



CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA



Universidade Federal
de Campina Grande

THIAGO TEIXEIRA DE LIMA BARBOSA



Centro de Engenharia
Elétrica e Informática

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO
**ESTUDO DE VIABILIDADE DE UM SISTEMA
FOTOVOLTAICO**



Departamento de
Engenharia Elétrica



Campina Grande
2018

THIAGO TEIXEIRA DE LIMA BARBOSA

ESTUDO DE VIABILIDADE DE UM SISTEMA FOTOVOLTAICO

*Trabalho de Conclusão de Curso submetido à
Coordenação do Curso de Engenharia Elétrica
da Universidade Federal de Campina Grande
como parte dos requisitos necessários para a
obtenção do grau de Bacharel em Ciências no
Domínio da Engenharia Elétrica.*

Área de Concentração: Geração de Energia

Orientador:

Professor Leimar de Oliveira, D. Sc.

Campina Grande
2018

THIAGO TEIXEIRA DE LIMA BARBOSA

*Trabalho de Conclusão de Curso submetido à
Coordenação do Curso de Engenharia Elétrica
da Universidade Federal de Campina Grande
como parte dos requisitos necessários para a
obtenção do grau de Bacharel em Ciências no
Domínio da Engenharia Elétrica.*

Área de Concentração: Geração de Energia

Aprovado em / /

Professor Roberto Silva Siqueira, D. Sc.
Universidade Federal de Campina Grande
Avaliador

Professor Leimar de Oliveira, D. Sc.
Universidade Federal de Campina Grande
Orientador, UFCG

Dedico este trabalho aos meus pais,
que me apoiaram em todo os momentos,
independente da dificuldade.

Agradecimentos

Primeiramente, agradeço a Deus, por me possibilitar esta oportunidade que muitos querem na vida. Posteriormente, mas não menos importante, agradeço a meus pais, Ivon Regis Barbosa e Rita Teixeira de Lima, que me deram apoio durante toda a minha vida, e que não mostraram desconfiança do meu potencial em momento algum, ao contrário, mesmo quando eu não me sentia confiante, eles me mostravam que era possível.

Agradeço a minha companheira, que sempre esteve ao meu lado, e que me apoiou e me deu forças para continuar na caminhada.

Agradeço também a minha irmã, que sempre me deu apoio e incentivo, e sempre confiou em mim.

Agradeço ao meu professor orientador, Leimar Oliveira, que me proporcionou esta oportunidade e me orientou a seguir o caminho correto, para atingir meus objetivos.

Agradeço também aos professores da graduação que despertaram o meu interesse nos assuntos abordados e me proporcionaram conhecimentos que me acompanharão para o resto da vida.

E por fim, agradeço a meus amigos, que me acompanharam nesta trajetória de sucessos e insucessos, alegrias e tristezas, mas sempre com a confiança de que atingiríamos o nosso objetivo.

“Sonhos determinam o que você quer.
Ação determina o que você conquista.”

Aldo Novak

Resumo

O seguinte trabalho tem como objetivo apresentar uma forma de energia que ao passar dos anos apresenta considerável desenvolvimento de sua tecnologia, o que possibilitou uma maior viabilidade para consumidores que tem o interesse de realizar micro geração, seja ela conectada à rede, ou não, a energia fotovoltaica, energia renovável que é considerada inesgotável na escala de tempo terrestre, o que apresenta como uma solução para os problemas ao redor no mundo no que diz respeito ao uso de energias não renováveis que devido ao elevado uso, estão se esgotando. Diante deste cenário, será apresentado um caso onde um sistema industrial de dublagem, a empresa M-colagens, instalou um sistema fotovoltaico em suas instalações, e será analisado se o sistema é viável ou não economicamente. Após o estudo do caso, foi verificado que a energia fotovoltaica no cenário atual apresenta-se como uma solução viável para a geração de energia, mesmo que momentaneamente tenha limitações, seja por ocupação de espaço, ou por conta de elevadas temperaturas, ela apresenta resultados favoráveis no ponto de vista financeiro.

Palavras-chave: Sistema fotovoltaico, Célula fotovoltaica,

Abstract

The following work has the objective of present one kind of energy that in the last years presents has a developing considerable of technology, what made the energy viable to the consumers that wants to use micro generation, which can be connected to the network, or not, the photovoltaic energy, a renewable energy that is considered inexhaustible in earth scale, what presents a solution to the problems around the world when you talk about nonrenewable energy's that because of the elevated use, are running out. Considering the situation, it will be presented a case of an industrial system of dubbing, the enterprise M-Colagens, that installed a photovoltaic system, and it will be analyzed if the system is viable or not. After the study of the case, it was verified that the photovoltaic energy presents now as a viable solution to the energy generation, even momentarily have limitations, like the space occupation or high temperatures, presents favorable results in the financial point of view.

Key-words: Photovoltaic system, photovoltaic cell

Lista de Ilustrações

FIGURA 1: RADIAÇÃO SOLAR	17
FIGURA 2: REPRESENTAÇÃO DE UM SEMICONDUTOR.....	17
FIGURA 3: REPRESENTAÇÃO DAS BANDAS DOS MATERIAIS.	18
FIGURA 4: ESPECTRO DA RADIAÇÃO SOLAR	20
FIGURA 5: TABELA DO GAP DE DIFERENTES MATERIAIS	20
FIGURA 6: GERAÇÃO DE PARES ELÉTRON-LACUNA	21
FIGURA 7: CORRENTE FOTOGERADA NA JUNÇÃO PN: (1) PAR ÉLETRON-LACUNA GERADO NA REGIÃO DE CARGA ESPACIAL;(2) PARA GERADO FORA DA REGIÃO DE CARGA ESPECIAL;(3) RECOMBINAÇÃO	22
FIGURA 8: CÉLULA FOTOVOLTAICA DE SILÍCIO.....	23
FIGURA 9: MODELO SIMPLIFICADO DE CÉLULA FOTOVOLTAICA.....	24
FIGURA 10:(A) REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DE MODULO FOTOVOLTAICO;(B) MÓDULO FOTOVOLTAICO	26
FIGURA 11: COMPORTAMENTO DE MÓDULOS ASSOCIADOS EM SÉRIE	28
FIGURA 12: ASSOCIAÇÃO DE MÓDULOS EM PARALELO.	29
FIGURA 13: CLASSIFICAÇÃO DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS.	31
FIGURA 14:ESQUEMA DE SISTEMA FOTOVOLTAICO CONECTADO À REDE.....	32
FIGURA 15: M-COLAGENS.	38
FIGURA 16:(A) MÁQUINA DE DUBLAGEM A FILME; (B) MÁQUINA DE DUBLAGEM A COLA.....	40
FIGURA 17:IRRADIAÇÃO DO ANO DE 2018 EM CAICÓ.....	42
FIGURA 18: FIGURA ILUSTRATIVA DE UM PAINEL FOTOVOLTAICO	44
FIGURA 19:FIGURA ILUSTRATIVADAS ENTRADAS DOS MPPT DO INVERSOR.....	45
FIGURA 20: FIGURA ILUSTRATIVA DO INVERSOR.	45
FIGURA 21: CURVA DE EFICIÊNCIA DO INVERSOR	46
FIGURA 22: CONTA DE ENERGIA PÓS INSTALAÇÃO DO SISTEMA FOTOVOLTAICO.	48

Lista de Tabelas

TABELA 1: CONSUMO MENSAL EM WATTS.	41
TABELA 2: DADOS DO ANO DE 2018 DO SISTEMA FOTOVOLTAICO	43
TABELA 3: PAYBACK DESCONTADO.	49
TABELA 4: VPL DAS PROPOSTAS 1 E 2.	50

Lista de Abreviaturas e Siglas

ABB	Asea Brown Boveri
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
COSERN	Companhia Energética do Rio Grande do Norte
CRESESB	Centro de referência de Energia Solar e Eólica
CSI	Currentt Source Inverter
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
MPPT	Ponto Rastreador de Potência Máxima
NBR	Norma Brasileira Regulamentadora
PVA	Acetato de Polivinila
PWM	Largura de Pulso
SFVRs	Sistemas Fotovoltaicos conectados a Rede
SFIs	Sistemas Fotovoltaicos Independentes
TMA	Taxa Mínima de Atratividade
Vca	Tensão em vazio
VP	Valor Presente
VPL	Valor Presente Liquido
VSI	Voltage Source Inverter
WEC	World Energy Council
CA	Corrente Alternada
CC	Corrente Continua
cm	Centímetro
Eg	Bandgap (Banda Proibida)
eV	Eletro volt
Icc	Corrente de Curto Circuito
Is	Corrente da célula
kW	Quilowatt
kWp	Quilowatt-pico

Sumário

1.INTRODUÇÃO.....	13
1.1 ESTRUTURA DO TRABALHO.....	14
2.REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	16
2.1 RADIAÇÃO SOLAR	16
2.2 EFEITO FOTOVOLTAICO	17
2.3 CÉLULA FOTOVOLTAICA	20
2.4 MODULO FOTOVOLTAICO	25
2.5 PAINÉIS FOTOVOLTAICOS.....	29
2.6 CLASSIFICAÇÃO DOS SISTEMAS FOTOVOLTAICOS	29
2.7 ENGENHARIA ECONÔMICA	36
3. PROJETO DE GERAÇÃO FOTOVOLTAICA PARA UMA SISTEMA INDUSTRIAL	38
3.1 A EMPRESA.....	38
4.PROJETO FOTOVOLTAICO PARA A EMPRESA.....	42
5. VIABILIDADE FINANCEIRA DO PROJETO	47
5.1 PAYBACK SIMPLES.....	47
5.2 VALOR PRESENTE LÍQUIDO (VPL)	49
6. ANÁLISE DO PROJETO EXECUTADO	51
6.1 INSTALAÇÃO DOS PAINÉIS FOTOVOLTAICOS	51
6.2 TEMPERATURA DAS PLACAS	52
6.3 CONSUMO DA REDE PÓS – INSTALAÇÃO	53
6.4 PRODUÇÃO X CONSUMO	54
7. CONCLUSÃO.....	55
8. BIBLIOGRAFIA	56

1.Introdução

O atual cenário energético do país vem apresentando uma demanda cada vez maior de formas renováveis de energia, devido à dificuldade atual para encontrar maneiras de sustentar o sistema ao mesmo tempo em que o avanço tecnológico faz com que o cidadão aumente seu consumo energético cada vez mais. Esta busca por diferentes formas de geração de energia vem apresentando mais uma preocupação também com os danos que cada forma de geração de energia pode causar ao meio ambiente, devido à esta preocupação, as energias renováveis vem avançando cada vez mais a sua demanda, e conseqüentemente sendo utilizadas mais e mais no contexto de geração de energia elétrica no Brasil e no mundo. Por consequência disto, uma das fontes de energia que devido ao avanço tecnológico vem sendo cada vez mais viável, são os sistemas fotovoltaicos. Sistemas que são baseados na irradiação solar, uma fonte renovável de energia, que na escala terrestre de tempo, é considerada inesgotável.

