



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE TECNOLOGIA
CURSO DE ENGENHARIA DE ENERGIAS RENOVÁVEIS

ANA MARIA PEREIRA MARCELO

ANÁLISE DE VIABILIDADE TÉCNICA DA IMPLANTAÇÃO DE UM SISTEMA
SOLAR FOTOVOLTAICO NA SECRETARIA DE MEIO AMBIENTE E CONTROLE
URBANO DE MARACANAÚ

FORTALEZA

2021

ANA MARIA PEREIRA MARCELO

ANÁLISE DE VIABILIDADE TÉCNICA DA IMPLANTAÇÃO DE UM SISTEMA
SOLAR FOTOVOLTAICO NA SECRETARIA DE MEIO AMBIENTE E CONTROLE
URBANO DE MARACANAÚ

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Curso de Engenharia de
Energias Renováveis da Universidade
Federal do Ceará, como requisito parcial
para obtenção do título de Engenheira de
Energias Renováveis.

Orientadora: Prof.^a Dr.^a Ana Fabíola
Leite Almeida

FORTALEZA

2021

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Biblioteca Universitária

Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

M263a Marcelo, Ana Maria Pereira.

Análise de viabilidade técnica da implantação de um sistema solar fotovoltaico na Secretaria de Meio Ambiente e Controle Urbano de Maracanaú / Ana Maria Pereira Marcelo. – 2021.

55 f. : il. color.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Curso de Engenharia de Energias Renováveis, Fortaleza, 2021.

Orientação: Profa. Dra. Ana Fabíola Leite Almeida.

1. Energia solar. 2. Dimensionamento. 3. Energia fotovoltaica. I. Título.

CDD 621.042

ANA MARIA PEREIRA MARCELO

ANÁLISE DE VIABILIDADE TÉCNICA DA IMPLANTAÇÃO DE UM
SISTEMA SOLAR FOTOVOLTAICO NA SECRETARIA DE MEIO
AMBIENTE E CONTROLE URBANO DE MARACANAÚ

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Curso de Engenharia de
Energias Renováveis da Universidade
Federal do Ceará, como requisito parcial
para obtenção do título de Engenheira de
Energias Renováveis.

Aprovado em ___/___/_____.

BANCA EXAMINADORA

Prof.^a Dr^a Ana Fabíola Leite Almeida (Orientadora)
Universidade Federal Do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Francisco Nivaldo Aguiar Freire
Universidade Federal Do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Ronaldo Stefanutti
Universidade Federal Do Ceará (UFC)

AGRADECIMENTOS

À Deus, pela minha vida, e por me permitir ultrapassar todos os obstáculos encontrados ao longo do período acadêmico, fazendo com que eu pudesse realizar o sonho de ser Engenheira de Energias Renováveis pela UFC.

Aos meus pais, Aristóteles e Zulene, por nunca terem medido esforços para me proporcionar uma educação de qualidade, por entenderem minhas tantas crises de estresse e ansiedade e por serem os meus maiores incentivadores. À minha irmã, Laís, que acreditou no meu sonho, me ouviu e me deu forças todos os dias.

Ao meu companheiro de vida, Andersson, que me estimulou, torceu e se desdobrou em esforços para me ajudar durante a elaboração deste trabalho. As minhas amigas, Karla, Amanda, Carolina, Katarine, Andressa, Karoline e Nara pela amizade e apoio demonstrado ao longo de toda minha graduação e o período em que me dediquei a este trabalho.

À minha orientadora Prof^ª Dr^ª Ana Fabíola, por ter dado todo o suporte no pouco tempo que lhe coube, pelas suas correções, incentivos e por ter desempenhado tal função com dedicação e amizade.

Aos professores Francisco Nivaldo Freire e Ronaldo Stefanutti pela disponibilidade em participar da minha banca examinadora e colaborar com o trabalho.

À todos da Secretaria de Meio Ambiente e Controle Urbano de Maracanaú, pelo fornecimento de dados e materiais que foram fundamentais para o desenvolvimento e realização deste trabalho.

Por fim, agradeço a Universidade Federal do Ceará, seu corpo docente, direção e administração que me deram a oportunidade de cursar nesta renomada instituição.

“Tomara que os nossos planos coincidam. Mas se não coincidirem, que a Tua vontade prevaleça.”

Desconhecido.

RESUMO

O aumento no consumo energético ao longo dos anos faz com que haja a necessidade de repensar na matriz energética nacional, por esse motivo, a busca por novas fontes de energia que trazem menos prejuízo ao meio ambiente se tornam cada vez mais necessárias. No panorama nacional, os níveis de irradiação solar proporcionam um potencial elevado de geração de energia, o que contribui para uma maior disseminação do uso da energia solar como fonte alternativa. Este trabalho teve por finalidade apresentar um estudo técnico analisando a viabilidade para implantação de um sistema solar fotovoltaico conectado à rede de baixa tensão da Secretaria de Meio Ambiente e Controle Urbano, localizada no município de Maracanaú/CE. Para isso foi realizada uma revisão dos conceitos básicos e trabalhos relacionados com o tema proposto. Como resultado foi recomendado a instalação de 124 painéis fotovoltaicos com um valor de 330 Wp de potência cada um, totalizando 40,92 kWp. Os resultados obtidos mostram uma redução de 100% no consumo estimado de energia elétrica proveniente da concessionária. O custo para o investimento do sistema foi calculado no valor de R\$ 158.769,60 com um tempo de retorno de 4 anos e 9 meses. Portanto, conclui-se que a implementação do sistema de energia solar fotovoltaica é capaz de suprir a demanda de energia além de ser viável economicamente. Para projeções futuras espera-se aumentar o sistema para que o consumo de todo centro administrativo seja inserido no projeto.

Palavras-Chaves: Energia solar; Viabilidade; Dimensionamento.

ABSTRACT

The increase in energy consumption over the years enforces a rethinking of the national energy matrix, for this reason, the search for new sources of energy less harmful to the environment becomes increasingly necessary. On the national scene, the solar irradiation levels provide a high potential for energy generation, which contributes to widespread solar energy as an alternative source. This work aimed to present a technical study analyzing the feasibility of implementing an on-grid photovoltaic system connected to the low voltage grid of the Secretaria de Meio Ambiente e Controle Urbano, located in the city of Maracanaú/CE. In order to achieve the goal, an overview study of the basic concepts and other works regarding the subject was made. As a result, it was recommended to install 124 photovoltaic modules with a 330 Wp value each, totaling 40.92 kWp. The obtained results show a 100% reduction in the estimated consumption of electricity from the utility. The calculated investment cost of the system is R\$ 158,769.60 with a payback time of 4 years and 9 months. Therefore, it concludes that the photovoltaic system installation is able to supply the demand energy and be economically viable. For future projections, it is expected to increase the system so that the consumption of the entire administrative center is included in the project.

Keywords: Solar energy; Feasibility; Sizing.

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
CA	Corrente alternada
CC	Corrente contínua
SSF	Sistema Solar Fotovoltaico
CRESESB	Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sergio Brito
SMU	Secretaria de Meio Ambiente e Controle Urbano
ENEL	Ente nazionale per l'energia elettrica
SF	Sistema Fotovoltaico
FDI	Fator de Dimensionamento do Inversor
TRI	Taxa de Retorno do Investimento
VPL	Valor Presente Líquido
INMETRO	Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Composição da matriz elétrica brasileira.....	11
Figura 2 - Ilustração da diferença do sistema de energia solar fotovoltaica e energia solar térmica.....	15
Figura 3 - Radiação solar incidente sobre o solo.....	17
Figura 4 - Composição de uma célula fotovoltaica.....	18
Figura 5 - Sistema isolado à rede - off grid.....	20
Figura 6 - Sistema conectado à rede - on grid / grid-tie.....	20
Figura 7 - Célula de silício monocristalina.....	23
Figura 8 - Estrutura da célula de silício monocristalina.....	23
Figura 9 - Célula de silício policristalina.....	24
Figura 10 - Célula de silício policristalina.....	24
Figura 11 - Célula de filme fino.....	25
Figura 12 - Exemplo de ligação de painéis em série.....	26
Figura 13 - Exemplo de ligação de painéis em série.....	27
Figura 14 - Processo de geração, conversão e compensação da energia solar....	28
Figura 15 - Aérea da Secretaria de Meio Ambiente e Controle Urbano de Maracanaú com indicação da área total do telhado.....	39
Gráfico 1 - Irradiação solar para o município de Maracanaú próximo ao local de instalação.....	40
Gráfico 2 - Retorno financeiro vs tempo de garantia dos módulos fotovoltaicos.....	49

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	11
1.1	Motivação.....	12
1.2	Justificativa.....	12
1.3	Objetivos.....	13
1.3.1	Objetivo Geral.....	13
1.3.2	Objetivos específicos.....	13
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	15
2.1	Energia solar fotovoltaica.....	15
2.2	Radiação solar e efeito fotovoltaico	16
2.2.1	Radiação solar.....	16
2.2.2	Efeito fotovoltaico.....	17
2.3	Configuração dos sistemas fotovoltaicos.....	19
2.3.1	Tipos de Medições.....	21
2.4	Célula fotovoltaica.....	22
2.4.1	Células de silício (Si) Monocristalino.....	22
2.4.2	Células de silício (Si) Policristalino	23
2.4.3	Células de Filmes finos	25
2.5	Módulo fotovoltaico	25
2.5.1	Ligação em série.....	26
2.5.2	Ligação em paralelo	26
2.6	Inversor.....	27
3	A EMPRESA.....	28
4	METODOLOGIA	30
4.1	Levantamento de dados	31
4.1.1	Área do telhado disponível	31
4.1.2	Irradiação solar local	31
4.1.3	Faturamento de energia elétrica da empresa	32
4.2	Cálculo da energia gerada pelo sistema solar fotovoltaico.....	32
4.3	Módulos fotovoltaicos	33
4.4	Área dos módulos e área disponível para instalação	34

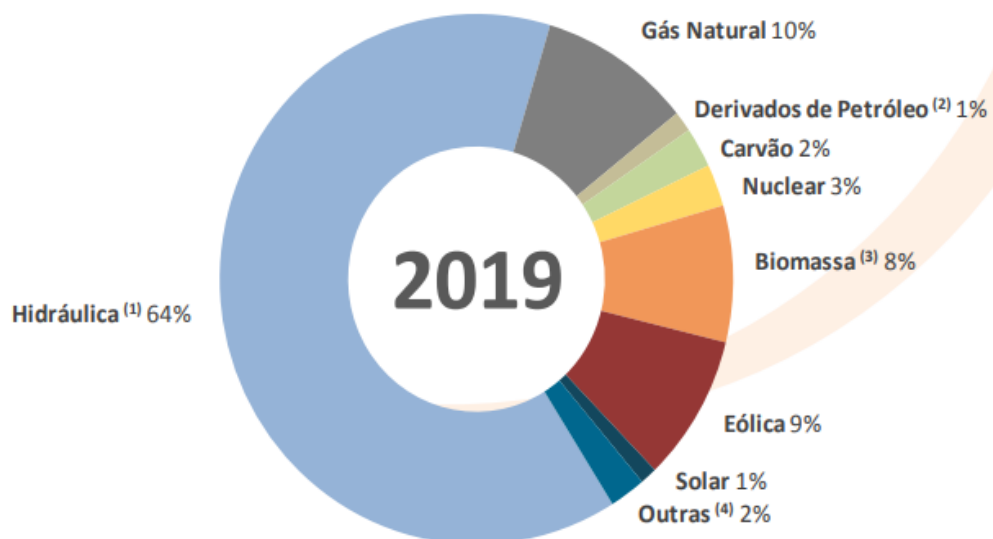
4.5	Dimensionamento do inversor.....	35
4.6	Viabilidade econômica	36
4.6.1	Custos de manutenção	38
5	RESULTADOS E ANÁLISE.....	38
5.1	Área disponível para instalação	38
5.2	Irradiação solar local	40
5.3	Histórico do consumo de energia	41
5.4	Painéis Solares.....	44
5.5	Potência do inversor.....	45
6	VIABILIDADE ECONÔMICA.....	47
6.1	Cálculo do Investimento	47
6.2	Cálculo do Balanço Econômico.....	47
6.3	Cálculo do VPL.....	47
6.4	Cálculo do TRI	48
6.5	Custos de instalação e de manutenção do sistema.....	49
7	CONCLUSÃO	50
	REFERÊNCIAS	

1 INTRODUÇÃO

A energia é um fator de evolução para a humanidade. Na medida em que evoluímos tecnologicamente, o consumo de energia elétrica vem aumentando cada vez mais. De acordo com a EPE (2021), no decorrer dos anos de 2004 a 2020 a demanda do consumo de energia elétrica em megawattshora teve um expressivo aumento de 42,89% a nível nacional, na região do nordeste 51% e 87% considerando apenas dados do estado do Ceará.

