção e alta confiabilidade (RÜTHER, 2004).

De acordo com Nascimento (2019), existem várias tecnologias para converter a luz solar em eletricidade, que variam de acordo com sua composição química e processo de fabricação. Estas tecnologias são comercializadas na seguinte ordem: silício policristalino (p-Si), silício monocristalino (m-Si), telureto de cádmio (CdTe), cobre índio gálio (CIGS), silício amorfo e silício microcristalino (a-Si e μ cSi).

A fim de realizar uma análise entre diferentes sistemas FV, de acordo com Guarnieri (2017), foi estabelecida uma padronização devido às variações sofridas pelo número decisivo de geradores FV no mesmo local durante a produção diurna, especialmente devido às diferentes características naturais de cada região.

Esta padronização é conhecida como STC (Standard Test Conditions) ou Condições de Teste Padrão e é um requisito para uso em laboratório na determinação dos parâmetros elétricos dos módulos FV (BARBOSA, 2018).

A intensidade de irradiação no módulo é diretamente proporcional à energia produzida. Entretanto, a luz incidente absorvida pelo módulo não é totalmente convertida e, portanto, a parte não convertida leva a perdas no sistema, tais como perdas de calor ou reflexão (HICKEL, 2017).

Em termos de temperatura, que é inversamente proporcional à energia produzida, a situação ideal para otimizar o uso em dias frios, com baixa massa de ar e altos níveis de radiação, é atingida. Por outro lado, esta situação é idealizada, considerando que na prática, a irradiação e a temperatura são quantidades físicas diretamente proporcionais (BARBOSA, 2018).

Cada forma de produção de energia tem vantagens e desvantagens que, em última análise, levam a vários custos associados a cada tipo de geração. Por exemplo, existem os custos ambientais, que estão relacionados aos possíveis impactos agindo sobre a natureza, e os custos locais, que estão relacionados à trajetória entre o ponto de produção e distribuição de energia, que seria a linha de transmissão (CUSTÓDIO, 2019).

De acordo com Verissimo (2017), a energia fotovoltaica oferece as seguintes vantagens: simplicidade de instalação e operação, curtos tempos de instalação, nenhum uso de peças móveis, baixos custos de manutenção, características modulares dependendo do nível de geração (de mW a MW), e alta confiabilidade, uma participação negligenciável de 0,01% (MME, 2016).

Em 2019, a participação desta fonte aumenta para 1,00% de 651,3 TWh. Durante o mesmo período, a expansão da capacidade instalada (MW) e a geração de eletricidade (GWh) mostram grande valor, crescendo 1167,2% e 11179,7% respectivamente (MME, 2020).