O sistema fotovoltaico baseia-se no efeito fotovoltaico, o qual vem da conversão direta da luz em energia elétrica através do uso de células fotovoltaicas. Estas células, que em maior escala compõem um módulo, tem como adversidade, a dificuldade de encontrar equipamentos complementares para o sistema fotovoltaico que possuem tanto vida útil como qualidade compatível com a dos módulos, que tem vida útil em torno de 25 anos para módulos de silício cristalino. De acordo com o World Energy Council (WEC), no ano de 2016, a capacidade energética solar instalada ao redor do mundo era de 227 GW, enquanto no ano de 2011, a capacidade energética era de 68.8 GW, ou seja, ao longo do tempo temos um crescimento significativo desta forma de geração de energia.

O Brasil é o país mais avançado da América do Sul, no que diz respeito ao desenvolvimento das energias renováveis. Foi um dos países pioneiros na fabricação de células fotovoltaicas no continente, a partir do silício monocristalino, não se limitando à simples montagem dos painéis solares. Em 1979, surgiu a primeira fábrica de módulos fotovoltaicos do país, como consequência da crise do petróleo, iniciada em 1973. A FoneMat, uma empresa de telecomunicações, sediada na cidade de São Paulo, começou a montar módulos

fotovoltaicos utilizando células fotovoltaicas importadas da Solarex, com o objetivo de atender ao mercado de telecomunicações. (TOLMASQUIM).

No Brasil, segundo a EPE, no ano de 2017, o país atingiu 174.5 MW de potência instalada, apresentando um crescimento considerável, já que segundo a WEC, em 2011 o Brasil possuía apenas 1.09 MW de potência instalada, no que diz respeito a energia fotovoltaica. (WEC,2011)

1.1 Objetivos

Sendo assim, como o sistema fotovoltaico apresenta uma forma de energia que vem se mostrando com grande potencial e com potencial para viabilidade econômica, é de interesse analisar casos onde exista aplicação de sistemas fotovoltaicos instalados para analisar seu comportamento e, se é realmente interessante a sua utilização.

Mediante este desejo de conhecer resultados de casos concretos, o presente trabalho procura realizar a análise de um sistema fotovoltaico em uso, e analisar sua viabilidade, ou seja, comparar os custos, com os custos referentes ao período onde o sistema ainda não estava implantado.

1.2 Estrutura do trabalho

O capítulo 1, é referente a introdução do trabalho, seu principal objetivo é apresentar o tema que será discutido durante o trabalho, para que o leitor se sinta motivado a continuar a leitura. Nele também está presente os objetivos desejados e a estrutura do trabalho.

O capítulo 2, é referente a revisão bibliográfica, ou seja, introduz todo o conceito desde a irradiação solar até a geração de energia elétrica por sistemas fotovoltaicos, assim como explica os passos para análise econômica de viabilidade.

O capítulo 3, é referente a apresentação da empresa, e do sistema ao qual foi introduzido um sistema de geração fotovoltaica para suprir a necessidade energética, levando em conta o seu consumo e custos antes da instalação do sistema fotovoltaico.

O capítulo 4, apresenta o sistema fotovoltaico projetado para a empresa, considerando para sua construção as condições físicas e financeiras para desenvolvimento do projeto.

O capítulo 5, analisa a viabilidade econômica do sistema, apresentando respostas sobre se é interessante, ou não, a instalação do sistema. Para esta análise, foram utilizados os métodos de payback e VPL.

O capítulo 6, analisa o projeto após a instalação, analisando as características dele na prática, para comparação com o sistema projetado, observando se os objetivos traçados pelo projeto foram atingidos, ou não.

O capítulo 7 apresenta as conclusões do estudo, levando em conta os resultados obtidos, pode-se avaliar se o sistema tem resposta positiva, ou não.

2.Revisão Bibliográfica

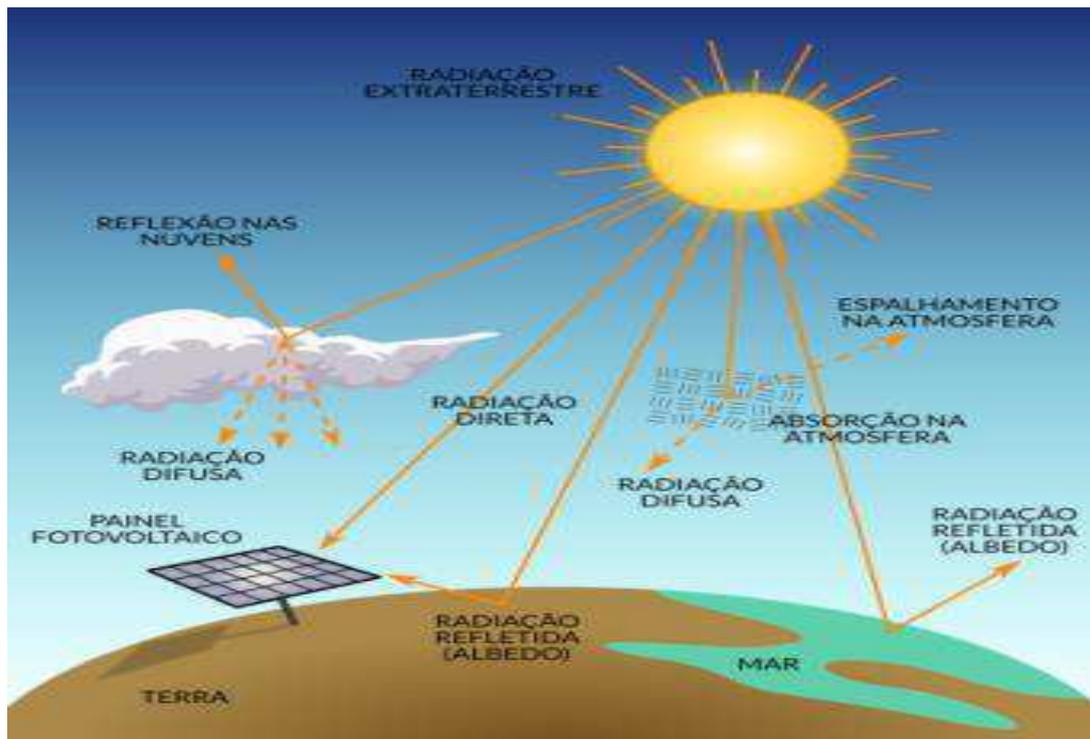
Este capítulo tem como objetivo tratar de todo conhecimento básico necessário para o entendimento do conteúdo que vem a seguir, toda a teoria de onde foi retirado o conhecimento para a produção de células fotovoltaicas a partir das quais foi possível produzir sistemas fotovoltaicos para suprir as necessidades de energia da sociedade.

2.1 Radiação Solar

Segundo a CRESESB, o Sol fornece atualmente para a atmosfera terrestre, cerca de 10.000 vezes o consumo mundial de energia por hora, esta liberação de energia que chega a terra, é justamente a radiação solar, que tem diferentes formas de apresentação. A radiação solar pode ser direta, difusa ou de albedo .

A radiação direta, é justamente a parcela da radiação solar que incide diretamente na superfície da terra sem nenhuma interferência da atmosfera, e constitui aproximadamente 25% da radiação total. A radiação difusa, é caracterizada pela radiação solar que alcança a terra após ser dispersada por moléculas e partículas presentes na atmosfera. O albedo é a fração da radiação solar incidente, que é refletida por uma superfície. Esses três tipos de radiação são apresentados na Figura 1. Para o aproveitamento fotovoltaico, é de fundamental importância a radiação direta, responsável pela maior fonte de geração de energia no que diz respeito ao efeito fotovoltaico, devido a característica das células utilizadas no processo.

Figura 1: Radiação Solar

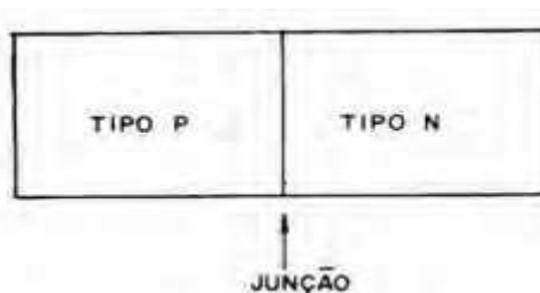


Fonte: Atlas de Energia Solar do Estado do Paraná - 1ª Edição – 2017.

2.2 Efeito Fotovoltaico

Na natureza, existem materiais que tem como característica possuir a camada de valência totalmente preenchida por elétrons e também uma banda de condução totalmente vazia na condição de temperaturas baixas. Esses materiais, são conhecidos como materiais semicondutores.

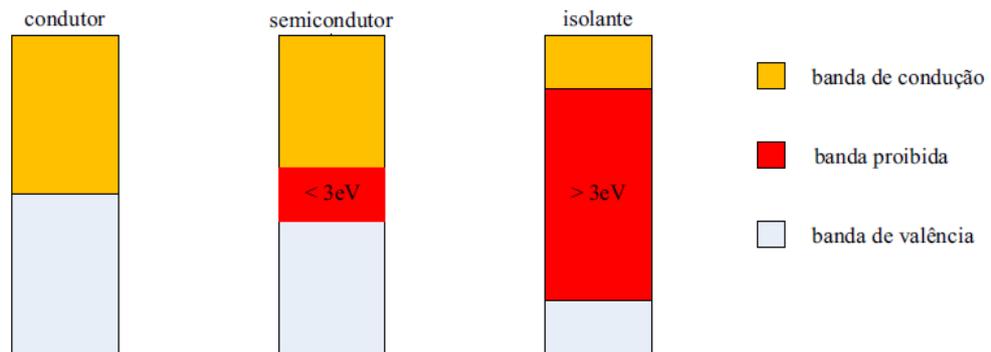
Figura 2: Representação de um Semicondutor



Fonte: (Mello, 1980)

Na existência da junção P-N como apresentada na Figura 2, pode-se observar a criação desta zona onde existe essa troca de elétrons, a banda de valência, e a separação destas duas bandas permitida pela característica dos semicondutores, é denominada o gap de energia, que está representado na Figura 3, para isolantes, condutores e semicondutores, no caso de estudo, os semicondutores, pode atingir até 3eV.

Figura 3: Representação das Bandas dos materiais.



Fonte: (Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos,2014)

Devido à esta característica, os semicondutores podem ser utilizados no efeito fotovoltaico, já que como propriedade da célula fotovoltaica, fótons com energia superior ao gap de energia do material, excitam elétrons para a banda de condução.

O efeito fotovoltaico foi descoberto por Alexander Edmond Becquerel no ano de 1839, conduzindo um experimento eletroquímico, verificou por acaso, que placas de platina ou prata quando imersas em uma solução ácida e expostas a luz solar, possuíam a capacidade de gerar uma diferença de potencial. Porém, apenas em 1870, foi iniciado os estudos do efeito fotovoltaico em materiais sólidos, como por exemplo o selênio e por volta de 1880, foi fabricada a primeira célula fotovoltaica, utilizando exatamente o selênio.