Tendo em vista o crescente consumo energético, têm-se a necessidade de utilizar fontes alternativas de produção de energia sustentável a fim de suprir a demanda da matriz elétrica do Brasil. Segundo a EPE (2020), grande parte da energia elétrica gerada no Brasil vem de usinas hidrelétricas sendo responsável por 64% da matriz nacional, como pode ser observado na Figura 1, com isso a matriz elétrica brasileira se torna ainda mais renovável do que a energética.

Figura 1 - Composição da matriz elétrica brasileira



Fonte: EPE (2020).

Com base na EPE (2020), no ano de 2019 houve um crescimento de 4,1% em relação ao ano de 2018 produzindo cerca de 626 TWh, com as maiores altas percentuais na geração solar (+92,1%) e eólica (+15,5%). A geração hidráulica cresceu em nível mais baixo com um percentual de 2,3% entre 2018 e 2019. As

termelétricas apresentaram uma queda significativa de 23,8%, reduzindo também a sua participação de 1,7% em 2018 para 1,3% em 2019 na matriz de geração elétrica nacional (EPE, 2020).

É notável o impulso que a geração de energia fotovoltaica vem recebendo no Brasil nos últimos anos, atraindo interesses de fabricantes nacionais através de projetos privados e governamentais. Considerando a necessidade de diversificação da matriz energética e esses avanços que o uso da energia solar fotovoltaica vem sofrendo, de acordo com Pereira et al. (2017) o principal requisito para a viabilidade desta tecnologia de geração é devido aos altos índices de irradiação solar direta que ocorrem principalmente no nordeste brasileiro. Por esse motivo, o uso dessa fonte é uma ótima opção para complementação de outras fontes já consolidadas como as hidroelétricas.

1.1 Motivação

A energia solar fotovoltaica vem como uma importante alternativa para solucionar os desafios energéticos globais, diminuindo a dependência energética dos combustíveis fósseis como carvão, petróleo e gás natural e com isso, contribuindo para a redução da emissão de gases do efeito estufa.

Além disso, o uso da energia solar contribui para melhorar cada vez mais a relação do homem com a natureza, facilitando o dia a dia de comunidades não abastecidas pela energia elétrica convencional e reduzindo o gasto devido ao elevado consumo energético de locais de grande dependência da eletricidade.

A inserção dessa tecnologia promove uma maior conscientização ambiental e uma mudança cultural na comunidade, colaborando para o atendimento das necessidades atuais sem comprometer a capacidade de geração futura. O Brasil conta com um recurso solar de excelente qualidade e, especificamente, no Ceará tem-se um alto índice de irradiação solar o que facilita e muito sua aplicação e viabilidade.

1.2 Justificativa

A sociedade já enfrentou diversas crises sendo elas energética, climática

e da água. Cabe aos órgãos públicos a responsabilidade de planejar e incentivar o uso de tecnologias que auxiliem no desenvolvimento sustentável, incentivando a micro e minigeração de energia.

A geração de energia solar fotovoltaica apresenta-se como uma opção para suprir as demandas energéticas utilizando um sistema de compensação, onde a energia gerada excedente será jogada para a rede de distribuição produzindo créditos para o dono do sistema.

Em meio a esse contexto econômico e social, a auto sustentabilidade energética possibilita a economia permanente no uso de recursos como energia e água, o que se reverterá em economia financeira no médio e longo prazo. A utilização desse tipo de energia possui grande vantagem por ser uma fonte de energia limpa e renovável, que não gera resíduos, não exige desmatamento, alagamentos ou desvio de curso de rios, nem assusta com a possibilidade de vazamento de radiação e que ainda se encontra em estado de desenvolvimento. Este trabalho, portanto, busca apresentar o correto dimensionamento dos sistemas solares fotovoltaicos e mostrar a viabilidade econômica destes.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo Geral

Avaliar a viabilidade técnica e econômica para implantação de um sistema solar fotovoltaico (SSF) integrado a Secretaria de Meio Ambiente e Controle Urbano de Maracanaú (SMU) e conectado à rede distribuidora operada pela ENEL Distribuição Ceará.

1.3.2 Objetivos específicos

Os objetivos específicos que contribuem para atingir o objetivo geral são:

- a) analisar o faturamento de energia elétrica da unidade consumidora;
- b) analisar a disponibilidade solar e a área disponível do local de instalação do sistema por meio de ferramentas geográficas e visita *in loco*;

- c) dimensionar os equipamentos que comporá o SSF: os módulos e inversores;
- d) investigar o impacto financeiro do SSF;
- e) calcular o retorno financeiro do SSF por meio do tempo de retorno do investimento

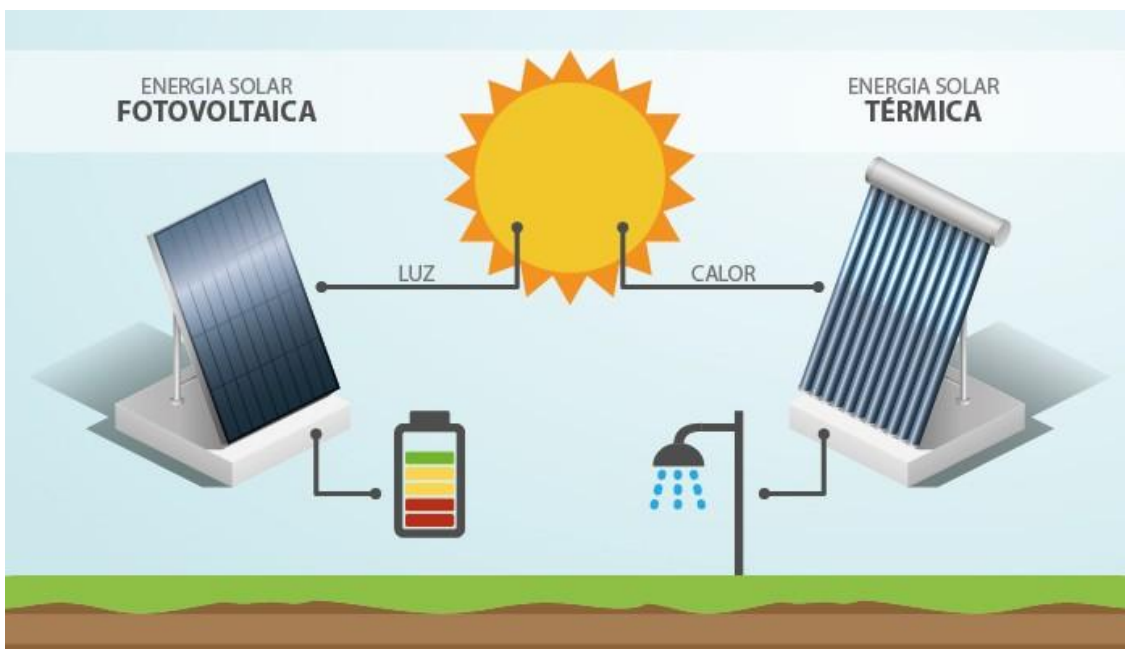
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo serão apresentados alguns conceitos de: Energia solar fotovoltaica; Efeito fotovoltaico; Configurações dos sistemas fotovoltaicos; Tipos de Medições; Células fotovoltaicas; Módulo fotovoltaico; Tipos de ligações e Inversor solar, estes servirão como base para a metodologia e dimensionamento do sistema solar fotovoltaico a ser implantado.

2.1 Energia solar fotovoltaica

O sol além de ser uma fonte de energia limpa e sem danos à natureza, é responsável pela origem de aproximadamente todas as outras fontes de energia (MANUAL, 1999). Em sua forma principal a energia pode ser aproveitada na forma de calor e luz produzindo eletricidade por meio dos sistemas térmico e fotovoltaico (FIGURA 2).

Figura 2 - Ilustração da diferença do sistema de energia solar fotovoltaica e energia solar térmica.



Fonte: Oca Solar Energia (2021).

O processo fotovoltaico é responsável pela transformação da luz solar em energia elétrica. Isso se dá por meio da diferença de potencial nos extremos de

uma estrutura de material sólido, geralmente cristalinos, de condutividade elétrica intermediária entre isolantes e condutores, chamados de semicondutores. A unidade fundamental desse processo é a célula fotovoltaica, que ao ser atingida por fótons provenientes do Sol, estes podem ser absorvidos produzindo energia elétrica (FADIGAS, 2016). Ao ocorrer a absorção dos fótons é dado início ao processo de efeito fotovoltaico onde a energia do fóton é transferida para um elétron em um átomo da célula de um semicondutor.

De acordo com Manual (1999), as empresas do setor de telecomunicações iniciaram o desenvolvimento dessa tecnologia no intuito de buscar fontes de energia para sistemas instalados em localidades remotas. Porém, por conseguir fornecer a quantidade de energia necessária por longos períodos com um menor custo e peso relacionado a outras tecnologias, a “corrida espacial” e a necessidade de energia para os satélites foram grandes agentes impulsionadores. O interesse em aplicações terrestres da energia fotovoltaica renovou e ampliou somente após a crise energética que ocorreu em 1973 com o embargo da exportação de petróleo (NUNES, 2016). No entanto, o custo de produção das células solares para a época ainda era bastante elevado e por esse motivo a difusividade em larga escala é ainda mais lenta.

2.2 Radiação solar e efeito fotovoltaico

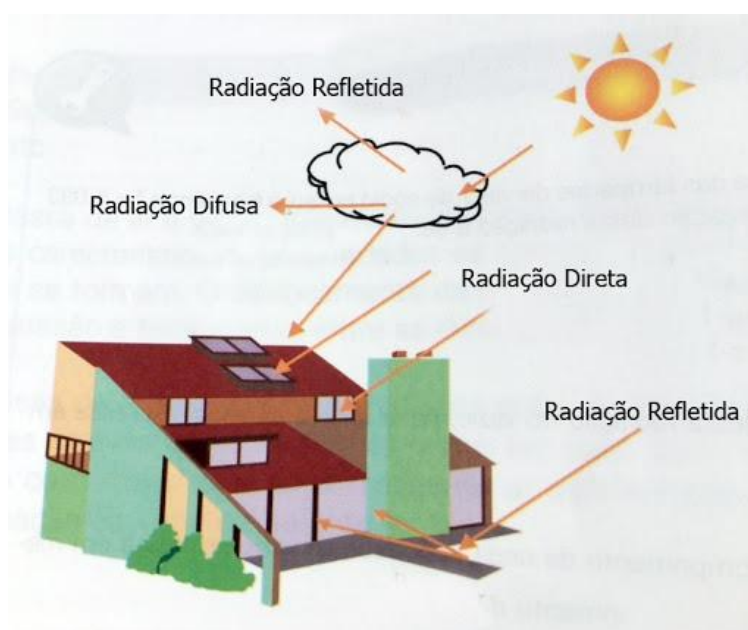
2.2.1 Radiação solar

De acordo com Cresesb (2014), o sol fornece para a atmosfera terrestre, $1,5 \times 10^{18}$ kWh de energia por ano. Esse valor corresponde aproximadamente a 10000 vezes o consumo mundial de energia neste período. Isso indica que o sol não é responsável somente pela manutenção da vida na Terra como também sua radiação constitui-se como uma fonte inesgotável de energia, havendo um enorme potencial de utilização por meio de sistemas de captação e conversão em outra forma de energia (térmica, elétrica, etc.).

