

CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA



Universidade Federal
de Campina Grande

GUSTAVO ERNESTO FERREIRA DOS SANTOS

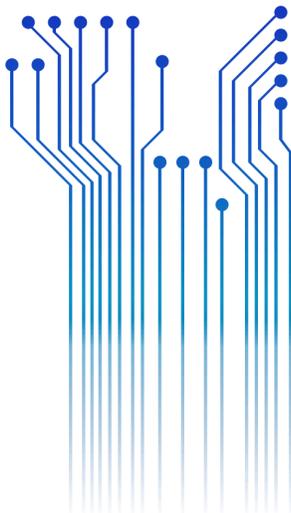


Centro de Engenharia
Elétrica e Informática

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO
PROJETO DE UMA CENTRAL DE CLIMATIZAÇÃO ALIMENTADA POR CÉLULAS
FOTOVOLTAICAS



Departamento de
Engenharia Elétrica



Campina Grande
2017

GUSTAVO ERNESTO FERREIRA DOS SANTOS

PROJETO DE UMA CENTRAL DE CLIMATIZAÇÃO ALIMENTADA POR CÉLULAS FOTOVOLTAICAS

*Trabalho de Conclusão de Curso submetido à
Coordenação 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 Energia

Orientador:

Professor Ubirajara Rocha Meira, M. Sc.

Campina Grande

2017

GUSTAVO ERNESTO FERREIRA DOS SANTOS

PROJETO DE UMA CENTRAL DE CLIMATIZAÇÃO ALIMENTADA POR CÉLULAS FOTOVOLTAICAS

*Trabalho de Conclusão de Curso submetido à
Coordenação 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: Processamento de Energia

Aprovado em / /

Professor Leimar de Oliveira

Universidade Federal de Campina Grande

Avaliador

Professor Ubirajara Rocha Meira, M. Sc.

Universidade Federal de Campina Grande

Orientador, UFCG

AGRADECIMENTOS

Primeiramente eu gostaria de agradecer a Deus, por ter me ajudado a nunca desistir, apesar de toda a pressão, dificuldades e notas baixas que enfrentei durante a graduação. Por ter me dado foco e empenho em momentos cruciais durante esta longa jornada.

Agradeço a minha família, principalmente ao meu irmão Diego e aos meus pais, Adalberto e Marluce, por todo incentivo e apoio nos momentos que precisava. Meus pais fizeram de tudo para me garantir uma boa educação e formar a pessoa que sou hoje. Se hoje estou me formando Engenheiro é graças a eles.

A todos professores, em especial Damásio Fernandes, Edson Guedes, Leimar Oliveira e Gutemberg de Assis, por todas as aulas, lições e por me ajudarem a me apaixonar novamente pela Engenharia Elétrica. Um agradecimento especial também aos funcionários do Departamento de Engenharia Elétrica da UFCG, em especial a Adail e Tchaikovsky, por todo apoio e por sempre fazerem tudo ao alcance para ajudar cada aluno.

Também faço um agradecimento especial Ubirajara Meira, pela orientação, apoio e tempo dedicado no desenvolvimento deste trabalho.

A todos os meus amigos, principalmente do GLEES, por todos os momentos que vão me fazer sentir falta da UFCG, pelas noites de estudo (ou não), por me ajudarem a lembrar da matéria quando precisava e depois esquecer tudo posteriormente no Parque do Povo.

Por fim a Fabio Xavier, por sempre me ajudar, mesmo sem saber. Por me manter focado, incentivado e são.

RESUMO

Um sistema de energia solar fotovoltaico gera energia elétrica utilizando o Efeito Fotovoltaico e convertendo luz em energia elétrica. Este sistema utiliza células fotovoltaicas fabricadas de material semicondutor adicionado de materiais dopantes e são a principal unidade no processo de conversão na geração com fonte solar. Com o avanço tecnológico e uma certa popularização na utilização da energia solar, já existem diversos projetos que utilizam dessa fonte tão abundante no nosso território nacional. Já existem diversos casos de sucesso em que as células são aplicadas para reduzir a conta de energia no final do mês ou até sana-la por completo. O presente trabalho procura então realizar o dimensionamento de um sistema de geração alternativo – tipo geração fotovoltaica, para o suprimento de energia elétrica a uma central de climatização – tipo Multi-Split, utilizando a tecnologia Inverter e com capacidade de atendimento até 08 (oito) trocadores de calor (fan coil unity).

Palavras-chave: Geração Solar, Central de Climatização, Células Fotovoltaicas, Efeito Fotovoltaico, Silício.

ABSTRACT

A photovoltaic solar system generate electricity using Photovoltaic Effect, converting light in electrical energy. These systems apply semiconductor cells added with dopant materials and are the main device used during this conversion. With technological advances in this area and a bigger acceptance of this energy source all around the world, it is possible to find many projects that already use Solar Power everywhere, including Brazil. It is possible to find many satisfactory projects that apply photovoltaic cells to reduce electrical bills at the end of the month, and this paper looks forward to develop an alternative photovoltaic system to supply energy to a central air-conditioning (using Multi-Split type and an Inverter technology) and its 08 (eight) fan coil units (FCU).

Keywords: Solar Power, Central Air-Conditioning, Photovoltaic Cells, Photovoltaic Effect, Silicon.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 -	Origem e Transformações Energéticas Originárias da Energia Solar....	17
Figura 2 -	Decomposição da Radiação Solar.....	18
Figura 3 -	Espalhamento dos Raios Solares em Diferentes Superfícies.....	19
Figura 4 -	Irradiação Solar x Latitude.....	20
Figura 5 -	Variação da Massa de Ar para Diferentes Posições do Sol.....	21
Figura 6 -	Imagem de Edmond Becquerel a Esquerda e a Experiência Realizada por Ele em 1839 a Direita.....	25
Figura 7 -	Satélite Explorer VI, uma das Primeiras Aplicações Espaciais de Painéis Fotovoltaicos.....	26
Figura 8 -	Parte da Tabela Periódica.....	27
Figura 9 -	Representação Bidimensional da Ligação Covalente da Rede Cristalina do Silício Puro.....	28
Figura 10 -	Esquema de Diagrama de Bandas de Energia de um Semicondutor Intrínseco com o Silício.....	29
Figura 11 -	Representação Esquemática da Substituição (Dopagem) de um Átomo de Silício por um Átomo de Boro.....	30
Figura 12 -	Circuito Equivalente da Célula Fotovoltaica.....	31
Figura 13 -	Curva I-V.....	32
Figura 14 -	Influência da Temperatura (à Esquerda) e da Intensidade Luminosa (à Direita) nas Curvas I-V.....	34
Figura 15 -	Efeito da Variação da Resistência Série (à Esquerda) e Efeito da Variação da Resistência Paralelo (à Direita).....	35
Figura 16 -	Partes Constituintes de um Módulo Fotovoltaico.....	36
Figura 17 -	Painéis Conectados em Série.....	38
Figura 18 -	Painéis Conectados em Paralelo.....	39
Figura 19 -	Configuração Básica de um Sistema Fotovoltaico.....	39
Figura 20 -	Diagrama de Sistema Fotovoltaico Isolado em Função da Carga.....	40

Figura 21 -	Esquema Básico de um SFCR.....	41
Figura 22 -	Símbolo Elétrico de um Inversor.....	42
Figura 23 -	Trajectoria do Sol.....	43
Figura 24 -	Processos de Produção do Si-gM.....	47
Figura 25 -	Sistema de Solidificação Direcional.....	49
Figura 26 -	Rotas e Processos de Produção de Silício.....	49
Figura 27 -	Célula de Silício Monocristalino.....	50
Figura 28 -	Célula de Silício Policristalino.....	51
Figura 29 -	Dados de Placa da Unidade Externa	53
Figura 30 -	Configuração do Sistema.....	62
Figura 31 -	Disposição Simplificada do Medidor Bidirecional.....	63
Figura 32 -	Medidor Bidirecional.....	63

Lista de Tabelas

Tabela 1 - Relação entre o teor de impurezas e número de noves do Si.....	41
Tabela 2 - Entrada Total (em kW) Utilizando 8 Unidades Internas em uma Central Externa.....	54
Tabela 3 - Dimensionamento do Consumo Médio Diário Baseado na Potência Nominal do Equipamento.....	50
Tabela 4 - Irradiação Solar Diária Média por Mês na Cidade de João Pessoa	53
Tabela 5 - Especificações do Pannel Solar Canadian CS6P 265P.....	54
Tabela 6 - Especificações dos Inversores Linha Sunny Tripower.....	56
Tabela 7 - Entrada Total (em kW) Utilizando 2 e 4 Unidades Internas em uma Central Externa.....	64

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

μm	Micrometro
A	Ampere
AC	Tensão Alternada
Ah	Amperes-hora
Al	Alumínio
AM	Massa de Ar
AMPM	Amplitude média
As	Arsênio
Au	Ouro
B	Boro
BTU	British Thermal Unit ou Unidade Térmica Britânica
C	Carbono
CdTe	Telureto de Cádmio
CGIS	Disseleneto de Cobre e Índio-Gálio
CIS	Disseleneto de Cobre e Índio
CO ₂	Dioxido de Carbomo
CRESESB	Centro de Referência para Energia Solar e Eólica
CZ	Método de Czocharalski
DC	Corrente continua
EPE	Empresa de Pesquisa Energetica
eV	Eletron volt
GaAs	Arseneto de Gálio
Ge	Germânio
HDIF	Irradiação Difusa Horizontal
HDIR	Irradiação Direta Normal
HHOR	Irradiação Global Horizontal
HSiCl ₃	Triclorosilano
In	Índio
m-Si	Monocristalino
NDU	Norma de Distribuição Unificada
Nm	Nanometro
NOCT	Nominated Operating Cell Temperature
NO _x	Oxidos de Nitrogênio
P	Fosforo
Ppm	Partes por milhão
p-Si	Policristalino
R _p	Resistência em paralelo

Rs	Resistência em série
Sb	Antimônio
Se	Selênio
SFCR	Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede
Si	Silício
SiC	Carboneto de Silício
SiCl ₄	Tetracloroeto de Silício
Si-gE	Silício Grau Eletrônico
Si-gM	Silício Grau Metalurgico
Si-gS	Silício Grau Solar
SiH ₄	Silano
SiO	Monóxido de Silício
SiO ₂	Dióxido de silício
SO ₂	Dioxido de Enxofre
STC	Standart Testing Conditions
Te	Telurio
UV	Radiações Ultravioleta
W/m ²	Watt por metro quadrado
Wh	Watt Hora
Wh/R\$	Relação de unidade de custo
Wp	Watt pico
ZF	Método de Fusão Zonal Flutuante

SUMÁRIO

1	Introdução.....	15
1.1	Objetivos do Trabalho.....	15
1.2	Estrutura do Trabalho.....	16
2	Energia Solar.....	17
2.1	Radiação Solar.....	18
2.1.1	Distribuição da Radiação Solar na Superfície Terrestre.....	19
2.2	Arquitetura Solar.....	22
2.2.1	Arquitetura Solar Passiva.....	23
2.2.2	Arquitetura Solar Ativa.....	23
Capítulo 3	– Energia Solar Fotovoltaica e Células Fotovoltaicas.....	25
3.1	Células Fotovoltaicas.....	25
3.2	Princípio de Funcionamento das Células Fotovoltaicas.....	27
3.2.1	Processo de Dopagem.....	29
3.3	Características Elétricas.....	30
3.4	Fatores que Afetam o Rendimento.....	33
3.4.1	Temperatura e Intensidade Luminosa.....	33
3.4.2	Reflexão.....	34
3.4.3	Resistências.....	34
3.5	Módulos Fotovoltaicos.....	35
3.5.1	Medidas de Desempenho de Elementos Fotovoltaicos.....	36
3.5.2	Associação de Módulos Fotovoltaicos.....	37
3.5.2.1	Associação em Série.....	37
3.5.2.2	Associação em Paralelo.....	38
3.5.3	Classificações dos Sistemas Fotovoltaicos.....	39
3.5.3.1	Sistemas Isolados.....	40
3.5.3.2	Sistemas Conectados à rede.....	41
3.5.3.3	Sistemas Híbridos.....	41

3.5.4 Inversores.....	41
3.5.5 Localização do Sistema.....	42
Capítulo 4 – Tecnologias e Materiais.....	44
4.1 O Silício (Si).....	44
4.2 Silício Metalúrgico.....	45
4.3 Silício Ultrapuro (Polisilício).....	47
4.4 Métodos de Obtenção do Silício para Aplicações fotovoltaicas.....	48
4.5 Tecnologia das Células Fotovoltaicas – Silício Cristalino.....	49
4.5.1 Silício Monocristalino.....	50
4.5.2 Silício Policristalino.....	50
Capítulo 5 – Projeto de Geração Solar para alimentar uma Central de Climatização...	52
5.1 Projeto Principal.....	52
5.1.1 Cálculo do Consumo Diário.....	53
5.1.2 Dimensionamento das Baterias.....	55
5.1.3 Avaliação do Recurso Solar.....	55
5.1.4 Dimensionamento do Inversor.....	58
5.1.5 Dimensionamento das Proteções.....	61
5.1.6 Configuração do sistema.....	61
5.2 Sistema Fotovoltaico Interligado a Rede.....	62
5.3 Projeto Reduzido de Central de Ar Condicionado.....	64
Capítulo 6 – Conclusões.....	65
Referências Bibliográficas.....	67
Anexo A – Orçamento do Projeto de Geração Solar.....	71

1 Introdução

1.1 Objetivos do Trabalho

Um sistema de energia solar fotovoltaico, também conhecido como sistema de energia solar ou sistema fotovoltaico, é um sistema capaz de gerar energia elétrica, utilizando o Efeito Fotovoltaico, convertendo diretamente luz em energia elétrica, gerando potencial elétrico utilizando células fotovoltaicas. Estas são fabricadas de material semicondutor adicionado de materiais dopantes e são a principal unidade no processo de conversão na geração com fonte solar.