Pesquisas envolvendo as aplicações das células fotovoltaicas levaram bastante tempo para serem iniciadas, e apenas em 1950, foram iniciadas. No Laboratório Bell, foi iniciado um estudo para utilização em sistemas realizáveis e de longa duração para aplicação em satélites. Em 25 de abril foi apresentado pelo engenheiro elétrico Daryl Chapin, o físico Gerald Pearson e o químico Calvin

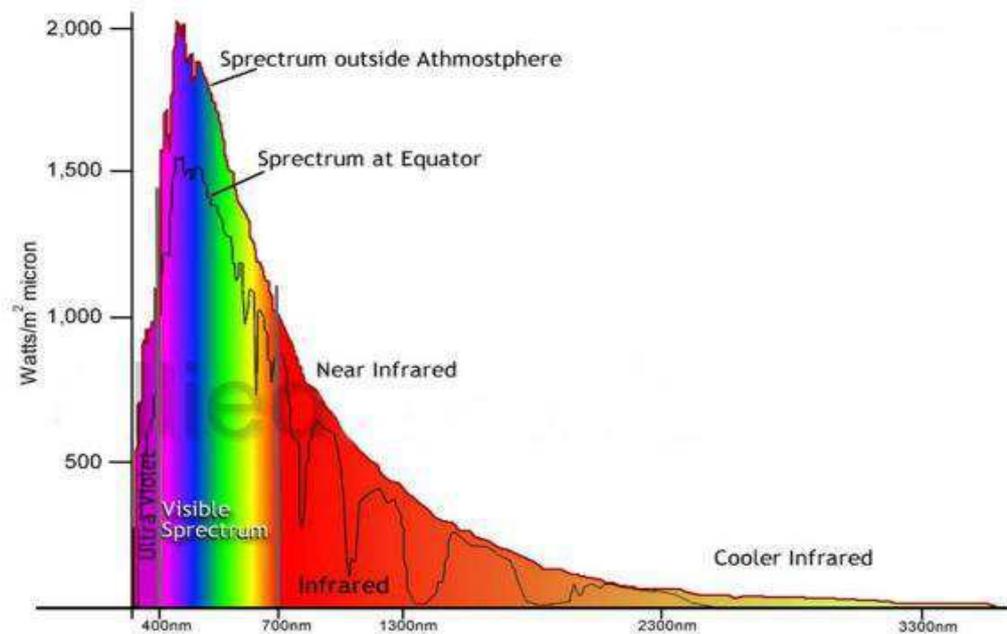
Fuller a primeira célula fotovoltaica que possuía um semicondutor de silício com junção PN, esta célula que foi feita a partir de laminas de silício cristalina com área de 2cm^2 de superfície com uma eficiência elétrica de 6%, o que na época era considerado relativamente alto.

Mediante a crise mundial energética que ocorreu entre 1973 e 1974, acarretou em uma busca maior por outras formas de obtenção de energia, e nesse contexto, a energia fotovoltaica deixou de ser considerada apenas para programas espaciais e passou a ser observada como uma possível fonte para obtenção de energia também em ambientes terrestres.

Nos dias de hoje, pode-se observar diversos materiais semicondutores que são apropriados na conversão fotovoltaica, possuindo diferentes eficiências e formas de aplicação. Na grande maioria, as células fotovoltaicas utilizam o silício, podendo ser constituídas de cristais monocristalinos, silício amorfo e cristais policristalino.

Deve-se observar que este processo possui fatores que limitam a sua produtividade. O espectro da radiação por exemplo é um deles, já que ele se espalha em uma ampla faixa e apenas a parcela com comprimento de onda inferior a $1\ \mu\text{m}$ tem a capacidade de excitar as células no silício, podemos ver o espectro da radiação solar incidente no topo da atmosfera e ao nível do mar na Figura 4. Outro fator limitante é que cada fóton, consegue excitar apenas um elétron, porque ao absorver quantum suficiente para escapar, o elétron provavelmente terá emitido o resto do quantum absorvido, portanto fótons com energia superior à do gap, irão apenas gerar um excesso de energia que será convertido em calor.

Figura 4: Espectro da Radiação Solar



Fonte:(USP,2011).

2.3 Célula Fotovoltaica

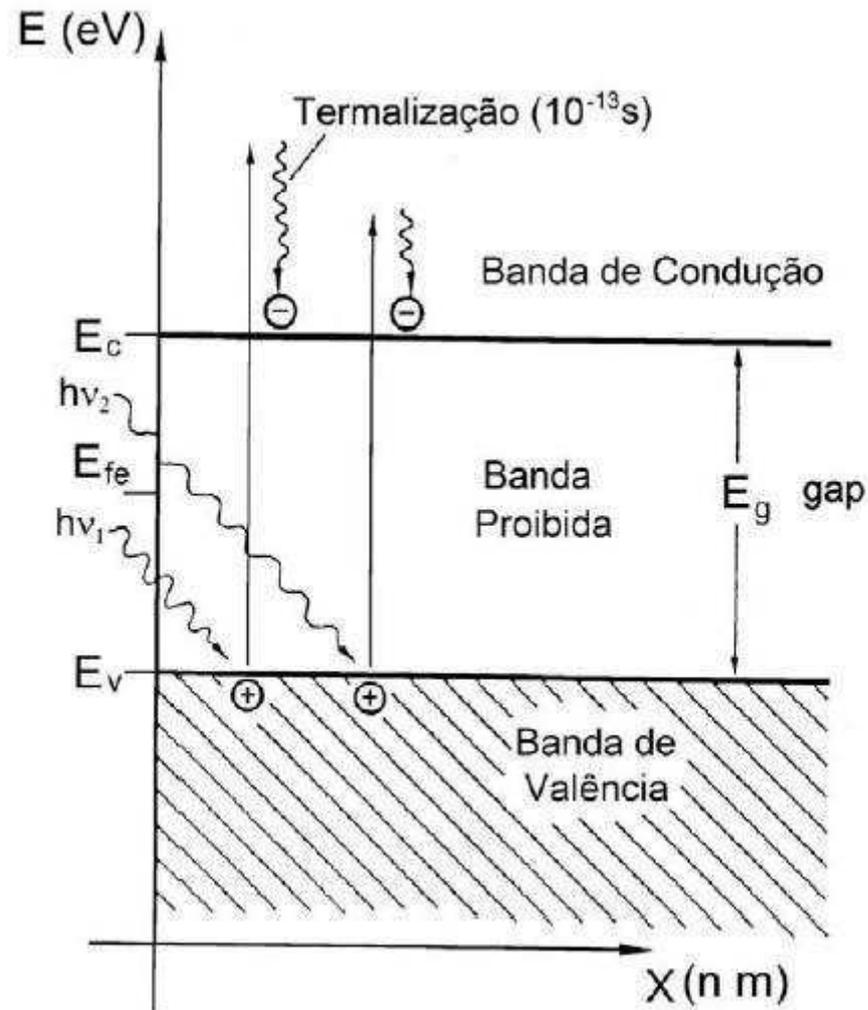
A propriedade fundamental a ser observada na fabricação de células fotovoltaicas é baseada exatamente no gap, a banda proibida, que o semicondutor utilizado possui. Pode-se ver alguns gaps de diferentes tipos de materiais semicondutores na Figura 5. Possuir o conhecimento do valor do gap do material é muito importante pois, fótons que incidem no material, devem possuir energia superior a E_g do gap do material, possibilitando que o elétron ultrapasse a banda proibida, para gerar pares do tipo elétron-lacuna, como está representado na Figura 6.

Figura 5: Tabela do gap de diferentes materiais

Material	Grupo	E_g (eV)	Material	Grupo	E_g (eV)
Si	elemento	1,12	GaP	III-V	2,26
Ge	elemento	0,66	CdS	II-IV	2,42
GaAs	III-V	1,43	PbS	II-IV	0,35
InSb	III-V	0,18	PbTe	II-IV	0,30
InP	III-V	1,35	CdTe	II-IV	1,45

Fonte: (Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos,2014)

Figura 6: Geração de pares elétron-lacuna



Fonte: (Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos, 2014)

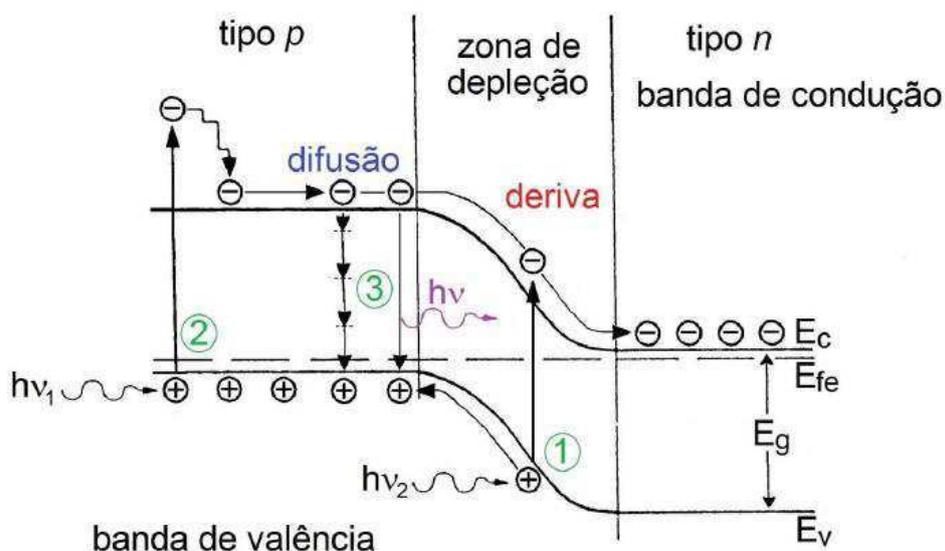
Mediante a geração de elétrons e lacunas que podem se mover dentro do material, acontece o efeito fotocondutivo, este efeito possibilita o aumento da condutividade elétrica do material. Entretanto para sua aplicação em correntes e

tensões é necessário a existência de um campo elétrico, que pode ser criado através da dopagem do material, formando a junção pn apresentada anteriormente. Para gerar esta junção, é necessário adicionar impurezas ao material semiconductor, realizando o processo de dopagem no mesmo.

Na prática, para obter a junção pn com uma célula de silício por exemplo, as mais utilizadas na atualidade, é utilizada uma lâmina de silício previamente dopada com átomos do tipo p, e nela, são introduzidos átomos do tipo n, para compensar a existência da região previamente dopada e introduzir uma região do tipo n na lâmina em questão, o processo contrário, pode da mesma forma ser realizado, produzindo a junção pn igualmente.

No caso onde os portadores de carga são gerados no interior da zona de depleção, como é representado na Figura 7, estes irão ser separados devido a presença do campo elétrico sendo os elétrons acelerados para o lado n e as lacunas para o lado p, gerando uma corrente elétrica. Esta separação que é causada pela junção pn nos portadores de carga, é justamente o que representa o efeito fotovoltaico, ou seja, conversão da energia luminosa em elétrica associada a uma corrente elétrica e uma diferença de potencial.