Devido a reflexão e absorção dos raios solares pela atmosfera, características como intensidade, distribuição espectral e espalhamento são afetadas. Além disso, apenas uma fração de toda a radiação solar que chega, atinge

a superfície terrestre constituída por uma componente direta e por uma componente difusa. Todavia, se a superfície receptora estiver inclinada com relação ao plano horizontal como pode ser visto na Figura 3, haverá uma terceira componente refletida pelo ambiente do entorno (solo, vegetação, obstáculos, terrenos rochosos, etc.). Antes de atingir o solo, as características da radiação solar (intensidade, distribuição espectral e angular) são afetadas por interações com a atmosfera devido aos efeitos de absorção e espalhamento (CRESESB, 2014).

Figura 3 - Radiação solar incidente sobre o solo



Fonte: FC Solar (2021).

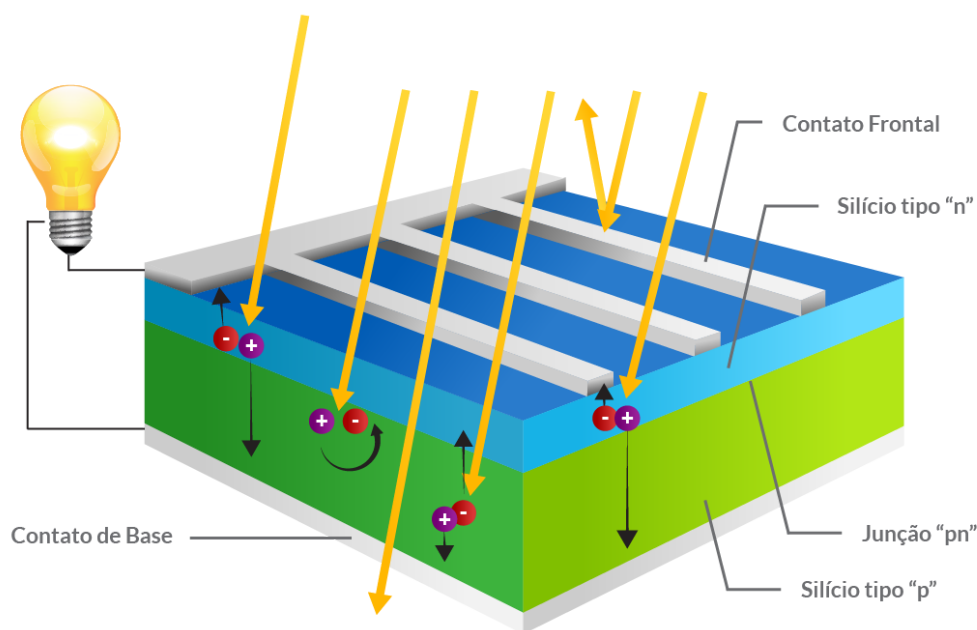
2.2.2 Efeito fotovoltaico

De acordo com Cresesb (2014), um semicondutor é caracterizado pela sua banda de valência totalmente preenchida por elétrons e sua banda de condução totalmente “vazia”. O germânio e o silício são exemplos de semicondutores que possuem quatro elétrons de valência ligados a outros átomos através de uma ligação covalente, que embora seja uma ligação mais forte do elétron de valência com o átomo, esses podem adquirir energia cinética suficiente e assumir o estado “livre”. Essas ligações são responsáveis pela formação de uma rede cristalina.

Ao ser introduzido na estrutura do silício, semicondutor comumente mais utilizado (SOLSTÍCIO, 2017), um elemento que possui cinco elétrons na camada de

valência, como o fósforo, um elétron fica em excesso e por não ser possível o emparelhamento ficará “sobrando”. Com isso, é necessário pouca energia para que esse elétron vá para a banda de condução. Nesse caso, o fósforo é um doador de elétrons chamado de dopante/impureza n. Seguindo o mesmo raciocínio, introduzindo o boro átomo com três elétrons de valência haverá a falta de elétrons para satisfazer as ligações gerando lacunas, sendo esse um aceitador de elétrons ou dopante p. Com pouca energia térmica e à temperatura ambiente os elétrons do fósforo que estão em excesso ficam livres e as lacunas criadas pelo boro se deslocam (FADIGAS, 2016). Na Figura 4 é possível observar a formação da junção pn. Isto ocorre quando, considerando a utilização de um silício puro, átomos de boro são introduzidos em uma metade e átomos de fósforo na outra

Figura 4 - Composição de uma célula fotovoltaica



Fonte: FADIGAS (2016).

Nesta junção os elétrons livres do lado n passam para o lado p onde são capturados pelos buracos presentes. À vista disso, é formado um acúmulo de elétrons no lado p, fazendo com que fique negativamente carregado e haja uma redução de elétrons no lado n, que o torna eletricamente positivo. Desse modo as cargas aprisionadas dão origem a um campo elétrico definitivo que dificulta a passagem de mais elétrons do lado n para o lado p alcançando o equilíbrio

(FADIGAS, 2016).

É possível que ocorra ainda a geração de pares elétron-lacuna quando uma junção pn é exposta a fótons com energia maior que o gap. Caso aconteça na região em que o campo elétrico é diferente de zero, uma corrente é gerada através da junção devido o aceleração das cargas. Se as duas extremidades do silício com diferença de potencial forem conectadas por um fio, haverá uma circulação de elétrons sendo este o procedimento que ocorre para o funcionamento das células fotovoltaicas (MANUAL, 1999).

2.3 Configuração dos sistemas fotovoltaicos

Segundo Cresesb (2008), os Sistemas Fotovoltaicos (SF) são classificados em três principais categorias: isolados (*off grid*), híbridos e conectados à rede (*on grid / grid tie*). Os fatores para a escolha do sistema mais adequado a ser utilizado depende da disponibilidade dos recursos energéticos, aplicação, investimento inicial, área a ser ocupada pelo SF, dentre outras. Os sistemas isolados e híbridos podem ser chamados de sistemas autônomos pois não são conectados à rede elétrica e podem apresentar ou não fontes complementares de energia. Em todo caso, nesses métodos é necessário o uso de algum tipo de armazenamento de energia para os períodos em que não há geração de energia.

O funcionamento do sistema *off grid* ocorre da seguinte maneira, o painel fotovoltaico gera a energia elétrica que logo em seguida passa por um controlador de carga antes de chegar à bateria, a carga passa da bateria para um inversor e após esse processo os equipamentos que necessitam de energia poderão ser alimentados pelo sistema, como pode ser visto na figura 5.

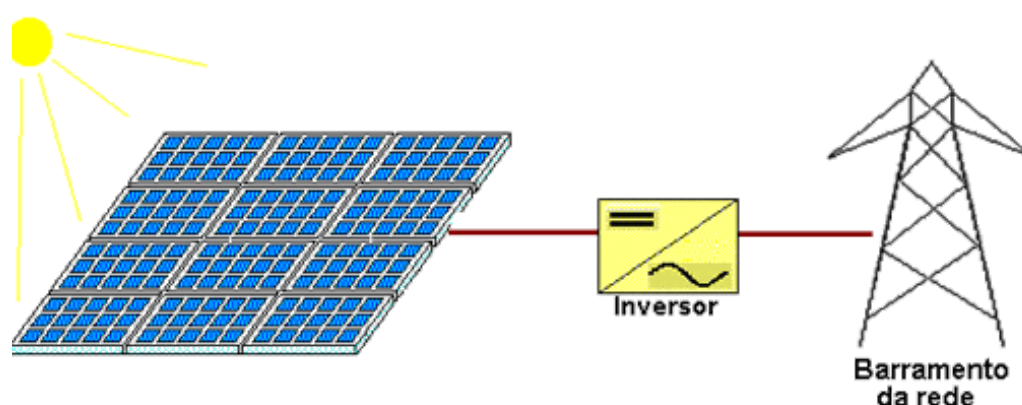
Figura 5 - Sistema isolado à rede - off grid.



Fonte: NEOSOLAR (2018).

Em SF conectados à rede, *grid-tie*, a potência gerada pelos módulos fotovoltaicos é representada como uma fonte complementar ao sistema elétrico de grande porte em que está conectado. O *grid-tie* possibilita o abastecimento de energia em mais de um local, podendo ser utilizado por qualquer consumidor em uma mesma rede de sistemas conectados. A energia gerada passa pelo inversor e é jogada instantaneamente na rede elétrica, não necessitando do armazenamento em baterias (Figura 6).

Figura 6 - Sistema conectado à rede - on grid / grid-tie.



Fonte: CRESESB (2008).

De acordo com a Resolução Normativa nº 482/2012, ANEEL (2012), quando ocorre da geração solar fotovoltaica ser superior à demanda, o sistema gira no sentido contrário devolvendo a energia para rede para que seja utilizada por outros consumidores, automaticamente sem intervenção e seguindo normas de segurança. O saldo positivo de energia poderá ser utilizado para abater o consumo em outro posto tarifário ou na fatura do mês subsequente. Esses créditos de energia gerados continuam válidos por até 60 meses podendo ser utilizados em outras unidades previamente cadastradas dentro da mesma área de concessão. Em dias nublados, chuvosos ou no período noturno, a geração solar fotovoltaica é inferior à demanda, com isso, a diferença de energia é suprida automaticamente pela energia elétrica da distribuidora.

2.3.1 Tipos de Medições

Com o intuito de promover uma maior segurança aos seus clientes e aos técnicos de manutenção da rede elétrica, as concessionárias de energia devem ser capazes de isolar o Sistema Fotovoltaico de forma simples e sistemática sempre que houver necessidade. Por esse motivo, em uma instalação solar, é necessário que seja realizada a troca do medidor comum para medidores que informam o consumo e a produção de energia que será jogada na rede.

Conforme Manual (1999), a forma de medição de energia é realizada por basicamente três tipos de conexão, sendo elas a medição única do balanço de energia, a medição simultânea e a medição dupla. No primeiro método, fica à cargo da concessionária registrar e remunerar a energia entregue produzida pelo SF pelo mesmo preço comprado pela concessionária. Diferente disso, quando o produtor deseja informações mais precisas sobre seu consumo e quanto é produzido pelo seu SF, é utilizado o sistema de medições simultâneas. Nesse método a conexão do sistema fotovoltaico à rede é feita de forma independente do painel de serviço da concessionária local.

O medidor duplo ou bidirecional é responsável por medir de forma contínua o consumo e produção de energia elétrica injetada na rede. A cada instante apenas um dos medidores estará em operação dependendo da diferença instantânea entre demanda e potência gerada pelo sistema. De acordo com Solis

Energia (2019), a residência ou imóvel do produtor sempre terá prioridade em relação à rede no momento de receber essa energia elétrica, portanto, somente quando ocorrer uma sobra de energia é que o ponteiro irá girar para trás informando que a rede receberá a energia solar. Nos casos em que o sistema não conseguir suprir 100% do consumo da residência, a concessionária fornecerá o complemento necessário para atender sua casa.