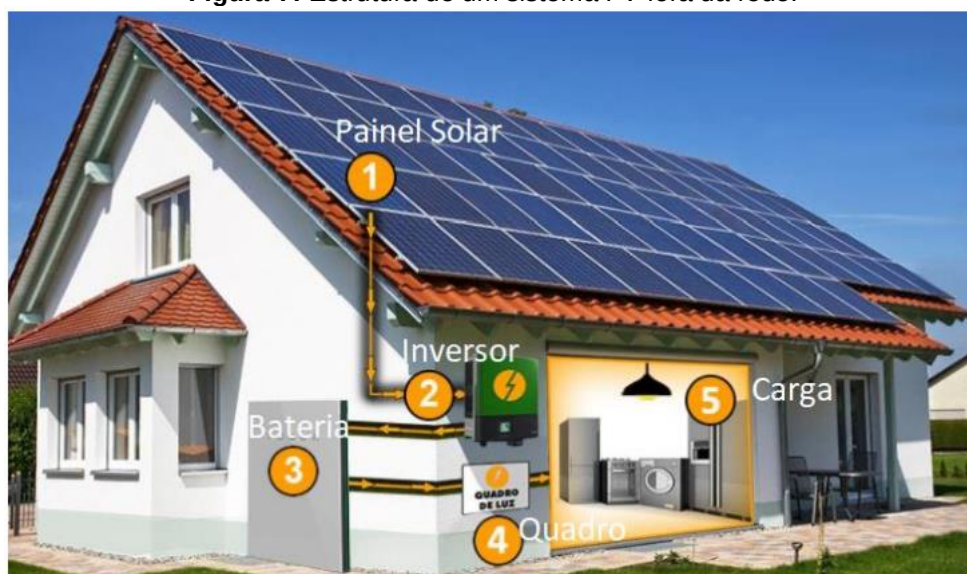
4.2 SISTEMA FOTOVOLTAICO OFF-GRID

O sistema fora da rede não está conectado à rede de distribuição de eletricidade, portanto precisa de sistemas que possam armazenar a energia produzida para que possa fornecer energia quando não há sol (BOSO, 2015).

Geralmente, este tipo de sistema consiste em painéis fotovoltaicos, um controlador de carga, um banco de baterias e um inversor. Quando uma carga DC precisa ser atendida, ela é atendida diretamente pela bateria, e quando é uma carga AC, ela é atendida após o inversor (VILLALVA; GAZOLI, 2012).

A Figura 2 mostra o sistema fora da rede, que mostra seus componentes e o fluxo de energia dos painéis para a carga. O sistema pode ser utilizado para fornecer energia para sistemas de bombeamento, produção de hidrogênio, iluminação pública, telecomunicações, cercas elétricas, redes de eletrificação rural, etc.

Figura 7: Estrutura de um sistema FV fora da rede.



Fonte: (PORTAL SOLAR, [201-]).

4.3 SISTEMA FOTOVOLTAICO ON-GRID

Um sistema PV na rede é um sistema que está diretamente conectado à rede de distribuição da concessionária. É responsável pela produção de energia para abastecimento de residências e estabelecimentos comerciais, a fim de reduzir a quantidade de eletricidade retirada da rede pública (VILLALVA; GAZOLI, 2013a). O

que é produzido pelo sistema de grade é devolvido ao concessionário e utilizado como crédito por três anos se não for utilizado pelo consumidor. Os consumidores podem optar por utilizar esses créditos em mais de uma residência ou instituição (BOSO, 2015).

A figura 3 mostra um sistema de grade composto de painéis solares, inversores, medidores bidirecionais e uma rede de distribuição. Uma parte do sistema é energia DC, dos painéis para o inversor, e a outra parte é energia AC, do inversor para a rede de distribuição.

Figura 8: Estrutura de um sistema fotovoltaico On-Grid.



Fonte: (VIRIDIAN, 2017).

Os sistemas conectados à rede podem ser divididos em puros e híbridos. Em ambos os casos, o consumidor é servido por voltagem CA.

4.4 COMPONENTES DO SISTEMA FOTOVOLTAICAS

Os painéis solares são um dos componentes básicos para produzir energia a partir do sol e consistem simplesmente de células e módulos.

As células fotovoltaicas nada mais são do que unidades básicas projetadas para a conversão direta da energia solar em energia elétrica. Um módulo é uma unidade composta por um grupo de células solares, interligadas eletricamente e encapsuladas com a finalidade de gerar eletricidade. Um painel é dois ou mais

módulos fotovoltaicos, eletricamente interconectados e montados em uma única estrutura. Um grupo de módulos, juntamente com equipamentos auxiliares (inversores e cabos) é usado para gerar eletricidade (ASOLAR, 2021).

Segundo a Ecoa Renewable Energy (2019), para produzir energia a partir do sol, em geral, os sistemas consistem em painéis solares, inversores, medidores e uma rede.

Módulos fotovoltaicos: Os módulos são integrados por um conjunto de células fotovoltaicas interligadas eletricamente e protegidas por um pacote, e são responsáveis pela conversão da energia solar em energia elétrica. Os modelos mais comuns no mercado são aqueles com 60 células em série, geralmente oferecendo uma garantia de defeito de fábrica de 10 anos e um rendimento mínimo de 80% de 25 anos (MAGALHÃES, 2017).

De acordo com Barbosa (2018), as propriedades elétricas de uma bateria podem ser visualizadas por curvas de corrente-tensão (I-V) e de potência-tensão (W-V), que são estabelecidas em testes de laboratório sob condições de teste padrão (STC).