Figura 7: Corrente foto gerada na junção pn: (1) par elétron-lacuna gerado na região de carga espacial; (2) para gerado fora da região de carga especial; (3) recombinação



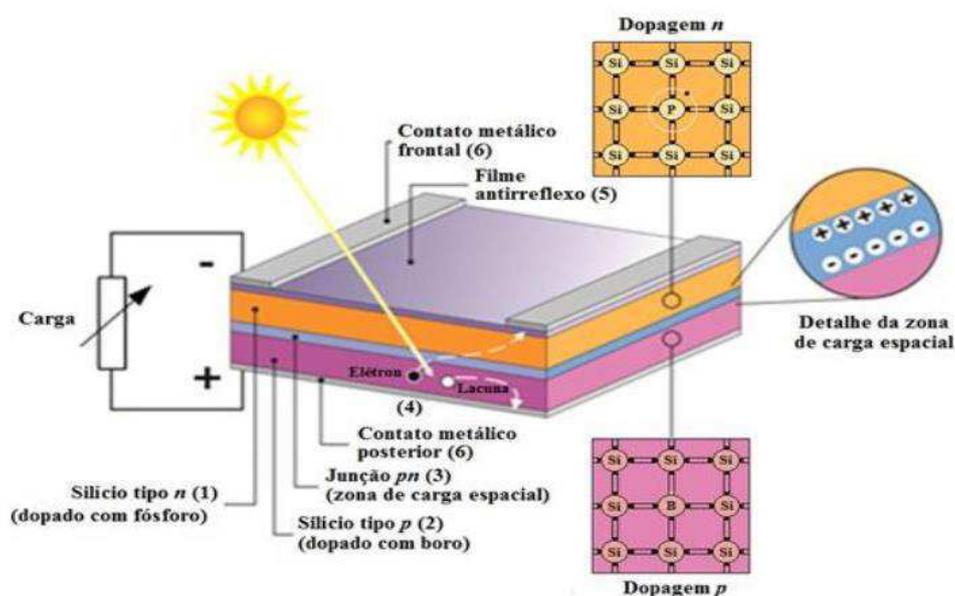
Fonte: adaptado de (OLDENBURG,1994) por (Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos,2014)

Após observar todas as suas características, podemos observar a estrutura básica de uma célula fotovoltaica de silício na Figura 8. Podemos observar que nela, existem contatos metálicos presentes tanto na parte frontal, na região n, como na parte traseira, na região p. A existência destes contatos é devido ao fato de que, se os mesmos forem conectados externamente por meio de um condutor, irá existir uma circulação de elétrons.

Como limitações para a eficiência da conversão das células fotovoltaicas são:

- Reflexão na superfície frontal;
- Sombra proporcionada pela malha metálica na superfície frontal;
- Absorção nula de fótons que possuem energia inferior à do gap;
- Probabilidade baixa de captação pela junção pn de portadores de carga que são gerados fora da zona de carga espacial;
- Recombinação dos portadores de carga em impurezas e defeitos do material;
- Resistência elétrica no dispositivo, assim como possíveis fugas de corrente elétrica.

Figura 8: Célula fotovoltaica de Silício

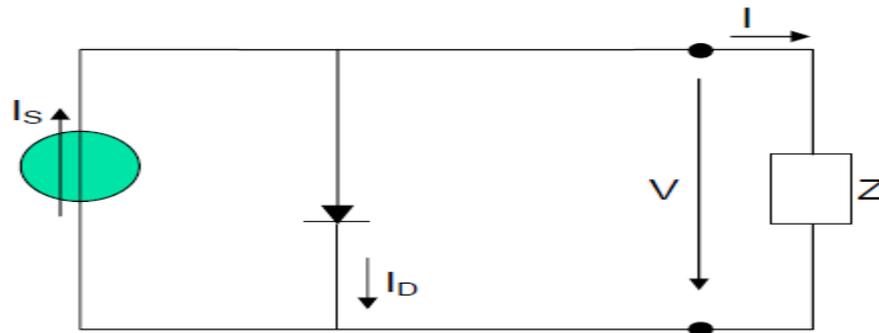


Fonte: (Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos,2014).

2.3.1 Modelo Matemático simplificado da Célula Fotovoltaica

Para facilitar o entendimento do funcionamento quanto a circuito da célula fotovoltaica, é possível utilizar um modelo simplificado que representa a célula, como apresentado na Figura 9.

Figura 9: Modelo Simplificado de Célula Fotovoltaica



Fonte: (Rui Castro,2002).

Segundo Rui Castro (2002), a fonte de corrente I_S representa a corrente eléctrica gerada pelo feixe de radiação luminosa, constituído por fotons, ao atingir a superfície ativa da célula (efeito fotovoltaico); esta corrente unidirecional é constante para uma dada radiação incidente. A junção p-n funciona como um díodo que é atravessado por uma corrente interna unidirecional I_D , que depende da tensão V aos terminais da célula. (RUI CASTRO)

A corrente I_D que se fecha atrás do díodo é dada por:

$$I_D = I_0 \left(e^{V/mV_T} - 1 \right) \quad \text{Eq.1}$$

Onde temos que a corrente inversa máxima de saturação do díodo é dada por I_0 , V é a tensão nos terminais da célula, m é o fator de idealidade do díodo e V_T é o potencial térmico. Portanto:

$$I = I_S - I_D = I_S - I_0 \left(e^{V/mV_T} - 1 \right) \quad \text{Eq.2}$$

Se faz necessário uma observação a dois momentos de operação em particular, que são os casos de curto-circuito e circuito aberto.

No curto-circuito: $V = 0$, $I_D = 0$, e $I = I_S = I_{cc}$.

Segundo Rui Castro (2002), I_{cc} (corrente de curto-circuito) é o valor máximo da corrente de carga, igual, portanto, à corrente gerada por efeito fotovoltaico. O seu valor é uma característica da célula, sendo um dado fornecido pelo fabricante para determinadas condições de radiação incidente e temperatura.

No caso da ocorrência de um circuito aberto:

$$I = 0 \text{ e } V_{ca} = mV_t \ln \left(1 + \frac{I_S}{I_0} \right) \text{ Eq.3}$$

Segundo Rui Castro (2002), V_{ca} (tensão em vazio) é o valor máximo da tensão aos terminais da célula, que ocorre quando esta está em vazio. O seu valor é uma característica da célula, sendo um dado fornecido pelo fabricante para determinadas condições de radiação incidente e temperatura.

2.4 Modulo fotovoltaico

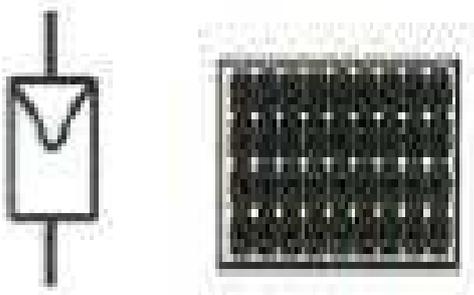
O modulo fotovoltaico é uma unidade básica constituída por um conjunto de células fotovoltaicas que são interligadas eletricamente e encapsuladas, tendo como objetivo a geração de energia elétrica. Este conjunto é conectado em arranjos que além de ter a capacidade de gerar energia, também promovem a proteção da célula fotovoltaica.

Para definir a quantidade de células a serem conectadas em um módulo e seu arranjo, deve-se observar a tensão de utilização e corrente desejada. É de fundamental importância a observação das características elétricas das células que serão reunidas no momento da fabricação do módulo, pois as incompatibilidades das características podem vir a gerar um modulo fotovoltaico de baixa qualidade, devido à o descasamento das células, que é um processo onde as células de menor fotocorrente limitam o desempenho do conjunto, fazendo com que a eficiência global do módulo fotovoltaico seja reduzida.

Dependendo da associação de células escolhida na fabricação, é possível obter diferentes resultados no que diz respeito a tensão e corrente nominal obtida, o número de células a serem agrupadas e a escolha de suas conexões seja ela em série ou paralelo, dependerá da tensão e corrente que é desejada para cada aplicação. Para sistemas conectados à rede, os níveis de tensão têm uma variação grande exigindo na maioria dos casos, a associação dos módulos em série, assim possibilitando a utilização de módulos com tensões nominais bastante diversificadas.

V_{ca} (tensão em vazio) é o valor máximo da tensão aos terminais da célula, que ocorre quando esta está em vazio. O seu valor é uma característica da célula, sendo um dado fornecido pelo fabricante para determinadas condições de radiação incidente e temperatura. V_{ca} (tensão em vazio) é o valor máximo da tensão aos terminais da célula, que ocorre quando esta está em vazio. O seu valor é uma característica da célula, sendo um dado fornecido pelo fabricante para determinadas condições de radiação incidente e temperatura. (MANUAL DE ENGENHARIA PARA SISTEMAS FOTOVOLTAICOS)

Figura 10:(a) Representação esquemática de modulo fotovoltaico;(b) Módulo fotovoltaico



Fonte: Projeto de Sistemas FV conectados à rede,2018.

2.4.1 Módulos Fotovoltaicos em serie

A conexão em série é feita do terminal positivo de um módulo ao terminal negativo de outro, e assim por diante. As caixas de conexão na sua face posterior ou cabos pré-instalados facilitam esta conexão. Deve-se utilizar cabos e conexões específicos para uso em sistemas fotovoltaicos, que são protegidos contra efeitos da radiação e intempéries.

Em situações onde os módulos são iguais, a corrente não é afetada, assim:

$$I = I_1 = I_2 = I_3 = \dots = I_n \text{ Eq.4}$$

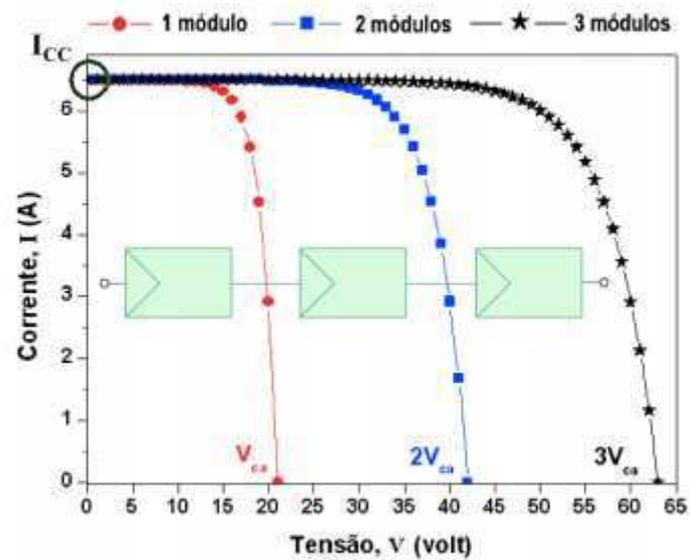
E suas tensões são somadas, então:

$$V = V_1 + V_2 + V_3 + \dots + V_n \text{ Eq.5}$$

Na Figura 11 pode-se observar o comportamento de um gráfico tensão x corrente de um sistema com módulos fotovoltaicos conectados em série. A partir da figura, podemos observar o que é representado pelas formulas acima, a soma das tensões com a corrente se mantendo a mesma, independentemente do número de módulos que estão sendo conectados.

Uma vez realizada a conexão em série, as correntes que fluem por cada módulo são sempre iguais entre si, mas para que a corrente não seja afetada em relação a corrente de um módulo individual, consideram-se módulos idênticos sob as mesmas condições de radiação e temperatura. Caso haja uma dispersão de características elétricas ou um sombreamento parcial, a corrente do conjunto conectado em série é limitada pelo módulo com menor corrente individual. (MANUAL DE ENGENHARIA PARA SISTEMAS FOTOVOLTAICOS)

Figura 11: Comportamento de módulos associados em série



Fonte: (Joaquim Carneiro, 2010).

