



**UNIVERSIDADE
ESTADUAL DO
MARANHÃO**

UNIVERSIDADE ESTADUAL DO MARANHÃO

CENTRO DE ESTUDOS SUPERIORES DE CAXIAS

DEPARTAMENTO DE MATEMÁTICA E FÍSICA - DMF

CURSO DE FÍSICA LICENCIATURA

MAURICIO OLIVEIRA GOMES

**ENERGIA FOTOVOLTAICA: UM PANORAMA DA IMPLEMENTAÇÃO DO
SISTEMA NA CIDADE DE CAXIAS-MA**

CAXIAS-MA

2023

MAURICIO OLIVEIRA GOMES

**ENERGIA FOTOVOLTAICA: UM PANORAMA DA IMPLEMENTAÇÃO DO
SISTEMA NA CIDADE DE CAXIAS-MA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao
Curso de Física Licenciatura do CESC/UEMA pré-
requisito para o título de Licenciado em Física
Licenciatura.

ORIENTADOR: Prof. Me. Valney Moura da Silva

CAXIAS - MA

2023

G633e Gomes, Mauricio Oliveira

Energia fotovoltaica: um panorama da implementação do sistema na cidade de Caxias-MA / Mauricio Oliveira Gomes. __Caxias: Campus Caxias, 2023.

43f.

Orientador: Prof. Me. Valney Moura da Silva.

Monografia (Graduação) – Universidade Estadual do Maranhão
– Campus Caxias, Curso de Licenciatura em Física.

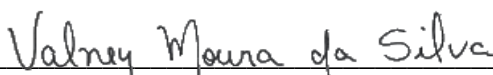
MAURICIO OLIVEIRA GOMES

**ENERGIA FOTOVOLTAICA: UM PANORAMA DA IMPLEMENTAÇÃO DO
SISTEMA NA CIDADE DE CAXIAS-MA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao
Curso de Física Licenciatura do CESC/UEMA pré-
requisito para o título de Licenciado em Física
Licenciatura.

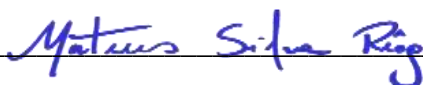
Aprovada em, 05/07/2023

BANCA EXAMINADORA



Prof. Me. Valney Moura da Silva (Orientador)

Centro Universitário de Ciências e Tecnologia do Maranhão – UNIFACEMA



Prof. Me. Mateus Silva Rêgo

Universidade Estadual do Maranhão – UEMA

Documento assinado digitalmente



DIEGO MACHADO DOS SANTOS

Data: 18/07/2023 13:54:18-0300

Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Me. Diego Machado dos Santos

Universidade Estadual do Maranhão – UEMA

Dedico aos meus avós, José Luís Gomes e Ana Rosa de Abreu Cardoso por tudo que fizeram por mim, em especial a minha avó que infelizmente já não está entre nós, e a minha esposa Fabiana Amorim Teixeira Gomes. Obrigado!

AGRADECIMENTOS

A Deus em primeiro lugar, por permitir estar com saúde e ter chegado até aqui.

Aos meus avós, José Luís Gomes e Ana Rosa de Abreu Cardoso, pelo constante apoio e cuidado em minha vida, dedicação, paciência e incentivo. Em especial a minha amada avó. Amo vocês!

A minha querida esposa Fabiana Amorim Teixeira Gomes, pelo apoio, compreensão e companheirismo, amo você!

A minha linda filha Julia, por existir em minha vida. Te amo!

Ao professor Paulo Afonso de Amorim, pelo incentivo e apoio para que eu chegasse até aqui. Obrigado por tudo!

Ao meu orientador, Prof. Me. Valney Moura da Silva pela orientação e paciência no decorrer do trabalho. Muito obrigado!

A minha amiga e comadre, Sd Zélia

A minha comandante da Patrulha Maria da Penha, Capitã Hilda

Aos tantos amigos que fiz durante a graduação.

A todos os meus professores, que diretamente ou indiretamente contribuíram para o desenvolvimento deste trabalho, bem como, para minha formação acadêmica.

A Universidade Estadual do Maranhão (UEMA), por sua estrutura e suporte oferecidos no decorrer do curso

Aos zeladores, vigilantes e todos os demais profissionais que estão na linha administrativa da instituição, bem como ao bibliotecário.

“Educai as Crianças para que não seja necessário punir os adultos.”

Pitágoras

RESUMO

O aproveitamento da energia gerada pelo sol, fonte inesgotável na escala de tempo da terra, tanto como fonte de luz, quanto de calor, é hoje, indubitavelmente, umas das opções energéticas mais promitentes para encarar os desafios que poderão surgir nos próximos séculos. Nesse contexto, há de se destacar, a Energia Fotovoltaica, que, é obtida através da conversão direta da luz em eletricidade (Efeito Fotovoltaico). O Efeito Fotovoltaico é o surgimento de uma diferença de potencial nos extremos das estruturas de determinados materiais semicondutores, produzidas pela absorção da luz. É de muita relevância conhecer detalhadamente cada parte desse processo, que tornou possível a utilização dessa fonte de energia, sendo assim, a partir de pesquisas nas mais variadas fontes disponíveis como livros, artigos e diversos sites na internet, sobre o assunto proposto, foi possível conhecer o funcionamento do sistema de geração distribuída. Neste trabalho mostrou-se um panorama da implementação desse sistema na cidade de Caxias - Ma. Ao observar o comportamento do efeito fotovoltaico nos materiais semicondutores, é possível entender o processo básico de conversão de fótons em uma corrente elétrica. Em seguida discorre-se sobre a conversão da corrente elétrica contínua (DC) em corrente alternada (AC), demonstrando componentes necessários para o funcionamento do sistema, e adiante discutir sobre os efeitos da radiação em células solares bem como os efeitos da temperatura e outros fenômenos físicos e atmosféricos que interferem na geração de eletricidade destacando também os impactos ambientais dessa tecnologia de conversão de energia solar.

Palavras Chaves: Energia fotovoltaica; Efeito fotovoltaico; Energia solar.

ABSTRACT

The use of energy generated by the sun, an inexhaustible source in the earth's time scale, both as a source of light and heat, is today, undoubtedly, one of the most promising energy options to face the challenges that may arise in the coming centuries. In this context, it is worth highlighting Photovoltaic Energy, which is obtained through the direct conversion of light into electricity (Photovoltaic Effect). The Photovoltaic Effect is the emergence of a potential difference at the extremes of the structures of certain semiconductor materials, produced by the absorption of light. It is very important to know in detail each part of this process, which made it possible to use this source of energy, therefore, based on research in the most varied sources available such as books, articles and various websites on the proposed subject, it was possible to know how the distributed generation system works. This work shows an overview of the implementation of this system in the city of Caxias - Ma. By observing the behavior of the photovoltaic effect in semiconductor materials, it is possible to understand the basic process of converting photons into an electric current. Next, the conversion of direct electric current (DC) into alternating current (AC) is discussed, demonstrating the components necessary for the system to function, and then discussing the effects of radiation on solar cells as well as the effects of temperature and other physical and atmospheric phenomena that interfere with the generation of electricity, also highlighting the environmental impacts of this solar energy conversion technology.

Keywords: Photovoltaics; Photovoltaic effect; Solar energy.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1: USINA DE ENERGIA FOTOVOLTAICA	16
FIGURA 2-EFEITO FOTOELÉTRICO	17
FIGURA 3:REPRESENTAÇÃO DAS BANDAS DE ENERGIA EM METAIS, SEMICONDUCTORES E ISOLANTES.....	19
FIGURA 4- CÉLULA FOTOVOLTAICA	20
FIGURA 5:ESTRUTURA DE UM CRISTAL DE SILICIO.....	21
FIGURA 6: MODELO DE SISTEMA FOTOVOLTAICO CONECTADO A REDE.....	23
FIGURA 7: FUNCIONAMENTO DA CÉLULA FOTOVOLTAICA.....	24
FIGURA 8: MÓDULOS FOTOVOLTAICOS	25
FIGURA 9: COMPOSIÇÃO DE UM PAINEL SOLAR	26
FIGURA 10: RADIAÇÃO SOLAR.....	26
FIGURA 11: SISTEMA ON-GRID	28
FIGURA 12: SISTEMA FOTOVOLTAICO OF-GRID.....	30
FIGURA 13: SISTEMA FOTOVOLTAICO HIBRIDO.....	31

LISTA DE TABELAS

TABELA 1: QUANTIDADE DE GD NO MARANHÃO	34
TABELA 2: CLASSES DE CONSUMO	35
TABELA 3: UNIDADES COM CONSUMO SOLAR EM CAXIAS - MA	36
TABELA 4:CLASSES DE CONSUMO DA ENERGIA SOLAR EM CAXIAS-MA.....	36

LISTA DE GRÁFICOS

GRÁFICO 1: BANDAS DE ENERGIA DO SILICIO	22
GRÁFICO 2: ADESÃO ANUAL AO SISTEMA FOTOVOLTAICO.....	34
GRÁFICO 3: QUANTIDADE DE ADESÃO AO SISTEMA FOTOVOLTAICO.....	36

LISTA DE SIGLAS, ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

ABSOLAR Associação brasileira de energia solar fotovoltaica

ANEEL Agência Nacional de Energia Elétrica

CA Corrente alternada

CC Corrente contínua

EPE Empresa de Pesquisa Energética

EVA Etileno acetato de vinila

GD Geração Distribuída

GW Gigawatts

INPE Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais

LABREN Atlas Brasileiro de Energia Solar

W Watts

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	16
2.1	BREVE HISTÓRIA DA ENERGIA SOLAR.....	16
3	ENERGIA SOLAR	17
3.1	EFEITO FOTOELÉTRICO	17
3.2	EFEITO FOTOVOLTAICO	18
3.3	SILÍCIO.....	21
3.4	SISTEMAS FOTOVOLTAICOS	22
4	CÉLULAS E MÓDULOS FOTOVOLTAICOS	23
4.1	PRINCÍPIOS DE FUNCIONAMENTO.....	23
4.2	ESTRUTURA FÍSICA DE PAINÉIS SOLARES	25
4.3	FATORES EXTERNOS QUE INFLUENCIAM NA CONVERSÃO DA ENERGIA SOLAR	26
5	SISTEMAS FOTOVOLTAICOS	27
5.1	SISTEMA ON-GRID	27
5.2	SISTEMA OFF-GRID	29
5.3	SISTEMA HÍBRIDO	30
5.4	IMPACTOS AMBIENTAIS	31
5.5	EVOLUÇÃO DA ADESÃO AO SISTEMA FOTOVOLTAICO NO MARANHÃO.....	33
5.6	EVOLUÇÃO DA ADESÃO AO SISTEMA FOTOVOLTAICO NA CIDADE DE CAXIAS – MA.....	35
6	RESULTADOS E DISCUSSÕES	38
7	CONSIDERAÇÕES FINAIS	40
	REFERÊNCIAS	41

1 INTRODUÇÃO

As fontes de energia não renováveis utilizam reservas naturais limitadas, com lentos processos de formação e curta existência em comparação com o rápido consumo pelo ser humano. Tais fontes utilizam recursos naturais, os quais serão esgotados em curto período de tempo ou mesmo a longo prazo. Em contrapartida, as fontes de energia renováveis são inesgotáveis, devido à constante renovação ao serem utilizadas dentro de um intervalo de tempo significativo (ALVES, 2019). Nesse contexto, destaca-se o sistema com uso de painéis fotovoltaicos, uma fonte de geração de eletricidade de forma limpa e eficiente, que vem sendo cada vez mais implantado no Brasil.