Sabe-se que no cenário atual existe uma grande preocupação com o impacto ambiental e econômico associado a toda geração de energia elétrica, seja baseado em fontes renováveis ou não. Além disso, é necessário levar em consideração a elevação da demanda energética devido ao aumento da população e o desenvolvimento tecnológico e industrial. Baseado nisso, não se busca mais apenas fontes de energia que sejam sustentáveis e consideradas limpas, mas também a possibilidade de aplicações dessa tecnologia em larga escala nas casas, de forma que seja viável economicamente e que possua uma eficiência considerável.

Com o avanço tecnológico e uma certa popularização na utilização da energia solar, já existem diversos projetos que utilizam dessa fonte tão abundante no nosso território nacional. Já existem diversos casos de sucesso em que as células são aplicadas para reduzir a conta de energia no final do mês ou até sana-la por completo.

Com isto em mente, o presente trabalho procura então realizar o dimensionamento de um sistema de geração alternativo – tipo geração fotovoltaica, para o suprimento de energia elétrica a uma central de climatização – tipo Multi-Split, utilizando a tecnologia Inverter e com capacidade de atendimento até 08 (oito) trocadores de calor (fancoil).

Para o dimensionamento do sistema de geração alternativo será observado os rendimentos das unidades fotovoltaicas a serem utilizadas com os seus respectivos parâmetros de influência.

1.2 Estrutura do Trabalho

O Capítulo 1 introduz o trabalho, contextualizando e destacando as motivações de sua realização, objetivos em seu desenvolvimento e estrutura aplicada em toda sua extensão.

No Capítulo 2 inicia-se uma revisão bibliográfica, introduzindo todo o conceito de radiação solar e a distribuição desta sobre a superfície terrestre. Também apresenta-se conceitos de arquitetura solar passiva e ativa, de forma a apresentar como a energia solar será aproveitada de diversas formas neste projeto.

Já no Capítulo 3 aborda-se de uma forma geral as células fotovoltaicas, seus princípios de funcionamento, suas características e os fatores que afetam sua eficiência na geração de energia elétrica. Também será abordado a tecnologia dos módulos fotovoltaicos como um todo, suas medidas de desempenho, suas possíveis associações e como se classificam os sistemas que utilizam o sol como fonte de energia.

Em seguida, no Capítulo 4, apresenta-se algumas informações sobre os materiais e processos de fabricação das células fotovoltaicas. Será abordado todo o tratamento do Silício, matéria prima do material semicondutor presente nesta tecnologia, desde sua extração até o produto final, em forma de Silício mono e policristalino, pronto para o desenvolvimento dos módulos fotovoltaicos.

No Capítulo 5 será apresentado todo o desenvolvimento do projeto fotovoltaico para a alimentação da unidade de climatização. Descreveu-se todas as etapas do processo como a avaliação do recurso solar na região da cidade de João Pessoa, cidade em que será aplicado o sistema, todo o dimensionamento dos geradores fotovoltaicos, baterias necessárias para alimentação nos períodos sem sol, do inversor utilizado e todas as proteções necessárias, assim como o esquema de ligação entre os painéis fotovoltaicos e o inversor. Neste capítulo

ainda são sugeridas modificações no projeto inicial para que este seja o mais viável economicamente possível, de forma a ter uma aplicação real e mais abrangente.

Por último, no Capítulo 6 encontra-se algumas conclusões obtidas durante o desenvolvimento deste trabalho como um todo, incluindo também possíveis aprimoramentos durante a execução final do projeto.

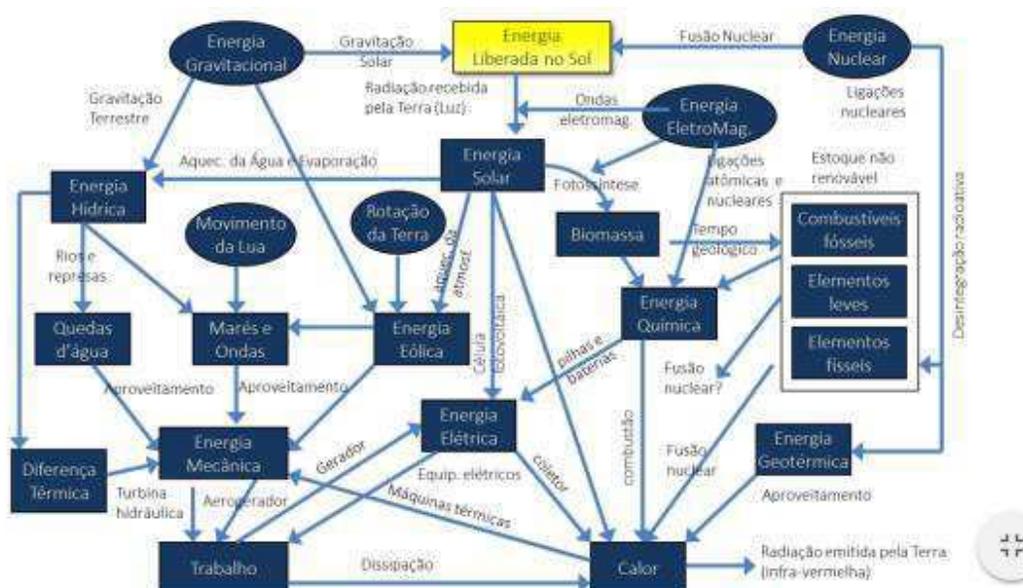
2 Energia Solar

O sol é uma estrela composta de mistura de gases localizada no centro do Sistema Solar, ocorrendo no seu interior o processo de fusão nuclear, convertendo hidrogênio em hélio. Nessa transformação, para um elemento de massa menor, ocorre a liberação de energia, fenômeno esse estudado por Einstein, ficando conhecido pela Equação 1:

$$\Delta E = \Delta m \times c^2 \quad (1)$$

A energia liberada do sol é a principal responsável pela origem de todas as fontes energéticas primárias na Terra, fornecendo a energia necessária para os sistemas e ciclos globais. A radiação solar é responsável também pela evaporação das águas, indução dos movimentos dos ventos, desenvolvimento de toda a matéria orgânica e a criação dos combustíveis fósseis. Esta interação entre a energia solar e as fontes energéticas primárias é ilustrada na Figura 1 abaixo.

Figura 1 – Origem e Transformações Energéticas Originárias da Energia Solar.



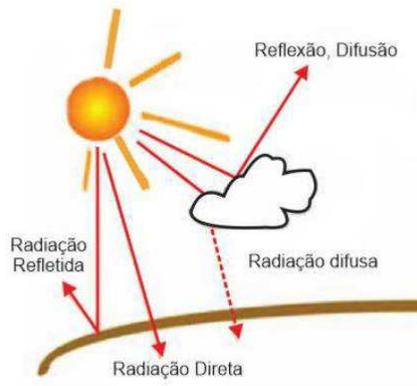
Fonte: EPE, 2016.

2.2 Radiação Solar

A energia proveniente do Sol é renovável e praticamente inesgotável, podendo ser aproveitada pela sociedade para suprir as suas necessidades energéticas. De acordo com IEA (2014), de toda energia solar que chega a Terra, aproximadamente metade atinge a superfície, totalizando 885 milhões de TWh/ano, o que seria mais de 8.000 vezes o consumo final total da energia mundial em 2013 (IEA, 2015). O potencial dessa energia é gigantesco, podendo ser aproveitados de forma direta ou indireta, seja por sistemas de captação ou em conversão em outros tipos de energia.

A radiação solar total que atinge a Terra pode ser decomposto em dois planos: um horizontal e outro inclinado. A de maior interesse para a geração fotovoltaica é a Irradiação Global Horizontal (HHOR), que é a radiação recebida pela superfície plana horizontal. A HHOR é composta por duas parcelas: a Irradiação Difusa Horizontal (HDIF), que é a parcela dispersa e atenuada na atmosfera por reflexões em geral; e a Irradiação Direta Normal (HDIR), parcela que atinge o solo diretamente sem reflexões (EPE, 2016), ilustrada na Figura 2.

Figura 2 – Decomposição da Radiação Solar.



Fonte: *Portal Solar*, 2004.

De acordo com GHENSEV (2006), um percentual de 47 % da energia incidente a superfície terrestre ($642,5 \text{ W/m}^2$) é armazenada na forma de calor, sendo 38% - ($519,5 \text{ W/m}^2$) absorvida pelos oceanos e 9% - ($519,5 \text{ W/m}^2$) pelos continentes, mantendo os processos naturais e a vida na Terra.

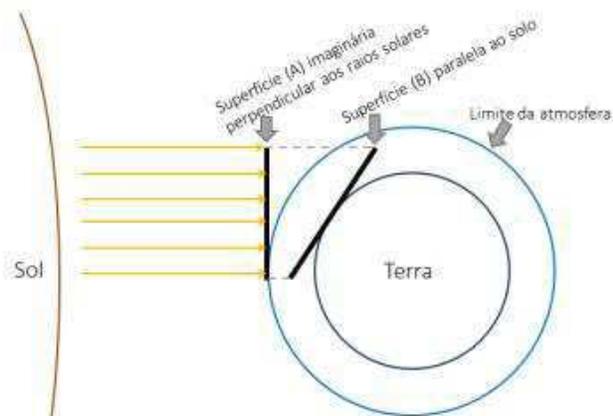
2.1.1 Distribuição da radiação solar na superfície terrestre

A radiação solar que alcança à terra, não é constante, sendo influenciada pelas condições geográficas do local e dos movimentos de rotação e translação, somando-se ainda os fenômenos climáticos. Pode-se apenas então criar uma certa previsão deste recurso.

Ao realizar o movimento de translação, a Terra determina um plano conhecido como plano da eclíptica. Enquanto isso, o movimento de rotação é realizado em torno de um eixo que possui inclinação de $23,45^\circ$ em relação à perpendicular do plano da eclíptica, ocasionando a mudança das estações ao longo do ano.

Pode-se afirmar que os raios solares atingem a Terra de forma paralela e, em uma superfície imaginária perpendicular aos raios e localizado na borda da atmosfera, com intensidade praticamente constante. Contudo, nem toda superfície a superfície terrestre é perpendicular aos raios solares, reduzindo a insolação neste plano por um fenômeno conhecido como efeito cosseno (STINE; GEYER, 2001), conforme mostra a Figura 3.

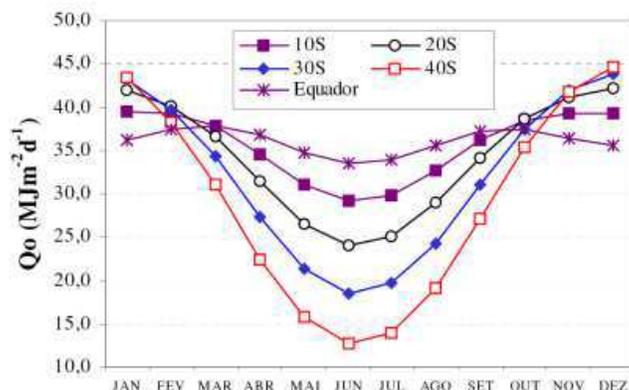
Figura 3 – Espalhamento dos Raios Solares em Diferentes Superfícies.