2.4.2 Módulos Fotovoltaicos em paralelo

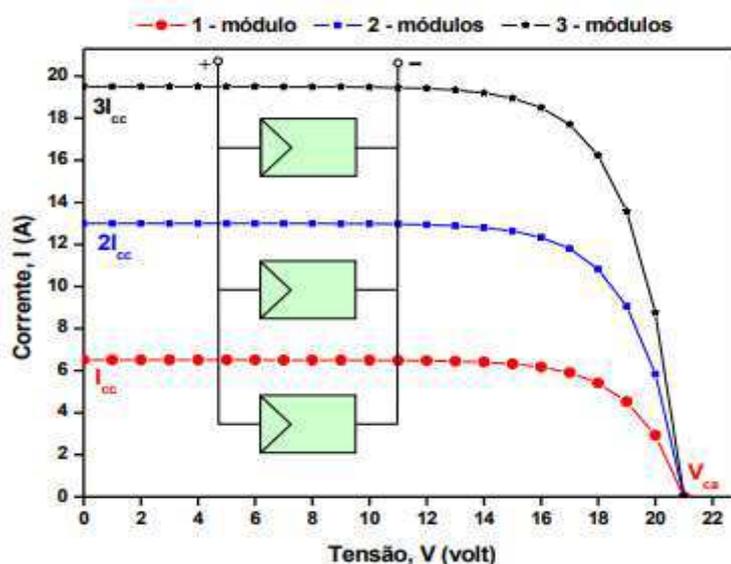
Na conexão em paralelo, é feita a união de todos os terminais positivos entre si e a união de todos os terminais negativos entre si. O que nos resulta um sistema onde não temos alteração de tensão e temos uma soma das correntes como mostrado a seguir.

$$V = V_1 = V_2 = V_3 = \dots = V_n \text{ Eq.6}$$

$$I = I_1 + I_2 + I_3 + \dots + I_n \text{ Eq.7}$$

Na situação da Figura 12 pode-se observar que a tensão de circuito aberto dos três módulos apesar da associação permanece inalterada, enquanto a corrente de curto circuito é três vezes maior, o que mais uma vez, condiz com as equações apresentadas acima.

Figura 12: Associação de módulos em paralelo.



Fonte: (Joaquim Carneiro,2010).

2.5 Painéis Fotovoltaicos

Os módulos podem ser conectados em ligações série e/ou paralelo, dependendo da corrente e tensão desejadas, para formar painéis fotovoltaicos com potência mais elevada. Ao definir como serão associados os módulos, é necessário ter informações de como deverá ser a instalação e quais componentes serão utilizados, pois as tensões e correntes resultantes devem ter plena compatibilidade com esses componentes.

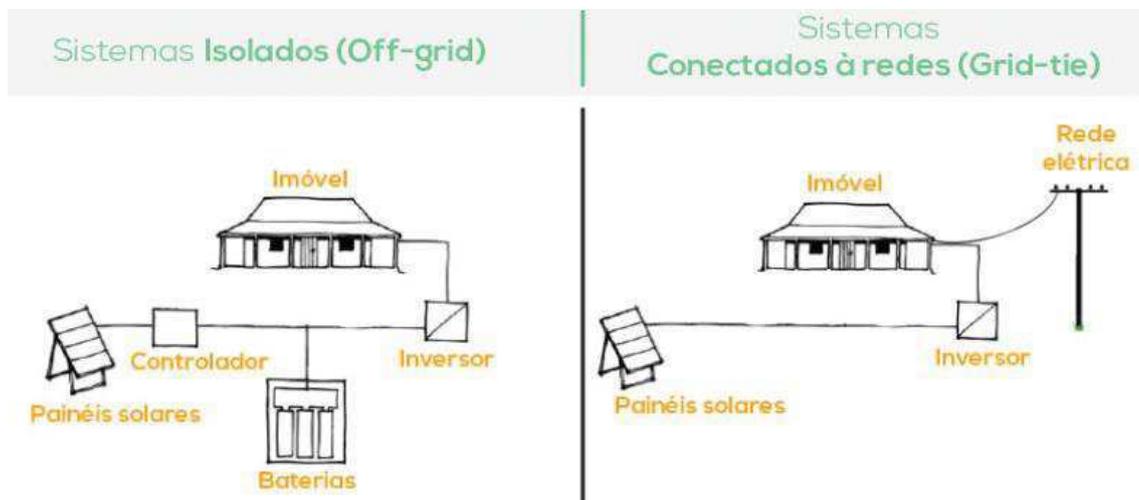
2.6 Classificação dos Sistemas Fotovoltaicos

Segundo a ABNT NBR 11704:2008, sistemas fotovoltaicos são classificados quanto a interligação com o sistema público de fornecimento de energia e quanto a configuração do sistema.

Mediante a sua interligação com o sistema público de fornecimento de energia, os sistemas podem ser sistemas isolados ou sistemas conectados à rede elétrica, como

apresentado na Figura 13. Já levando em conta a configuração do sistema, os sistemas podem ser puros ou híbridos.

Figura 13: Sistemas não conectados à rede e Sistemas Conectados à Rede.



Fonte: <http://www.ecoeficientes.com.br/o-que-e-energia-solar-fotovoltaica/>

Sistemas isolados são sistemas que não possuem conexão alguma com o sistema público de fornecimento de energia elétrica, segundo a CRESESB (2006), este armazenamento pode ser feito através de baterias, quando há intuito de utilizar aparelhos elétricos, ou armazenar na forma gravitacional, em situações onde é usado para bombear água para tanques de abastecimento.

Já sistemas conectados à rede elétrica são aqueles efetivamente conectados ao sistema público de fornecimento de energia. Segundo PINHO e GALDINO (2014), sistemas conectados à rede é um tipo de sistema que não utiliza baterias, pois a energia que é produzida pode ser consumida diretamente pela carga local ou injetada na rede elétrica convencional, de forma a ser consumida pelas unidades consumidoras conectadas ao sistema de distribuição.

Segundo RUI CASTRO (2002), em aplicações ligadas à rede de energia elétrica, o gerador fotovoltaico entrega à rede a máxima potência que, em cada instante, pode produzir. Entre o módulo e a rede existem equipamentos de regulação e interface que otimizam as condições de geração e as adaptam às condições de recepção impostas pela rede.

Sistemas puros são sistemas que tem como o gerador fotovoltaico a única fonte de geração de energia elétrica, já sistemas híbridos, são resultado de uma associação da energia fotovoltaica com outros tipos de geração de energia.

Na Figura 14 pode-se ver alguns exemplos de aplicações típicas de diferentes classes de sistemas fotovoltaicos.

Figura 14: Classificação de Sistemas Fotovoltaicos.

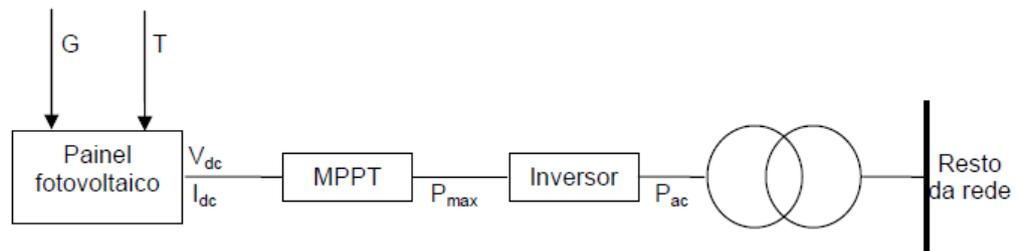
Tipo de sistema		Alimentação dos consumidores	Acumulação de energia elétrica	Componentes básicos	Aplicações típicas
Sistemas isolados	Puros	Tensão contínua	Não	Seguidor de potência máxima (desejável)	Bombeamento, produção de hidrogênio etc.
			Sim	Controlador de carga e acumulador	Iluminação, telecomunicações, sinalização náutica, cerca elétrica, proteção catódica etc.
		Tensão alternada	Não	Inversor	Bombeamento, uso industrial etc.
			Sim	Controlador de carga, acumulador e inversor	Eletrificação rural, bombeamento, telecomunicações, uso industrial, iluminação etc.
	Híbridos	Tensão contínua	Sim	Controlador de carga, acumulador e gerador complementar	Telecomunicações, iluminação, sinalização rodoviária e ferroviária etc.
		Tensão alternada	Opcional	Controlador de carga, acumulador opcional e gerador complementar	Iluminação, uso industrial etc.
Sistemas conectados à rede elétrica	Puros	Tensão alternada	Não	Inversor	Aplicações residenciais, comerciais e industriais, produção de energia para a rede pública etc.
	Híbridos	Tensão alternada	Não	Inversor e gerador complementar	Aplicações residenciais, comerciais e industriais, produção de energia para a rede pública etc.
			Sim	Inversor, gerador complementar e acumulador	Eletrificação rural, uso industrial, suprimento ininterrupto de energia etc.
NOTA Todos os tipos de sistemas possuem gerador fotovoltaico entre os componentes básicos.					

Fonte: ABNT NBR 11704:2008.

2.6.1 Sistemas Conectados à rede

É um tipo de sistema onde normalmente não existe armazenamento de energia devido a toda energia gerada ser entregue diretamente a rede. Para a inserção da energia a rede são utilizados inversores especiais que obedecem a regras específicas de qualidade e segurança. Sistemas interligados a rede podem ser utilizados em aplicações bastante diversificadas, desde sistemas residenciais, onde geralmente existe uma potência de dezenas de kWp, ou centrais fotovoltaicas, onde é produzido centenas de kWp

Figura 15:Esquema de Sistema Fotovoltaico Conectado à Rede.



Fonte: (Rui Castro,2002).

Segundo Rui Castro (2002), em aplicações ligadas à rede de energia elétrica, o gerador fotovoltaico entrega à rede a máxima potência que, em cada instante, pode produzir. Entre o módulo e a rede existem equipamentos de regulação e interface que otimizam as condições de geração e as adaptam às condições de recepção impostas pela rede.

Utilizando o modelo matemático simplificado apresentado no tópico 2.3.1, é possível obter certas características do módulo fotovoltaico a partir dos resultados obtidos mediante estudo da célula fotovoltaica.