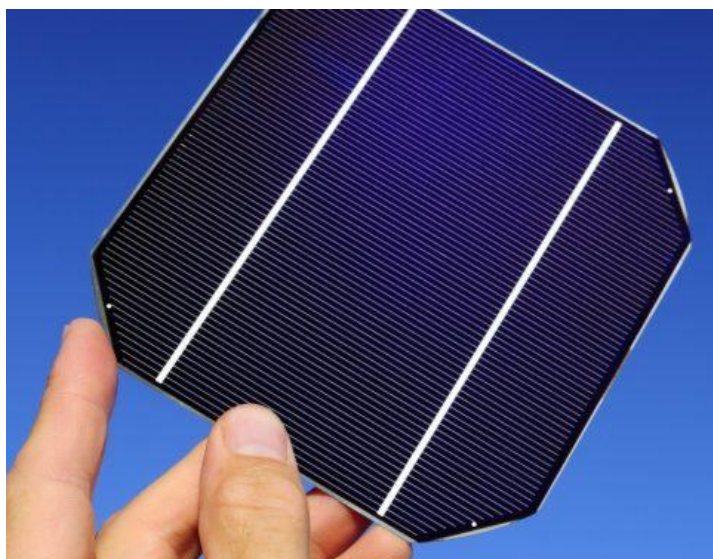
2.4 Célula fotovoltaica

Conforme visto anteriormente, utilizando material semicondutor é possível elevar o estado energético dos seus elétrons na presença de radiação solar obtendo assim a conversão de energia solar em energia elétrica. No entanto, para que isto ocorra é necessário que o semicondutor passe por uma etapa de purificação e dopagem, adicionando dosagens controladas de impureza para aumentar a sua condutividade elétrica. As principais células fotovoltaicas mais ativas comercialmente, de acordo com Souza (2017), são apresentadas a seguir.

2.4.1 Células de silício (Si) Monocristalino

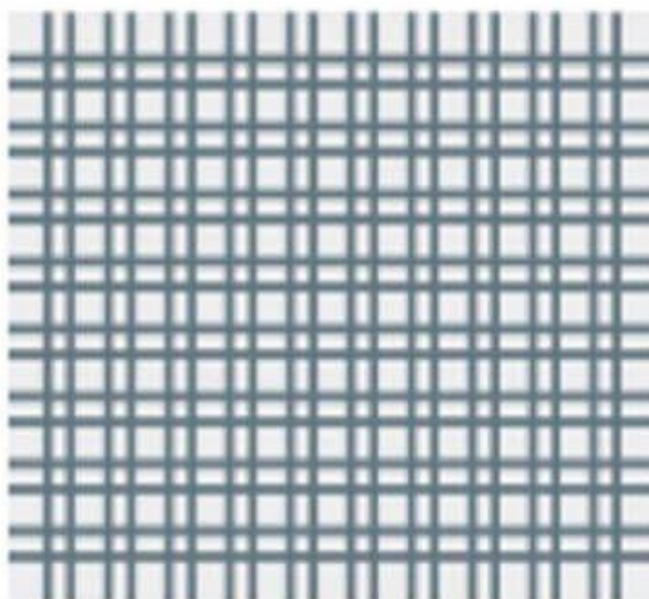
Segundo Nascimento (2004), este tipo de célula é obtido a partir de barras cilíndricas de um único grande cristal produzido em fornos especiais. As células são obtidas por corte das barras em forma de pastilhas finas (0,4 – 0,5 mm de espessura). Após isso, as células são cortadas nas laterais para a remoção de possíveis causadores de curto-circuitos, é aplicado uma camada de material anti reflexo e são impressos os contatos frontais e traseiros. Sua pureza na fabricação garante uma alta eficiência na conversão da luz solar em eletricidade, superior a 12%. Nas Figuras 7 e 8 é possível observar a estrutura de uma célula monocristalina.

Figura 7 - Célula de silício monocristalina



Fonte: Souza (2017).

Figura 8: Estrutura da célula de silício monocristalina.



Fonte: Engehall (2018).

2.4.2 Células de silício (Si) Policristalino

Utilizando o mesmo material visto anteriormente, este tipo de célula é solidificado em forma de bloco composto uma estrutura policristalina com superfícies de separação entre os cristais. As lâminas cortadas possuem aproximadamente 0.3 mm de espessura. Souza (2017) aponta que a dopagem com fósforo em uma das

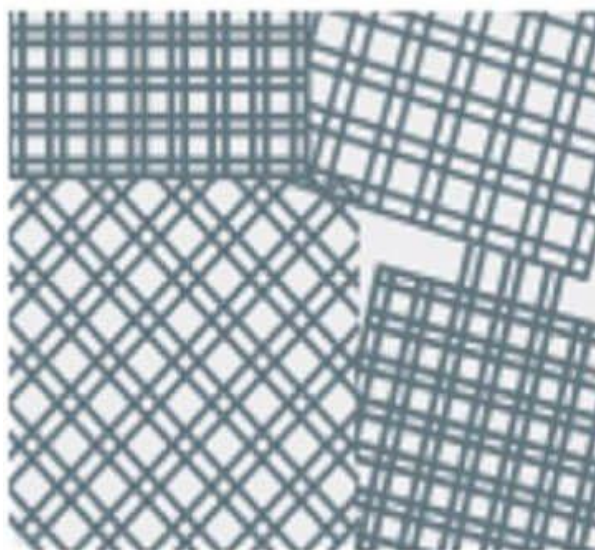
faces é feita após o corte, depois disso, para que aumente a absorção luminosa, é aplicado uma camada de material anti reflexo. Sua eficiência na conversão de luz solar em eletricidade é ligeiramente menor do que nas de silício monocristalino devido às perdas por recombinação. As Figuras 9 e 10 apresentam a estrutura de uma célula de silício policristalino.

Figura 9 - Célula de silício policristalina



Fonte: Portal Energia (2015).

Figura 10 - Célula de silício policristalina



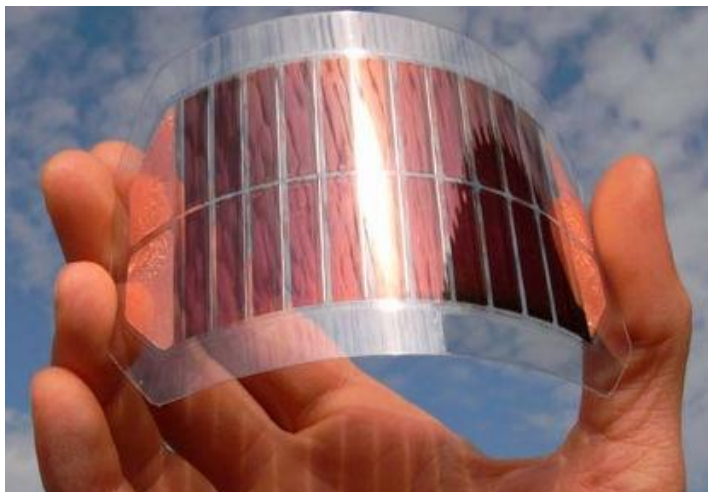
Fonte: Engehall (2018).

2.4.3 Células de Filmes finos

Com o intuito de produzir células fotovoltaicas confiáveis, com um menor custo, pouco material semicondutor e passível de produção em larga escala, foi desenvolvido a tecnologia dos filmes finos. Apesar da maior fatia das células e módulos fotovoltaicos do mercado pertencerem à tecnologia cristalina, os filmes finos estão cada vez mais ganhando espaço devido o processo de produção ser mais eficiente energeticamente e com um menor desperdício (CANAL SOLAR, 2020).

As células são constituídas por finas camadas de material semicondutor, Figura 11, depositadas num substrato de vidro, metal ou polímeros de superfície rígida ou flexível. Sua espessura varia de alguns nanômetros (nm) a dezenas de micrômetros (μm), permitindo que sejam mais flexíveis e com menor peso. A tecnologia de filme fino é economicamente mais viável e hoje sua eficiência ultrapassa o silício policristalino (ENERGIA SOLAR, 2019).

Figura 11 - Célula de filme fino



Fonte: Agroavances (2017)

2.5 Módulo fotovoltaico

As células de silício são encapsuladas e conectadas em arranjos que compõem a unidade básica de todo sistema, o módulo fotovoltaico. No ponto de máxima potência, cada célula gera aproximadamente 0,4 Volts, sendo possível obter

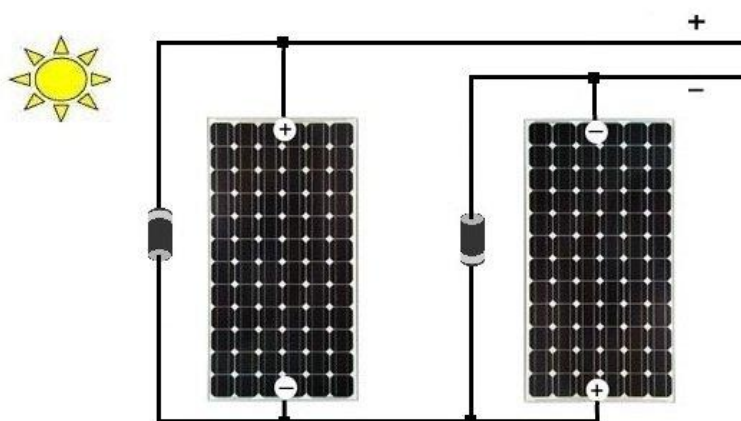
uma maior tensão de acordo com o tipo de conexão que será feito. (MANUAL, 1999)

O módulo fotovoltaico pode ser composto por 36 a 72 células solares produzidas normalmente por silício que, como já visto anteriormente, são responsáveis pela geração da energia solar devido ao efeito fotovoltaico. A quantidade de células conectadas em um módulo e o arranjo que será disposto depende da tensão de utilização e da corrente elétrica desejada (PORTAL SOLAR, 2011). Segundo Solar Brasil (2017), de maneira geral, os módulos fotovoltaicos apresentam uma vida útil de aproximadamente 25 anos e atualmente uma eficiência comercial em torno de 14%.

2.5.1 Ligação em série

A associação de células fotovoltaicas ligadas em série fazem com que o valor da tensão aumente enquanto o valor da corrente é mantido. Nesta conexão, o terminal positivo de um módulo é ligado ao terminal negativo do outro módulo como pode ser observado na Figura 12. Dois ou mais módulos ligados desta maneira, são denominados de “*String Série*” (MANUAL, 1999).

Figura 12 - Exemplo de ligação de painéis em série



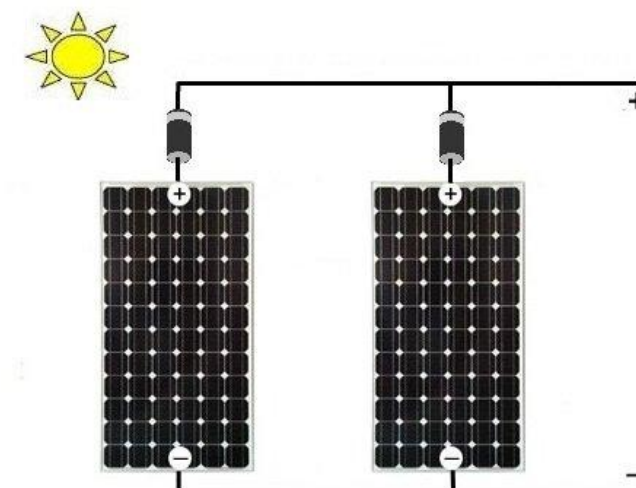
Fonte: MPPT Solar (2021).