Fonte: *EPE, 2016.*

Logo se conclui que a irradiância solar varia com a posição terrestre e o ângulo de incidência dos raios solares, onde regiões localizadas mais próximas a linha do equador apresentam uma redução na variação da irradiação ao longo do ano. Já em regiões de grandes latitudes observa-se maiores variações de irradiação durante o ano e uma energia anual total menor, conforme observado no gráfico na Figura 4.

Figura 4 – Irradiação Solar x Latitude



Fonte: *EPE, 2016.*

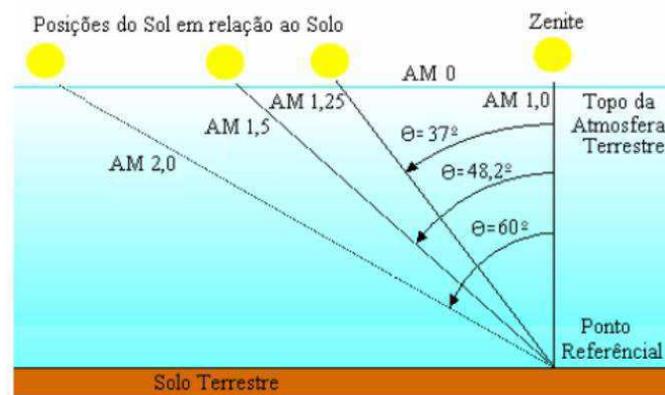
Baseando-se nessas condições de incidência, pode-se descobrir as perdas que a energia solar sofre ao atingir o solo. A espessura da atmosfera é definida pelo coeficiente

Massa de Ar (AM), conhecido como o caminho percorrido pela irradiação solar até atingir o plano estudado na Terra. Define-se AM pela seguinte equação:

$$AM = \frac{1}{\cos \theta_x} \quad (2)$$

Onde θ_x é o ângulo zenital do sol, ou seja, a distância angular entre o feixe de radiação solar e o plano vertical de incidência, variando entre $0^\circ \leq \theta_x \leq 70^\circ$. Pode-se observar na Figura 5 as variações da massa de ar atravessada pela radiação solar diante do posicionamento do sol.

Figura 5 - Variação da Massa de Ar para Diferentes Posições do Sol.



Fonte: Ghensev, 2006.

Pode-se concluir a partir da figura acima que:

- AM1: Quando $\theta_x = 0^\circ$ o sol está posicionado no zênite e a massa de ar equivale a 1;
- AM 1,5: Quando $\theta_x = 48^\circ$ e a massa de ar equivale a 1,5;
- AM 2: Quando $\theta_x = 60^\circ$ e a massa de ar equivale a 2;
- AM 1,5: Quando $\theta_x = 48^\circ$ e a massa de ar equivale a 1,5;
- AM 0: Como a massa atmosférica no topo da atmosfera.

Pode-se citar ainda outros ângulos que se relacionam geometricamente com os raios solares. Temos:

- Elevação Solar (α): É o ângulo que se forma entre os raios incidentes de Sol e a projeção destes sobre o plano horizontal. Sabemos ainda que estes são complementares ao ângulo zenital, ou seja, $\alpha + \theta_z = 90^\circ$;
- Ângulo Azimutal (γ): É o ângulo que se forma entre a projeção normal ao plano na horizontal e o meridiano local;
- Inclinação da superfície de captação (β): É o ângulo que se forma entre o plano da superfície tratada e o plano horizontal (entre 0° e 90°);
- Ângulo de incidência (θ): É o ângulo que se forma entre o feixe de radiação direta e a normal à superfície de captação;
- Ângulo horário (ω): É o deslocamento angular do feixe solar a partir do meridiano local ocorrido devido ao movimento de rotação da Terra;
- Altura solar: É o ângulo formado entre a radiação direta e o plano horizontal;
- Declinação (δ): É o ângulo formado entre o Sol ao meio dia e o plano do Equador;
- Latitude (ϕ): É a distância angular entre a linha do equador e o ponto de interesse. Esse valor é medido sobre a superfície da Terra.

Percebe-se então que a radiação proveniente do Sol depende diretamente das condições e características da atmosfera, como umidade relativa do ar e nebulosidade, da latitude do local e da posição no tempo. Dessa forma, os ângulos de inclinação dos painéis solares, um dos focos deste trabalho, devem ser ajustados para o aproveitamento ótimo da radiação solar, tendo em vista que apenas uma parte mínima dessa radiação emitida atinge a superfície da Terra.

Pode-se salientar ainda, que a luz produzida pela fusão nuclear no Sol, assim como toda a luz, apresenta a dualidade onda-partícula (também conhecida como dualidade onda-corpúsculo ou dualidade matéria-energia), que consiste na capacidade de comportarem-se ou terem propriedades tanto de partículas quanto de ondas. Baseado nisso, considera-se que a radiação solar é constituída por fótons, ou pacotes de energia, cuja a energia (expressa por

elétron-volts) pode ser associada a frequência ou com o comprimento de onda da radiação. Isso implica que quanto menor o comprimento de onda, maior será a frequência e a energia.

Tem-se que a amplitude da energia dos fótons varia de 2,48 eV até 12,4 eV. Sabe-se também que as células fabricadas com o elemento químico Silício (Si), absorvem fótons com energia maior ou igual a 1,127 eV, o que corresponde a uma onda de comprimento até 1,1 μm . Ainda, segundo GHENSEV (2006), fótons que possuem comprimento de onda superior a este valor não são capazes de gerar energia elétrica pelas células fotovoltaicas e ainda aquecem as células.

2.2 Arquitetura Solar

Como já foi citado anteriormente, o Sol é responsável pela origem de todas as outras fontes de energia da Terra. Baseado nisso, um dos principais estudos da energia proveniente da luz do Sol é conhecido como arquitetura solar, que tem como interesse o aproveitamento de técnicas solares de forma passiva e ativa.

2.2.1 Arquitetura Solar Passiva

Tem-se que o estudo da arquitetura solar passiva é focado na captação, armazenamento e utilização da energia solar, seja através de ganho direto ou indireto. Segundo SANTOS (2014), este estudo ainda trata do controle do ganho solar através da ventilação natural e sistemas de sombreamento, levando em conta a localização e o clima do local estudado.

As diversas aplicações dessa área de estudo podem trazer diversos benefícios aos projetos arquitetônicos, procurando reduzir ao mínimo os aspectos de consumo de energia naquela obra realizada. Projetos que envolvem esse tipo de aplicação não costumam ter despesas acrescidas, pois estas técnicas estão ligadas a construção dos projetos arquitetônicos e não na utilização de dispositivos eletrônicos.

Os fatores que são considerados em projetos que envolvem arquitetura solar passiva procuram proporcionar conforto térmico e visual aos seus inquilinos. Alguns elementos considerados são iluminação natural, água, vegetação, vento, umidade, inércia térmica,

temperatura, massa térmica, isolamento, proteção solar, efeito estufa, localização forma e orientação dos projetos.

Como o projeto desenvolvido será aplicado numa residência já existente, muitos desses aspectos já foram utilizados durante a construção e não serão amplamente discutidos neste trabalho.

2.2.2 Arquitetura Solar Ativa

Já a arquitetura solar ativa lida com a produção da energia térmica e elétrica através da utilização de painéis fotovoltaicos ou outros dispositivos de transformação de energia solar (SANTOS, 2014).

Um das principais utilizações é a energia solar térmica, que se relaciona com o aquecimento de líquidos ou gases, procurando absorver os raios solares com o intuito de aquecer estes materiais. A principal utilização desde tecnologia dá-se pelo aquecimento de água para uso geral em chuveiros, aquecimento de gases na secagem de grãos e no uso de turbinas (FIGUEIREDO et al, 2016).

Outra utilização, e a que será utilizada nesse trabalho, é a energia solar elétrica ou fotovoltaica. Esta é uma tecnologia que possibilita a geração de uma corrente elétrica (nível DC) a partir de semicondutores quando iluminados por fótons. Enquanto as células solares permanecem iluminadas, ocorre geração de eletricidade. Esta geração é interrompida quando as células deixam de ser iluminadas.

Os projetos que envolvem arquitetura ativa ainda possuem um custo inicial e um período de retorno elevado, o que dificulta sua implementação (principalmente em países que não detém a tecnologia, como o Brasil). Contudo, espera-se que com o avanço das pesquisas na área e através de incentivos governamentais, os valores da produção das células fotovoltaicas e da geração do kW/hora sejam reduzidos.

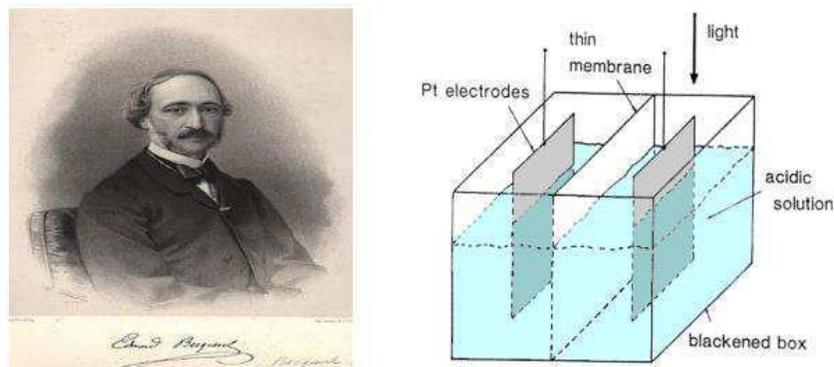
3 Energia Solar Fotovoltaica e Células Fotovoltaicas

3.1 Células Fotovoltaicas

Células Fotovoltaicas (também conhecida como Células Solares), segundo o Portal Solar (2017), é um dispositivo elétrico que possui a característica de converter a energia da luz do Sol diretamente em energia elétrica através do efeito fotovoltaico, que será abordado futuramente.

O efeito fotovoltaico foi descoberto em 1839, pelo físico francês Alexandre-Edmond Becquerel, ao observar que placas metálicas (de platina ou prata) submersas em uma determinada solução ácida gerava uma corrente elétrica ao ser exposta à luz. Com base nesse estudo, foi também observado alguns anos depois por W. G. Adams e R. E. Day o mesmo efeito no estado sólido do Selênio (Se) quando recoberto por uma fina camada de ouro (Au) e, assim, foram desenvolvidas as primeiras células fotovoltaicas por C. E. Frits em 1883.

Figura 6 – Imagem de Edmond Becquerel a Esquerda e a Experiência Realizada por Ele em 1839 a Direita.



Fonte: *Mendonça, 2016.*

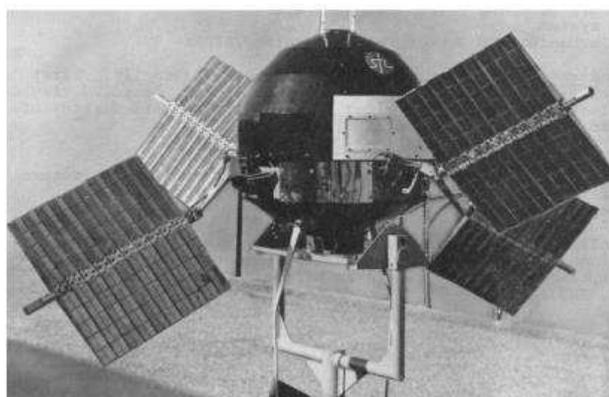
Os estudos nessa área continuaram se desenvolvendo, até que em 1954, com o avanço no estudo dos semicondutores, surgiram as primeiras células fotovoltaicas produzidas nos

Estados Unidos, com Silício cristalino. Apesar de sua baixíssima eficiência (6% para uma área de 2 cm²).

Apenas em 1958, com a utilização de células fotovoltaicas – como fonte de energia para suprimento dos sistemas de comunicação dos satélites, no programa espacial americano, é que se experimentou um avanço significativo no desenvolvimento das células solares. Mas, ainda assim permaneceu muito caro para se produzir energia com essa tecnologia. Tal condição só veio mudar em meados da década de 70, quando a crise do petróleo elevou os custos de produção baseada em outras fontes energéticas, tornando a energia solar mais atrativa e competitiva.

Como a solidificação da tecnologia, novas alternativas de geração com células fotovoltaicas começaram a surgir, como o Arseneto de Gálio (GaAs), Disseleneto de Cobre e Índio (CIS e CGIS), Silício amorfo e Telureto de Cádmiio (CdTe). Contudo, as tecnologias que utilizam do Silício como base ainda dominam o mercado, seja o Silício monocristalino ou policristalino. Mais detalhes sobre o uso destes compostos na geração fotovoltaica será abordado mais adiante.