Painéis solares fotovoltaicos são dispositivos utilizados para converter a energia solar em energia elétrica. São compostos por células que geram uma diferença de potencial elétrico sob incidência de luz, através do efeito fotoelétrico. Uma célula é semelhante a um diodo, entretanto seus elétrons adquirem energia a partir de fótons (RASHID, 2014). Saber a realidade da aplicação do sistema que usa esse tipo de tecnologia e os processos envolvidos nessa modalidade de geração de energia, garantirá além do conhecimento sobre a área, um melhor entendimento do uso desse sistema de geração de energia solar.

Com relação a energia solar, em 2012, com a finalidade do direito de permitir ao consumidor gerar sua própria energia elétrica a partir da energia solar, a ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica) criou a resolução normativa n° 482, de 17/07/2012. Esta resolução estabeleceu as condições gerais para o acesso de micro geração e mini geração distribuída, aos sistemas de distribuição de energia elétrica, e ao sistema de compensação de energia elétrica (ANEEL, 2012). A partir de então, tornou-se ainda mais interessante adquirir essa modalidade de geração de eletricidade que utiliza o sol como fonte de energia. Na região Nordeste essa modalidade vem sendo implementada cada vez mais, tendo em vista o clima favorável durante a maior parte do ano, o estado do Piauí conta atualmente com a maior usina de geração fotovoltaica da América Latina. A usina está localizada no município de Ribeira do Piauí, a 377 quilômetros de Teresina, na microrregião do Alto Médio Canindé. A instalação abrange uma área de 690 hectares, com capacidade instalada total de 290 MW e vai gerar aproximadamente 600 GWh por ano, o suficiente para atender às necessidades anuais de consumo de energia de cerca de 300 mil lares brasileiros. A figura a seguir nos mostra a dimensão da usina (CIBIC, 2019).

FIGURA 1: USINA DE ENERGIA FOTOVOLTAICA



FONTE: CBIC, 2019

Além disso, os sistemas fotovoltaicos representam uma maneira eficiente, tanto para o consumidor utilizá-los conectados à rede de distribuição de energia elétrica (ON-Grid), como também enquanto uma solução para atender pequenas demandas de energia, em locais de difícil acesso (OFF-Grid), (ALVES, 2019).

Esse trabalho visa demonstrar numericamente um panorama da implementação do sistema de energia solar fotovoltaica na cidade de Caxias – Ma, bem como, o do Estado do Maranhão, podendo assim, fazer um comparativo da evolução da implementação do sistema, destacando as vantagens, os desafios da implementação e os impactos ambientais desse tipo de geração de energia elétrica.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 BREVE HISTÓRIA DA ENERGIA SOLAR

Muito além do olhar científico, o Sol sempre despertou um instinto de contemplação e mesmo devoção. O antigo Egito cultuava Ra, o deus-sol. Povos ameríndios pré-colombianos tinham no Sol um elemento essencial de sua cosmovisão; e possuíam notável conhecimento de sua relevância no ordenamento da vida. Na mitologia tupi, o Sol (Guaraci ou Coaraci) tem papel de destaque, como criador da vida (BURSZTYN, 2020).

O aproveitamento da energia gerada pelo Sol, inesgotável na escala terrestre de tempo, tanto como fonte de calor quanto de luz, é hoje, sem sombra de dúvidas, uma das alternativas energéticas mais promissoras para enfrentarmos os desafios do novo milênio. E quando se fala em energia, deve-se lembrar que o Sol é responsável pela origem de praticamente todas as outras fontes de energia. Em outras palavras, as fontes de energia são, em última

instância, derivadas, em sua maioria, da energia do Sol (CRESESB). Muito antes de qualquer invenção tecnológica moderna para fazer o processo de conversão da luz solar em corrente elétrica ser criada, já se utilizava a luz sol para diversas finalidades.

A evolução da energia solar fotovoltaica teve início a partir da pesquisa de um físico francês, Alexandre Edmond Becquerel, em 1839, que iniciou seus estudos sobre o efeito fotovoltaico (PORTAL SOLAR,2021). Desde então, os estudos e avanços tecnológicos na área, tornaram seu uso nas mais variadas áreas, possível.

3 ENERGIA SOLAR

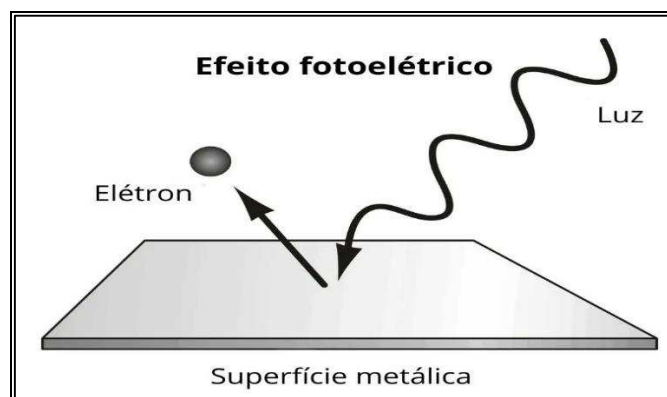
3.1 EFEITO FOTOELÉTRICO

O Efeito Fotoelétrico foi observado por A. E. Becquerel em 1839, mas foi confirmado experimentalmente por Heinrich Hertz em 1887 e sua explicação só foi dada por Albert Einstein em 1905, que motivou a Academia a premiá-lo com o Nobel de Física no ano de 1921 (EISBERG,2008).

O efeito fotoelétrico tem uma ampla gama de aplicações práticas, incluindo na tecnologia de painéis solares, dispositivos de imagem e sensores de luz. Além disso, o estudo do efeito fotoelétrico foi fundamental para o desenvolvimento da teoria quântica, pois desafiou as concepções tradicionais da física clássica e levou ao entendimento de que a energia é quantizada em pacotes discretos, conhecidos como fótons (ENERGIA).

Quando iluminamos a superfície de um determinado metal com um raio luminoso, de comprimento de onda suficientemente pequeno, a luz faz com que elétrons sejam emitidos pelo metal. O fenômeno que recebe o nome de efeito fotoelétrico, é essencial para o funcionamento de câmaras de TV e óculos de visão noturna (RESNICK; HALLIDAY,2016).

FIGURA 2-EFEITO FOTOELÉTRICO



FONTE: PREPARA ENEM.

Em 1905, Albert Einstein propôs que a radiação eletromagnética (ou, simplesmente, a luz) é quantizada; a quantidade elementar de luz hoje recebe o nome de fóton. A definição de quantum de luz, ou fóton, é muito mais sutil e misterioso do que Einstein imaginava. Na verdade, até hoje não é compreendido perfeitamente (RESNICK; HALLIDAY, 2016).

Uma teoria simples e revolucionária para explicar o efeito fotoelétrico, a qual considera que a luz é constituída por partículas sem massa. Cada fóton carrega uma energia dada por:

$$E = hf$$

Onde $h = 4,1 \times 10^{-15} \text{ eV}\cdot\text{s}$ é a constante de Planck, e f é a frequência da luz. Einstein relacionou a energia cinética, E , com que o elétron emerge da superfície do material à frequência da luz incidente sobre ele e à função trabalho, W , através da equação $E = hf - W$. A função trabalho W corresponde à energia necessária para um elétron ser ejetado do material (PREPARA ENEM).

Com os avanços dos estudos e experimentos, baseados nas descobertas do efeito fotoelétrico e nas pesquisas relacionadas ao assunto, o homem utilizou-se desse processo para a obtenção de energia elétrica. A energia solar, próxima ao que conhecemos hoje, surgiu em 1954 por Russell Shoemaker Ohl, junto ao anúncio da primeira célula fotovoltaica durante uma reunião da National Academy of Sciences, após a descoberta do efeito fotovoltaico e dando início à utilização dos painéis solares em 1958 (PORTAL SOLAR, 2021).

Uma das primeiras utilizações de painéis solares ocorreu em 1958 no espaço, quando o satélite Vanguard I foi lançado, com o auxílio de um painel de 1 W para alimentar seu rádio na viagem. Além disso, foram construídas as primeiras instalações solares para casas, estabelecimentos e até mesmo para meios de transportes, como ônibus, navio e avião (PORTAL SOLAR, 2021).

Embora o efeito fotoelétrico seja diferente do efeito fotovoltaico na questão da estrutura e funcionamento interno, a sua descoberta contribuiu significativamente para o avanço das tecnologias fotovoltaicas e nos permitiu ter um maior conhecimento sobre a luz e como nos utilizar dela para a geração de energia elétrica (CARVALHO, 2019).