2.5.2 Ligação em paralelo

Diferente da associação em série, nas células fotovoltaicas ligadas em

paralelo o valor da tensão é mantido enquanto o valor da corrente aumenta (MANUAL, 1999). Os dispositivos conectados em paralelo tem os terminais positivos ligados uns aos outros e os terminais negativos da mesma forma (Figura 13).

Figura 13 - Exemplo de ligação de painéis em série



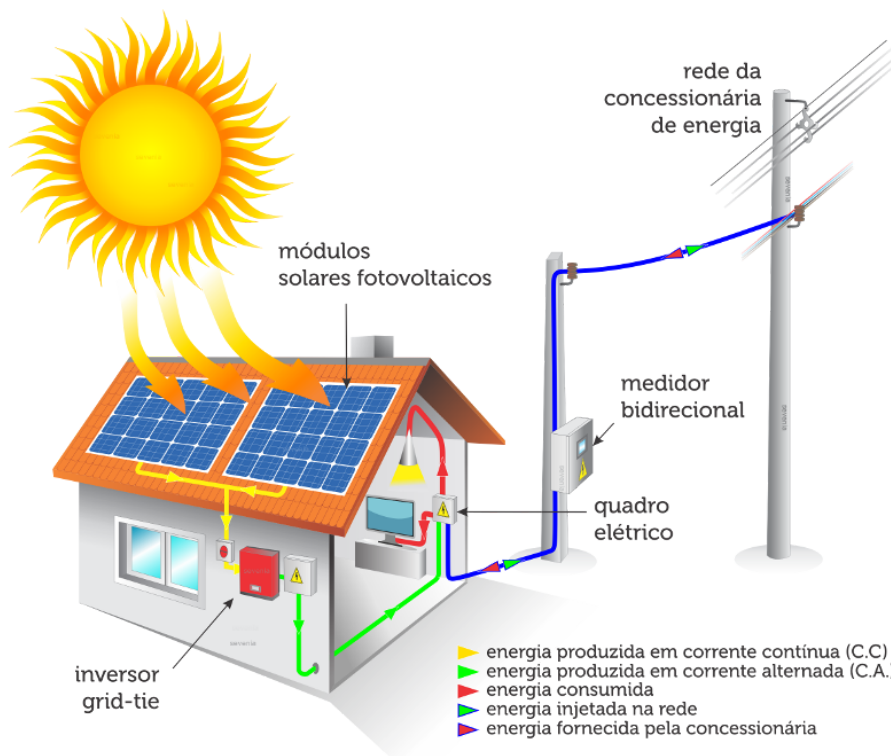
Fonte: MPPT Solar (2021).

2.6 Inversor

O inversor é um equipamento fundamental visto que a energia elétrica produzida pelos módulos é em corrente contínua (CC) e caso seja necessário interligar um gerador fotovoltaico à rede é necessário seu uso para a conversão em corrente alternada (CA). No intuito de evitar perdas, o inversor deve dissipar o mínimo de potência e deve produzir uma tensão com baixo teor de harmônicos sincronizado com a rede elétrica.

Por ser um componente primordial, este deve ser cuidadosamente selecionado após o dimensionamento do sistema fotovoltaico. Seu uso garante a segurança de todo o SF, realiza monitoramento, além de ser responsável pela otimização de toda energia produzida. O valor mínimo de eficiência aceitável, segundo Solarvolt (2019) é de 94%. A instalação pode ser em um ponto próximo ao cliente para que seja possível acompanhar a produção de energia ou em um local mais distante devido ao ruído que pode ser emitido pelo inversor solar (Figura 14).

Figura 14 - Processo de geração, conversão e compensação da energia solar.



Fonte: Sunset Energia (2020).

3 A EMPRESA

O levantamento dos dados ocorreu com a realização de visitas técnicas ao local de instalação para que fosse possível uma melhor análise das condições físicas do prédio. Com isso foi possível constatar as adequações que permitem a implantação de um sistema fotovoltaico.

A Secretaria de Meio Ambiente e Controle Urbano - SMU é um órgão público da prefeitura de Maracanaú dotado de autonomia funcional, administrativa, financeira e orçamentária. Integrante da estrutura organizacional do Poder Executivo, tem como finalidade planejar, coordenar e definir as políticas públicas ambientais do Município, bem como planejar e ordenar o controle dos ambientes naturais locais e desenvolver programas de educação ambiental, garantindo o direito ao meio ambiente ecologicamente equilibrado à melhoria da qualidade de vida e à preservação dos recursos naturais às presentes e futuras gerações.

Esta secretaria possui uma sede própria instalada no ano de 2017 em uma área de 426,90 metros quadrados no município de Maracanaú, Ceará.

Atualmente, possui cerca de 98 funcionários trabalhando internamente e externamente por meio de fiscalizações. Nessa sede, os únicos equipamentos que consomem bastante energia são os ares-condicionados, impressoras simples e os computadores pessoais, que ficam ligados das 08:00 às 17:00.

A secretaria demonstrou interesse em realizar a implantação de um eventual sistema solar fotovoltaico com o intuito de buscar fontes alternativas de energia que pudessem gerar uma economia para o município e além disso ser o primeiro órgão público de Maracanaú a ser auto sustentável energeticamente, tornando-o capaz de produzir, através do aproveitamento da energia solar em seu próprio prédio, a energia elétrica que será consumida ao longo dos anos.

4 METODOLOGIA

Neste capítulo será apresentada a metodologia adotada para este trabalho de modo a auxiliar na obtenção dos resultados. Além disso, são discutidas as bases teóricas e as limitações da pesquisa.

Para o desenvolvimento de um projeto de sistema solar fotovoltaico em um empreendimento, é necessário que seja feito um correto dimensionamento. Portanto, o principal critério considerado é a quantidade de energia que o sistema precisará gerar.

No caso da secretaria, como o prédio instalado é bem recente e a conta de energia é medida junto com outras secretarias, foi realizada uma estimativa considerando a conta do período em que não existia o empreendimento para o período em que passou a existir. Considerando uma data de pleno funcionamento, antes da pandemia. Essa quantidade de consumo precisou ser calculada de modo que trouxesse o melhor retorno financeiro para o solicitante e com o menor custo. Deste modo, o solicitante fica ciente de que após a instalação da energia fotovoltaica a conta virá apenas com o valor reduzido de acordo com a energia que for gerada, tendo como base para cálculo o consumo aproximado do prédio da SMU.

Nos casos em que a instalação do sistema fotovoltaico causa outros custos relacionados ao projeto de sustentação do sistema ou sistema elétrico, como a necessidade do reforço do telhado ou aumento da potência do transformador de alimentação da unidade consumidora, faz com que a maximização do retorno financeiro não ocorra impreterivelmente quando o sistema é dimensionado para compensar toda a energia consumida pelo cliente.

Além disso, com o intuito de diminuir os possíveis erros que podem gerar prejuízos ao cliente, os dados solarimétricos provenientes de programas computacionais ou mapas solarimétricos foram analisados de maneira adequada, especificando corretamente o local a ser instalado. No final, do dimensionamento foi possível indicar:

- a) a quantidade de módulos fotovoltaicos necessária;
- b) o valor total do investimento;
- c) o tempo de retorno esperado do sistema.

4.1 Levantamento de dados

4.1.1 Área do telhado disponível

A área disponível para instalação dos painéis fotovoltaicos no telhado, pode ser obtida com o auxílio do programa Google Earth, prática bastante comum no mercado para obtenção da área disponível. Todavia, devem ser considerados alguns fatores para obtenção da correta área disponível:

- a) sombras proporcionadas por objetos no telhado ou por edifícios adjacentes;
- b) peso total suportado pelo telhado;
- c) inclinação e orientação da estrutura do telhado;
- d) formato do telhado.

4.1.2 Irradiação solar local

A magnitude responsável pela medição da energia por unidade de área de radiação solar incidente em uma superfície colocada em um local e intervalo de tempo bem especificados, é chamada de irradiação solar. Isso quer dizer que nem toda a radiação solar gerada pelo Sol atinge a Terra. A irradiância, magnitude que descreve a radiação solar que atinge a terra, pode ser expressa em watts por metro quadrado, já a irradiação solar é geralmente medida em watts-hora por metro quadrado. Portanto, quando falamos de irradiação solar, queremos dizer a quantidade de irradiação recebida em um determinado momento.

Para obter os valores de irradiação do local, será utilizado o Atlas Eólico e Solar do Estado do Ceará (2019), único atlas híbrido do Brasil amplamente disponível para público acesso na internet disponível nas versões inglês e português. Desse modo, é preciso apenas pesquisar o endereço do local de implantação e verificar a latitude e longitude, no caso as coordenadas da Secretaria de Meio Ambiente e Controle Urbano de Maracanaú.

4.1.3 Faturamento de energia elétrica da empresa

Como visto anteriormente, devido o prédio ter sido instalado recentemente e a conta de energia ser medida junto com outras secretarias, será realizado uma estimativa considerando a conta do período em que não existia o empreendimento para o período em que passou a existir. Considerando uma data de pleno funcionamento, antes da pandemia. Essa quantidade de consumo precisa ser calculada de modo que traga o melhor retorno financeiro para o solicitante e com o menor custo.

É importante salientar que o faturamento da energia elétrica contém informações de fundamental importância para o correto dimensionamento do sistema fotovoltaico. Dentre elas estão o consumo de energia em kWh, o histórico mês a mês do consumo de energia e as tarifas cobradas pela distribuidora de energia elétrica.

4.2 Cálculo da energia gerada pelo sistema solar fotovoltaico

Para o dimensionamento de um sistema com um menor custo é indispensável conhecer a quantidade de energia que pode ser produzida por dia. Considerando a utilização de um painel fotovoltaico de 330W/Dia a quantidade de energia gerada pode ser calculada da seguinte forma, como enuncia o Portal Solar.

$$Egd = P \times I \times (1 - p) \quad (1)$$

Em que:

Egd: energia gerada por dia por uma placa fotovoltaica;

P: potência do painel solar escolhido;

I: valor médio de irradiação solar por dia;

p: São fatores que interferem no pleno funcionamento do painel.

A eficiência da potência a partir da célula solar depende tanto da quantidade de luz solar como do índice de radiação sobre os painéis solares. As perdas de potência entre módulos e inversores também podem ser por acúmulo de

sujeira, cabeamento, incompatibilidade elétrica e perdas por aquecimento entre outras. Em condições bem extremas até 29% de energia pode não chegar aos inversores. As porcentagens podem ser analisadas na Tabela 1 abaixo.

Tabela 1 - Porcentagens de perda de energia no sistema fotovoltaico.

Perdas de Energia	
Fator de perda	%
Perda por temperatura	7 - 18
Incompatibilidade elétrica	1 - 2
Acúmulo de sujeira	1 - 8
Cabeamento CC	0,5 - 1
Cabeamento CA	0,5 - 1
Inversor	2,5 - 5

Fonte: DIMENSIONAMENTO (2017)

Observando o faturamento de energia elétrica, é possível perceber que, de acordo com o consumo de energia e as informações especificadas, a secretaria opera pelo subgrupo A4 na modalidade tarifária Horo Sazonal Verde. Sendo assim, para este tipo de grupo, as tarifas são binômias, isto é, tem diferenciação de preços em certos horários. Nas tarifas do Grupo A, são utilizados os horários de ponta e fora ponta, sendo o período constituído de 3 horas consecutivas definidas pela concessionária considerado para o horário de ponta e as demais 21 horas do dia são consideradas fora de ponta. O perfil da unidade consumidora do sistema em questão, é trifásica, por esse motivo é feito uma cobrança mínima correspondente a 100 kWh mensal, mesmo que não haja consumo (GRUGEEN, 2017).