Parâmetros Constantes:

$$m = \frac{V_{max}^r - V_{ca}^r}{V_T^r * \ln\left(\frac{I_{max}^r}{I_{cc}^r}\right)} \text{ Eq.8}$$

Parâmetros que dependem da radiação:

$$I_{cc} = I_{cc}^r * \frac{G}{G^r} \text{ Eq.9}$$

Parâmetros que dependem da temperatura:

$$I_o = I_o^r * \left(\frac{T}{T^r}\right)^3 * e^{\frac{\epsilon}{m^r} * \left(\frac{1}{V_T} - \frac{1}{V_T^r}\right)} \text{ Eq.10}$$

Corrente em função de tensão:

$$I = I_{cc} - I_o * \left(e^{\frac{V}{m \cdot V_T}} - 1 \right) \text{ Eq.11}$$

Tensão Máxima:

$$e^{\frac{V_{max}}{m \cdot V_T}} = \frac{\frac{I_{cc} + 1}{I_o}}{1 + \frac{V_{max}}{m \cdot V_T}} \text{ Eq.12}$$

Corrente Máxima:

$$I_{max} = I_{cc} - I_o * \left(e^{\frac{V_{max}}{V_T}} - 1 \right) \text{ Eq.13}$$

Potência Máxima:

$$P_{max} = V_{max} * I_{max} \text{ Eq.14}$$

Porém os parâmetros obtidos para um sistema simplificado, deixam a desejar quando é necessária uma maior precisão nos resultados, o que é o caso de quando se define parâmetros para uma instalação de uma central fotovoltaica. Assim, para uma maior precisão nos resultados, é possível se obter a potência máxima que é apresentada na saída do MPPT, como é apresentado a seguir.

$$P_{max} = V_{max} * I_{max} = m * V_T * \ln \left[\frac{\frac{G}{G^r} * (I_{cc} - I_{max}^r)}{I_o^r * \left(\frac{T}{T^r} \right)^3 * e^{\frac{\varepsilon}{m^r * \left(\frac{1}{V_T^r} - \frac{1}{V_T} \right)}}} \right] * \left(\frac{G}{G^r} \right) * I_{max}^r \text{ Eq.15}$$

2.6.1.1 Seguidor de Potência Máxima (MPPT)

Segundo Rui Castro (2002), A potência máxima varia de acordo com as condições ambientais (temperatura e radiação) e com a tensão aos terminais do módulo, sendo naturalmente desejável o funcionamento, sempre, à máxima potência. De modo a colocar o módulo fotovoltaico no ponto de operação correspondente à potência máxima, os conversores fotovoltaicos são equipados com um sistema eletrônico, o seguidor de potência máxima. Estes dispositivos são especialmente indicados no caso de sistemas isolados, devido à tensão ser constante e imposta pela bateria, mas também são usados nas aplicações ligadas à rede. O MPPT consiste num conversor DC/DC que, de acordo com as condições ambientais de temperatura e radiação e com as condições impostas pela rede, ajusta a tensão de saída do módulo e faz com que o funcionamento atue no ponto correspondente à potência máxima. O fato de todos os conversores fotovoltaicos estarem equipados com este dispositivo reforça a necessidade de dispor de um método eficiente de cálculo da potência máxima (para as condições de temperatura e radiação existentes), pois é de interesse que os módulos funcionem sempre nesse ponto de operação. A literatura da especialidade reporta o valor de 95% como sendo o rendimento típico dos sistemas seguidores de potência máxima.

2.6.1.2 Inversor

Segundo João Tavares e Marco Antonio (2014), um inversor é um dispositivo eletrônico que fornece energia elétrica em corrente alternada (C.A.) a partir de uma fonte de energia elétrica em corrente contínua (C.C.). A energia C.C. pode ser proveniente, por exemplo, de baterias, células a combustível ou módulos fotovoltaicos. A tensão C.A. de saída deve ter amplitude, frequência e conteúdo harmônico adequados às cargas a serem alimentadas. Adicionalmente, no caso de sistemas conectados à rede elétrica a tensão de saída do inversor deve ser sincronizada com a tensão da rede.

Na grande maioria, os inversores têm potências individuais de 5kW para casos com saídas monofásica e acima disso, é utilizado saídas trifásicas ou, inversores monofásicos com associação trifásica.

O rendimento do inversor é dado por:

$$\eta_{inv} = \frac{P_{AC}}{V_{max} * I_{max}} \text{ Eq 16}$$

Os inversores podem ser classificados em comutados pela rede ou autocomutados.

Segundo João Tavares e Marco Antonio (2014), nos inversores autocomutados os elementos de chaveamento são semicondutores que podem ser postos em estado de condução ou de corte em qualquer instante do ciclo, através de um terminal de controle. Dependendo da velocidade de chaveamento e dos níveis de potência e tensão, são utilizados IGBTs ou MOSFETs nos inversores. Estes dispositivos operam com a estratégia de controle de modulação por largura de pulso (PWM), o que permite um bom controle sobre a forma de onda e o valor da tensão de saída. Os inversores autocomutados podem ser do tipo fonte de corrente (CSI – *current source inverter*) ou fonte de tensão (VSI – *voltage source inverter*). Na configuração fonte de tensão, a mais empregada em sistemas de conversão fotovoltaica, o controle pode ser feito tanto por tensão quanto por corrente, dependendo da grandeza de saída utilizada como referência. Devido à sua estabilidade diante de perturbações na rede e à facilidade no controle do fator de potência, o controle por corrente é adotado na maioria dos modelos para SFCRs, enquanto que o controle por tensão é utilizado principalmente em inversores para SFIs.

Ainda segundo João Tavares e Marco Antonio (2014), uma vez em condução, o dispositivo só é levado ao corte quando a corrente que flui através dele for inferior à chamada corrente de manutenção de condução, ou quando houver uma inversão de polaridade entre anodo e catodo. Como a troca do estado de condução para o estado de corte é controlada pelo circuito de potência, os inversores a tiristor são chamados inversores de comutação natural ou inversores comutados pela rede. Apesar de robustos e simples, sua baixa qualidade de tensão e corrente de saída

(devido à alta quantidade de harmônicos) requer o uso de redes de filtragem complexas, onerosas e que implicam em perdas. Com o surgimento de novos dispositivos de chaveamento (MOSFET, IGBT), a utilização de inversores a tiristor foi sendo reduzida e é hoje restrita a unidades de potência elevada (acima de 100 kW) e acionadores (*drivers*) de motores elétricos de grande porte.

2.7 Métodos de Engenharia Econômica Utilizados

A Engenharia Econômica apresenta formas de analisar por meio de previsões a rentabilidade ou viabilidade de um projeto, possibilitando uma análise primária do projeto apresentado. Com isto, é possível ao cliente determinar se é viável, ou não, realizar o projeto oferecido. Os métodos de payback e VPL são utilizados para apresentar em quanto tempo o cliente obterá o retorno financeiro de seu investimento, apresentando assim uma possibilidade de observar a viabilidade da proposta.

2.7.1 Payback

Segundo (ROSS, WESTERFIELD e JAFFE, 2002, p. 127), O critério do período payback, na tomada de decisões de investimento, é simples. Seleciona-se certo período de corte, digamos, de dois anos. Todos os projetos que tiverem períodos de payback de dois anos ou menos serão aceitos, e todos os que proporcionarem recuperação do investimento em mais de dois anos serão rejeitados.

O payback é o espaço de tempo entre o início do projeto e o momento em que o fluxo de caixa acumulado se torna positivo, ou seja, é o período de recuperação do investimento inicial.

2.7.2 Valor Presente Líquido (VPL)

É a diferença entre o valor investido e o valor resgatado ao fim do investimento, trazidos ao valor presente. Se VP for positivo, então o valor investido será

recuperado e haverá um ganho. Se VP for zero significa que aplicar ou não fará diferença. Agora se VP for negativo significa que o investidor estará resgatando um valor menor que o valor investido, então não se deve aplicar neste investimento.

Segundo Santos (2001, p. 156), quando o Valor Presente Líquido (VPL) é maior do que zero, significa que o investimento é vantajoso, pois existe lucro econômico, já que o valor presente das entradas de caixa é maior do que o valor presente das saídas de caixa. Também indica que a taxa interna de retorno do projeto é maior que a TMA da empresa. Se for igual a zero, o investimento está numa situação de indiferença, pois o valor presente das entradas de caixa é igual ao valor presente das saídas de caixa. E para um VPL menor que zero, conclui-se que o investimento não é economicamente atrativo, pois o valor presente das entradas de caixa sendo menor do que o valor presente das saídas de caixa significa a existência de prejuízo econômico.

3. Projeto de Geração Fotovoltaica Para uma Sistema Industrial

Mediante a atuação situação do sistema de geração de energia do Brasil, com constantes períodos na bandeira vermelha, onde o custo da energia é o mais elevado, tanto pessoas nos seus sistemas residenciais, que tem um custo mais baixo, quando sistemas industriais onde a energia, é grande parcela do seu custo, pelo elevado uso de energia. Como caso de estudo, será tomada como base uma empresa do sistema de colagens, que introduziu um sistema fotovoltaico para suprir as suas necessidades de diminuição de custos no que diz respeito a energia elétrica.

3.1 A Empresa

A M-Colagens é uma empresa fundada em 1997, por Marivaudo Medeiros de Araújo, o qual até hoje é responsável pelos negócios da empresa. A empresa fornece produtos e serviços para a fabricação de bonés, bolsas, calçados e chapéus. A principal atividade da empresa é referente a colagens industriais em tecidos, borrachas assim como todo tipo de material sintético do mercado. Localizada na cidade de Caicó, Rio Grande do Norte, atende a demandas ao redor de todo o país na sua área de atuação.

Figura 16: M-Colagens.



Fonte: Próprio autor.

A colagem, ou dublagem é um processo que apesar de pouco conhecido, é de vital importância para a produção de bolsas, estofamentos de carros, tênis e chapéus. O processo consiste na colagem de dois ou mais materiais, objetivando possibilitar desde sustentação e conforto, até o embelezamento dos produtos finais que utilizam os materiais.

O procedimento utilizado para realização das colagens na empresa é feito de duas maneiras, sendo elas dublagem a cola e a dublagem a filme.

A dublagem a cola, consiste na utilização de cola PVA à base de água como base de seu processo, que é feito utilizando um túnel de aquecimento para secagem no qual os materiais são inseridos.

A dublagem a filme, tem uma melhor qualidade e eficiência no processo de colagem, ele utiliza um filme termocolante, que funde os materiais em altas temperaturas.

3.1.1 Equipamentos

A empresa realiza todo o processo de recorte e colagem através de máquinas, que necessitam de uma grande demanda de energia diariamente, principalmente os equipamentos que realizam os processos de colagem, os quais, tem grande liberação de calor durante o processo, reduzindo a eficiência da máquina.

Em levantamento, foi constatado que na empresa existem:

4 Computadores;

3 Ares-condicionados;

1 Fogão;

1 Televisão;

5 Lâmpadas LED de 60W;

7 Lâmpadas industriais de 150W;

4 Ventiladores;

2 Maquinas de corte para TNT;

1 Portão Eletrônico;

2 Refletores;

1 Máquina de dublagem a cola;

1 Máquina de dublagem a filme (potência de 370W);

Figura 17:(a) Máquina de Dublagem a Filme; (b) Máquina de Dublagem a Cola



Fonte: Próprio Autor.

Na Figura 17 pode-se ver os principais consumidores de energia da empresa, a máquina de dublagem a filme a direita, e a esquerda, a máquina de dublagem a cola.

3.1.2 Consumo

O consumo de energia entre os meses de novembro de 2017 e agosto de 2018 fornecido pela concessionária pode ser observado na Tabela 1. Analisando este período, é possível notar um consumo médio de 3297,5 W, considerando que o preço do watt na COSERN, empresa distribuidora de energia do estado do Rio Grande do Norte, é de oitenta centavos o KWh, para aparelhos que trabalham em média oito horas por dia, a conta de energia média da empresa seria de R\$2.638,00.

Tabela 1: Consumo mensal em Watts.

Mês/Ano	Consumo(W)
Novembro/2017	3009
Dezembro/2017	2976
Janeiro/2018	3505
Fevereiro/2018	3126
Março/2018	3171
Abril/2018	3008
Maio/2018	3802
Junho/2018	2892
Julho/2018	3748
Agosto/2018	3738

Fonte: Próprio Autor

4. Projeto Fotovoltaico para a Empresa

O primeiro passo de análise do projeto fotovoltaico para a empresa, foi realizar o levantamento dos dados de irradiação solar da cidade de Caicó, e especificamente, da localidade da empresa, através da latitude e a longitude do local. Através do site da CRESESB, foram obtidos os dados da Figura 18, que possibilitam observar a quantidade de horas por dia no local em questão, de irradiação solar.