Figura 7 – Satélite Explorer VI, uma das Primeiras Aplicações Espaciais de Painéis Fotovoltaicos.



Fonte: *Mendonça, 2016.*

3.2 Princípio de funcionamento das células fotovoltaicas

Conforme colocado anteriormente, o princípio de funcionamento das células e a conversão de luz solar para corrente elétrica ocorre devido ao efeito fotovoltaico, no qual ocorre através da transferência de energia dos fótons da luz solar incidente para os elétrons na estrutura atômica do material semiconductor.

Os elementos semicondutores são aqueles que estão localizados entre os grupos 13 e 16 da tabela periódica (anteriormente conhecidos como IIIA a VIA), cujos principais semicondutores são: Arsênio (As), Boro (B), Carbono (C), Germânio (Ge), Fósforo (P), Silício (Si), Selênio (Se) e Telúrio (Te), os quais possuem três, quatro ou seis elétrons na camada de valência. Além destes elementos, tem-se ainda compostos semicondutores conhecidos como binários – exemplo, telureto de cádmio, CdTe, ternário – exemplo, disseleneto de cobre-índio, CIS e quaternário – exemplo, fosfeto arseneto de gálio-índio, InGaAsP.

Figura 8 – Parte da Tabela Periódica

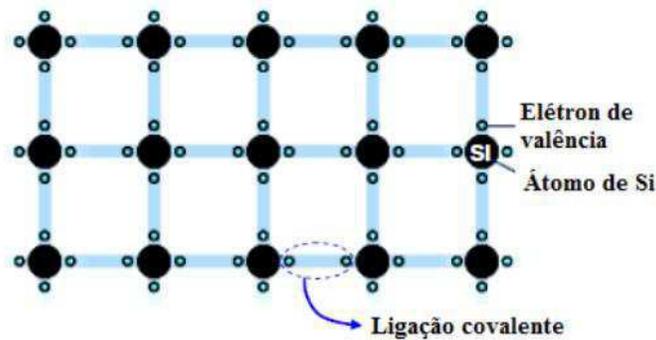
	10	11	12	IIIA 13	IVA 14	VA 15	VIA 16	VIIA 17	VIIIA 18
									2 He Hélio 4,002602
				5 B Boro 10,811	6 C Carbono 12,011	7 N Nitrogênio 14,007	8 O Oxigênio 15,999	9 F Flúor 18,9984	10 Ne Neônio 20,1797
				13 Al Alumínio 26,9815	14 Si Silício 28,085	15 P Fósforo 30,9737	16 S Enxofre 32,06	17 Cl Cloro 35,45	18 Ar Argônio 39,948
	29 Cu Cobre 63,546	30 Zn Zinco 65,38	31 Ga Gálio 69,723	32 Ge Germânio 72,63	33 As Arsênio 74,9215	34 Se Selênio 78,971	35 Br Bromo 79,904	36 Kr Cripton 83,798	
	47 Ag Prata 107,8682	48 Cd Cádmio 112,414	49 In Índio 114,818	50 Sn Estanho 118,710	51 Sb Antimônio 121,760	52 Te Telúrio 127,60	53 I Iodo 126,904	54 Xe Xenônio 131,293	
	79 Au Ouro 196,966	80 Hg Mercúrio 200,59	81 Tl Tálio 204,38	82 Pb Chumbo 207,2	83 Bi Bismuto 208,980	84 Po Polônio (209)	85 At Astato (210)	86 Rn Radônio (222)	
	111 Rg Roentgênio (260)	112 Cn Copernício (285)	113 Uut Ununtrio (284)	114 Fl Fleróvio (289)	115 Uup Ununpêntio (288)	116 Lv Livermório (293)	117 Uus Ununseptio (294)	118 Uuo Ununoctio (294)	

Fonte: *Ptable.com*

Apesar da vasta gama de possibilidades de semicondutores conhecidos, o mais utilizado na fabricação das células fotovoltaicas continua sendo o Silício, que embora exista apenas associado a areia de sílica, e não no formato de um elemento químico isolado, possui uma disponibilidade elevada.

O átomo Silício, por pertencer ao grupo 14 da tabela periódica, possui quatro elétrons na camada mais externa ou banda de valência. Logo, em cristal de Si, existe a formação de quatro ligações covalentes com quatro átomos vizinhos, tornando o átomo estável com oito elétrons em sua última camada, conforme ilustra a Figura 9.

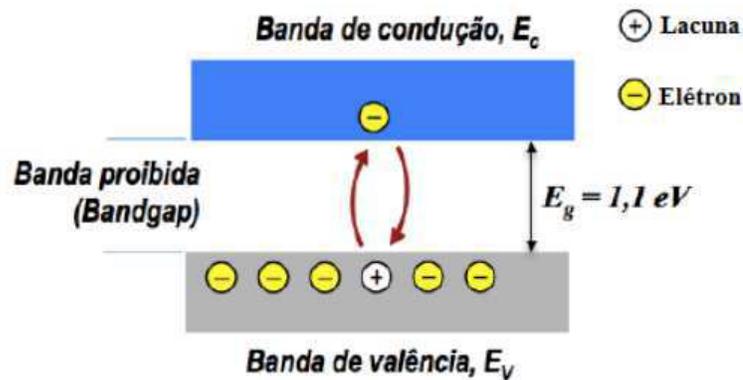
Figura 9 – Representação Bidimensional da Ligação Covalente da Rede Cristalina do Silício Puro.



Fonte: *Mendonça, 2016.*

Quando um cristal de silício é submetido a uma temperatura de aproximadamente 20°C, a energia térmica fornecida ao elétron é capaz de excita-lo, permitindo com que este elétron passe da banda de valência para a banda de condução, deixando para trás uma lacuna na banda de valência, que se comporta como uma carga positiva. Contudo, estamos lidando com um cristal de Silício puro, ou seja, não existem outros elétrons para preencher a lacuna na banda de valência e nem uma diferença de potencial. Isso permite com que o elétron que foi levado a banda de condução se reconecte imediatamente com a lacuna, sem permitir a origem de corrente elétrica, mostrado na Figura 10 a seguir.

Figura 10 – Esquema de Diagrama de Bandas de Energia de um Semicondutor Intrínseco com o Silício.



Fonte: Mendonça, 2016.

Então, para que haja a potencialização da condução nestes materiais semicondutores se faz necessária a existência de um campo elétrico, separando os portadores através de uma junção. Para constituir esta junção, são adicionadas impurezas, ou elementos dopantes, no semicondutor de forma a mudar as propriedades elétricas do material. Essa ação é chamada de dopagem.

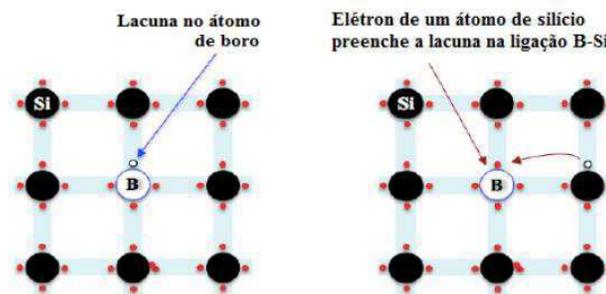
3.2.1 Processo de dopagem

Elementos químicos que possuem a característica de doar elétrons são chamados de impurezas ou dopantes do tipo *n*. Os elementos comumente utilizados são Fósforo (P), Arsênio (Ar) e Antimônio (Sb). Já quando são adicionados elementos aceitadores de elétrons, estes são conhecidos como dopantes tipo *p* e os elementos mais utilizados são Boro (B), Gálio (Ga), Alumínio (Al) e Índio (In).

Pode-se utilizar como exemplo de dopagem, o Silício dopado com Boro. O Boro possui apenas três átomos na camada de valência, de forma que a ausência de um elétron (se

comparado com os átomos de Silício em volta, com quatro elétrons na última camada cada) é considerada uma lacuna. Quando energia térmica suficiente é fornecida ao átomo de Silício é suficiente, este libera um elétron que se desloca para o átomo vizinho ao Boro, preenchendo a lacuna deste, por conseguinte, criando uma lacuna no átomo de Silício, que se comporta como uma carga positiva. Cada vez que um átomo vizinho ao Boro é preenchido, novas lacunas se formam em outros locais, movendo-se livremente no cristal de Silício – ilustrado na Figura 11.

Figura 11 – Representação Esquemática da Substituição (Dopagem) de um Átomo de Silício por um Átomo de Boro.



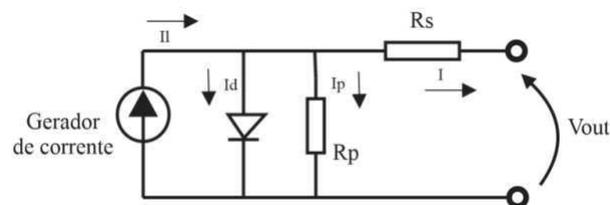
Fonte: *Mendonça, 2016.*

Ainda pode ser realizado os dois tipos de dopagem, uma em cada lado da lamina de Silício. Esta dopagem, conhecida como junção *pn*, configura os elétrons em excesso do lado *n* migrando para a região *p*, de forma a deixar cargas fixas positivas na região *n* e cargas fixas negativas na região *p*. Esta migração ocorre até que o equilíbrio seja atingido, de forma que o campo elétrico formado por esse excesso de elétrons e lacunas nas regiões especificadas impeça o traslado dos portadores de carga.

3.3 Características Elétricas

Podemos apresentar uma célula fotovoltaica pela conexão em paralelo de um diodo, representado a junção *pn*, e um gerador de corrente comum. Observa-se que pelo diagrama na Figura 14, a corrente gerada nessa célula é então a soma da corrente no diodo, quando não há tensão externa de polarização, e a corrente que foi gerada pela radiação solar incidente na célula.

Figura 12 – Circuito Equivalente da Célula Fotovoltaica.



Fonte: *Monteiro, 2016*.

São consideradas ainda duas resistências no circuito: R_S são as resistências em série associadas a junção, malhas metálicas e regiões dopadas, enquanto que R_P são as resistências em paralelo associadas a pontos de curto circuito na junção *pn*. Baseando-se na equação de corrente no diodo ideal e do circuito equivalente mostrado acima, podemos então levantar a equação da curva característica I-V da célula – mostrada na Figura 12.

$$I = I_L - I_0 \left[\exp \left(\frac{q(V + IR_S)}{nkT} \right) - 1 \right] - \frac{V + IR_S}{R_P} \quad (3)$$

Onde:

I_L - Corrente fotogerada (A);

I_0 - Corrente reversa de saturação no diodo (A);

q – Carga do elétron ($1,6 \times 10^{19}$ C);

k – Constante de Boltzmann ($1,38 \times 10^{-23}$);

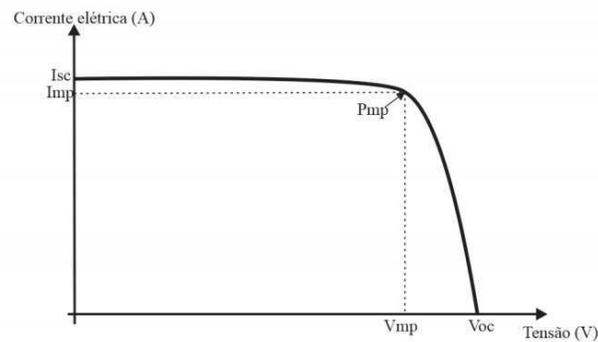
T – Temperatura absoluta (K);

V – Tensão nos terminais da célula;

R_S – Resistência série;

R_P – Resistência paralelo;

Figura 13 – Curva I-V.



Fonte: *Monteiro, 2016*.

Observando-se a curva I-V da célula fotovoltaica, é possível determinar alguns parâmetros fundamentais para a caracterização das células. Estes normalmente são fornecidos pelos próprios fabricantes e são:

- **Corrente de curto-circuito (I_{SC}):** Esta é a corrente máxima que pode ser obtida quando a tensão nos terminais da célula é nula. Este valor depende diretamente de valores como área da célula, irradiância solar, distribuição espectral e outros, logo, esta corrente varia para cada tecnologia aplicada;
- **Tensão de circuito aberto (V_{oc}):** Esta é a tensão máxima encontrada entre os terminais do circuito quando o circuito está aberto e sem circulação de corrente;
- **Ponto de máxima potência (P_{mp}):** Esta grandeza representa o ponto no qual o produto entre tensão e corrente possui valor máximo, ou seja, eficiência máxima;
- **V_{mp} e I_{mp} :** São, respectivamente, a tensão (dada em Volts) e a corrente (dada em Amperes) no ponto de máxima potência;

- **Fator de Forma (FF):** Este fator é aquele que é utilizado como parâmetro para determinar a potência média real obtida pela célula;
- **Eficiência (η):** Parâmetro utilizado para quantificar a eficiência do processo de conversão de energia na célula solar. Associado diretamente com a área da célula e a irradiância incidente.