4.3 Módulos fotovoltaicos

Para o dimensionamento do número de módulos necessários é preciso que seja feito uma relação entre a energia gerada por dia por uma placa fotovoltaica

e o consumo médio diário de energia do estabelecimento a ser instalado. Com essas informações é possível realizar o correto dimensionamento e dar prosseguimento nos cálculos e definições do arranjo e inversores a serem utilizados. A Equação 2, adaptada do Portal Solar, indica o cálculo para o número de módulos a ser utilizado no sistema.

$$N^{\circ} \text{ módulos} = \frac{CMD}{Egd} \quad (2)$$

Em que:

CMD: é a energia média mensal por dia;

Egd: é a energia gerada por dia por uma placa fotovoltaica;

Com a quantidade de placas solares é possível calcular a potência nominal total do sistema solar fotovoltaico.

$$Pt = N^{\circ} \text{ módulos} \times \text{Pot máx módulo} \quad (3)$$

A produção mensal de energia em kWh pode ser obtida da seguinte maneira:

$$PM = Egd \times N^{\circ} \text{módulos} \times 30 \quad (4)$$

4.4 Área dos módulos e área disponível para instalação

O cálculo da área total que os módulos irão ocupar pode ser feito multiplicando a área dos módulos pelo número de módulos, conforme a equação 3 abaixo:

$$A_{total} = A_{mod} \times N^{\circ} \text{mod} \quad (5)$$

Em que:

A_{total} : é a área total destinada aos módulos fotovoltaicos;

A_{mod} : é a área ocupada de um módulo fotovoltaico;

Nºmod: é o número de módulos que compõem o sistema.

Com o auxílio do programa Google Earth é possível identificar a área disponível para instalação além de informar o cálculo da área e a fotografia aérea do local.

4.5 Dimensionamento do inversor

O equipamento responsável por fazer a ligação dos módulos fotovoltaicos com a rede elétrica instalada na cidade, é o inversor. Quando seus parâmetros são bem dimensionados, este funciona corretamente para serem compatíveis com a rede elétrica. São parâmetros de saída do inversor:

- a) Frequência;
- b) Corrente;
- c) Tensão.

Para calcular a potência do inversor, é preciso considerar o fator de dimensionamento do inversor (FDI), que representa a relação entre a capacidade do inversor e a potência nominal do gerador fotovoltaico. Para isso, é necessário multiplicar a potência nominal dos módulos conectados pelo fator de dimensionamento do inversor, que deve ser entre 0,75 e 0,85 (PROJETOFOTOVOLT, 2021). Para este dimensionamento será considerado 0,80. Assim, a potência do inversor pode ser calculada da seguinte maneira:

$$Pot\ inversor = FDI \times Pt \quad (6)$$

Em que:

Pot inversor: é a potência do inversor;

Pt: é a potência nominal total do sistema;

FDI: Fator de dimensionamento.

Devido às faixas de voltagem do inversor e dos seus limites de corrente e potência, é possível utilizar o mesmo inversor para sistemas de diferentes tamanhos. Todavia, não é uma opção vantajosa pois o inversor teria o mesmo custo com número menor de painéis.

Os microinversores são uma outra opção para uso no sistema

fotovoltaico. Apesar de apresentarem uma vida útil bem maior que a dos inversores tradicionais, o custo iria aumentar já que os painéis operariam de forma independente, sendo necessário 1 microinversor por painel, fazendo com que não seja necessário mudar o inversor sempre que precisasse aumentar o número de painéis (ECYCLE, 2021).

4.6 Viabilidade econômica

Após realizado o dimensionamento do sistema é necessário analisar o investimento que será feito pela empresa e o tempo de payback. Segundo Contábeis (2016), payback é entendido como um indicador do tempo necessário para que se tenha o retorno sobre o investimento aplicado em um projeto, isto é, representa o tempo necessário para que o custo de instalação se pague e comece a dar lucro para o proprietário.

Através disso é possível calcular o custo total do sistema fotovoltaico (PEREIRA, 2017).

$$I = P_t \times C \quad (7)$$

Em que:

I: é o investimento;

P_t: é a potência nominal total do sistema (Wp);

C: é o custo do sistema (R\$/Wp).

No sistema fotovoltaico, para estimar o benefício econômico anual é preciso o valor do produto da quantidade média de energia mensal consumida pela tarifa de energia elétrica informada na fatura (PEREIRA, 2017).

$$B = C_{mensal} \times trf \times 12 \quad (8)$$

Em que:

B: é o benefício econômico anual;

C_{mensal}: é a energia consumida no mês (kWh);

trf: Tarifa de energia elétrica.

As avaliações serão baseadas no Valor Presente Líquido (VPL) e na Taxa de Retorno do Investimento (TRI). O resultado do cálculo do VPL é muito importante para avaliar a viabilidade do investimento no sistema. Quando o valor do VPL é positivo, significa que o investimento é bastante viável e economicamente interessante. Em contrapartida, caso o valor seja negativo, significa que o investimento é inviável e que não cobrirá a recuperação do capital investido. Para os casos em que obtêm-se VPL nulo, significa dizer que do ponto de vista financeiro é indiferente realizar ou não o investimento (BIGSUN, 2020).

Os valores para Valor Presente Líquido e Taxa de Retorno do Investimento podem ser calculados da seguinte maneira:

a) VPL

$$VPL = - I + B \times FVP_{(i,n)} \quad (9)$$

$$FVP_{(i,n)} = \frac{(1+i)^n - 1}{i \cdot (1+i)^n} \quad (10)$$

Em que:

B: é o benefício econômico anual;

I: é o investimento;

i: Taxa Mínima de Atratividade (anual);

n: Vida útil do equipamento (em anos);

b) TRI

$$R = - \frac{\ln(1 - \frac{I}{B} \times i)}{\ln(1+i)} \quad (11)$$

Em que:

R: Taxa de retorno do investimento

Com o resultado do TRI têm-se o número de períodos que zera o VPL do empreendimento, considerando a adoção de uma taxa de juros, que é o próprio

custo de capital no tempo.

4.6.1 Custos de manutenção

Com o objetivo de reduzir ou impedir falhas aumentando a confiabilidade e eficiência do sistema, prevenindo problemas como acúmulo de sujeira, perda no cabeamento, incompatibilidade elétrica, e aquecimento, que podem provocar perdas na produção de energia elétrica é necessário que sejam realizadas manutenções preventivas. O valor mais utilizado para estimar as despesas com manutenção preventiva anual varia entre 0,5% e 1% do custo total do SF instalado (ELYSIA, 2017).

5 RESULTADOS E ANÁLISE

5.1 Área disponível para instalação

Com o auxílio do Google Earth é possível identificar que a secretaria possui uma área disponível para implantação dos sistemas solares fotovoltaicos de cerca de 426,90 metros quadrados, conforme a Figura 15.

Figura 15: Imagem aérea da Secretaria de Meio Ambiente e Controle Urbano de Maracanaú, com indicação da área total do telhado.



Fonte: Google Earth (2021).

Na Figura 15 e em visita técnica à secretaria, pôde ser constatado que não há prédios ao redor do estabelecimento e não há previsão de futuras construções e ampliações das secretarias que ficam na vizinhança, porém há uma árvore que mesmo sendo constantemente podada pode vir a projetar sombra no telhado.

Assim, levando em consideração o formato, a inclinação e a orientação do telhado e uma sombra proporcionada por uma árvore que, embora seja podada, em alguns períodos do ano pode ocorrer o sombreamento em alguns painéis, por margem de segurança foi utilizado 80% da área total do telhado como sendo a área máxima disponível para implantação do sistema. Então:

$$\text{Área disponível} = \text{Área telhado} \times \text{Aproveitamento} \quad (12)$$

$$\text{Área disponível} = 426,90 \times 0,8$$

$$\text{Área disponível} = 341,52 \text{ m}^2$$

5.2 Irradiação solar local

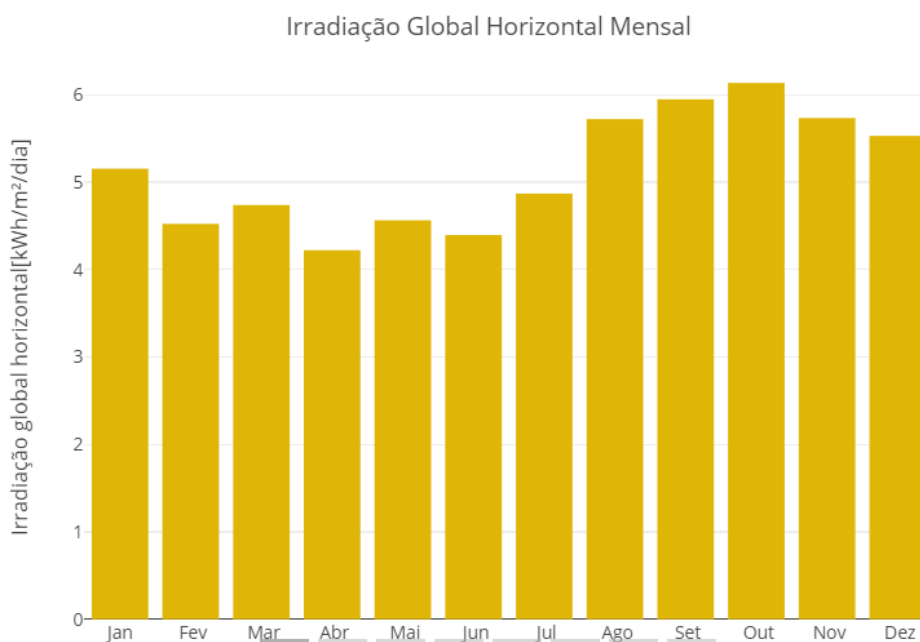
De acordo com o endereço Av II, 150 - Jereissati I - Maracanaú/CE e as coordenadas do local onde serão instaladas as placas é possível identificar a irradiação solar incidente:

a) latitude: 3,87° S

b) longitude: 38,61° O

Conforme as informações citadas, podemos representar a irradiação solar ao longo dos meses de acordo com o Gráfico 1 abaixo:

Gráfico 1: Irradiação solar para o município de Maracanaú, próximo ao local de instalação.



Fonte: Atlas Eólico e Solar do Estado do Ceará (2019).

Para facilitar a verificação do Gráfico 1 acima, os dados foram dispostos na Tabela 2 a seguir para que assim seja possível verificar a irradiação mês a mês, a média anual e os meses de maior e menor índice de radiação local.

Tabela 2: Irradiação solar próximo ao local de implantação, na cidade de Maracanaú, CE.

Irradiação Solar Próximo Ao Local De Implantação	
Local	Maracanaú
Latitude	3,87
Longitude	38,61
Irradiação kWh/m².dia	
Janeiro	5.15
Fevereiro	4.52
Março	4.74
Abril	4.22
Maio	4.56
Junho	4.40
Julho	4.87
Agosto	5.72
Setembro	5.95
Outubro	6.14
Novembro	5.73
Dezembro	5.53
Irradiação Anual Média	5.13

Fonte: Adaptado de Atlas Eólico e Solar do Estado do Ceará (2019).

5.3 Histórico do consumo de energia

As faturas de energia elétrica são fornecidas pela distribuidora de energia ENEL e foram disponibilizadas pela secretaria. A análise dos consumos de energia podem ser feitas pelas Tabelas 3 e 4 onde o somatório das médias dos consumos hora ponta e fora ponta representam a média mensal do consumo total.