Figura 18: Irradiação do ano de 2018 em Caicó

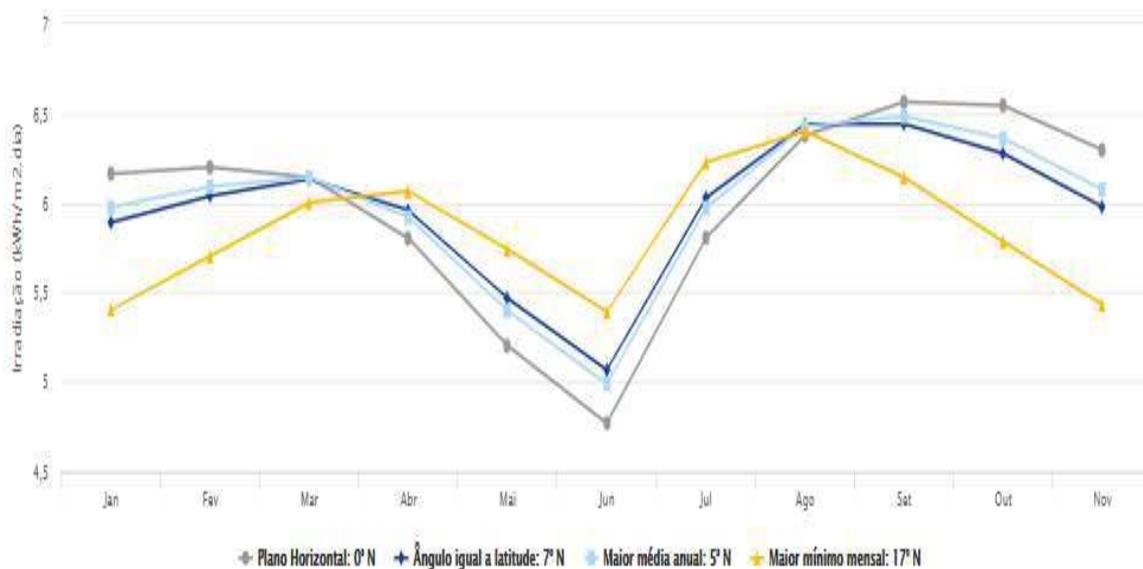
Cálculo no Plano Inclinado

Estação: Caico
Município: Caico, RN - BRASIL
Latitude: 6,501° S
Longitude: 37,049° O
Distância do ponto de ref. (6,501° S; 37,049° O) : 0 km

#	Ângulo	Inclinação	Irradiação solar diária média mensal [kWh/m ² .dia]													
			Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Média	Delta
✓	Plano Horizontal	0° N	6,16	6,20	6,14	5,80	5,20	4,77	5,05	5,81	6,38	6,56	6,65	6,30	5,91	1,79
✓	Ângulo igual a latitude	7° N	6,89	6,04	6,13	5,98	5,47	5,07	5,35	6,03	6,44	6,44	6,28	5,98	5,92	1,37
✓	Maior média anual	5° N	6,97	6,09	6,14	5,92	5,40	4,99	5,27	5,97	6,43	6,48	6,38	6,08	5,93	1,49
✓	Maior mínimo mensal	17° N	6,40	6,70	6,00	6,08	5,74	5,39	5,88	6,23	6,40	6,14	5,79	5,43	5,83	1,01

Irradiação Solar no Plano Inclinado -Caico-Caico, RN-BRASIL

6,501° S; 37,049° O



Fonte: CRESESB (2018).

Posteriormente, foi observado que na localidade onde as placas seriam instaladas, não era necessário a preocupação com o sombreamento, um dos fatores que poderiam complicar na execução do projeto.

Observando então a viabilidade da execução do projeto, o próximo passo consistiu em escolher os painéis a serem utilizadas na execução. Para escolha dos painéis, foi analisada a demanda de potência para suprir a empresa, assim como a área disponível para posicionamento dos painéis, já que o proprietário solicitou um sistema com folga para aproveitamento da folga em suas duas casas, que também estão no município de Caicó e para o caso de futuras expansões na empresa.

Foi verificado então a possibilidade de instalação de 76 painéis de 345 Watts no local, gerando um sistema que tem capacidade de produzir 26,22 kWp de energia. Considerando a capacidade do sistema, foi visto que o sistema tem uma média de geração de 5,16534kW, como pode ser visto na Tabela 2, considerando a irradiação solar média do ano de 2018, ano no qual, o sistema foi instalado, no mês de setembro.

Tabela 2: Dados do ano de 2018 do Sistema Fotovoltaico

Mês	kWh/m ² .dia	Potencia (kWp)	Produção Mensal (kW)
Janeiro	6,16	26,22	5,38384
Fevereiro	6,2	26,22	5,4188
Março	6,14	26,22	5,36636
Abril	5,8	26,22	5,0692
Maió	5,2	26,22	4,5448
Junho	4,77	26,22	4,16898
Julho	5,05	26,22	4,4137
Agosto	5,81	26,22	5,07794
Setembro	6,38	26,22	5,57612
Outubro	6,56	26,22	5,73344

Novembro	6,55	26,22	5,7247
Dezembro	6,3	26,22	5,5062
Média	5,91	26,22	5,16534

Fonte: Próprio Autor.

O painel escolhido está representado na Figura 19.

Figura 19: Figura Ilustrativa de um painel fotovoltaico

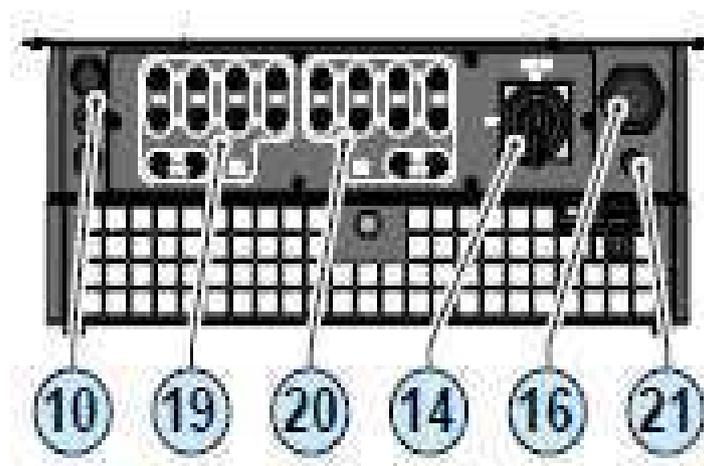


Fonte: canadian_solar-datasheet-maxpower-CS6U-M-v5.531P1na.

Após a escolha do tipo de painel a ser utilizado, foi escolhida a estrutura do sistema, que levou em conta a composição das placas na sua organização para formação dos strings que são conectados aos MPPTs do Inversor.

Considerando a equalização da potência dos painéis conectados a cada string, em cada MPPT presente no inversor, foi conectado dois strings com 19 painéis. O inversor em questão, possibilita a entrada de dois MPPTs, como podemos observar na Figura 20 nos pontos 19 e 20 são as duas entradas dos MPPTs presentes no inversor, que possibilitam a conexão de até 4 strings.

Figura 20: Figura Ilustrativas entradas dos MPPT do Inversor



Fonte: TRIO-20.0-27.6-TL-OUTD-Product manual EN-RevE(M000001EG).

O inversor escolhido, foi o TRIO-27.6-TL-OUTD-S2X da empresa a ABB, que está ilustrado na Figura 21.

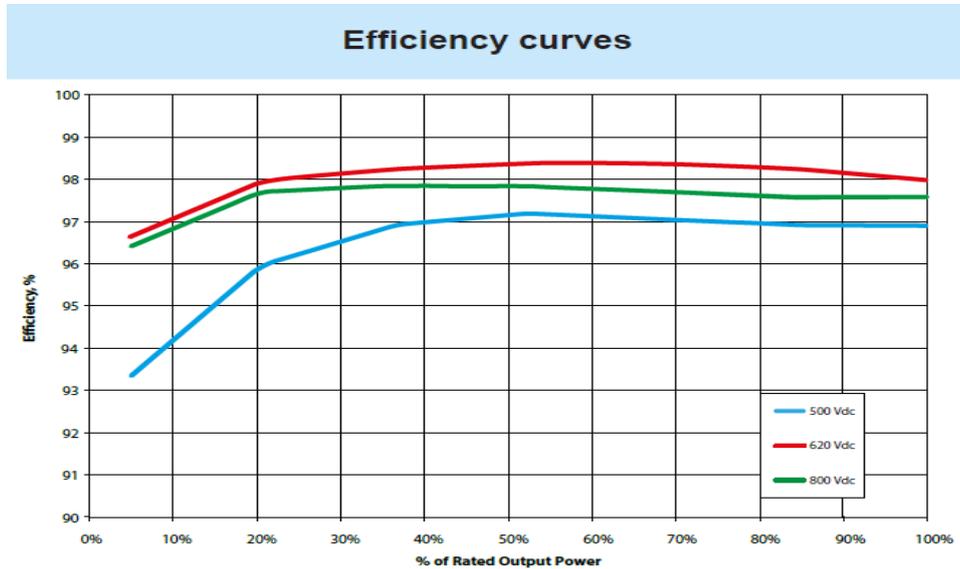
Figura 21: Figura Ilustrativa do Inversor.



Fonte: TRIO-27.6-TL-OUTD-Product manual EN-RevE(M000001EG).

Mediante a sua curva de eficiência, fornecida pelo datasheet da ABB presente na Figura 22, é possível identificar que seu rendimento está entre 93% e 99% mediante sua tensão de entrada. A eficiência considerada para projeto é de 98,5%.

Figura 22: Curva de Eficiência do Inversor



Fonte: TRIO-20.0-27.6-TL-OUTD-Product manual EN-RevE(M000001EG).

5. Viabilidade financeira do Projeto

Para análise da viabilidade financeira é interessante observar que foram oferecidas duas propostas ao contratante. A primeira proposta consistia em um pagamento dividido em trinta e seis parcelas de três mil reais mais uma entrada de vinte e dois mil reais, e a segunda proposta era um pagamento de duas vezes de trinta e cinco mil reais e uma entrada de trinta mil reais, possibilitando uma economia de trinta mil reais.

5.1 Payback simples

Para fazer o cálculo do Payback no caso do sistema fotovoltaico, será considerado o retorno mensal da conta de energia, que como foi apresentado era em média no valor de três mil reais, e passou a ser setenta e cinco reais e cinquenta e seis centavos, como é apresentado na figura 22, então mensalmente tem um retorno de dois mil novecentos e noventa e sete reais aproximadamente, o que anualmente dá trinta e cinco mil, novecentos e sessenta e quatro reais.

A partir do payback descontado apresentado na Tabela 3 é possível identificar que em cinco anos, tempo escolhido para ser o tempo aceitável para aceitabilidade do projeto pelo contratante, ambos os projetos apresentam retorno financeiro, sendo a proposta 1 com retorno de R\$ 44.820,00 e a proposta 2 com retorno de R\$79.820,00.

Figura 23: Conta de Energia pós Instalação do Sistema Fotovoltaico.