3.4 Fatores que Afetam o Rendimento

A eficiência dos painéis solares é medida em condições padronizadas e normatizadas em laboratório pelo Standart Testing Conditions (STC). Para este padrão, temos:

- Temperatura da célula; 25°C;
- Irradiação Solar: 1000W/m²;
- Massa de Ar: 1,5.

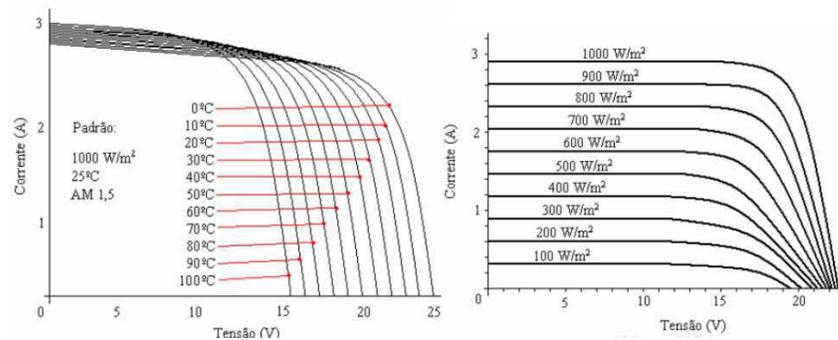
Parâmetros fora desse padrão causam efeitos que podem ser notados diretamente na curva I-V dos módulos fotovoltaicos.

3.4.1 Temperatura e Intensidade Luminosa

A elevação da temperatura nas células fotovoltaicas resulta nos pontos de máxima potência mais baixos da curva, como ilustrado na Figura 14, indicando uma menor eficiência nessas condições. Deve-se levar em consideração que o ponto de máxima potência é dificilmente atingido na prática, pois a potência gerada costuma diminuir com o aumento da temperatura, mesmo para insolações elevadas.

Já quanto a intensidade luminosa, como abordado anteriormente, sabe-se que a radiação solar é composta por várias faixas de comprimento de onda e de energia, e que várias partes dessa radiação são dissipadas na atmosfera, restando apenas uma parte da radiação que poderá ser convertida em energia elétrica. Tem-se que esses níveis de energia capazes de realizar o efeito fotovoltaico nas células dependem e variam com o material utilizado na fabricação dos painéis.

Figura 14 – Influencia da Temperatura (à Esquerda) e da Intensidade Luminosa (à Direita) nas Curvas I-V.



Fonte: Ghensev, 2006.

3.4.2 Reflexão

O reflexo dos painéis fotovoltaicos é um fator que afeta diretamente a eficiência da conversão das células, já que isto influencia diretamente a quantidade de radiação que poderá ser utilizada na conversão. Existem diversas técnicas e tecnologias utilizadas pelos fabricantes para otimizar a absorção da energia solar como, por exemplo, aplicação de camadas antirreflexo à camada mais superior dos painéis.

Outra técnica utilizada é a texturização da superfície dos painéis, fazendo com que a luz seja refletida para uma outra superfície da célula. Por exemplo, quando a superfície texturizada apresenta a forma de pirâmide, a luz é refletida em diferentes pontos da superfície de absorção da célula, de forma que seja absorvida completamente.

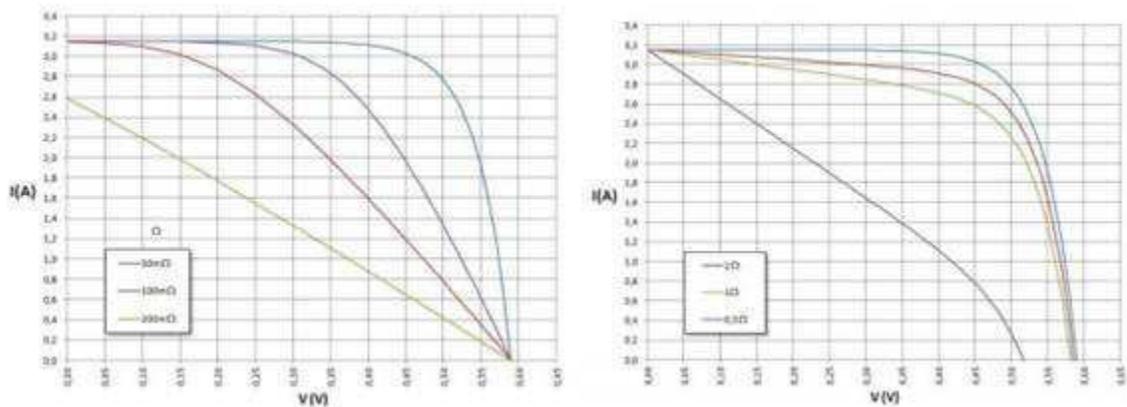
3.4.3 Resistências

Um fator que influencia no rendimento e eficiência das células são as resistências abordadas no circuito equivalente na Figura 12. A resistência em série é originada a partir da resistência do próprio material semicondutor, nos contatos metálicos e nas junções metal-

semicondutor. Esta resistência reduz o Fator de Forma da célula, reduzindo assim a eficiência e os valores da corrente de curto circuito da placa.

Enquanto isso, as resistências paralelas geram reduções na tensão de circuito aberto das células e no fator de forma, também. Porém, estas não influenciam nos valores de curto circuito como as resistências em série. Pode-se observar na Figura 15 abaixo como essas resistências influenciam nas curvas I-V das células.

Figura 15 – Efeito da Variação da Resistência Série (à Esquerda) e Efeito da Variação da Resistência Paralelo (à Direita).



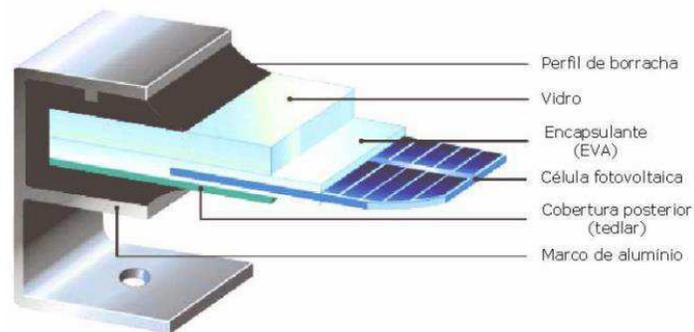
Fonte: *Pinho e Galdino, 2014.*

3.5 Módulos Fotovoltaicos

Os módulos fotovoltaicos ou painéis fotovoltaicos são formados pela associação das células estudadas separadamente até agora. Essas células são conectadas em série ou paralelo com o objetivo de conseguir atingir níveis de corrente e tensão desejados.

Quando as células são associadas em série, elas são conectadas pelos seus contatos frontais (polo negativo) com os contatos posteriores (polo positivo) de uma outra célula seguinte. O módulo pode ser constituído por conjuntos de 36, 20 e 16 células, sendo protegidas por soldas e encapsulamentos, proporcionando uma certa resistência mecânica ao módulo como um todo. Pode-se observar as partes constituintes desse módulo abaixo na Figura 16.

Figura 16 – Partes Constituintes de um Modulo Fotovoltaico.



Fonte: *Monteiro, 2016.*

Na parte superior do modulo se utiliza vidro temperado com alta transparência e para se reduzir as perdas por reflexão, como citado anteriormente, é aplicado um acabamento texturizado. Abaixo destas camadas, utiliza-se um polímero transparente como encapsulante, com objetivo de isolar, evitar umidade, fadiga mecânica e as radiações UV. Já na cobertura posterior é comum se fazer uso de fluoreto de polivinil, ou Tedlar. Por fim, para fornecer rigidez mecânica para o conjunto do modulo e ajudar em sua fixação para geração, é utilizado uma moldura metálica que costuma ser de aluminio.

As células se apresentam em formatos quadrados e redondos, sendo importante considerar sua geometria, pois a projeção dos módulos deve levar em consideração a disposição das células, de forma a aproveitar ao máximo sua área. Segundo ASSUNÇÃO (2014), as células quadradas ocupam melhor o espaço nos módulos fotovoltaicos, enquanto que as células redondas sofrem menos perdas de material em sua produção.

3.5.1 Medidas de Desempenho de Elementos Fotovoltaicos

A unidade de medida utilizada para medir a potência dos módulos fotovoltaicas é o Watt-pico (Wp), indicando qual é a potência máxima gerada por aquele modulo em condições controladas de temperatura, luminosidade e massa de ar. Utilizando-se essa grandeza, existem diversos métodos para medir o desempenho dos módulos fotovoltaicos.

O primeiro método é o NOCT ou Nominated Operating Cell Temperature, no qual o modulo estudado é mantido à temperatura ambiente nominal e se obtém a potência máxima

gerada. Neste método, segundo GHENSEV (2006), as condições de operação consideradas são: Irradiação de 800 W/m^2 , massa de ar AM 1,5, incidência normal, temperatura ambiente de 25°C e velocidade do vento em 1 m/s .

No segundo método, chamado de AMPM ou amplitude média, considera-se nesse procedimento as horas inteiras de radiação solar do dia, baseado na descrição padrão solar em relação a luminosidade, temperatura e massa de ar.

Outras medidas que podem ser utilizadas são a energia de saída, medindo-se a quantidade de energia produzida em determinado intervalo de tempo, em Wh/m^2 ou em relação a unidade de custo ($\text{Wh/R\$}$), e a Eficiência de conversão, definida como a energia recebida do sol que é transformada em energia elétrica.

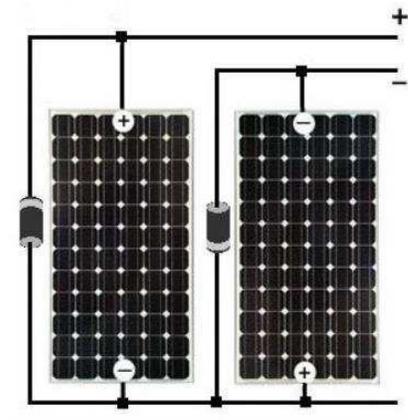
3.5.2 Associação de Módulos Fotovoltaicos

Assim como ocorre nas células fotovoltaicas que formam os painéis fotovoltaicos, os módulos também podem ser conectados em série e/ou paralelo para obter uma tensão ou corrente desejadas. Segundo PINHO e GALDINO (2014), após feita a definição de como serão feitas as associações dos módulos utilizados, é também necessário saber como será feita a instalações destes painéis e quais componentes serão necessários, pois as tensões e correntes devem ser compatíveis com estes componentes, provendo segurança e isolamentos necessários.

3.5.2.1 Associação em série

Para a associação em série, conecta-se o terminal positivo de um dos módulos ao terminal negativo do modulo seguinte e assim sucessivamente, conforme mostrado na Figura 17 abaixo.

Figura 17 – Painéis Conectados em Série.



Fonte: *Araújo, 2016.*

Para o caso de módulos idênticos e submetidos as mesmas condições como radiação e temperatura, tem-se que as tensões destes são somadas e sua corrente não é afetada. Pode-se, então, resumir este conceito nas seguintes equações:

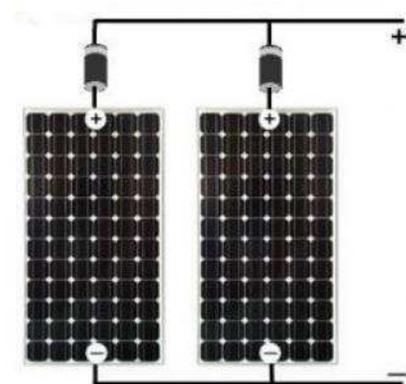
$$V = V_1 + V_2 + \dots + V_n \quad (4)$$

$$I = I_1 = I_2 = \dots = I_n \quad (5)$$

3.5.2.2 Associação em paralelo

Diferente da associação em série, na associação em paralelo os terminais positivos de todos os módulos são interligados entre si, assim como os terminais negativos, detalhado na Figura 18 abaixo.

Figura 18 – Painéis Conectados em Paralelo.