Tabela 3: Histórico de consumo de energia elétrica em kWh/mês da empresa no mês de Setembro de 2016 (Antes da instalação do prédio)

Consumo de Energia em kWh/mês - Setembro/2016		
Mês	Hora Ponta	Fora Ponta
Set	1128	18758
Ago	1116,8	18708
Jul	920	14006
Jun	187,2	8003
Jun	857,6	12142
Mai	923,2	17204
Abr	772,8	13617
Mar	1051,2	18569
Fev	940,8	14869
Jan	806,4	13195
Dez	1016	20899
Nov	923,2	18646
Média	886,93	15718
Consumo Total - kWh/mês	16604.93	

Fonte: Elaborada pelo autor com dados fornecidos pela empresa (2016).

Tabela 4: Histórico de consumo de energia elétrica em kWh/mês da empresa no mês de Julho de 2019 (Após a instalação do prédio)

Consumo de Energia em kWh/mês- Julho/2019		
Mês	Hora Ponta	Fora Ponta
Jul	816	19835
Jun	852,8	20117
Mai	812,8	20358

Abr	820,8	20280
Mar	867,2	18887
Fev	961,6	22437
Jan	822,4	18525
Dez	806,4	21867
Nov	862,4	23222
Out	825,6	22428
Set	817,6	22235
Ago	956,8	22211
Jul	785,6	17337
Média	846,77	20749,15
Consumo Total - kWh/mês	21595.92	

Fonte: Elaborada pelo autor com dados fornecidos pela empresa (2019).

O valor de cobrança mínimo mensal de 100 kWh não será incluído no cálculo já que considerando o consumo total do prédio da SMU a fatura, mesmo assim, não viria zerada. Assim, a estimativa do consumo total da secretaria pode ser calculada da seguinte forma:

$$Cts = Cons\ 2019 - Cons\ 2016 \quad (13)$$

$$Cts = 21595,92 - 16604,93$$

$$Cts = 4990,99\ kWh/mês$$

Em que:

a) Cts: Consumo total mensal da secretaria.

Com isso, o consumo médio diário é:

$$CMD = \frac{Cts}{30} \quad (14)$$

$$CMD = \frac{4990,99 \text{ kWh/mês}}{30} = 166,37 \text{ kWh/dia}$$

Em que:

CMD: Consumo médio diário.

O valor considerado para as perdas de potência podem ser analisados na Tabela 5 abaixo.

Tabela 5: Porcentagem considerada para as perdas de energia

Perdas de Energia		
Fator de Perda	%	% Considerada
Perda por Temperatura	7 - 18	11
Incompatibilidade Elétrica	1 - 2	1
Acúmulo de Sujeira	1 - 8	2
Cabeamento CC	0,5 - 1	1
Cabeamento CA	0,5 - 1	1
Inversor	2,5 - 5	4

Fonte: Elaborada pelo autor (2021)

Com os dados de energia diária consumida, o valor médio de horas solares e a porcentagem das perdas totais, a potência de energia diária que pode ser obtida é dada por:

$$Egd = 0,33 \times 5,13 \times (1 - 0,2)$$

$$Egd = 1,35 \text{ kW/dia}$$

5.4 Painéis Solares

Com base no dimensionamento feito anteriormente e na disponibilidade

de marcas do mercado, foi escolhido para fins de cálculo o Painel Solar Fotovoltaico Policristalino de 330W DAH Solar – DHP72-330W. De acordo com Minha Casa Solar (2020), o painel fotovoltaico de 330W da DAH Solar é ideal para uso em sistemas grid-tied, possui um alto padrão de qualidade, certificação INMETRO, selo do procel nota “A” e possui 10 anos de garantia contra defeitos de fabricação.

Com base nos parâmetros do modelo, o número de painéis necessário seria:

$$N^{\circ} \text{ módulos} = \frac{166,37}{1,35} = 123,24 \approx 124 \text{ painéis solares.}$$

A potência nominal do sistema é dada por:

$$Pt = 124 \times 330$$

$$Pt = 40,92 \text{ kW}$$

A produção mensal de energia em kWh pode ser obtida da seguinte maneira:

$$PM = 1,35 \times 124 \times 30$$

$$PM = 5.022 \text{ kWh/mês}$$

Cada painel possui as seguintes dimensões: 1956 X 991 X 35 mm, ocupando uma área de aproximadamente 2,0 m², sendo necessário uma área de:

$$A_{total} = 2,0 \times 124 = 248 \text{ m}^2$$

Com isso é possível analisar que a área disponível no prédio da SMU é suficiente para a implantação de todo o sistema necessário. Além da área, é importante pontuar que a inclinação sugerida para a latitude do município de Maracanaú é de 4°, com o objetivo de aumentar a eficiência dos painéis solares, reduzir o acúmulo de sujeira nas células fazendo com que se tenha um menor custo com a manutenção.

5.5 Potência do inversor

O local considerado neste trabalho, por se tratar de uma região próxima à Linha do Equador, a radiação apresenta picos frequentes, o que faz com que o gerador fotovoltaico opere mais próximo de sua potência nominal, exigindo maior potência de operação dos inversores. Assim, utilizando 0,8 como fator de dimensionamento e considerando a potência nominal dos módulos 40,92 kW, obtêm-se a potência do inversor necessária.

$$Pot\ inversor = 0,8 \times 40,92$$

$$Pot\ inversor = 32,74\ kW$$

Com base no resultado acima, têm-se a necessidade de um inversor de aproximadamente 32,74 kW ou dois inversores de aproximadamente 15 kW. De acordo com Portal Solar (2017), quando há um sobredimensionamento dos painéis, o inversor vai gastar menos tempo operando com menor eficiência em luz solar fraca (como em dias nublados) e, quando a saída de energia dos painéis excede a capacidade nominal do inversor, a eficiência média mais alta ajuda a compensar a perda de energia elétrica que ocorre. Por esse motivo, desde que o gerador solar seja dimensionado corretamente, qualquer inversor de qualidade deve ser capaz de lidar com um total de painéis solares um terço maior do que a potência nominal do inversor.

Os dados do sistema necessários para esse projeto podem ser vistos na Tabela 6 abaixo:

Tabela 6: Dados preliminares do sistema solar fotovoltaico.

Dados do Sistema	
Quantidade de painéis	124
Quantidade de inversores	1
Potência do painel (Wp)	330
Potência do inversor (kVA)	32,74

Potência nominal total do sistema (kWp)	40,92
Área total dos painéis (m ²)	248,00
Produção de energia (kWh/mês)	5022
Consumo médio (kWh/mês)	4990,99

Fonte: Elaborado pelo autor (2021)

6 VIABILIDADE ECONÔMICA

6.1 Cálculo do Investimento

Para o estudo da viabilidade econômica serão considerados 25 anos de vida útil, tempo de garantia normalmente oferecido pelas fabricantes dos módulos fotovoltaicos e de acordo com Greener (2020), o valor do investimento para instalação de sistemas comerciais tem o custo de R\$3,88/Wp. Tal valor inclui módulos, inversores, acessórios, instalação, entre outros custos envolvidos. Através disso é possível calcular o custo total do sistema fotovoltaico.

$$I = 40,92 \times 3,88 = R\$ 158.769,60$$

6.2 Cálculo do Balanço Econômico

O balanço econômico estimado é calculado baseado no valor do produto da quantidade de energia gerada pelas tarifas de energia elétrica estimada ano a ano. Para o valor da tarifa de energia elétrica, segundo a Enel Ceará (2020) têm-se R\$0,546/kWh.

$$B = 4990,99 \times 0,546 \times 12 = R\$ 32.700,97$$

Em ambos os métodos será utilizado como Taxa Mínima de Atratividade, a taxa SELIC de março de 2021, que com base no Banco Central do Brasil (2021) tem valor mensal de aproximadamente 0,23%.

6.3 Cálculo do VPL

$$FVP_{(i,n)} = \frac{(1 + 0,0023)^{25} - 1}{0,0023 \cdot (1 + 0,0023)^{25}} = 24,27$$

$$VPL = - 158.769,60 + 32.700,97 \times 24,27_{(i,n)}$$

$$VPL = R\$ 634.882,94$$

Avaliando o resultado do cálculo do VPL é possível notar que o investimento na implementação do sistema solar é altamente viável, pois além do resultado ser positivo o valor é economicamente atrativo.

6.4 Cálculo do TRI

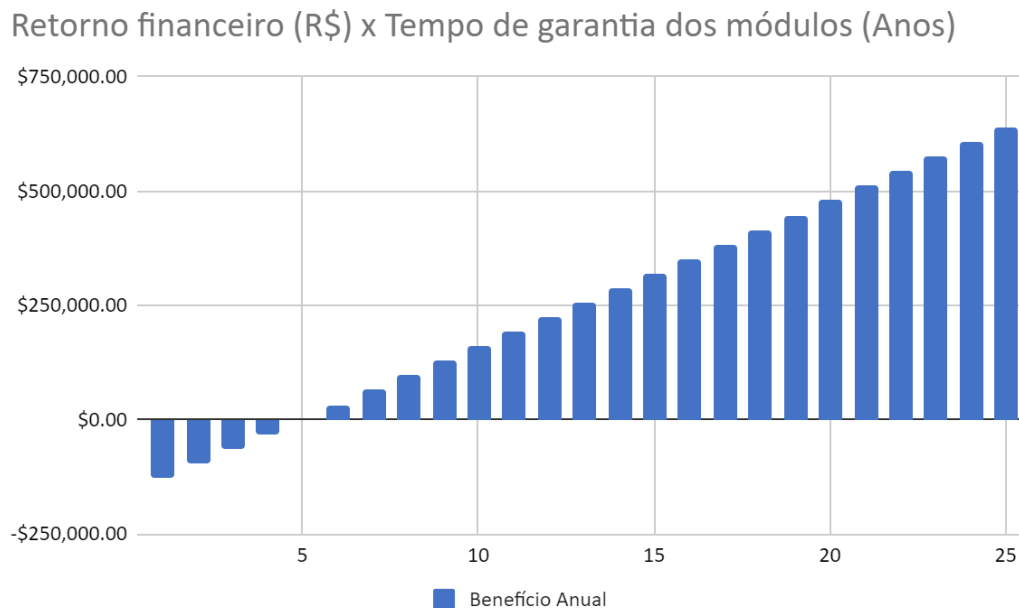
Para o cálculo da taxa de retorno do investimento - TRI não é preciso a obtenção de dados adicionais sendo necessário apenas dos valores do investimento, balanço econômico e da taxa mínima de atratividade.

$$R = - \frac{\ln\left(1 - \frac{158.769,60}{32.700,97} \times 0,0023\right)}{\ln(1+0,0023)}$$

$$R = 4 \text{ anos e } 9 \text{ meses}$$

O retorno financeiro do valor investido será obtido em 4 anos e 9 meses, isto é, o tempo necessário para que o custo de instalação se pague e comece a dar lucro para o proprietário. É importante lembrar que para os cálculos acima não foi considerada a degradação da potência dos módulos durante sua vida útil, a inflação energética, os custos de manutenção e a possível necessidade de substituição do inversor.

Gráfico 2: Retorno financeiro vs tempo de garantia dos módulos fotovoltaicos



Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

No Gráfico 2 tem-se a relação entre o retorno financeiro e o tempo de garantia dos módulos em anos. Com isso é possível concluir que após 4 anos e 9 meses a secretaria se tornará auto sustentável energeticamente e a economia com os gastos de energia trará um benefício de aproximadamente R \$638.908,40. Para a composição dos dados foi considerado um gasto de manutenção anual no valor de R \$793,85 que equivale a 0,5% do custo de investimento do projeto (ELYSIA, 2017).