Magalhães (2017) define os pontos das curvas como características essenciais que devem ser comunicadas pelo fabricante para projetos PV.

- Corrente de curto-circuito (I_{sc}): indica a corrente máxima que pode ser extraída do módulo FV. Ela ocorre quando a resistência de carga do módulo tende a zero.

- Tensão de circuito aberto (V_{oc}): é o valor máximo de tensão na ausência de uma carga ou quando há uma resistência muito alta que impede o fluxo da corrente.

- Tensão máxima de potência (V_{mp}): refere-se à tensão no ponto de máxima geração do painel.

- Corrente máxima de potência (I_{mp}): refere-se à corrente no ponto de máxima geração de energia do painel.

- Potência nominal (P_{mp}): o valor máximo de potência que o módulo PV pode fornecer sob condições de teste padrão. É o produto da tensão máxima de potência (V_{mp}) e da corrente máxima de potência (I_{mp}).

O teste é realizado pela varredura do módulo com uma fonte de tensão que varia a tensão desde um valor negativo até uma tensão de circuito aberto. Durante a

varredura, o par corrente-tensão é registrado, permitindo que a curva característica da célula, e portanto do módulo PV, seja traçada (CRESB, 2014).

Uma combinação de dois ou mais módulos conectados em série é chamada de string, onde o terminal positivo de um módulo é conectado ao terminal negativo do último elemento. Quando eles são idênticos e sob as mesmas condições de irradiação e temperatura, as correntes são equivalentes e a tensão do fio é a soma das tensões de cada módulo (BARBOSA, 2018).

Quando o terminal positivo é conectado a outro terminal positivo e o terminal negativo a outro terminal negativo de duas ou mais cordas, temos uma conexão paralela onde a corrente do sistema é o resultado da soma das correntes das cordas e as tensões entre as cordas são as mesmas (BARBOSA, 2018).

A combinação de módulos deve ser disposta em série e em paralelo para atingir níveis de corrente e tensão compatíveis com os limites máximos e mínimos do inversor ao qual serão conectados. A potência nominal do gerador é determinada pela soma da potência de todos os seus módulos, de modo que a capacidade de produção de energia cresce proporcionalmente ao número de módulos instalados (BARBOSA, 2018).

Inversores: os inversores são responsáveis por inverter a corrente contínua (CC) dos módulos em corrente alternada (CA) utilizada pelos consumidores conectados à rede de distribuição (MAGALHÃES, 2017). De acordo com Barbosa (2018), em relação ao seu uso, eles podem ser divididos em três categorias.

- Paralelo, onde o inversor é conectado à rede do distribuidor.
- Fora da rede, isolado da rede do distribuidor.
- Híbrido, que pode ser usado como as duas primeiras formas.

Quando o inversor é conectado à rede de distribuição, a tensão de saída precisa ter amplitude, frequência e conteúdo harmônico semelhantes à tensão fornecida pela rede. Dependendo do tamanho do gerador, os inversores podem ser divididos em três grupos, cada um com sua própria aplicação.

Os inversores solares contêm um sistema de rastreamento no ponto de máxima potência, que se adapta à resistência de entrada e regula a tensão atuando sobre os painéis para otimizar a conversão energética, recomendando tal sistema para cada direção dos módulos no telhado (MAGALHÃES, 2017).

Referindo-se à manutenção dos inversores, Lachini (2017) afirma que, de acordo com todos os equipamentos eletrônicos, sua vida útil é limitada pela produtividade devido a falhas relacionadas ao envelhecimento ou operação em situações estressantes e deve ser entre 10 e 15 anos, momento em que o equipamento precisa ser substituído.

- Outros componentes. As estruturas fixas são geralmente feitas de alumínio ou aço galvanizado e precisam ser dimensionadas para suportar o peso do sistema e cargas inesperadas, tais como ação do vento e manutenção. Elas devem ser resistentes à corrosão, mecanicamente fortes e ter uma baixa gravidade específica (MAGALHÃES, 2017).