Fonte: *Araújo, 2016.*

Assim, as correntes geradas são somadas enquanto a tensão permanece a mesma. Podemos resumir este conceito nas seguintes equações:

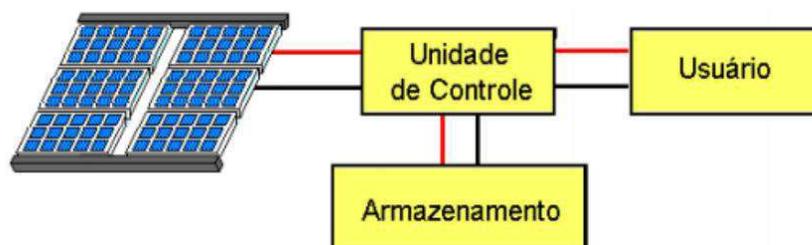
$$V = V_1 = V_2 = \dots = V_n \quad (6)$$

$$I = I_1 + I_2 + \dots + I_n \quad (7)$$

3.5.3 Classificação dos Sistemas Fotovoltaicos

Os sistemas fotovoltaicos são classificados em três categorias: sistemas isolados, híbridos e conectados à rede. Apesar disso, todos os sistemas possuem uma configuração básica (CRESESB, 2006), como pode-se observar no diagrama da Figura 19 abaixo.

Figura 19 – Configuração Básica de um Sistema Fotovoltaico.



Fonte: *CRESESB, 2006.*

3.5.3.1 Sistemas Isolados

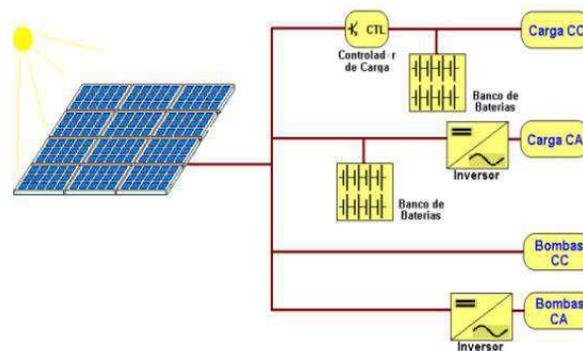
Como o próprio nome informa, os sistemas isolados têm como principal característica serem isolados, ou seja, não estarem conectados à rede elétrica, de forma se gerar a energia no local e utilizar alguma forma de armazenamento.

Segundo o CRESESB (2006), este armazenamento pode ser feito através de baterias, quando há o intuito de utilizar aparelhos elétricos, ou armazena-se na forma gravitacional quando água é bombeada para tanques de abastecimento.

Nos sistemas isolados que utilizam armazenamento em baterias se utiliza também um dispositivo conhecido como controlador de carga, para monitorar a carga e descarga da bateria, protegendo a mesma ou banco de baterias. Este dispositivo desconecta o gerador fotovoltaico quando a bateria atinge a carga plena e interromper o fornecimento de energia caso ela atinja o limite mínimo de segurança.

Estes controladores costumam ser utilizados em sistemas de pequeno porte, onde os aparelhos alimentados são de baixa tensão e corrente contínua. Para utilizar aparelhos em corrente alternada são utilizados um inversor e, normalmente, um segurador de ponto de máxima potência, procurando otimizar a potência final produzida, podendo-se observar esses equipamentos no diagrama da Figura 20 abaixo.

Figura 20 – Diagrama de Sistema Fotovoltaico Isolado em Função da Carga.

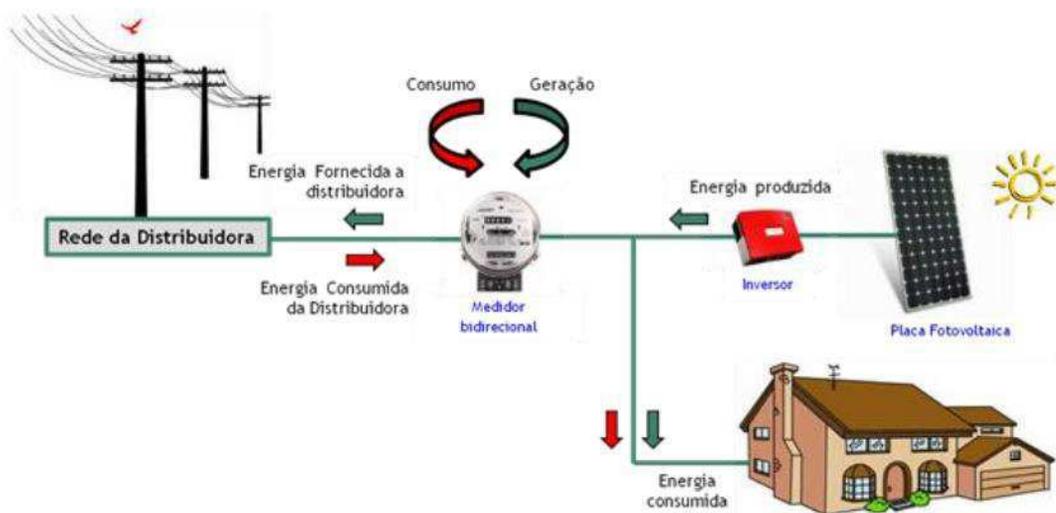


Fonte: CRESESB, 2006.

3.5.3.2 Sistemas Conectados à Rede

Segundo PINHO e GALDINO (2014), sistemas conectados à rede (ou SFCR) é um tipo de sistema que não utilizam baterias, pois a energia que é produzida em sitio 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. O diagrama básico deste sistema pode ser visto na Figura 21 abaixo.

Figura 21 – Esquema Básico de um SFCR.



Fonte: Araújo, 2016.

3.5.3.3 Sistemas Híbridos

Ainda segundo PINHO e GALDINO (2014), os sistemas híbridos são aqueles que possuem mais de uma fonte geradora local, onde costumam ser complexos e necessitam de algum tipo de controle capaz de integrar todos os geradores, otimizando, assim, a operação para o usuário. Normalmente são aplicados em sistemas de médio e grande porte, podendo trabalhar com correntes alternadas e fazendo necessário o uso de inversores.

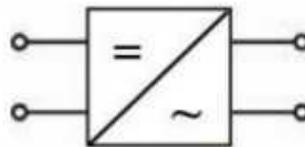
3.5.4 Inversores

A tensão gerada pelas células fotovoltaicas durante o processo de conversão de energia solar em elétrica é, como se sabe, do tipo contínua, e, como a obtenção de

eletrodomésticos alimentados por tensão contínua, se faz necessário a conversão desta corrente para o tipo alternada.

O inversor, então, é o equipamento que se responsabiliza por estabelecer a conexão entre os módulos fotovoltaicos e a carga ou rede elétrica, convertendo o sinal elétrico CC proveniente do gerador em um sinal elétrico CA, ajustando também frequência e o nível de tensão necessário (FIGUEIRA, 2014). A simbologia deste equipamento pode ser observada na Figura 22.

Figura 22 – Símbolo Elétrico de um Inversor.



Fonte: *Figueira, 2014.*

O inversor que se utilizou neste projeto, e que são comumente utilizado em SFCR, são conhecidos como inversores *grid-tie*, de forma que a energia produzida é inserida diretamente na rede. Durante a noite, o sistema necessitará da energia da rede para se alimentar, já que os painéis não produzirão energia neste momento. Todo este processo será realizado pelo inversor automaticamente, sem a necessidade do usuário intervir (FIGUEIRA, 2014).

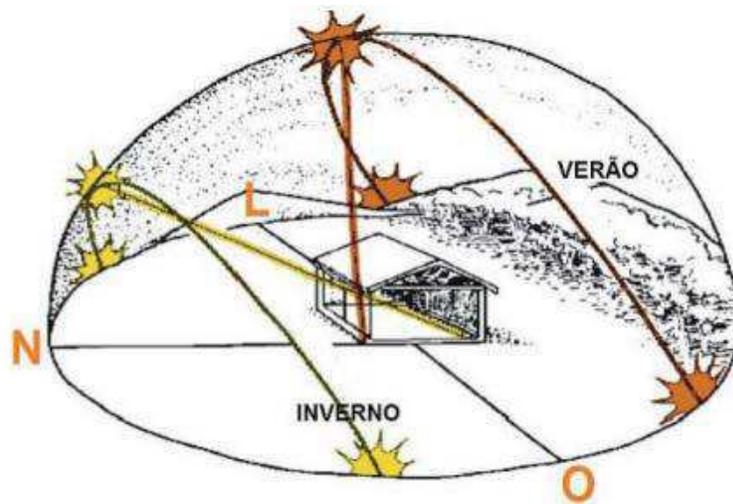
O dimensionamento deste elemento depende de fatores como a potência do gerador fotovoltaico, as características dos módulos utilizados, características ambientais e topologia da instalação. Deve-se dimensioná-lo cuidadosamente, pois deve este não deve ser utilizado nem sobrecarregado e nem pouco utilizado. A escolha de um inversor de capacidade adequada equivale a um menor custo para o projeto, sem impactar na quantidade de energia e na confiabilidade do sistema.

3.5.5 Localização do Sistema

A escolha da localização dos painéis fotovoltaicos dimensionados neste projeto é um fator determinante para o desempenho destes. E para isso, se faz necessária uma integração

dos elementos abordados até agora, como os elementos arquitetônicos do projeto, a presença de fatores que afetam o rendimento, o ângulo e a orientação dos painéis, procurando atingir a maior eficiência possível do sistema. Como a instalação será do tipo *rooftop* (no telhado da residência), tem-se menos liberdade no posicionamento destes (PINHO E GALDINO, 2014).

Figura 23 – Trajetória do Sol.



Fonte: *Portal Solar*.

O sol, como observado na Figura 23, nasce no Leste, eleva-se a sua posição mais alta inclinando-se para o Norte e se põe no Oeste. Conclui-se, então, que a posição ideal para instalação dos módulos fotovoltaicos no país seria voltada para o Norte, de forma a mantê-los iluminados por mais tempo, produzindo mais energia. Sabe-se também que o ângulo de inclinação ótima seria igual ao da latitude do local de instalação (PORTAL SOLAR).

Entretanto, permite-se que esta instalação seja realizada em faces voltadas para o Leste ou Oeste, pois a perda de geração não é considerada muito elevada. Como a residência em questão não possui face de telhado voltado para Norte, segue-se a instalação no telhado voltado para Leste.

4 Tecnologias e Materiais

Nos últimos anos, o mercado de células fotovoltaicas vem modificando-se bastante devido a inserção de novos métodos de fabricação de células fotovoltaicas. Estas alternativas permitem um menor custo de produção das células e fornecem uma maior eficiência na geração de energia, podendo diversificar mais ainda suas aplicações.

Hoje, existem diversos tipos de materiais semicondutores que são utilizados na fabricação de componentes fotovoltaicos, onde os mais utilizados são o silício cristalino, o silício amorfo, o telureto de cádmio (CdTe) e compostos de disseleneto de cobre e índio e gálio (CIS).

Algumas destas tecnologias alternativas, como o telureto de cádmio e compostos de disseleneto de cobre e índio e gálio, possuem uma grande aceitação devido ao seu custo reduzido. Porém, estes materiais ainda possuem baixo rendimento, baixa longevidade, dificuldade de acesso de alguns elementos (como o índio) e elevada toxicidade de alguns outros (como o cádmio) (PINHO e GALDINO, 2014), tornando a aplicação destes compostos apenas na alimentação de eletrônicos com baixo consumo de energia (NASCIMENTO, 2004).

Para produção em larga escala, o principal elemento que ainda se utiliza é o silício, seja em sua forma cristalina (monocristalina ou policristalina) ou amorfa. Este elemento químico é um dos mais abundante na superfície terrestre, barateando a matéria prima principal das células, e ainda possui um nível toxico inferior em relação aos outros materiais utilizados (MONTEIRO, 2016).

4.1 Características do Silício

Como discutido anteriormente, o silício é o segundo elemento mais abundante na superfície terrestre, mas ele não é encontrado em sua forma nativa na natureza e sim em formato de silicatos e sílica, ou seja, combinados com oxigênio (LUQUE e HEGEDUS, 2011).

O silício por si só é considerado inerte e não toxico, ou seja, não oferece risco para seres humanos. Contudo, o quartzo, principal material a partir do qual o silício é obtido,

possui um pó fino que, ao inalado no ambiente de extração, causa uma doença respiratória conhecida como silicose. Além disso, a produção do silício tem um grande impacto ambiental devido ao elevado consumo de energia em sua produção e a emissão de gases poluentes, como o CO₂, NO_x e SO₂.