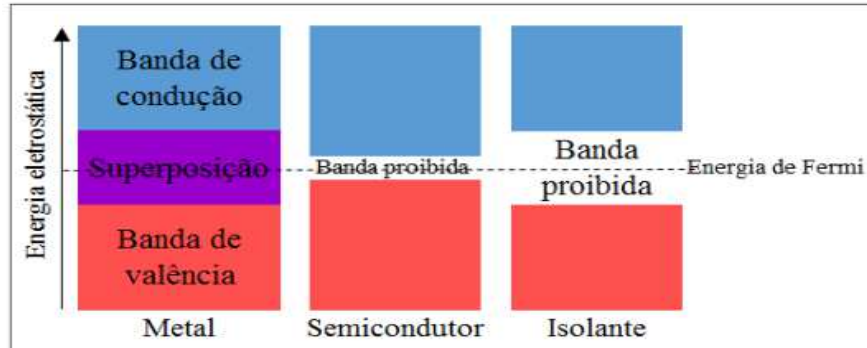
3.2 EFEITO FOTOVOLTAICO

Observado pela primeira vez no ano de 1839, o efeito fotoelétrico foi comprovado por Edmund Becquerel, onde verificou que uma placa de prata ou platina quando mergulhadas

num eletrolítico, e quando expostas à luz produziam uma pequena diferença de potencial. Em sequência no ano de 1877, W. G. Adams e R.E. Day usaram o selênio para criar o primeiro dispositivo sólido que conseguia gerar eletricidade quando exposto à luz (VIRTUAL QUÍMICA, 2015)

O efeito fotovoltaico é a criação de uma corrente elétrica em um material semicondutor quando exposto a determinada frequência de radiação luminosa, como no painel solar exposto ao sol. Já o efeito fotoelétrico é a emissão de elétrons de determinados materiais metálicos, quando recebem radiação em determinada frequência. São efeitos diferentes, mas ligados por elementos em comum, como os fótons de luz e os elétrons, por isso, geralmente são confundidos e ambos estão na base de tipos de energia limpa e renovável (PORTAL SOLAR, 2021). Esse efeito fotovoltaico dá-se em materiais da natureza denominados semicondutores que se caracterizam pela presença de bandas de energia onde é permitida a presença de elétrons (banda de valência) e de outra onde totalmente “vazia” (banda de condução), conforme a teoria das bandas na imagem a seguir (CAMARA, 2017).

FIGURA 3: REPRESENTAÇÃO DAS BANDAS DE ENERGIA EM METAIS, SEMICONDUTORES E ISOLANTES.



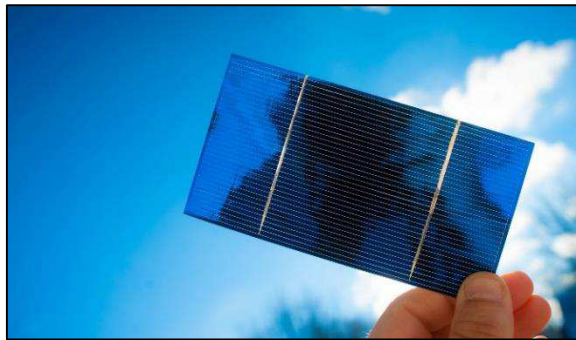
FONTE: SCIENTIA PLENA

Conforme a figura 3, nos materiais condutores as bandas de valência e de condução se superpõem (retângulo violeta), de modo que sempre vão existir elétrons na banda de condução, tornando-os bons condutores de eletricidade. Em outras palavras, em um condutor, ao menos uma banda de energia encontra-se parcialmente preenchida. Nos materiais isolantes a banda de valência está completamente cheia e, de acordo com Princípio da Exclusão de Pauli, os elétrons não podem ocupar um nível energético mais alto que esteja completamente preenchido; nos isolantes, a banda proibida apresenta uma intensidade muito alta, nesse caso, para os elétrons “saltarem” da banda de valência para a banda de condução é necessário fornecer uma quantidade de energia elevada ao material, provocando a quebra da rigidez dielétrica. Nos isolantes, a energia dos elétrons deve ser muito grande para que possa haver uma corrente

elétrica. Os materiais semicondutores apresentam uma estrutura de banda de energia semelhante à dos isolantes diferindo na intensidade ou largura da banda proibida, pois, nos semicondutores a energia de gap (E_g) é bem menor (CORREIA et al, 2017)

Para que isso aconteça, o painel solar deve ter, no seu interior, um conjunto de células fotovoltaicas, que podem ser feitas de silício, telúrio de cádmio, disseleneto de cobre e índio, entre outros (SOLAR POWER, 2021). A Célula fotovoltaica, ou célula solar, é um dispositivo capaz de converter a radiação solar diretamente em energia elétrica por meio do efeito fotovoltaico. Existem diversos tipos de células solares, que são classificadas de acordo com os materiais utilizados em seu processo de fabricação. Os principais são produzidos em silício, podendo ser cristalino, monocristalino (mono-Si), policristalino (multi-Si) e silício amorfo (a-Si), (AZEVEDO), conforme pode-se exemplificar e visualizar a célula fotovoltaica na figura 4:

FIGURA 4- CÉLULA FOTOVOLTAICA



FONTE: FONTESUL, 2021.

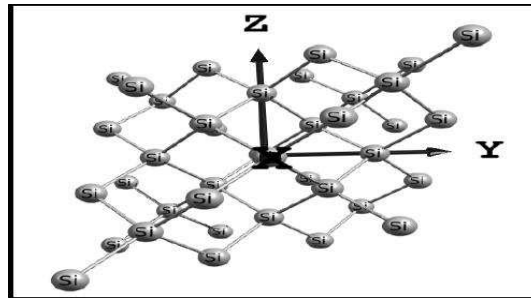
O material utilizado em células fotovoltaicas em grande parte o silício devido as suas características semicondutoras e sua abundância no planeta que chega a quase 30% do conjunto de elementos que constituem a crosta terrestre, e também pelo fato de não ser um material tóxico, com isso o silício foi alvo de grandes investigações altamente detalhadas nas últimas décadas. Além disso, o silício possui bastantes vantagens técnicas, a exemplo o *band gap*, que é uma banda de energia não permitida, a mesma é apropriada à radiação solar, possui baixo coeficiente de segregação de materiais, ou seja, é facilmente dopável. (NASCIMENTO, 2004).

Com o passar dos anos outras tecnologias foram surgindo, como exemplo os referidos filmes finos que podem ser constituídos de silício amorfo, Cobre – índio –deselenio ou cádmio- telúrio. Essas tecnologias têm aproveitado a oportunidade para se introduzirem de forma gradual no mercado. (BRITO; SILVA, 2006).

3.3 SILÍCIO

O silício é um componente essencial da maioria das rochas que formam a crosta terrestre, fazendo parte de mais de 28% da sua massa. Ele é o segundo elemento mais abundante na superfície da Terra, perdendo somente para o oxigênio. O sol, outras estrelas e meteoritos chamados aerólitos também possuem silício em sua composição. O silício apresenta uma forma cristalina muito dura, a figura a seguir mostra a estrutura dos cristais deste elemento (ECYCLE).

FIGURA 5:ESTRUTURA DE UM CRISTAL DE SILÍCIO

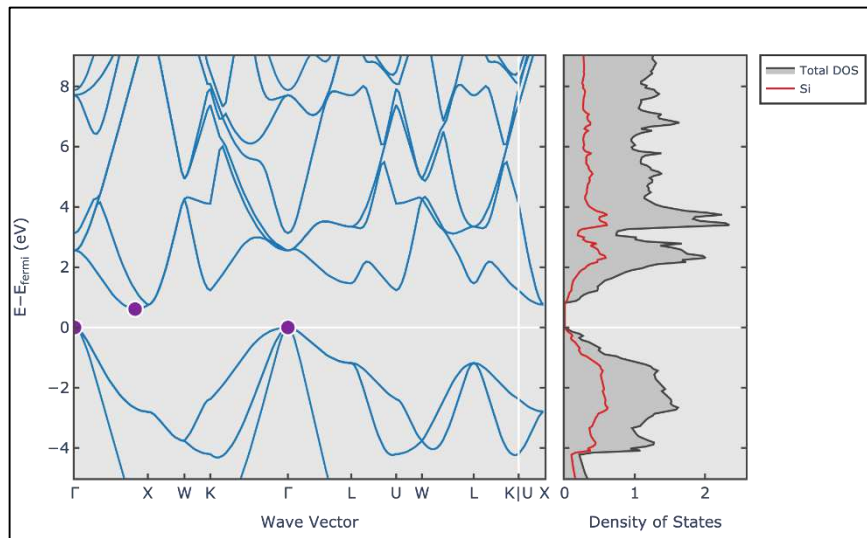


FONTE: MATERIALS PROJECT

Os cristais são muito importantes por possuírem uma propriedade especial chamada piezoelectricidade. Trata-se de uma característica que permite a transformação de energia mecânica em energia elétrica, tornando esse elemento semicondutor útil para a construção de diversos objetos, como painéis solares (ECYCLE).

Os semicondutores são capazes de mudar sua condição de isolante para condutores com grande facilidade. Isso se deve ao fato de que os semicondutores possuem uma banda proibida intermediária. A banda proibida é a região localizada entre as bandas de valência, ou camada de valência do átomo, e a banda de condução (região onde, sob ação de um campo elétrico, se forma a corrente elétrica). O gráfico a seguir, demonstra a banda de energia do silício, onde o intervalo entre os pontos na cor roxo, representam um *band gap* de 0,61eV, o que o torna um excelente material para uso na área elétrica (MUNDO EDUCAÇÃO).

GRÁFICO 1: BANDAS DE ENERGIA DO SILÍCIO



FONTES: MATERIALS PROJECT

3.4 SISTEMAS FOTOVOLTAICOS

O sistema fotovoltaico é um sistema que gera uma energia renovável e limpa. O Brasil tem um grande potencial para a geração desse tipo de energia já que, em boa parte do ano, o sol brilha consideravelmente forte. De acordo com os dados da Empresa de Pesquisa Energética (EPE), até 2030 cerca de 10% da produção nacional de energia virá da energia solar (MOURA, 2020).

O sistema fotovoltaico apresenta diversas vantagens, entre elas, a baixa manutenção, a possibilidade de instalação de baixa potência (W) até elevadas potências (GW) e a sua característica modular, possibilitando a ampliação do sistema conforme a necessidade (COSTA et al, 2020).