Além disso, segundo Magalhães (2017), a distância entre o teto e os painéis deve ser considerada, levando em conta que quanto menor for esta distância, maior será a tendência de aumento da temperatura na área das células fotovoltaicas e, portanto, a diminuição da tensão e potência máximas dos painéis solares.

Estes condutores devem ser resistentes a temperaturas intensas, radiação UV, ozônio e água, e ter propriedades mecânicas que resistam à abrasão, corte e rasgos na jaqueta de proteção, todas as características que os distinguem dos condutores residenciais convencionais. Por outro lado, os conectores precisam ser efetivamente isolados para máxima tensão do sistema e devem ter a capacidade de resistir às intempéries da exposição ao meio ambiente (CRESESB, 2014).

De acordo com a CRESESB (2014), os dispositivos de segurança são designados em painéis de proteção chamados de caixas de corda e consistem principalmente em.

- Fusíveis fotovoltaicos - têm a função de proteger o banco de células contra correntes inversas do grupo de tensão mais alto em série para o grupo de tensão mais baixo e devem ser colocados nas saídas negativas e positivas de cada banco de células.

- Dispositivo de proteção contra sobtensões (SPD) - projetado para redirecionar as altas correntes geradas por sobtensões através do solo.

- Disjuntores de curto-circuito - devem garantir a proteção do sistema em caso de curto-circuito, sobrecarga ou alta corrente devido a uma falha à terra.

- Interruptores de desconexão - capazes de interromper a corrente em caso de emergência ou condições de manutenção.

4.5 DESEMPENHOS DO GERADOR FOTOVOLTAICO

O desempenho de um sistema fotovoltaico é fundamentalmente dependente da irradiação incidente (G), da qualidade do ar (AM) e da relação de desempenho (PR). A irradiação de incidentes (G) e a qualidade do ar (AM) são quantidades que variam de acordo com a latitude, longitude, altitude, hora do dia e estação do ano. A relação de desempenho (PR), freqüentemente chamada de perda, é uma medida em termos percentuais que especifica o fator de qualidade do sistema, quanto mais próximo estiver de 100%, mais eficiente será o gerador solar.

O PR é calculado pela razão entre a produção real e nominal do sistema, ambos dados na mesma ordem de grandeza (kWh) e no mesmo intervalo de tempo (SMA, 2018). SMA (2018) cita ainda os determinantes no PR, a saber,

Temperatura do módulo - Quanto maior o valor da temperatura, mais energia o sistema perde através do calor.

Temperatura do módulo - quanto maior o valor da temperatura, mais energia o sistema perde através do calor

Desempenho do módulo e do inversor - o parâmetro de eficiência dos componentes do sistema.

Desempenho do módulo e do inversor - o parâmetro de eficiência dos componentes do sistema.

Degradação das células fotovoltaicas - a perda natural de eficiência na conversão da energia solar em energia elétrica.

5 IMPACTOS ECONÔMICOS

Quando se fala em energia, é necessário apontar a diferença entre os termos. O consumo ou energia é determinado pela potência utilizada multiplicada pelo tempo (KWh); a demanda máxima é toda a potência necessária em um dado instante (KW); e o fator de potência é um índice que expressa a relação entre a potência ativa e a potência aparente consumida (SILVA, 2018).

O setor industrial consome aproximadamente um terço da energia final para atender a seus processos de produção. Até 2017, era o setor de maior consumo, mas com a redução da atividade econômica industrial entre 2014 e 2017 e a redução da produção de açúcar em 2018, foi superado pelo setor de transportes. Em 2019, a energia gerada pelo sol, é um dos representantes de 9,6% do consumo final de energia industrial (EPE, 2021).

O site New Life Solar Energy (2022) nos indica que no Brasil, a geração de energia solar está crescendo em grande escala. A pesquisa realizada pelo IPEA (Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada), indica que a participação da energia do sol na matriz energética brasileira foi de 0,1% em 2016 para 1,2% em 2019. Isso demonstra que energia solar é um dos principais recursos que oferecem a possibilidade de manter o fornecimento elétrico contribuindo para a preservação ambiental.