CLASSIFICAÇÃO			CONTA CONTRATO		MÊS(ES)					
02 COMERCIAL COMERCIAL			0851179500	11/2018						
Nº DA NOTA FISCAL			DATA DE VENCIMENTO		DATA PROXIMA PROXIMA FATURA					
014736640	UBICA	09/11/2018	19/11/2018	04/12/2018						
APRESENTAÇÃO			Nº DO CLIENTE		Nº DA INSTALAÇÃO					
09/11/2018	3000430672	116103	TOTAL A PAGAR (R\$) 75,58							
DESCRIÇÃO DA NOTA FISCAL										
DESCRIÇÃO DA NOTA FISCAL	QUANTIDADE	PREÇO (R\$)	VALOR (R\$)							
Consumo Ativo(kWh)	100,0000000	0,82080051	82,08							
Acréscimo Bandeira AMARELA			0,19							
Acréscimo Bandeira VERMELHA			5,43							
Contrib. Ilum. Pública Municipal			7,86							
<i>Sanchez</i>										
TOTAL DA FATURA						75,58				
DEMONSTRATIVO DE CONSUMO DESTA NOTA FISCAL										
Nº DO MEDIDOR	TIPO DA FUNÇÃO	ANTERIOR DATA	ANTERIOR LEITURA	ATUAL DATA	ATUAL LEITURA	Nº DE DIAS	CONSTANTE	AJUSTE	CONSUMO (KWH)	
2170157301	CAI	04-10-2018	2.063,00	05-11-2018	2.455,00	32	1,00000	-1.392,00	0,00	
2170157301	CRF	04-10-2018	112,00	05-11-2018	160,00	32	1,00000		63,20	
HISTÓRICO DE CONSUMO			INFORMAÇÕES DE TRIBUTOS							
MÊS(ES) kWh			BASE DE CÁLCULO	%	VALOR DO IMPOSTO	Faturado pelo número de fatur - Custo de Disponibilidade Artigo 96, Resolução ANEEL 414/2010				
NOV 18	100		ICMS	18,00	12,18					
OUT 18	100		PIS	0,81	0,54					
SET 18	286		COFINS	3,74	2,53					
AGO 18	3009									
JUL 18	2976									
JUN 18	3505									
MAI 18	3126									
ABR 18	3171									
MAR 18	3008									
FEV 18	3803									
JAN 18	2892									
DEZ 17	3748									
NOV 17	3736									
TARIFAS APLICADAS										
Consumo Ativo(kWh)						0,460810				
RESERVADO AO FISCO										
15CA C069 5377 6187 6901 E017 D264 2F18										

Fonte: Próprio autor

Tabela 3: Payback Descontado.

PAYBACK DESCONTADO			
	Proposta 1	Proposta 2	Retorno Anual
Ano	135000	100000	35964
1	99036	64036	
2	63072	28072	
3	27108	-7892	
4	-8856	-43856	
5	-44820	-79820	

Fonte: Próprio Autor.

5.2 Valor Presente Líquido (VPL)

Para conferência do valor presente líquido, método mais preciso do que o payback, foi avaliado que considerando um período de cinco anos e uma taxa de atratividade de dez por cento, e os métodos matemáticos apresentados no tópico 2.7.2, o VPL da proposta 1 seria de R\$1.331,86 e o VPL da proposta 2 seria de 36.331,86. Os resultados do VPL ano a ano até os cinco anos desejados, está representado na Tabela 4, já o resultado apresentando o VPL final comparando ambas as propostas constam na Tabela 5.

Tabela 4: VPL das propostas 1 e 2.

VPL	Proposta 1	Proposta 2	Retorno Anual	Taxa de Atratividade
Ano	135000,00	100000	35964	10%
0	135000,00	100000		
1	32694,55	32694,55		
2	29722,31	29722,31		
3	27020,29	27020,29		
4	24563,90	24563,90		
5	22330,81	22330,81		
VPL Proposta 1	1331,86			
VPL Proposta 2	36331,86			

Fonte: Próprio Autor.

Pela análise dos resultados obtidos pelo VPL, pode-se observar que a proposta 2 apresenta um retorno financeiro maior ao longo de 5 anos, possibilitando um retorno mais rápido do investimento aplicado pelo cliente.

6. Análise do Projeto Executado

Após a execução do projeto, foi possível verificar as respostas que ele apresenta nos últimos três meses, tempo referente ao período pós instalação do sistema fotovoltaico na empresa.

6.1 Instalação dos Painéis Fotovoltaicos

A instalação dos painéis fotovoltaicas utilizou o teto da empresa, para aproveitamento de espaço, assim como, da ausência de sombreamento no local. Na Figura 24 pode-se verificar a disposição dos painéis no espaço, e verificar também que existe espaço para uma possível expansão do sistema.

Figura 24 : Disposição dos Painéis.



Fonte: Próprio autor.

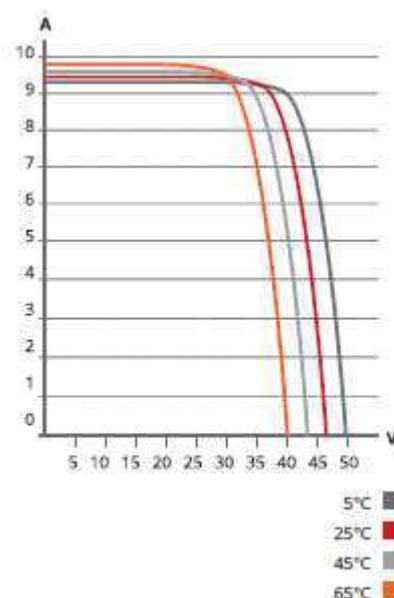
Apesar da instalação dos painéis não utilizar a inclinação com melhor desempenho para Caicó, que seria uma inclinação igual a latitude da localização,

8,501°, foi priorizado a utilização da estrutura já disposta, evitando assim um custo com construção civil no qual afetaria os valores do projeto.

6.2 Temperatura das placas

De acordo com a Figura 25, que é disponibilizada pela Canadian Solar no datasheet do modulo utilizado pelo projeto, pode-se verificar que mediante a temperatura do local onde o sistema for instalado, a potência gerada será diferente.

Figura 25: Curva Corrente x Tensão mediante temperatura.



Fonte: canadian_solar-datasheet-maxpower-CS6U-M-v5.531P1na.

Para um resultado mais próximo da realidade a partir das curvas fornecidas na figura 24, foi observado que o painel trabalha na curva cinza clara, ou seja, com uma temperatura inferior a 45° C , está conferencia foi realizada no período diário de maior indicação de temperatura, entre 11h e 13h do dia , está medição foi feita utilizando um termômetro digital infravermelho devidamente calibrado, o mesmo foi apontado a uma distância quarenta centímetros da placa, para que realizar as medições, que apresentaram resultados com temperaturas de aproximadamente 44° C ,como pode ser observado na Figura 26.

Figura 26: Medição de temperatura do módulo.



Fonte: Próprio Autor.

6.3 Consumo da rede Pós – Instalação

Como pode ser observado na Figura 27, o consumo de energia no mês de instalação foi de 256 W e nos meses posteriores, de outubro e novembro, um consumo fixo de 100 W.

Figura 27: Consumo da Rede Pós Instalação do Sistema Fotovoltaico

HISTÓRICO DE CONSUMO		INFORMAÇÕES DE TRIBUTOS		
Mês/Ano kWh		BASE DE CÁLCULO	%	VALOR DO IMPOSTO
NOV18	100			
OUT18	100			
SET18	286			
AGO18	300W			
		ICMS	18.00	12,18
		PIS	0.81	0,54
		COFINS	3.74	2,53

Faturado pelo número de faturação - Custo de Disponibilidade - Artigo 98, Resolução ANEEL 414/2010.

Fonte: Próprio Autor.

6.4 Produção x Consumo

Após três meses de utilização pode-se verificar que o sistema gerou 7452 W e que a empresa consumiu 3596 W no período entre o mês de outubro e o dia 15 de novembro, de acordo com o relógio bidirecional.

O resultado apresenta uma produção com sobra de energia, como desejado pelo consumidor, que tem pensamento de vender a energia sobressalente para obtenção de lucros, acreditando que futuramente o mercado será facilitado para este tipo de negociação.

7. Conclusão

Na conjuntura atual, a viabilidade de um sistema fotovoltaico tem resposta positiva tanto economicamente como no contexto da utilização de uma fonte de energia renovável.

No estudo realizado, conclui-se a partir dos métodos de Engenharia Econômica, que o projeto é viável. Apesar disto, a previsão futura é de que no Brasil, com o avanço das tecnologias utilizadas, os valores passem a ser cada vez mais acessíveis.

Através do estudo acima, foi possível compreender melhor a utilização de sistemas fotovoltaicos e suas configurações, assim como a observação de adequações de projeto mediante a necessidade e interesse do usuário que utilizará o sistema.

Como dificuldade para realização do estudo do caso, foi encontrado certa resistência das empresas para fornecer características do sistema assim como explicações sobre as características adotadas.

O estudo possibilitou uma experiência satisfatória devido ao fato de mostrar que novas formas de energia estão sendo desenvolvidas e aplicadas no mercado. Este fato mostra que o desenvolvimento da tecnologia aumenta e que o cenário energético sempre busca acompanhar para atender as necessidades da sociedade buscando novas, e menos agressivas ao meio ambiente, formas de gerar energia.

8. Bibliografia

Krauter. **O Módulo fotovoltaico**-Estudo das características elétricas dos módulos.

UFRJ <<http://www.solar.coppe.ufrj.br/practical.html>>. Acesso em 25 de setembro de 2018.

World Energy resources 2016. Disponível em:

<<https://www.worldenergy.org/data/resources/resource/solar/>>. Acesso em 27 de setembro de 2018.

Hilton A. Mello/Edmond Intrator. **Dispositivos semicondutores**. 4ª edição,1980.

Disponível em:

<<http://hamello.com/PDF/DispositivosSemicondutorescompletoRedSize.pdf>> . Acesso em 30 de setembro de 2018.

CRESESB. Radiação solar,2008. Disponível em:

<http://www.cresesb.cepel.br/index.php?section=com_content&lang=pt&cid=301>.

Acesso em 04 de Outubro de 2018.

COSERN. **Aneel define reajuste para tarifa de energia do Rio Grande do Norte**,2016.

Disponível em:

<<http://www.cosern.com.br/Noticias/Pages/Aneel-define-reajuste-para-tarifa-de-energia-do-Rio-Grande-do-Norte.aspx>>. Acesso em 07 de Outubro de 2018

CRESESB. **A difusão da energia solar fotovoltaica interligada à rede em municípios de pequeno e médio porte**,2018.

<<http://www.cresesb.cepel.br/index.php#data>>. Acesso em 10 de Novembro de 2018

EPE. Geração Energética do Brasil em 2016 , 2016. Disponível em: <http://epe.gov.br/pt>;
Acesso em 14 de Novembro de 2018.

Carneiro, Joaquim. **Módulos fotovoltaicos características e associações**, 2010.

Castro,Rui. **Introdução a energia fotovoltaica**,2002.

Pinho,João;Galdino,Marco. **Manual de engenharia para sistemas fotovoltaicos**,2014.

TIEPOLO, G. M.; PEREIRA, E. B.; URBANETZ JR, J.; PEREIRA, S. V.; GONCALVES, A. R.; LIMA, F. J. L.; COSTA, R. S., ALVES, A. R. "Atlas de Energia Solar do Estado do Paraná". 1a Edição. Curitiba: UTFPR, 2017.

Ross, Westerfield; Jaffe. **Administração financeira – Corporate Finance**, Porto Alegre: Mc Grall Hill,2002.

SANTOS, Edno Oliveira dos. **Administração financeira da pequena e média empresa**. São Paulo: Atlas, 2001.