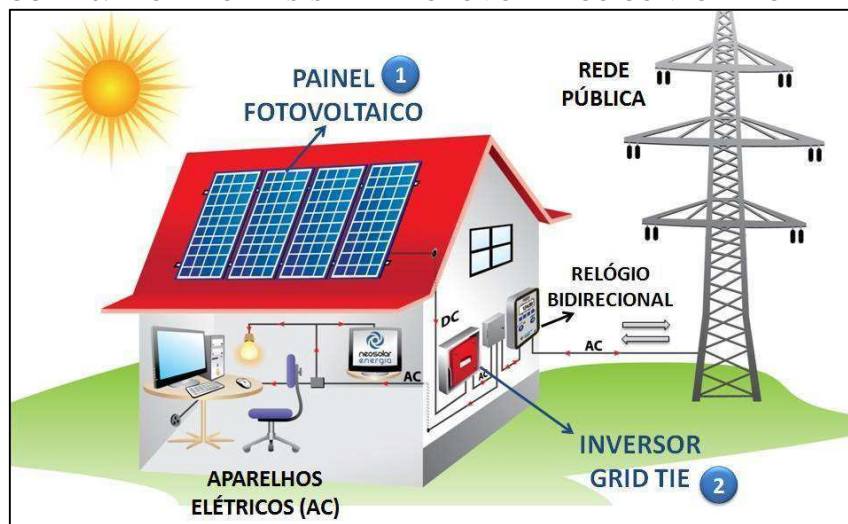
Com o extraordinário potencial do Brasil para geração de energia solar, o desenvolvimento e a difusão dessa tecnologia vêm crescendo a olhos vistos, mas ainda há muito a ser explorado e aperfeiçoado. Além das condições climáticas locais que propiciam o uso de sistemas fotovoltaicos, é importante salientar pesquisas que apresentam as vantagens e especificidades dessa tecnologia (COSTA et al, 2020).

Zomer (2012) expõe uma série de vantagens para o sistema elétrico, proveniente da instalação de painéis solares fotovoltaicos integrados ao sistema de distribuição. Dentre elas, destacam-se: diminuição das perdas por transmissão e distribuição de energia; redução dos custos com linhas de transmissão e distribuição; além dos geradores fotovoltaicos apresentarem mínima capacidade ociosa de geração de energia, quando estrategicamente distribuídos. Diante desse cenário, é de suma importância a utilização da energia solar convertendo-a em eletricidade.

Os sistemas fotovoltaicos são classificados de acordo à forma como gera ou distribui a energia elétrica: sistemas isolados (Off Grid), sistema híbrido, e sistema conectado à rede (On Grid), (BLUESOL, 2017). Cada tipo de produção tem as suas especificidades e, claro, demanda uma estrutura física adequada para captar o recurso que será utilizado para produzir energia (SOLARVOLT)

A figura a seguir nos mostra um exemplo de um tipo de sistema fotovoltaico residencial. A quantidade e o posicionamento de placas em cada sistema são decididos no momento do dimensionamento, quando se avalia a quantidade necessária de energia solar a ser gerada (NEOSOLAR,2018). Isso garantirá o pleno funcionamento dos equipamentos eletroeletrônicos daquela moradia.

FIGURA 6: MODELO DE SISTEMA FOTOVOLTAICO CONECTADO A REDE



FONTE: NEOSOLAR, 2018

Cada um dos tipos de sistemas, possui vantagens e desvantagens, o que varia é a necessidade de cada um. Em centros urbanos, o sistema on grid costuma ser mais vantajoso e econômico, mas em lugares afastados da cidade, onde a rede elétrica não chega, sistemas off grid são mais adequados

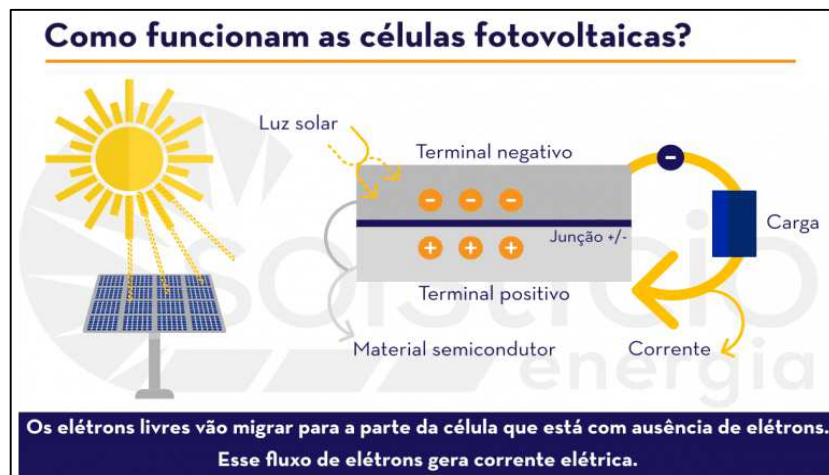
4 CÉLULAS E MÓDULOS FOTOVOLTAICOS

4.1 PRINCÍPIOS DE FUNCIONAMENTO

As células fotovoltaicas são unidades menores dos módulos fotovoltaicos, funcionam através da absorção de fótons, elementos de energia presentes na luz solar. Os fótons absorvidos excitam elétrons que fluem através das células fotovoltaicas, gerando eletricidade. Cada célula fotovoltaica é basicamente um sanduíche feito de duas fatias de material

semicondutor, normalmente silício. Durante a sua fabricação, o silício é dopado (adição intencional de impurezas em um material semicondutor com a finalidade de alterar suas propriedades elétricas) com outros materiais dando para cada fatia do material uma carga elétrica positiva ou negativa. Essa diferença de carga de diferentes polaridades da origem a um campo elétrico, que é essencial para o funcionamento da célula fotovoltaica (FREIRE,2017). Conforme exemplificado abaixo:

FIGURA 7: FUNCIONAMENTO DA CÉLULA FOTOVOLTAICA



FONTE: SOLSTÍCIO ENERGIA,2017

Para entender como funciona a energia solar fotovoltaica é importante ter em mente quais são os seus principais equipamentos. Painéis solares e inversor de frequência são os fundamentais, no entanto, cabos, proteções elétricas e estruturas metálicas de sustentação são outros itens necessários para o correto funcionamento (LUZSOLAR, 2017)

O painel solar é constituído por uma célula fotovoltaica. A célula fotovoltaica utiliza o “efeito fotovoltaico” para gerar eletricidade. Baseia-se na propriedade de certos materiais existentes na natureza, denominados semicondutores, que possuem uma banda de valência totalmente preenchida com elétrons e uma banda de condução totalmente vazia. Quando os fótons da luz solar na faixa do espectro de radiação visível incidem sobre este material, excitam elétrons da banda de valência enviando-os à banda de condução. A energia presente nos fótons é transferida para os átomos, liberando estes elétrons com alta energia. Uma barreira consegue impedir que estes elétrons retornem a sua posição anterior, podendo-se direcioná-los para um circuito elétrico, gerando uma tensão e uma corrente elétrica. (ALVARENGA, 2014). O inversor é o equipamento eletrônico que converte a corrente elétrica contínua (CC) em alternada (sinal elétrico CA) no sistema fotovoltaico. É praticamente um adaptador de energia para o sistema fotovoltaico (SUNERGIA, 2020).

O módulo fotovoltaico é a unidade básica de todo o sistema. O módulo é composto por células conectadas em arranjos produzindo tensão e corrente suficientes para a utilização da energia (BRITO; SILVA, 2006). Esse agrupamento é necessário, pois, somente uma célula, produz pouca quantidade de energia.

FIGURA 8: MÓDULOS FOTOVOLTAICOS



FONTE: FREIRE,2017

Em resumo, o princípio de funcionamento dos módulos fotovoltaicos é baseado no efeito fotovoltaico, em que a luz solar é convertida em eletricidade por meio de células fotovoltaicas, permitindo sua instalação e utilização em diferentes aplicações.

4.2 ESTRUTURA FÍSICA DE PAINÉIS SOLARES

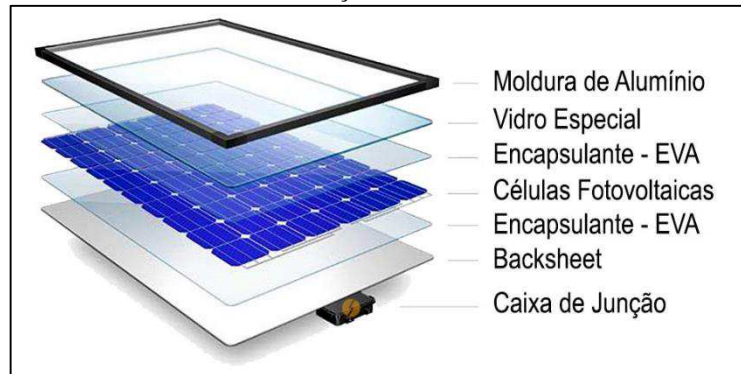
Todo sistema fotovoltaico utiliza painéis solares. Isso porque são os painéis que cumprem a função de absorver a irradiação solar para que ela possa ser convertida em energia elétrica. Devido a isso, são cruciais para que o sistema funcione da maneira como deve funcionar (COGERA, 2021)

A parte frontal do painel é coberta por uma camada de vidro ou plástico transparente. Essa camada tem como objetivo proteger as células solares contra danos físicos, como impactos e intempéries, enquanto permite a passagem da luz solar para o interior do painel. Abaixo das células solares, há uma camada de encapsulante, normalmente feita de EVA (etileno acetato de vinila) ou outro material similar. Essa camada tem a função de isolar eletricamente as células solares e protegê-las contra umidade e possíveis danos causados por agentes externos (SOLAR, 2019).

Na parte traseira dos painéis fotovoltaicos, geralmente há uma camada de encapsulante semelhante à camada frontal. Essa camada atua como isolante adicional e também confere rigidez e proteção estrutural ao painel. Os painéis solares são geralmente montados em

uma estrutura de suporte, que pode ser feita de alumínio ou outros materiais resistentes. Essa estrutura permite que os painéis sejam fixados em telhados, suportes ou outras superfícies, garantindo sua estabilidade e posicionamento adequado para captar a luz solar de maneira eficiente (SUNERGIA, 2020). A figura abaixo demonstra a estrutura física de um painel solar.