No Brasil esse setor possui uma expectativa de crescimento acelerado no ano atual, especialmente nos sistemas de geração própria solar, isso devido ao aumento nas tarifas de energia elétrica e da entrada em vigor da Lei nº 14.300/2022, que criou o marco legal da geração própria de energia, conhecida como geração distribuída. O mercado espera um aquecimento muito forte para o segundo semestre deste ano e também para 2023, tendo em vista que a regra citada abrange acordos firmados até o fim do ano (Ramon Nuche, 2022).

Os sistemas fotovoltaicos têm pouco impacto sobre o ambiente social, são flexíveis em sua localização e podem acelerar a eletrificação de lugares distantes e de difícil acesso. Se a compra de painéis solares foi difícil e cara há alguns anos, com o tempo o preço do equipamento e da instalação tornou-se acessível, com o potencial de economia entre 50 e 95% nas contas de eletricidade, com o investimento na instalação de painéis sendo pago pela economia gerada pelas contas de eletricidade reduzidas (PORTAL SOLAR, 2017).

Ao calcular os componentes de custo da eletricidade, seja em residências ou na indústria, é necessário saber quais itens são abrangidos por ela. O custo médio da eletricidade pode ser dividido em cinco componentes: geração, transmissão e distribuição (GTD); perdas técnicas e não técnicas; encargos setoriais; bandeiras tarifárias; e impostos estaduais e federais. Em um estudo realizado por Firjan (2017) desde 2011, o valor alcançado para determinar o custo da eletricidade para as pequenas e médias indústrias foi de R\$504,00 por MWh, excluindo impostos.

Em relação à energia solar, o custo mais oneroso vem da implementação do sistema, que depende, sobretudo do número de painéis solares necessários para atender à demanda de energia (DANTAS E POMPERMAYER, 2018). IPEA estudou em 2018 a viabilidade econômica dos sistemas fotovoltaicos (conectados à rede) no Brasil e modelou o preço final de três sistemas contendo seis, dez e dezoito painéis, incluindo a instalação, suporte, painéis, inversores e proteção, por R\$11.548,00, R\$16.967,00 e R\$27.458,00 respectivamente.

CONCLUSÃO

Aproximadamente um quinto da eletricidade consumida anualmente em Maranhão é utilizada pelo setor industrial, sendo mais de sessenta por cento consumida pela indústria alimentícia. Esse fato poderá partir do processamento e industrialização de alimentos requerem mais energia, tanto elétrica quanto térmica, para todos os processos e operações unitárias necessárias para transformar as matérias-primas em produtos finais.

O uso da energia solar na indústria alimentícia está em ascensão e Maranhão, apesar de ter um grande potencial para gerar energia solar fotovoltaica e ter programas e incentivos para o assunto, ainda não está muito envolvida nesta área.

Entre as conclusões deste trabalho, podemos afirmar que faz sentido o investimento em um sistema de geração de energia através de um modelo de captação de energia fotovoltaica.

Consciente do alto custo da eletricidade no Brasil, o sistema foi instalado para utilizar energia renovável como fonte inesgotável de energia e em abundância em todo o imenso território nacional. Mesmo com o contraste das estações que se traduzem em meses de baixa e alta geração de energia, mudando a incidência solar. Seguindo a Resolução 482/2012 da ANEEL, o uso de baterias foi abandonado através da conexão à rede dos sistemas fotovoltaicos, interligando o sistema diretamente à rede de distribuição da concessionária local, permitindo a conversão da energia gerada em créditos em excesso de consumo, ou seja, em meses com baixa incidência solar, os créditos gerados em meses com alta incidência solar serão consumidos.

A energia fotovoltaica está em um estado emergente no Brasil, um país localizado perto da linha do Equador e abençoado com condições únicas de exposição solar.