Para a fabricação das células fotovoltaicas utilizadas neste projeto, utiliza-se o silício ultrapuro, o silício grau eletrônico (Si-gE, com grau de pureza de 99,9999999%) ou o silício grau solar (Si-gS, com grau de pureza 99,9999%). Verifica-se a relação da quantidade de impurezas em partes por milhão (ppm) e o número de naves do grau de pureza do silício na Tabela 1 abaixo.

Tabela 1 – Relação entre o teor de impurezas e número de naves do Si

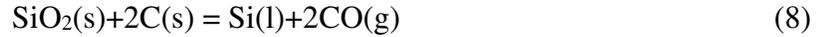
Teor de impurezas (ppm)	Pureza do silício	Número de naves (N)
10000	99,0	2
1000	99,9	3
⋮	⋮	⋮
1	99,9999	6
0,1	99,99999	7
0,01	99,999999	8
0,001	99,9999999	9

Fonte: *Monteiro, 2016*.

4.2 Silício Metalúrgico

O silício de grau metalúrgico, ou Si-gM, possui pureza aproximada de 98,5% e é produzido em fornos elétricos de arco convencionais. Estes tipos de silício contêm impurezas como alumínio, ferro e cálcio na proporção de 1200, 4000 e 1600 ppm, respectivamente.

O processo mais comum e barato utilizado é a redução carbônica da sílica em cadinhos com quartos e materiais carbônicos, que consiste na redução do quartzo pelo carbono em altas temperaturas, pode-se ilustrar esse processo pela seguinte reação:

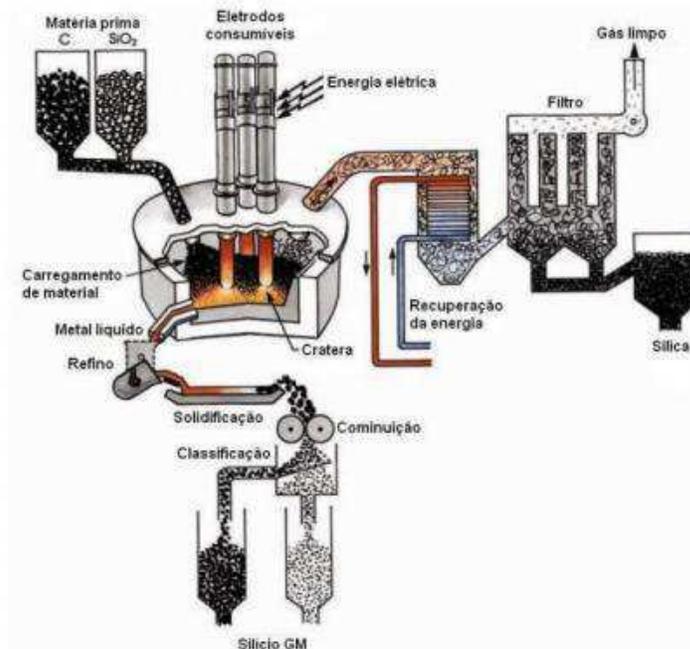


A mistura é aquecida a altas temperaturas nos fornos elétricos mencionados acima, de forma que o silício líquido gerado é drenado do fundo do forno, enquanto uma mistura dos materiais brutos formados de quartzo e carbono é carregada no forno. A reação também produz monóxido de carbono que, posteriormente, forma dióxido de carbono e é descartado e dois compostos intermediários, o monóxido de silício (SiO (g)) e o carboneto de silício (SiC (s)), que devem ser filtrados para evitar contaminação do silício líquido bruto (SERODIO, 2009).

A maioria das aplicações deste elemento demanda um silício que possua um alto grau de pureza, por isso o silício líquido obtido ainda deve ser refinado e tratado com gases oxidantes e aditivos, resultando na separação das impurezas ainda presentes. O silício tratado é armazenado em moldes de fundição e as impurezas, removidas mecanicamente ou por gravidade, são rejeitadas.

Após a solidificação, os grãos de silício terão tamanhos variando entre 1 e 100 nm. O processo todo pode ser ilustrado pela Figura 24 abaixo.

Figura 24 – Processos de Produção do Si-gM.



Fonte: *Monteiro, 2016.*

4.3 Silício Ultrapuro (Polisilício)

Para aplicações em dispositivos eletrônicos semicondutores faz-se necessário a utilização de um silício que possua um grau de pureza mais elevado, que é obtido a partir de métodos físicos ou químicos de purificação do silício de grau metalúrgico.

Os métodos físicos utilizados baseiam-se na maior solubilidade das impurezas contidas no silício líquido e procura moê-lo de forma a permitir que as impurezas ainda presentes nesse elemento se acumulem nas superfícies dos grânulos, obtendo-se um pó mais puro. Enquanto isso, os métodos químicos procuram atuar sobre compostos que são mais fáceis de serem purificados, como o triclorosilano (HSiCl₃), o tetracloreto de silício (SiCl₄) e o silano (SiH₄) (CARVALHO et al, 2014).

O processo de purificação do silício costuma ser dividido em duas etapas principais, em que primeiro se prepara um hidreto de silício volátil e em seguida o purifica com um processo de destilação fracionada. Existem diversas rotas conhecidas e utilizadas na obtenção deste elemento para aplicações eletrônicas, como a Rota Química (utilizando o processo Union Carbide, processo Siemens ou outros) ou Rota Metalúrgica. Cada uma delas possui suas características próprias, mas todas elas controlam os seguintes passos:

1. Preparação do hidreto de silício volátil;
2. Processo de purificação;
3. Decomposição do hidreto e obtenção do silício;
4. Reciclagem dos rejeitos.

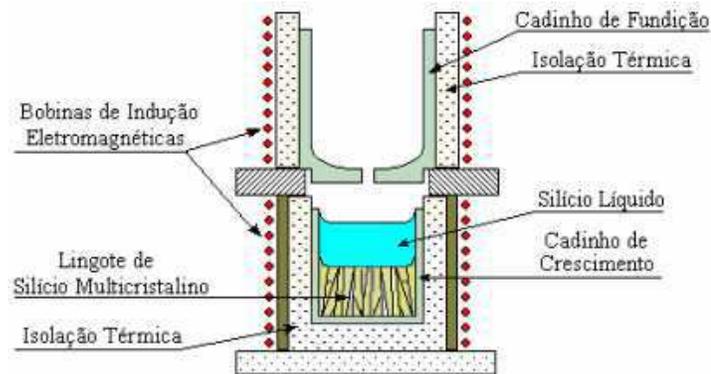
4.4 Método de Obtenção do Silício para Aplicações Fotovoltaicas

Para a obtenção do silício para a fabricação de células fotovoltaicas, ou Si-gS, são necessárias algumas técnicas intermediárias aplicadas aos diferentes processos vistos até agora.

Na obtenção do Si-gS pela rota metalúrgica, utiliza-se a solidificação direcional, o que resulta na produção de lingotes de silício policristalino. Já na produção de silício monocristalino, utiliza-se o método de Czocharalski (CZ) e o método de fusão zonal flutuante (ZF), que são técnicas específicas de solidificação direcional.

A solidificação direcional ou moldagem em cadinho, é um método que garante a solidificação homogênea do silício. Neste método são utilizados cadinhos de quartzo ou grafite de alta densidade envoltos por bobinas de indução eletromagnética que derretem o silício disposto neste cadinho. Quando a solidificação começa a acontecer, as impurezas permanecem segregadas na porção do material que continua em estado líquido, que é descartada por completo, resultando no refino do Silício (OLIVEIRA, 2008). Pode-se observar o esquema do processo na Figura 25 abaixo.

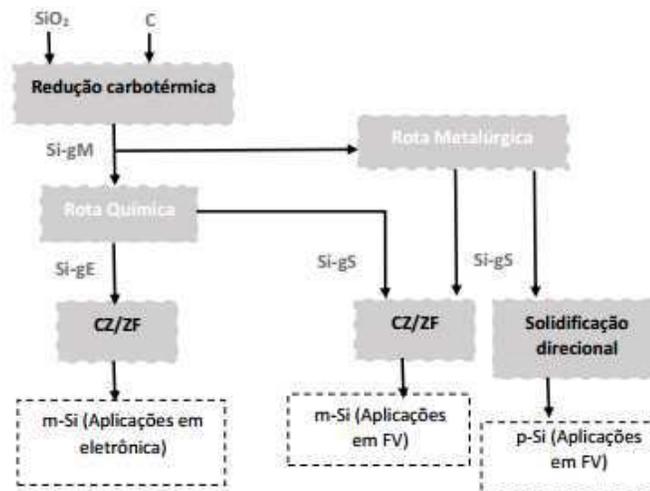
Figura 25 – Sistema de Solidificação Direcional.



Fonte: Ghensev, 2006.

Abaixo, na Figura 26, pode-se observar as etapas e métodos aplicado em cada uma das rotas de produção de silício para produção de células fotovoltaicas.

Figura 26 – Rotas e Processos de Produção de Silício.



Fonte: Monteiro, 2016.

4.5 Tecnologia das células fotovoltaicas – Silício Cristalino

O silício cristalino, como já se citou anteriormente, é o material mais comumente usados na fabricação de placas fotovoltaicas devido a sua robustez, confiabilidade, eficiência, abundância e baixo custo de matéria prima. Contudo, como vimos nas seções anteriores, o processo de fabricação exige altas temperaturas e pressões, demanda um longo período de

tempo e exige um grau elevado de precisão, o que eleva o custo final do módulo fotovoltaico (RUTHER, 2004).

Também já foi apresentado anteriormente, este material pode ser monocristalino (m-Si) e policristalino (p-Si). O m-Si é bastante utilizado em aplicações comerciais devido a sua eficiência, enquanto que o p-Si possui uma eficiência menor devido a imperfeições cristalina inerentes ao processo de produção. Apesar disto, o silício policristalino ainda é o mais utilizado no mercado global, pois possui um menor custo de produção, pois em demanda menos energia elétrica seu processo de fabricação (AMÉRICA DO SOL, 2011).

4.5.1 Silício Monocristalino

As células que utilizam a tecnologia de silício monocristalina são comercializadas comumente como conversor direto de energia solar em eletricidade, apesar de serem mais caras devido ao seu processo de produção. Células produzidas com este material podem atingir uma eficiência de até 24,2%, mas normalmente a eficiência dos módulos comerciais costumam variar de 16,84% até 20,4% dependendo do fabricante (TIRADENTES, 2007). Pode-se ver abaixo, na Figura 27, um exemplo desta célula.

Figura 27 – Célula de Silício Monocristalino.



Fonte: *Mura & Frazão, 2013.*

4.5.2 Silício Policristalino

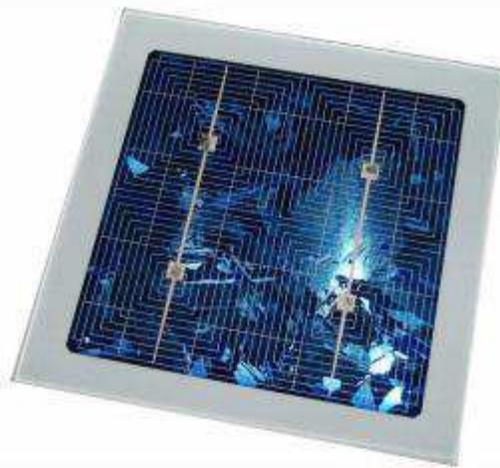
Os módulos de silício policristalino ou multicristalino foram introduzidos no mercado em 1981 e são comumente utilizados em dispositivos ativos, como diodos ou células solares,

devido a possibilidade de obter junções *pn*. O fato da condutividade do silício policristalino poder ser controlada através de dopagem permite a utilização deste material em resistências ou emissores em transistores bipolares (PEREIRA, 2008).

O processo da produção destas células é, como citado anteriormente, mais barato, pois consome menos energia, tempo e gera menos desperdício que os outros métodos. Contudo, as células produzidas com esta tecnologia possuem uma tolerância ao calor inferior se comparada com as células de silício monocristalino, o que torna seu desempenho pior em altas temperaturas (MAEHLUN, 2012).

Em testes mais recentes, observou-se que estas células conseguiram atingir uma eficiência recorde de 20,3% de eficiência. Apesar dos módulos produzidos comercialmente terem um desempenho inferior, isto mostra que esta tecnologia poderá se mostrar uma escolha mais satisfatória tanto economicamente quanto em termos de eficiência em um futuro próximo. Pode-se ver abaixo um exemplo desta célula na Figura 28.