FIGURA 9: COMPOSIÇÃO DE UM PAINEL SOLAR

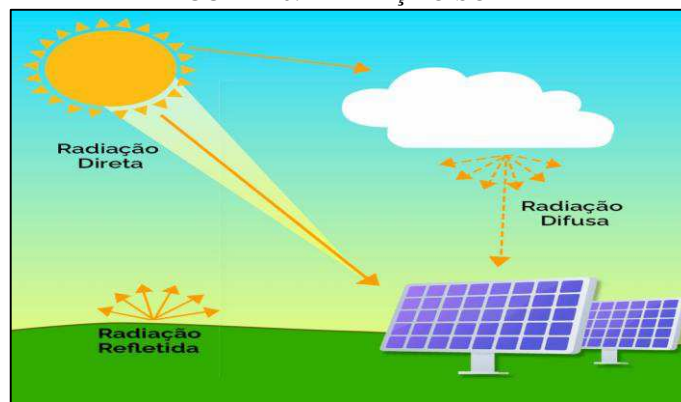


FONTE: PORTAL SOLAR, 2021.

4.3 FATORES EXTERNOS QUE INFLUENCIAM NA CONVERSÃO DA ENERGIA SOLAR

A conversão da energia solar é influenciada por vários fatores externos que podem afetar a quantidade de energia solar disponível e sua eficiência de conversão, dentre eles a radiação solar. A quantidade e intensidade da radiação solar disponível em determinada região afeta diretamente a quantidade de energia solar que pode ser convertida, além do mais, temos a falsa ideia de que, quanto maior a temperatura, maior será a geração de energia (ABSOLAR,2016).

FIGURA 10: RADIAÇÃO SOLAR



FONTE : QUANTAGERAÇÃO,2023.

Outro fator que interfere na produção de energia, é a localização geográfica e posição de onde será instalado o sistema fotovoltaico, isso determina a quantidade de luz solar

incidente, com áreas mais próximas ao equador recebendo mais energia solar. As condições climáticas, como nebulosidade, chuva e neve, podem bloquear ou reduzir a quantidade de energia solar que atinge os painéis solares e também a posição do sol no céu ao longo do dia, afeta a quantidade de geração (PRIME).

A poluição atmosférica é um motivo relevante, partículas suspensas na atmosfera, como poeira, fumaça e poluentes, podem bloquear a luz do sol e reduzir a eficiência dos painéis solares bem como o sombreamento causado por obstruções, como prédios, árvores ou estruturas adjacentes, podem lançar sombras nos painéis solares, diminuindo a capacidade de produção (BARBOSA et al).

Simplificadamente, essas são algumas das principais condições que interferem diretamente na capacidade de produção energética dos painéis solares.

5 SISTEMAS FOTOVOLTAICOS

5.1 SISTEMA ON-GRID

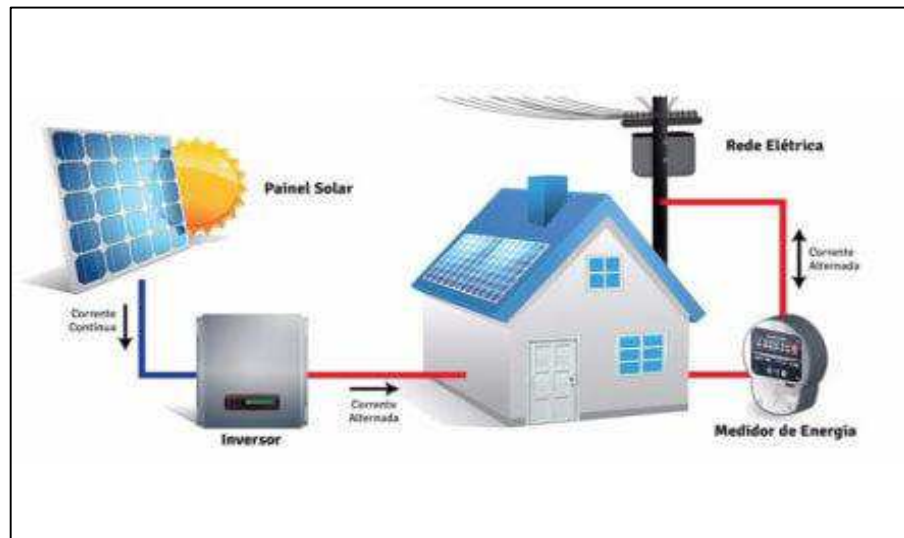
Os sistemas ON-Grid, também conhecidos como sistemas conectados à rede elétrica, possuem um crescimento exponencial no mercado fotovoltaico em países desenvolvidos. São, portanto, considerados uma fonte complementar ao sistema elétrico e empregados em locais já atendidos por energia elétrica. Esse sistema de energia solar fotovoltaico utiliza a luz do sol para gerar a energia elétrica. A rede da concessionária funciona como uma bateria que recebe todo excedente de energia gerado pelo sistema (ALVES, 2019)

Esse tipo de sistema, permanece conectado à rede de distribuição, assim, em momentos em que não há produção de energia, é possível utilizá-la da distribuidora e, em casos de excesso de produção, recebem-se créditos de energia (ABSOLAR, 2016).

Os dados de consumo das áreas urbanas do Brasil mostram diferença entre as regiões onde prédios comerciais dominam e regiões residenciais, de forma que a primeira apresenta picos de demanda no período diurno, ao passo que a segunda apresenta valores de pico de demanda ao anoitecer (INPE, 2017)

A energia solar gerada pelos painéis é direcionada para um inversor solar, que converte a corrente contínua (CC) gerada pelos painéis em corrente alternada (CA) utilizável pela rede elétrica. O inversor solar também sincroniza a eletricidade gerada pelos painéis solares com a frequência e a fase da rede elétrica. A energia gerada é usada primeiro para alimentar as cargas elétricas presentes na residência ou no estabelecimento (PINHO e GALDINO, 2014). A figura abaixo demonstra esse processo.

FIGURA 11: SISTEMA ON-GRID



FONTE: BÃO RIBEIRO, 2022.

O inversor fotovoltaico interativo também age na função chamada de misturador de energia, que mistura a energia solar à energia elétrica convencional, com isso permitindo a utilização de qualquer equipamento que seja consumidor de energia elétrica e que esteja ligado à rede, como secador de cabelo, ar condicionado e geladeira, por exemplo. Um sistema on grid sempre trabalha em paralelo com a rede pública de distribuição de energia elétrica, em paralelo com a distribuição convencional, no caso, ela opera exatamente da mesma forma que uma usina elétrica convencional (BÃO RIBEIRO, 2022).

É possível rastrear a quantidade de energia gerada, o consumo de eletricidade e a economia financeira proporcionada pelos painéis solares, sendo adequado para áreas onde a rede elétrica é estável e confiável.

Este tipo de sistema utiliza a geração distribuída e pode ser classificado de acordo com a potência gerada. Em um sistema fotovoltaico de micro geração, geralmente, a unidade consumidora - local onde a micro geração ou mini geração distribuída se encontra instalada - está em residências ou em lotes próximos ao local de consumo da energia gerada por este tipo sistema. Já os tipos de unidades consumidoras que utilizam um sistema fotovoltaico de mini geração são, em sua maioria, prédios comerciais (ALVES, 2019).

O sistema On-grid elimina a necessidade de armazenamento de energia, sendo assim, gera mais uma economia pois o usuário não precisa comprar baterias para a retenção da energia produzida. Durante o dia, quando a geração solar é alta, é possível obter economia significativa na conta de energia elétrica, já que parte ou toda a eletricidade consumida é proveniente dos painéis solares. Os medidores bidirecionais são usados para registrar tanto a

eletricidade consumida quanto a eletricidade injetada na rede. A manutenção do sistema On-grid é geralmente mínima, envolvendo principalmente a limpeza periódica dos painéis solares (PORTAL SOLAR,2021).

O tempo de retorno do investimento desse tipo de sistema, depende de vários fatores, como o custo da eletricidade convencional, o tamanho do sistema, os incentivos governamentais e a tarifa de alimentação. A vida útil dos painéis solares utilizados no sistema On-grid geralmente varia de 25 a 30 anos, com os avanços contínuos na tecnologia solar, o sistema está se tornando mais acessível e eficiente, tornando-se uma escolha atraente para muitos consumidores (PORTAL ENERGIA, 2015).

5.2 SISTEMA OFF-GRID

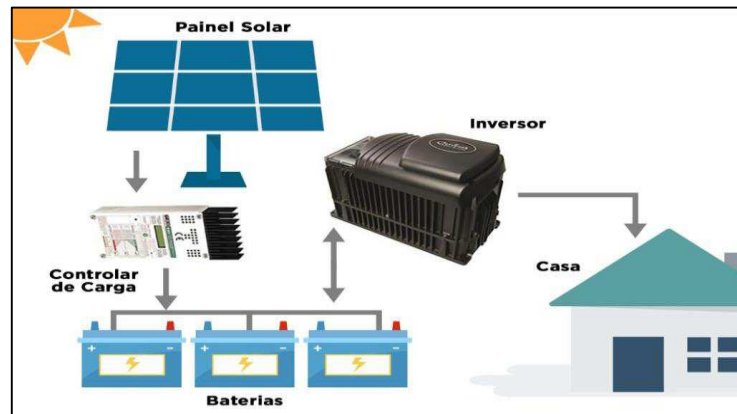
Os sistemas off grid são considerados como sistemas isolados ou não conectados à rede elétrica, ou seja, eles operam de forma anônima armazenando energia solar em baterias para posterior utilização quando não houver produção (ALVES, 2019). Esse sistema pode fornecer energia elétrica para bases de pesquisas em locais isolados, moradias em áreas remotas, aldeias indígenas que estão em regiões afastadas e não são atendidos por concessionária de energia elétrica.

Dessa forma, os habitantes mais afastados das fontes de geração, como por exemplo em fazendas, sítios e zonas rurais, sofrem com a dificuldade de receber energia elétrica, que está associada aos custos elevados de distribuição e transmissão, visto que é essencial uma rede de transmissão de alta tensão para o atendimento desses clientes (ALVES, 2019).