REFERÊNCIAS

- ALVES, M. de O. L. Energia solar: estudo da geração de eletricidade por sistemas fotovoltaicos na rede e fora da rede. 2019. 76 f. TCC (Diploma) - Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Ouro Preto, João Molevade, MG, 2019.
- BARBOSA, E; B. Análise da viabilidade financeira de um investimento em um gerador solar fotovoltaico - um estudo de caso. 2018. 48 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Centro de Ciências, Tecnologia e Saúde, Universidade Estadual da Paraíba, Araruna, 2018.
- BOSO, A. C. M. R.; GABRIEL, C. P. C.; FILHO, L. R. A. G. Análise de custos de sistemas fotovoltaicos on-grid e off-grid no Brasil. ANAP Brasil, v. 8, n. 12, p. 57-66, 2015.
- Brum, T.S. Projeto de uso de Energia Fotovoltaica como fonte emergencial. 2017, 62. f Trabalho de Conclusão de Curso, Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro 2017.
- CORREA, R. L. ENERGIA SOLAR: UMA ANÁLISE DE VIABILIDADE ECONÔMICO-FINANCEIRA DA SUA INSTALAÇÃO. p. 22, [s.d.].
- CRESB. Centro de Referência de Energia Solar e Eólica Sérgio de S. Brito. História da energia solar. 2016.
- CUSTÓDIO, I. P. Análise da viabilidade técnica e econômica de um mini gerador solar fotovoltaico integrado no envelope do edifício de um campus universitário. 2019.
- DUSOL - Energia Sustentável. Por que o mercado de energia solar é promissor para o Brasil em 2019? 13 de fevereiro de 2019. Disponível em: <https://yellot.com.br/energia-solar-fotovoltaica/mercado-de-energia-solar-brasil-em-2019/>. Acesso: 30 de outubro de 2022.
- Energia Solar Fotovoltaica: Como Funciona. Disponível em: <<https://www.esgpower.com.br/blog/energia-solar-fotovoltaica-como-funciona>>. Acesso em: 5 dez. 2022.
- ELY, Fernando; SWART, Jacobus. Energia solar fotovoltaica de terceira geração. IEEE, outubro de 2024. Disponível em: < <http://www.ieee.org.br/wp-content/uploads/2014/05/energia-solar-fotovoltaica-terceira-geracao.pdf>>. Acesso em 06 de dezembro de 2022.
- GUIMARÃES, Daiane Costa. O impacto da aplicabilidade da tecnologia de placas fotovoltaicas para residência familiar utilizando a prospecção tecnológica. 2016. 79 f. Dissertação (Mestrado em Propriedade Intelectual) - Pós-graduação em Ciência da Propriedade Intelectual. Universidade Federal de Sergipe - UFS.
- HICKEL, B. M. O impacto no desempenho dos sistemas fotovoltaicos causado pelo acúmulo de sujeira nos módulos PV - metodologia e avaliação por curvas IxV de

campo. 2017. 110 p. Tese (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2017.

INPE. Atlas Brasileiro de Energia Solar, 2ª edição, São José dos Campos, 2017. Disponível em: <https://www.arandanet.com.br/assets/revistas/fotovolt/2017/maio/index.php#page=10>. Acesso em: 01 de novembro de 2022.

MAGALHÃES, J. A. F. et al. INFLUÊNCIA DO TEMPO DE TRACKING NA EFICIÊNCIA DE UM COLETOR CONICAL SOLAR. VII Congresso Brasileiro de Energia Solar. Gramado, RS. 2018.

MELIN, Monise Fernanda Maciel; CAMIOTO, Flávia de Castro. A importância dos incentivos governamentais para aumentar o uso da energia solar. In: Revista GEPROS Gestão da Produção, Operações e Sistemas. v. 14, nº 5, p. 89-108, 2019.

MELIN, Monise Fernanda Maciel; CAMIOTO, Flávia de Castro. A importância dos incentivos governamentais para aumentar o uso da energia solar. In: Revista GEPROS Gestão da Produção, Operações e Sistemas. v. 14, nº 5, p 91, 2019.

Microsoft Power BI. Disponível em:

<<https://app.powerbi.com/view?r=eyJrljoiNjc4OGYyYjQtYWZWM2ZC00YjllLWJlYmEtYzdkNTQ1MTc1NjM2liwidCI6IjQwZDZmOWI4LWVjYTctNDZhMi05MmQ0LWVhNGU5YzAxNzBIMSI6ImMiOjR9>>. Acesso em: 6 dez. 2022.