6.5 Custos de instalação e de manutenção do sistema

No processo de instalação e ao longo da vida útil do sistema existem alguns custos que, por não serem de fácil acesso na literatura, não foram considerados nos cálculos acima. Entre eles estão:

- a) oscilação da tarifa de energia elétrica;
- b) a degradação da potência dos módulos durante sua vida útil;
- c) valor dos equipamentos ao final da garantia;
- d) a possível necessidade de substituição do inversor.

7 CONCLUSÃO

A escolha do uso da energia solar fotovoltaica conectada à rede de baixa tensão da Secretaria deu-se ao amplo espaço para instalação, ventilação, pouco sombreamento e elevado custo-benefício da tecnologia. Entretanto, é importante mencionar a dificuldade de obtenção e constante variações de algumas informações como a oscilação da tarifa de energia elétrica, a degradação da potência dos módulos durante sua vida útil, valor dos equipamentos ao final da garantia e a possível necessidade de substituição do inversor. Portanto, os valores obtidos podem sofrer algumas variações, mas não alteram a viabilidade do projeto proposto e a credibilidade deste estudo.

O presente trabalho ratifica a viabilidade do projeto de instalação de um sistema solar fotovoltaico na Secretaria de Meio Ambiente e Controle Urbano de Maracanaú. Todos os cálculos para o dimensionamento dos componentes do sistema foram feitos considerando para o valor de implantação o custo de R\$ 3,88/Wp, o qual será capaz de fornecer 5022 kWh ao mês e será composto por 124 painéis fotovoltaicos.

Analisando o retorno do investimento aplicado a curto prazo, o sistema fotovoltaico de geração de energia pode ser um investimento menos atrativo que outras aplicações financeiras. Contudo, realizando uma avaliação a longo prazo, é possível obter um retorno financeiro em aproximadamente 4 anos e 9 meses e com um superávit em torno de R\$ 638.908,40 ao final da maioria das garantias fornecidas por empresas nos módulos. Vale ressaltar que para implementar um sistema fotovoltaico é necessário avaliar não só o aspecto econômico, mas também os diversos benefícios ambientais que o uso da tecnologia de geração trará ao meio ambiente.

Por fim, analisando os dados obtidos no projeto, foi possível dimensionar o sistema solar fotovoltaico conectado à rede de maneira bastante satisfatória, conforme os objetivos que foram estabelecidos e as limitações encontradas. Espera-se que a possível inserção de uma energia alternativa na Secretaria de Meio Ambiente seja uma fagulha para algo grandioso e que sirva de estímulo para as demais secretarias que compõem o centro administrativo de Maracanaú.

REFERÊNCIAS

- AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. REN 482/2012: Condições gerais para o acesso de microgeração e minigeração distribuídas aos sistemas de distribuição de energia elétrica e o sistema de compensação de energia elétrica.. [S. L.]: Aneel, 2012. 9 p. Disponível em: <<http://www2.aneel.gov.br/cedoc/bren2012482.pdf>>. Acesso em: 17 mar. 2021.
- AGROAVANCES. Biotecnología: Científicos Mexicanos Desarrollan Celdas Solares Orgánicas. 2017. Disponível em: <<https://agroavances.com/noticias-detalle.php?idNot=464>>. Acesso em: 27 fev. 2021.
- ATLAS - Eólico e Solar do Estado do Ceará. 2019. Disponível em: <<http://atlas.adece.ce.gov.br/>>. Acesso em: 26 mar. 2021.
- BANCO CENTRAL DO BRASIL. Taxas de juros básicas – Histórico. 2021. Disponível em: <<https://www.bcb.gov.br/controleinflacao/historicotaxasjuros>> Acesso em: 25 fev. 2021.
- BIGSUN. Retorno do Investimento em Energia Solar Fotovoltaica: Principais variáveis que devemos analisar. 2020. Disponível em: <<https://www.bigsun.com.br/analise-financeira-da-energia-solar-fotovoltaica/>>. Acesso em: 24 fev. 2021.
- CANAL SOLAR. Filmes Finos CIGS: Uma Alternativa Ao Silício Cristalino. 2020. Disponível em: <<https://canalsolar.com.br/filmes-finos-cigs-uma-alternativa-ao-silicio-cristalino/>>. Acesso em: 25 fev. 2021.
- CONTÁBEIS. O que é e como calcular o payback?. 2016. Disponível em: <<https://www.contabeis.com.br/noticias/30249/o-que-e-e-como-calcular-o-payback/>>. Acesso em: 18 fev. 2021.
- CRESESB - Centro De Referência Para Energia Solar E Eólica Sérgio Brito. Radiação Solar. 2008. Disponível em: <http://www.cresesb.cepel.br/index.php?section=com_content&lang=pt&cid=301>. Acesso em: 13 mar. 2021.
- CRESESB. Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos. Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio de Salvo Brito, 2014. Disponível online em <http://www.cresesb.cepel.br/publicacoes/download/Manual_de_Engenharia_FV_2014.pdf>. Acesso em: 20 mar. 2021.
- CRESESB - Centro De Referência Para Energia Solar E Eólica Sérgio Brito. Componentes de um sistema fotovoltaico. 2008. Disponível em:

<http://www.cresesb.cepel.br/index.php?section=com_content&lang=pt&cid=341#:~:text=Um%20sistema%20fotovoltaico%20pode%20ser,tamb%C3%A9m%20uma%20unidade%20de%20armazenamento>. Acesso em: 12 mar. 2021.

DIMENSIONAMENTO Sistema Solar Fotovoltaico Passo a Passo. [S.I.]: Fotaic Energia Solar, 2017. Son., color. Disponível em: https://www.youtube.com/watch?v=i5NG_wHAodk. Acesso em: 13 fev. 2021.

ECYCLE. Inversor: O cérebro do sistema de energia solar. Disponível em: <<https://www.ecycle.com.br/3349-inversor.html>>. Acesso em: 22 fev. 2021.

ENEL CEARÁ. Tarifa De Fornecimento - Sistema Convencional. 2020. Disponível em: <https://www.enel.com.br/content/dam/enel-br/megamenu/taxas,-tarifas-e-impostos/Tarifas%20ENEL-CE%20bandeira-AMARELA_%20mar%C3%A7o21_REH%202676_220420.pdf>. Acesso em: 24 fev. 2021.

ENERGIA SOLAR. Célula solar de filme fino. 2019. Disponível em: <<https://pt.solar-energia.net/energia-solar-fotovoltaica/elementos/painel-fotovoltaico/celula-fotovoltaica/celula-solar-de-pelicula-fina>>. Acesso em: 26 fev. 2021.

ENGEHALL. Como Funciona a Célula Fotovoltaica. 2018. Disponível em: <<https://engehallrenovaveis.com.br/artigos/celula-fotovoltaica>>. Acesso em: 26 fev. 2021.

ELYSIA Energia Solar. Custo de manutenção de sistema fotovoltaico: alto ou baixo?. 2017. Disponível em: <<https://elysia.com.br/manutencao-de-painel-fotovoltaico/#:~:text=Entenda%20o%20motivo-,O%20custo%20de%20manuten%C3%A7%C3%A3o%20de%20painel%20fotovoltaico%20%C3%A9%20praticamente%20zero,do%20sol%20em%20energia%20el%C3%A9trica.>>> . Acesso em: 24 fev. 2021.

EPE - Empresa de Pesquisa Energética. **Anuário Estatístico de Energia Elétrica**. Rio de Janeiro. 2020.

EPE - Empresa de Pesquisa Energética. Consumo Mensal de Energia Elétrica por Classe (regiões e subsistemas). 2021. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/Consumo-mensal-de-energia-eletrica-por-classe-regioes-e-subsistemas>. Acesso em: 10 mar. 2021.

FADIGAS, Eliane Aparecida Faria Amaral. **Produção de Energia**. Energia Solar Fotovoltaica: fundamentos, conversão e viabilidade técnico-econômica. São Paulo. Grupo de Energia Escola Politécnica Universidade de São Paulo (GEPEA), 2016. p. 22-92.

FC SOLAR. Energia Solar Fotovoltaica. Disponível em: <<http://www.fcsolar.eco.br/aprenda-aqui/>>. Acesso em: 14 mar. 2021.

GREENER. Estudo Estratégico: Mercado Fotovoltaico de Geração Distribuída 2º Semestre de 2020. 2020. Disponível em: <<https://www.greener.com.br/estudo/estudo-estrategico-mercado-fotovoltaico-de-geracao-distribuida-2-semester-de-2020/>>. Acesso em: 18 fev. 2021.

GRUGEEN. Entenda sua Conta de Luz. 2017. Disponível em: <<http://grugeen.eng.br/entenda-sua-conta-de-luz/>>. Acesso em: 19 fev. 2021.

MANUAL De Engenharia Para Sistemas Fotovoltaicos. Rio de Janeiro: Centro de Referência Para Energia Solar e Eólica Sergio de Salvo Brito (CRESESB), 1999. 204 p.

MINHA CASA SOLAR. Painel Solar 330W Dah Solar Policristalino - DHP72-330W. 2020. Disponível em: <<https://www.minhacasasolar.com.br/produto/painel-solar-330w-dah-solar-policristalino-dhp72-330w-79480>>. Acesso em: 16 fev. 2021.

MPPT SOLAR. Ligação em série de mais painéis solares. 2021. Disponível em: <<https://www.mpptsolar.com/pt/paineis-solares-em-serie.html>>. Acesso em: 17 mar. 2021.

MPPT SOLAR. Painéis Solares: Ligação em paralelo. 2021. Disponível em: <<https://www.mpptsolar.com/pt/paineis-solares-em-paralelo.html>>. Acesso em: 17 mar. 2021.

NASCIMENTO, Cássio Araújo do. **Princípio De Funcionamento Da Célula Fotovoltaica**. 2004. 21 f. Monografia (Especialização) - Curso de Fontes Alternativas de Energia, Universidade Federal de Lavras, Lavras - Mg, 2004..

NEOSOLAR. Sistemas de energia solar e seus componentes, 2018. Disponível em: <<https://www.neosolar.com.br/aprenda/saiba-mais/sistemas-de-energia-solar-fotovoltaica-e-seus-componentes>>. Acesso em: 25 mar. 2021.

NUNES, André Figueiredo. **O Choque do Petróleo de 1973: Estados Unidos, OPAEP e a Segurança Energética**. 2016. 127 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de História Comparada, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2016. Acesso em: 10 mar. 2021.

OCA SOLAR ENERGIA. Energia Solar Fotovoltaica e Energia Solar Térmica: Entenda a diferença. Disponível em: <<https://www.ocaenergia.com/blog/energia-solar/energia-solar-fotovoltaica-energia-solar-termica-saiba-diferenca/>>. Acesso em: 18 mar. 2021.

PEREIRA, Bruno Eustáquio Lima. **Análise De Viabilidade Econômica De Implantação De Um Sistema De Geração De Energia Elétrica Através De Painéis Fotovoltaicos Em Sítio Aeroportuário**. 2017. 67 f. Monografia (Especialização) - Curso de Especialização em Eficiência Energética Aplicada Aos Processos Produtivos, Universidade Federal de Santa Maria (Ufsm, Rs), Novo Hamburgo, 2017.

ext=A%20unidade%20b%C3%A1sica%20respons%C3%A1vel%20pela,sistemas%20fotovoltaicos%20%C3%A9%20o%20sil%C3%ADcio>. Acesso em: 20 fev. 2021.

SOUZA, Ronilson di. Célula Fotovoltaica: o guia técnico absolutamente completo. O Guia Técnico Absolutamente Completo. 2017. BlueSol Energia solar. Disponível em: <<https://blog.bluesol.com.br/celula-fotovoltaica-guia-completo/>>. Acesso em: 15 mar. 2021.

SUNSET ENERGIA. Disponível em: <<https://sunsetenergia.com.br/>>. Acesso em: 10 fev. 2021.