O sistema permite que os proprietários vivam de forma autossuficiente e independente em termos energéticos, sendo necessário monitorar e gerenciar cuidadosamente o consumo de energia para evitar esgotar a capacidade das baterias. É importante ressaltar a necessidade do dimensionamento adequado do sistema de armazenamento de bateria para atender à demanda de eletricidade durante períodos de baixa geração solar (BÁO RIBEIRO, 2022)

Para o funcionamento de um sistema solar fotovoltaico é necessário a instalação de alguns equipamentos auxiliares em conjunto com os módulos. Esses componentes irão servir para o processo de armazenamento e distribuição da energia elétrica gerada, dependendo do tipo de sistema implantado (SILVA *et al.*, 2021). O sistema off grid é composto por painel fotovoltaico, controlador de carga, inversor e banco de baterias utilizadas para o armazenamento e fornecimento da energia elétrica gerada nos períodos em que há radiação solar (TORRES, 2012). A figura abaixo nos mostra o sistema off-grid:

FIGURA 12: SISTEMA FOTOVOLTAICO OF-GRID



Fonte: FREIRE,2017

No sistema off-grid o inversor solar também converte a corrente contínua (CC) gerada pelos painéis solares em corrente alternada (CA) utilizável para alimentar as cargas elétricas. Sua potência pode variar de alguns watts para necessidades básicas de iluminação até quilowatts para atender a demandas maiores pois, foi projetado para ser robusto e autônomo, capaz de fornecer eletricidade mesmo em condições adversas. Esse sistema, pode ser mais caro em comparação com o sistema On-grid, devido aos custos adicionais associados ao armazenamento de bateria e ao gerenciamento de energia regular das baterias que é essencial para garantir sua vida útil e desempenho adequado. O sistema Off-grid oferece a liberdade de gerar eletricidade limpa e renovável, proporcionando independência energética e contribuindo para um futuro mais sustentável (HEIN, 2021).

5.3 SISTEMA HÍBRIDO

Sistemas híbridos são normalmente compostos por fontes renováveis cujos recursos são intermitentes e, caso necessário, contam com a complementação de grupos geradores com motores a combustão, para suprir eventuais períodos de escassez de recursos renováveis. Entre as fontes renováveis, destaca-se a solar fotovoltaica, a eólica, a hídrica e a biomassa; entre os grupos geradores, são utilizados usualmente geradores a diesel, a gasolina, a gás, ou a biocombustíveis. A aplicação ótima de sistemas híbridos ocorre quando há disponibilidade de recursos energéticos no local de instalação do sistema, e esses recursos são adequadamente combinados para garantir atendimento confiável e de qualidade no ponto de entrega (ROBERTS, 2012). A figura 13 nos mostra a configuração básica de um sistema fotovoltaico híbrido:

FIGURA 13: SISTEMA FOTOVOLTAICO HIBRIDO



FONTE: SOLAR BRASIL

Esses sistemas aproveitam a energia solar durante o dia e podem alternar para outra fonte de energia, como uma bateria ou uma rede elétrica convencional, quando a energia solar não está disponível, isso garante um fornecimento constante de eletricidade, mesmo quando a geração solar é limitada (ENERGIA TOTAL, 2022).

Nesse sentido, esse sistema pode ser bem complexo sendo indispensável o domínio de todas as fontes presentes para que seja possível obter o máximo de eficiência na geração de energia. Ademais, o sistema híbrido exige a utilização de um inversor, podendo ter ou não um sistema de armazenamento de energia (TORRES, 2012).

Em geral, os sistemas híbridos são empregados para sistemas de médio a grande porte vindo a atender um número maior de usuários. Por trabalhar com cargas de corrente contínua, o sistema híbrido também apresenta um inversor. Devido à grande complexidade de arranjos e multiplicidade de opções, a forma de otimização do sistema torna-se um estudo particular para cada caso (CAMARA, 2017).

Em síntese, os sistemas híbridos de energia fotovoltaica são soluções versáteis e eficientes que combinam energia solar, armazenamento de baterias e outras fontes para fornecer eletricidade confiável, econômica e sustentável.

5.4 IMPACTOS AMBIENTAIS

O setor energético produz impactos ambientais em toda sua cadeia de desenvolvimento, desde a captura de recursos naturais básicos para seus processos de produção até seus usos finais por diversos tipos de consumidores. Do ponto de vista Global, a energia tem participação significativa nos principais problemas ambientais da atualidade (REIS, 2011),

por mais limpos que sejam os processos de geração de eletricidade, resíduos sempre serão gerados, sejam eles líquidos, sólidos ou gasosos.

O tempo de vida útil dos módulos gira em torno de 20 a 25 anos na maioria dos fabricantes dependendo do tipo e material usado na sua produção (DIAS, 2015). Embora tenha uma vida útil relativamente longa, surge a problemática dos resíduos de silício que terão de ser descartados e de alguma forma reaproveitados.

A reciclagem das placas fotovoltaicas ainda é ineficaz e se direciona basicamente para a reutilização dos materiais semicondutores, sendo de extrema importância o investimento de novas pesquisas e tecnologias para a reciclagem de todo material de composição das placas e redução de custos do processo. Todo o descarte deste material e a necessidade da reciclagem abre uma porta para um novo mercado de reciclagem que segundo alguns autores pode gerar bilhões de dólares. Estima-se que em 2050 a China terá 13,5 milhões de toneladas de resíduos. Esta questão exige a necessidade e urgência enquanto ainda dá tempo de não termos toneladas de placas acumuladas aguardando reciclagem e solução (ANAMI, 2017).

O Brasil ainda está muito atrasado quando o assunto é a reciclagem das placas fotovoltaicas. Sendo as questões legais e de tecnologia muito mais desenvolvidas na Europa e Estados Unidos mesmo que com algumas divergências relacionadas ao descarte. Para que a energia solar seja considerada uma energia totalmente limpa, deve se incluir sua destinação final correta no âmbito da reciclagem e descarte adequado. Atualmente as empresas fornecedoras de placas fotovoltaicas estão sendo responsável pela sua destinação final, mas ainda assim com um descarte inadequado e baixo potencial de reciclagem dos componentes (OLIVEIRA et al, 2017).

Entre as formas de reciclagem dos painéis fotovoltaicos de silício estão o tratamento químico e físico. O método químico feito, por exemplo, com solventes traz grande eficiência na reciclagem deste material (COELHO & SERRA, 2018).

No processo de reciclagem e separação de material, alguns autores defendem para os módulos de silícios, o processo térmico por se tratar de uma opção mais vantajosa no âmbito econômico, rápida e mais simples. Associado ao tratamento químico como um segundo passo nestes casos. Outras técnicas também podem ser realizadas obtendo um percentual satisfatório de silício e outras matérias (DIAS, 2015).

Além das mudanças tecnológicas e das frequentes mudanças da economia global, um fator cada vez mais importante na indústria de energia elétrica, assim como em todas as outras atividades humanas, é a crescente conscientização sobre a importância do ambiente natural. Existe o entendimento de que um dos maiores desafios da atividade humana nestes

tempos é o projeto de um modelo de desenvolvimento sustentável, definido como um modelo que resolve as necessidades do presente sem comprometer a capacidade das gerações futuras de resolver suas próprias necessidades (GOMÉZ, et al)

Mesmo tendo um ciclo de vida longo, as células fotovoltaicas chegam ao seu fim e como a maioria possui silício na sua composição, existe atualmente um forte alerta sobre a necessidade de descarte trazendo uma grande questão com relação ao impacto ambiental gerado por estes resíduos. Dentro dos materiais existe também a presença de vidro, alumínio e material semicondutor, mas que possuem reciclagem eficiente de 97% na produção de novas placas sem silício (MORAIS, 2018).

Apesar da energia solar trazer uma série de impactos ambientais positivos em comparação com as fontes de energia tradicionais, o descarte inadequado desses materiais pode comprometer ainda mais o meio ambiente e a saúde humana com a liberação de elementos tóxicos, sendo necessário para tal, uma forma de descarte excepcional adequada em conjunto com o reaproveitamento dos elementos que compõem as placas fotovoltaicas.

5.5 EVOLUÇÃO DA ADESÃO AO SISTEMA FOTOVOLTAICO NO MARANHÃO

O estado do Maranhão é responsável por uma grande parte de toda a geração distribuída solar produzida no Nordeste. No ano de 2022, segundo dados da ANEEL foram gerados mais de 178 MW em potência instalada somente pelos novos sistemas implementados em GD (Geração Distribuída) solar fotovoltaica, contando com mais de 29 mil sistemas de geração fotovoltaicas, instaladas em 214 dos seus municípios (ANEEL, 2023).

Devido à sua localização geográfica, o território maranhense destaca-se entre os mais promissores em relação à geração de energia fotovoltaica no país, sendo utilizada em residências, estabelecimentos comerciais, indústrias e, até mesmo, em propriedades rurais (PORTALSOLAR,2021)

Ainda que haja diversas formas de geração de energia elétrica, nos últimos anos a aquisição do sistema solar fotovoltaico vem ganhando espaço. A tabela abaixo nos mostra esses dados e também é possível observar que a produção energética tem forte aumento anual gerando economia através da produção das unidades geradoras que também são direcionadas as unidades remotas em forma de desconto na tarifa de energia (ANEEL, 2023).

TABELA 1: QUANTIDADE DE GD NO MARANHÃO

ANO	QTD GD	UCs REC	CRÉDITOS	POT INSTALADA (kW)
2022	13.880		20.905	178.079,53
2021	9.037		12.457	115.271,46
2020	4.252		7.384	55.090,20
2019	2.051		2.715	24.356,26
2018	426		614	5.019,84
2017	127		149	1.425,76
2016	81		83	1.025,18
2015	22		27	334,94
2014	1		1	33,00
Total	29.877		44.335	380.636,17

ADAPTADO: ANEEL,2023

A partir do ano de 2014, como consta nos dados da ANEEL, o estado do Maranhão começou a ter suas primeiras unidades de produção fotovoltaica, sendo que, desde então o segmento dessa energia limpa e renovável vem aumentando e praticamente dobra a cada ano, como nos mostra o gráfico a seguir, (ANEEL, 2023).

GRÁFICO 2: ADESÃO ANUAL AO SISTEMA FOTOVOLTAICO



FONTE : ANEEL,2023.

Essa aquisição acontece em sua maioria através dos consumidores residenciais, porém, conforme tabela 2 é possível constatar que o sistema fotovoltaico é empregado nas diversas classes de consumo, desde a iluminação pública até setores industriais, em zonas rurais e departamentos do poder público, (ANEEL, 2023).