NASCIMENTO, Á. D. J. GERAÇÃO FOTOVOLTAICA DISTRIBUÍDA COMO UM ELEMENTO SUBSIDIÁRIO PARA SISTEMAS DE ARMAZENAMENTO DE ENERGIA EM UM AMBIENTE TARIFÁRIO DIFERENCIADO. 2019. 109 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2019.

NEW SOLAR ENERGY. São Leopoldo, RS. Disponível em: <<https://newlifesolarenergy.com/sobre/#:~:text=No%20Brasil%2C%20a%20gera%C3%A7%C3%A3o%20de,1%2C2%25%20em%202019.>>>. Acesso em: 16 de setembro de 2022.

NUCHE, Ramon. Estamos no melhor momento para investir em energia solar. EXAME, 16 de julho de 2022. Disponível em: <<https://exame.com/esg/estamos-no-melhor-momento-para-investir-em-energia-solar/>>. Acesso em: 16 de setembro de 2022.

PEREIRA, N. X. Desafios e perspectivas da energia solar fotovoltaica no Brasil: geração distribuída versus geração centralizada. 2019.

PORTAL DA ENERGIA. Vantagens e desvantagens da energia solar. 2017. Disponível em: <https://www.portal-energia.com/vantagens-e-desvantagens-da-energia-solar/>. Acesso em: 01 de novembro de 2022.

PORTAL SOLAR. Energia Solar Fotovoltaica em Goiás. 2021. Disponível em: <https://www.portalsolar.com.br/energia-solar-fotovoltaica-em-goias>. Acesso em: 03 de novembro de 2022.

RUSCHEL, C. S. DESENVOLVIMENTO DE SOFTWARE PARA SUPERVISÃO DE USINAS SOLARES FOTOVOLTAICAS. p. 106, [s.d.].

RÜTHER, R. Edifícios solares fotovoltaicos: o potencial da geração solar fotovoltaica integrada a edificações urbanas e interligada à rede elétrica pública no Brasil. Florianópolis: UFSC, 2004.

SEGUEL, J. I. L. Projeto de um sistema fotovoltaico autônomo de suprimento de energia usando técnica MPPT e controle digital. p. 222, [s.d.]

SILVA, R. G.; CARMO, M. J. do,. Energia solar fotovoltaica: uma proposta para melhorar a gestão da energia. InterSciencePlace, v. 12, n. 2, 2017. Disponível em: <http://www.interscienceplace.org/isp/index.php/isp/article/view/649/403>. Acesso em: 02 de novembro de 2022.

SILVA, L. R. de J. R.s; SHAYANI, R. A.; OLIVEIRA, M. A. G. de. ANÁLISE COMPARATIVA DAS FONTES DE ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA, HIDROELÉTRICA E TERMOELÉTRICA, COM ESTUDO DOS CUSTOS AMBIENTAIS, APLICADA AO DISTRITO FEDERAL. Em: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENERGIA SOLAR. 2018.

SOLARVOLT. A energia solar é sustentável? 2020. Disponível em: <https://www.solarvoltenergia.com.br/blog/a-energia-solar-e-sustentavel/>. Acesso em: 29 de outubro de 2022.

TECLUZ, Engenharia. Sistema de Geração de Energia Solar Fotovoltaica. Disponível em: <http://www.tecluz.com.br/energia-solar>. Acesso em: 30 de outubro de 2022.

VERÍSSIMO, P. H. A. Avaliação de uma usina solar fotovoltaica comparando diferentes topologias de sistemas de fixação utilizando duas tecnologias diferentes de fv. 2017. 112 p. Tese (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2017.

VILLALVA, M. G.; GAZOLI, J. R. Energia solar fotovoltaica - Conceitos e aplicações. 1ª. ed. São Paulo: Editora Érica Ltda, 2013.

ZILLES, Roberto et al. Sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica. . São Paulo: Oficina de texto. . Acesso em: 04 dez. 2022. , 2012