TABELA 2: CLASSES DE CONSUMO

CLASSE	QTD GD	UCs REC CRÉDITOS	POT INSTALADA (kW)
Comercial	2.381	5.979	89.825,30
Iluminação pública	2	3	13,00
Industrial	132	233	10.535,75
Poder Público	149	236	7.042,10
Residencial	26.552	36.485	252.302,54
Rural	657	1.295	19.760,48
Serviço Público	4	104	1.157,00
Total	29.877	44.335	380.636,17

FONTE: ANEEL,2023

Baseado nessa análise, é possível concluir que o sistema de geração de energia elétrica a partir do sol vem gradativamente sendo implantado cada vez mais no estado do Maranhão, apesar da falta de incentivos fiscais e políticas públicas voltadas a fomentar o ramo. Há de se ressaltar que o estado é um dos mais pobres da federação, fator que contribui significativamente para que maior parte da população não consiga ter acesso a essa fonte de energia renovável.

É um setor que traz imensos benefícios econômicos, sociais, ambientais, energéticos e estratégicos, conta com amplo apoio da população brasileira e atrai empreendedores e investimentos de forma espalhada e distribuída em todas as regiões do Brasil. Com um plano consistente dedicado ao setor, o País e o planeta têm muito a ganhar com o avanço da energia solar fotovoltaica (ABSOLAR 2023).

5.6 EVOLUÇÃO DA ADESÃO AO SISTEMA FOTOVOLTAICO NA CIDADE DE CAXIAS – MA.

Conforme informações da ANEEL, até dezembro de 2022, a Cidade de Caxias contava apenas com 655 sistemas de geração de energia solar fotovoltaica tendo uma potência de produção de pouco mais de 8 MW, o que representa 2,19% de todo o sistema instalado no estado, a tabela a seguir nos mostra o progresso desse sistema na cidade (ANEEL, 2023).

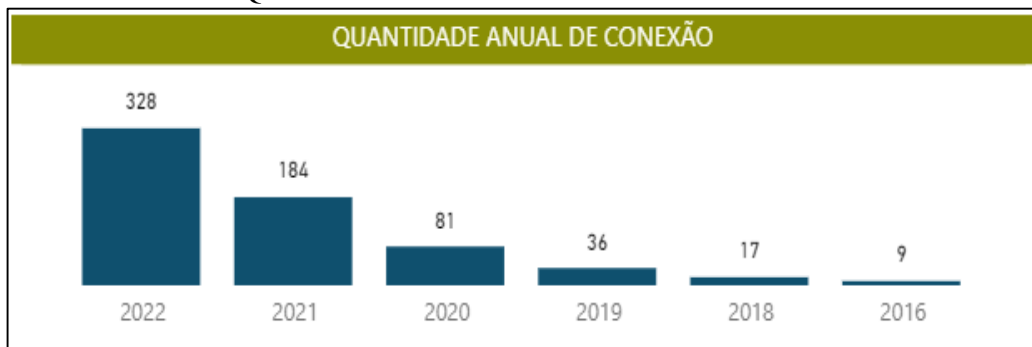
TABELA 3: UNIDADES COM CONSUMO SOLAR EM CAXIAS - MA

ANO	QTD GD	UCs REC CRÉDITOS	POT INSTALADA (kW)
2022	328	458	4.047,99
2021	184	242	2.233,48
2020	81	113	944,38
2019	36	42	366,67
2018	17	20	257,58
2016	9	9	168,00
Total	655	884	8.018,10

FONTE: ANEEL, 2023.

A partir de 2016, a tecnologia de obtenção de energia solar, começa a ser implementada na cidade, desde então a adesão ao sistema vem crescendo continuamente, esse crescimento vem mais que dobrando a cada ano que passa como pode-se observar abaixo (ANEEL, 2023).

GRÁFICO 3: QUANTIDADE DE ADESÃO AO SISTEMA FOTOVOLTAICO



FONTE: ANEEL,2023.

Analogamente ao estado do Maranhão, Caxias conta com algumas classes de consumo, sendo o residencial predominante. O uso comercial conta com uma grande fatia do mercado sendo responsável por quase 10% dos pontos de geração presentes no município, conforme apresentado na Tabela 4:

TABELA 4: CLASSES DE CONSUMO DA ENERGIA SOLAR EM CAXIAS-MA

CLASSE	QTD GD	UCs REC CRÉDITOS	POT INSTALADA (kW)
Comercial	58	93	1.462,95
Industrial	1	1	60,00
Poder Público	7	7	720,60
Residencial	568	743	5.441,37
Rural	21	40	333,18
Total	655	884	8.018,10

FONTE: ANEEL,2023.

É possível ver que o município de Caxias detém uma fatia bem pequena do sistema de energia fotovoltaica, porém, em plena expansão. Ainda que, com os mesmos desafios encontrados de forma geral, a cidade enfrenta problemas semelhantes ao estado do Maranhão como um todo, sendo necessário para uma grande implementação do sistema, políticas públicas e linhas de financiamentos com juros mais baixos, voltadas a incentivar a aquisição dessa fonte de energia.

6 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Diante de todo o conteúdo exposto ao longo do texto, é perceptível que a produção de energia elétrica por conversão da radiação solar é uma promissora tecnologia, limpa e renovável para produzir a eletricidade (ALVES, 2019). A conversão citada da energia através do sol em corrente elétrica acontece pelos efeitos da radiação, sobre determinados materiais, particularmente os semicondutores. Em meio a esses, destacam-se os efeitos fotoelétrico e fotovoltaico, principais responsáveis por esse processo.

Tendo a possibilidade de utilização de um dos sistemas de conversão, como por exemplo, o On-grid que é ideal para áreas urbanas onde há energia elétrica pública, por outro lado o sistema Off-grid se torna indicado para ser usado em áreas isoladas onde ainda não chegou rede de distribuição de eletricidade, bem como o sistema Híbrido que vem a contar com mais de uma fonte de geração.

Outro ponto a ser destacado é a viabilidade econômica para aquisição dos componentes do sistema fotovoltaico. Atualmente, a tecnologia de produção de energia solar é muito cara. As placas residenciais, por exemplo, são exclusividades da população economicamente mais rica, exceto nos casos em que o governo custeia ou financia o equipamento para lares mais humildes. No entanto, a tendência é que esse equipamento fique mais barato nos próximos tempos (PENA).

A energia solar apresenta os menores impactos ambientais entre todas as fontes energéticas disponíveis ao homem, sem emissão de poluentes na sua geração elétrica ou efeitos negativos significantes ao meio ambiente na construção de grandes usinas, sendo estes ainda nulos em pequenos e médios projetos de geração distribuída (BLUESOL,2021). No entanto, o futuro do uso dessa tecnologia trará desafios, pois, o silício, principal componente das células fotovoltaicas perderá sua vida útil e capacidade de produzir corrente elétrica, se tornando mais um dejetos juntamente com outros materiais presentes em painéis solares. Para isso, tecnologias de reciclagem e reaproveitamento desses materiais tem que serem criados o quanto antes, da mesma forma, locais adequados e preparados para seu descarte.

Um desafio paralelo para a indústria é o desenvolvimento de acessórios e equipamentos complementares para sistemas fotovoltaicos, com qualidade e vida útil comparáveis às dos módulos (fabricantes de módulos de silício cristalino garantem os seus produtos por 25 anos) Sistemas de armazenamento de energia e de condicionamento de potência têm sofrido grandes avanços no sentido de aperfeiçoamento e redução de custos, embora ainda não tenham atingido o grau de desenvolvimento desejado (PINHO e GALDINO, 2014).

Ainda que a implementação do sistema fotovoltaico venha crescendo visivelmente no Estado do Maranhão tal como na cidade de Caxias, a falta de programas governamentais direcionados para essa área, torna esse crescimento longe do ideal, já que, não é acessível a todas as camadas da sociedade. Incentivos fiscais e planos flexíveis de pagamentos, tornariam a produção de energia solar ainda maior e alcançaria cada vez mais os lares brasileiros.

7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Conhecer sobre os processos de geração de eletricidade é de fundamental importância tanto para professores das diversas áreas de ensino, como estudantes e para comunidade em geral. Nesse sentido, o sistema de geração fotovoltaica se destaca, tendo em vista que é uma tecnologia promissora no ramo de energias limpas e renováveis.

Com praticamente nenhuma emissão de poluentes em seu processo de conversão de energia, esse sistema se sobressai em relação aos demais meios de produção de eletricidade, que causam, em sua maioria, grandes impactos ambientais. Portanto, além dos benefícios para a humanidade e contribuição para o ecossistema do planeta, o sistema de energia solar estimula os estudos e desenvolvimento de pesquisas voltadas a aprimorar ainda mais o sistema.

Esse trabalho mostra de maneira simples e direta como funciona o sistema de geração solar fotovoltaica, os equipamentos usados, os tipos de sistemas que são implantados conforme a realidade e a necessidade do consumidor e fatores que interferem no sistema. Além de mostrar a evolução da implementação do sistema na cidade de Caxias bem como no Estado do Maranhão, trazendo a luz sobre o assunto para alunos dos cursos das áreas de exatas e engenharia, assim também como a empresas que buscam informações sobre o setor e sua implantação, servindo de base para pesquisas futuras e aprofundamento sobre o assunto.

REFERÊNCIAS

- ALVARENGA, C. A. “**Sistemas de Energia Solar Fotovoltaica**”. Solenerg Engenharia[2014]. Disponível em:<www.solenerg.com.br>. Acesso em: 02 jun. 2023
- ALVES, Marliana de Oliveira Lage. **Energia solar: estudo da geração de energia elétrica através dos sistemas fotovoltaicos on-grid e off-grid**. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharel em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal de Ouro Preto. Ouro Preto, 2019.
- ANAMI, A. M. **Painel fotovoltaico: perspectivas e desafios**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Londrina, 80 f. 2017.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA (ABSOLAR). **Geração Distribuída Solar Fotovoltaica. Encontro Nacional dos Agentes do Setor Elétrico – ENASE**. Rio de Janeiro, 2016. Disponível em: <http://www.absolar.org.br/>. Acesso em: 23 abr. 2023.
- AZEVEDO, Julia. **O que é célula fotovoltaica e como ela funciona?** Disponível em: <https://www.ecycle.com.br/celula-fotovoltaica/> . Acesso em: 22 jun. 2023
- BÁO RIBEIRO, **Sistema On Grid: O processo de produção de energia solar fotovoltaica**, Disponível em: <https://baoribeiro.com.br/blog/sistema-de-energia-on-grid-como-funciona/> Acesso em: 07 jun. 2023.
- BLUESOL, **As 5 Principais Questões sobre o Módulo Fotovoltaico Respondidas para Você Entender Tudo**,2021. Disponível em: <https://blog.bluesol.com.br/modulo-fotovoltaico/>Acesso em: 11/05/ 2023
- BRITO, Miguel C.; SILVA, José A. **Energia fotovoltaica: conversão de energia solar em electricidade**. Faculdade de ciências da Universidade de Lisboa, 2006
- BURSZTYN, M.. (2020). **Energia solar e desenvolvimento sustentável no Semiárido: o desafio da integração de políticas públicas**¹. *Estudos Avançados*, 34(98), 167–186. <https://doi.org/10.1590/s0103-4014.2020.3498.011>.
- CÂMARA, Carlos Fernando. **Sistemas Fotovoltaicos Conectados À Rede Elétrica No Brasil**. Monografia (Especialização em Formas Alternativas de Energia) - Departamento de Engenharia da Universidade Federal de Lavras. Lavras, 2017.
- CARVALHO, Franco Rodrigues de, **Princípios Físicos aplicados a produção de energia fotovoltaica**, Trabalho de Conclusão de Curso (Física Licenciatura), Universidade Estadual do Maranhão, 2019.
- COELHO, T.; SERRA, J. **Tecnologias para Reciclagem de Sistemas Fotovoltaicos: Impactos Ambientais**. *Revista Meio Ambiente e Sustentabilidade*, Volume 15, número 7. Curitiba – PR, jun/dez - 2018.
- COGERA, **Entenda como é a estrutura de um painel solar**; Disponível em: <https://cogera.com.br/como-e-a-estrutura-de-um-painel-solar/>-Acesso em: 09 jun. 2023.
- COSTA et al. **Energia solar fotovoltaica uma alternativa viável?** Costa, A. C., Oliveira, D. F. de, Rabelo, M. H., Pinheiro, M. D. da S. L. B., & Piazzarolo, J. (2020)/ Photovoltaic solar

energy a viable alternative?. Brazilian Journal of Development, 6(9), 72637–72656. <https://doi.org/10.34117/bjdv6n9-639>

CRESEBB-CEPEL, Centro de Pesquisas de Energia Elétrica. Grupo de Trabalho de Energia Solar. **Manual de engenharia para sistemas fotovoltaicos** / Rio de Janeiro, CRESEBB, 2014

DIAS, P. R. **Caracterização e reciclagem de materiais de módulos fotovoltaicos** (painéis solares). 2015.

DO NASCIMENTO, Cássio Araújo. **Princípio de funcionamento da célula fotovoltaica**. Diss. Universidade Federal de Lavras, 2004.

DO NASCIMENTO, Cássio Araújo. **Princípio de funcionamento da célula fotovoltaica**. Diss. Universidade Federal de Lavras, 2004.

ENERGIA, **A Sinergia entre o Efeito Fotoelétrico e o Efeito Fotovoltaico**, Disponível em: <https://energiaqueinova.com/publicacoes/a-sinergia-entre-o-efeito-fotoeletrico-e-o-efeito-fotovoltaico/> . Acesso em 03 jun. 2023

FONTE SUL, **Célula fotovoltaica: o que é e quais são seus tipos?**, 2021, disponível em: <https://www.fontesul.com.br/celula-fotovoltaica-o-que-e-e-quais-sao-seus-tipos/>. Acesso em: 10/04/2023.

FREIRE, Felipe **Célula Fotovoltaica, como funciona?**, 2017 Disponível em: <https://www.shareenergy.com.br/como-funciona-celula-fotovoltaica/> Acesso em: 27 mai. 2023.

GOMÉZ, Antonio et al. **Sistemas de Energia Elétrica**. Rio de Janeiro: Ltc 2011

HEIN, Henrique. **Apenas 1 em cada 139 famílias brasileiras possui energia solar**. 2021. Disponível em: <https://canalsolar.com.br/apenas-uma-cada-139-familias-brasileiras-possui-energia-solar/> . Acesso em: 08 mai. 2023

INPE, **Atlas Brasileiro de Energia Solar**. 2a. ed. São José dos Campos, 2017. Disponível

LEITE, Girlane Castro Costa, **Energia Sola Fotovoltaica: Sistema Off Grid como geração de energia elétrica**. Doutora em Física pela Universidade de Brasília (UnB), Professora da Universidade Federal do Maranhão (UFMA). ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1131-043X>. Currículo Lattes: <http://lattes.cnpq.br/0000528802857269>. Disponível em: <https://www.nucleodoconhecimento.com.br/livros/engenharias/sistema-off-grid>. Acesso em 23 de abr. 2023

LOSCHI, Hermes José. **Conceitos fundamentais sobre sistemas de rastreamento solar e predição da geração solar**. 2018. Disponível em: https://www.researchgate.net/profile/Hermes_Jose_Loschi. Acesso em: 18 mar. 2023

MACHADO, C. T.; Miranda, F. S. **Energia solar fotovoltaica: uma breve revisão**. Resv. Virtual Química, v. 7, n. 1, p. 126-143, 2014. Disponível em: <http://rvq.sbq.org.br/imagebank/pdf/v7n1a08.pdf>. Acesso em: 05 jun. 2023

MORAIS, A. **Avaliação dos problemas que envolvem o descarte dos resíduos sólidos provenientes de painéis solares fotovoltaicos**. Meio Ambiente poços, Anais 2018. Disponível em: <http://www.meioambientepocos.com.br/Anais2018/Energias%20Renov%C3%A1veis/55>

9.%20Avalia%C3%A7%C3%A3o%20dos%20Problemas%20que%20Envolvem%20o%20De scarte%20dos%20Res%C3%ADduos%20S%C3%B3lidos%20Provenientes%20de%20Pain%C3%A9is%20Solares%20Fotovoltaicos.pdf>. Acesso em: 20 de maio de 2023.

OLIVEIRA, D. B, LEBENSOLD, F. OLIVEIRA, L. T. **Destinação final das placas fotovoltaicas pós-consumo no Brasil**. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2017.

PENA, Rodolfo F. Alves, **Vantagens e desvantagens da Energia Solar**, Disponível em: <https://mundoeducacao.uol.com.br/geografia/vantagens-desvantagens-energia-solar.htm>. Acesso em: 15 jun. 2023

PENA, Rodolfo F. Alves, **Vantagens e desvantagens da Energia Solar**, Disponível em: <https://mundoeducacao.uol.com.br/geografia/vantagens-desvantagens-energia-solar.htm>

PINHO, J.T.; GALDINO, M.A. **Manual de Engenharia para Sistema Fotovoltaico**. Edição revisada e atualizada. Rio de Janeiro: Março, 2014.

PORTALSOLAR, **Tipos de sistemas fotovoltaicos**, 2021. Disponível em: <https://www.portalsolar.com.br/tipos-de-sistemas-fotovoltaicos>. Acesso em : 04 abr 2023.

PRIME, Solar. **Os diferentes tipos de energia solar: tudo que você precisa saber**. Solar Prime. 2018. Disponível EM: <https://blog.solarprime.com.br/os-diferentes-tipos-de-energia-solar-tudo-que-voce-precisa-saber/>. Acesso em: 19 jun de 2023.

QUANTAGERAÇÃO, **Energia Solar: 4 fatores que impactam na geração**, Disponível em: <https://quantageracao.com.br/energia-solar-4-fatores-que-impactam-na-geracao/#:~:text=Vimos%20que%20a%20gera%C3%A7%C3%A3o%20de,tipo%20de%20energia%20no%20Brasil> Acesso em: 21 abr. 20023

R. M. Eisberg, L. S. Lerner. **Física, fundamentos e aplicações. Conteúdo: efeito foto elétrico**” Disponível em: <https://sites.ifi.unicamp.br/lfmoderna/conteudos/efeito-fotoeletrico/>, postado em 2008. Acesso em: 02 /03/ 2023.

REIS, Lineu Belico dos. **Geração de energia elétrica**. 2. ed. São Paulo: Manole, 2011

ROBERTS, Justo José. **Análise de desempenho de um sistema híbrido de geração de energia solar-eólico-diesel considerando variações probabilísticas da carga e dos recursos renováveis**. 2012. 152 f. Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2012. Disponível em: <<http://hdl.handle.net/11449/99329>>. Acesso em 08/05/2023.

SEGUEL, Julio Igor López. **Projeto de um sistema fotovoltaico autônomo de suprimento de energia usando técnica MPPT e controle digital**. 2009. 222f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2009. Disponível em: https://www.ppgee.ufmg.br/documentos/Defesas/850/Julio_Lopez_Versao_Corrigida.pdf. Acesso em: 01 jun. 2023.

SILVA, Matheus Segundo da; LANA, Tiago Rocha; SILVA JÚNIOR, José Antônio; TALARICO, Matheus G. **Energia solar fotovoltaica: Revisão bibliográfica**. Revista Mythos, vol. 14, n. 2, p. 51-61, 2021.

SILVA, R. M. **Energia Solar**: dos incentivos aos desafios. Texto para discussão nº 166. Brasília: Senado Federal, 2015.

SOLAR POWER, 2021. **Qual é a tecnologia por trás do efeito fotovoltaico? Descubra!** Disponível em: <https://blog.solarpowerenergy.com.br/efeito-fotovoltaico/>

SOLAR, Minha casa, 2019. **Painel Fotovoltaico.** Disponível em: <http://blog.minhacasasolar.com.br/como-e-feito-um-painel-solar/> . Acesso em: 16 mai. 2023

SOLARVOLT. **Quais os principais componentes de uma usina fotovoltaica?** Disponível em: <https://www.solarvoltenergia.com.br/blog/componentes-usina-fotovoltaica/> .Acesso em: 07 jun. 2023

SUNERGIA, 2020. **Como fazer um projeto de energia solar fotovoltaico.** Disponível em: <https://sunergia.com.br/blog/como-fazer-um-projeto-de-energia-solar-fotovoltaico-empresa-de-energia-solar/> . Acesso em: 06 jun. 2023

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

VALLERA, Antônio M.; BRITO, Miguel Centeno. **Meio século de história fotovoltaica.** Gazeta de Física, v. 1, n. 2, 2006

WALKER, J.; HALLIDAY, D.; RESNICK, R. **Fundamentos de física volume 4: óptica e física moderna.** Rio de Janeiro: LTC, 2016

ZILLES, Roberto et al. **Sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica.** São Paulo: Oficina de Textos, 2016.