Figura 28 – Célula de Silício Policristalino.



Fonte: *Mura e Frazão, 2013.*

5 Projeto de Geração Solar para Alimentar uma Central de Climatização

5.1 Projeto Principal

A residência em que será aplicada a central de climatização dimensionada nesse trabalho localiza-se na cidade de João Pessoa, capital Paraibana localizada na costa litorânea do Estado, e pertence, segundo a Energisa, ao grupo B1 da tabela de modalidade tarifária convencional em baixa tensão. A elaboração deste projeto está de acordo com as normas n° 482/2012 e 687/2015, além da NDU 013.

Para este projeto, procura-se implantar uma central de climatização na residência, utilizando-se do equipamento com tecnologia Multi-Split da empresa Fujitsu, em que se podem conectar até oito unidades internas para troca de calor, tornando o projeto mais econômico energeticamente e financeiramente. Na Figura 29 a seguir observa-se os dados de placa da unidade externa do sistema de climatização, dados estes que foram tomados como base para o dimensionamento posterior dos elementos do sistema fotovoltaico.

Figura 29 – Dados de Placa da Unidade Externa.

FUJITSU	
MODELO	AOBG45LBT8
No. DE SÉRIE	T000299
220V ~ 60Hz	
REFRIGERAÇÃO	
CAPACIDADE	14,06 kW (48.000 BTU/h)
CORRENTE	23,6 A
POTÊNCIA ELÉTRICA	5,20 kW
COEFICIENTE DE EFICIÊNCIA ENERG	2,69 kW/kW
VAZÃO DE AR	4.650 m ³ /h
AQUECIMENTO	
CAPACIDADE	15,82 kW (54.000 BTU/h)
CORRENTE	23,4 A
POTÊNCIA ELÉTRICA	5,16 kW
REFRIGERAÇÃO	
CORRENTE NOMINAL	26,5 A
AQUECIMENTO	
CORRENTE NOMINAL	26,5 A
<small>CONDIÇÃO DE TESTE IEC60335-2-40</small>	
PRESSÕES MÁX. SUCÇÃO	1.600 kPa
DESCARGA	4.150 kPa
REFRIGERANTE R410A	3,45 kg
IPX4	
A CAPACIDADE, CONSUMO e CORRENTE desta unidade foram obtidos quando conectadas as seguintes unidades internas.	
<small>ASBG24LFCA + ASBG24LFCA</small>	
<small>FABRICADO NA TAILÂNDIA</small>	
FUJITSU GENERAL LIMITED	

Fonte: *Fujitsu*.

5.1.1 Cálculo do consumo diário

Além dos dados de placa obtidos, utilizou-se como fonte também informações obtidas no manual do usuário fornecido pela própria empresa Fujitsu, em que observou-se a entrada total de energia (em Watts) do equipamento selecionado baseado nos modelos internos utilizados e seus respectivos BTU's (*British thermal unit* ou Unidade Térmica Britânica).

Para as unidades internas do sistema de refrigeração escolheu-se 8 unidades interna classe High Wall Compacto, modelo ASBG07LMCA de 7.000Btu e potência de 2.0kW. A entrada total (em kW) pode ser observada na Tabela 2 a seguir.

Tabela 2 – Entrada Total (em kW) Utilizando 8 Unidades Internas em uma Central Externa.

Combinação de Modelos

Multi-8 Ambientes – Refrigeração

AOBG45LBT8	Modelo interno para cada ambiente								Capacidade de Refrigeração (kBTu/h)								Entrada total (kW)	
									Ambiente 1	Ambiente 2	Ambiente 3	Ambiente 4	Ambiente 5	Ambiente 6	Ambiente 7	Ambiente 8		Total
8 Ambientes	7	7	7	7	7	9	9	9	6.05	6.05	6.05	6.05	6.05	7.78	7.78	7.78	53.60	5.88
	7	7	7	7	7	7	9	9	6.14	6.14	6.14	6.14	6.14	6.14	7.90	7.90	52.67	5.89
	7	7	7	7	7	7	7	12	6.11	6.11	6.11	6.11	6.11	6.11	10.47	53.23	5.88	
	7	7	7	7	7	7	7	9	6.27	6.27	6.27	6.27	6.27	6.27	8.06	51.92	5.89	
	7	7	7	7	7	7	7	7	6.55	6.55	6.55	6.55	6.55	6.55	6.55	52.42	5.90	

Nota:

- A capacidade de refrigeração é baseada em 27°C BS/19°C BU (temperatura interna), 35°C BS (temperatura externa)
- A capacidade total das unidades deve estar entre 38.400 e 62.400 btu
- Comprimento da tubulação: 5m (entre a U.E e a caixa de distr.), 3m (entre a caixa de distr. e a U.I.)
- Desnível: 0m (entre as U.I e U.E.)
- É necessário conectar no mínimo 2 unidades e no máximo 8
- Os valores nesta tabela devem ser usados apenas como orientação. Estes valores são calculados em condição padrão

Fonte: *Manual do Usuário da Fujitsu.*

Baseado nos dados obtidos no Manual, desenvolveu-se a seguinte Tabela 3 do consumo médio diário (kWh) do equipamento. Logo:

Tabela 3 – Dimensionamento do Consumo Médio Diário Baseado na Potência Nominal do Equipamento.

Aparelho	Quantidade	Potência nominal (kW)	Média Utilização/Dia	Consumo Médio Diário (kWh)
Unidade de climatização	1	5.90	8h	47.2
Total				47.2

Fonte: *Próprio Autor.*

Observa-se então que o consumo médio diário do sistema supondo uma média de utilização de 8 horas diárias será de 47,2kWh. Estima-se, ainda, que este sistema será utilizado basicamente no período noturno, de forma que esta demanda de energia será gerada pelos painéis fotovoltaicos durante o período da manhã e armazenadas em baterias, permitindo o consumo durante a noite.

5.1.2 Dimensionamento das Baterias

Levou-se, inicialmente, em consideração que este sistema não será conectado à rede, ou seja, toda a demanda de energia seria suprida pelos painéis fotovoltaicos e baterias.

Utilizou-se baterias de composição chumbo-ácido, por serem facilmente encontradas no mercado. Estas baterias possuem descargas profundas, de forma que podem ser descarregadas entre 20% a 80% de sua carga e serem recarregadas frequentemente sem haver redução de sua vida útil. Logo, estimou-se uma descarga diária de 40% da bateria. Logo, a energia nominal mínima necessária para as baterias deverá ser:

$$E_{bateria} = \frac{C_{médio/dia}}{Descarga\ diária} = \frac{47200}{0.4} = 118,000Wh$$

Além disso, também se selecionou baterias com 12V de capacidade, devido a sua popularidade e facilidade de encontrar para venda. Sabendo disso, calcula-se a quantidade de Ah (Amperes-hora) que será demandada pela bateria. Logo:

$$C_{bateria} = \frac{E_{bateria}}{Capacidade\ das\ baterias} = \frac{118000}{12} = 9,833.3Ah$$

Uma bateria com essa capacidade não é produzida comercialmente, então deve-se optar pela utilização de um banco de baterias em paralelo. A bateria selecionada foi a do modelo TT24HGC da montadora Tudor, com capacidade nominal de 195Ah. Calcula-se então o número de baterias necessárias:

$$Numero\ de\ Baterias = \frac{9833.3}{195} = 50.427 \dots \cong 51\ baterias$$

Serão necessárias então 51 baterias conectadas para suprir a demanda no período noturno.

5.1.3 Avaliação do Recurso Solar

A ferramenta utilizada nesse trabalho para obter-se a irradiação solar incidente diariamente na região do município de João Pessoa foi o SunData, recurso online encontrado no site da CRESESB, onde basta fornecer como dados as coordenadas geográficas do local e a ferramenta informa os valores de irradiação solar diária média por mês.

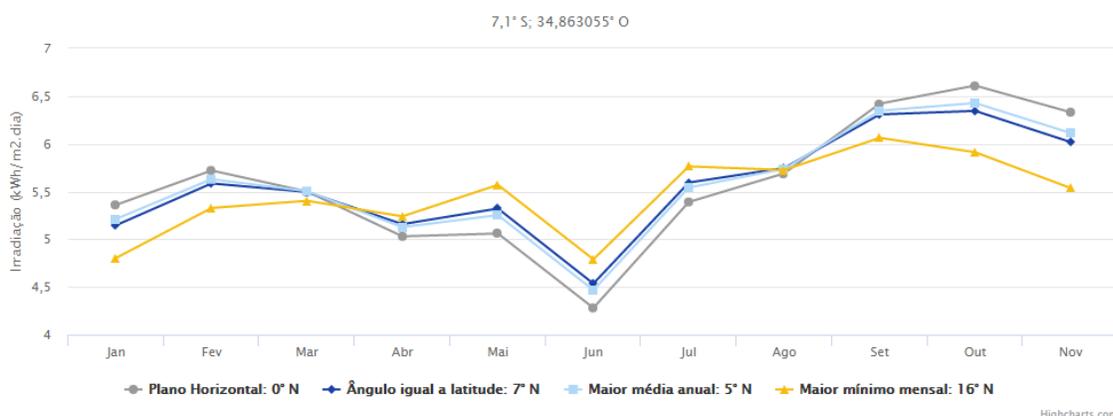
Utilizou-se as coordenadas geográficas 7.1195° S, 34.8450° W e obteve-se a seguinte Tabela 4 informando a irradiação solar diária média por mês na cidade de João Pessoa.

Tabela 4 – Irradiação Solar Diária Média por Mês na Cidade de João Pessoa.

Estação: Joao Pessoa
Município: João Pessoa, PB - BRA
Latitude: 7,1° S
Longitude: 34,863055° O
Distância do ponto de ref. (7,1195° S; 34,845° O): 2,9 km

#	Ângulo	Inclinação	Irradiação solar diária média mensal [kWh/m ² .dia]												Média	Delta
			Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez		
✓	Plano Horizontal	0° N	5,36	5,72	5,50	5,03	5,06	4,28	4,56	5,39	5,69	6,42	6,61	6,33	5,50	2,33
✓	Ângulo igual a latitude	7° N	5,15	5,58	5,50	5,16	5,32	4,53	4,81	5,59	5,75	6,31	6,34	6,02	5,51	1,81
✓	Maior média anual	5° N	5,21	5,63	5,50	5,13	5,25	4,47	4,75	5,54	5,74	6,35	6,43	6,11	5,51	1,96
✓	Maior mínimo mensal	16° N	4,80	5,33	5,40	5,24	5,57	4,79	5,06	5,76	5,73	6,06	5,91	5,54	5,43	1,27

Irradiação Solar no Plano Inclinado –João Pessoa–João Pessoa, PB–BRA



Fonte: *SunData – CRESESB, 2017.*

Esta ferramenta se mostra muito útil pela impossibilidade atual de realizar-se medições que afirmam a irradiação solar no local que será aplicado o projeto. Contudo, deve-se deixar claro que o Atlas Solar Brasileiro não é atualizado desde 2006 e que os dados deste atlas são utilizados pelo SunData. Por isso, a medição da Irradiação Solar no local da implantação do projeto sempre será indispensável para um dimensionamento mais preciso.

Observa-se então no gráfico acima os valores referentes as irradiações diárias médias mensais para a cidade de João Pessoa. Utilizou-se os dados fornecidos pelo programa e referentes a inclinação de 0°. Como o projeto foi dimensionado para funcionar a plena atividade durante todo o decorrer do ano, procura-se o período que possui menor irradiação solar média possível, conhecido como ponto crítico para geração de energia solar e que normalmente ocorre em meses de inverno. O mês de junho, incluso no período de inverno no

hemisfério sul do globo terrestre, apresenta o menor valor encontrado no plano horizontal, igual a $Radiação_{min} = 4,28 kWh/m^2 . dia$

A potência mínima do sistema para suprir o consumo diário será dada por:

$$Potência_{minima} = \frac{Consumo_{médio/dia}}{Radiação_{min}} = \frac{47200}{4,28} = 11,028W$$

Deve-se levar em consideração as perdas totais do sistema, de forma a tornar este dimensionamento o mais próximo possível da realidade. Considera-se, então, as perdas nos cabamentos (6%), perdas de conversão de energia (10%) e perdas por desajuste (10%). Logo, tem-se que a potência necessária será:

$$Potência_{necessária} = \frac{11,028}{(1 - 0.06). (1 - 0.10). (1 - 0.10)} = 14,483.8W$$

Foi escolhido uma placa do fabricante Canadian modelo CS6P265P, com potência de pico de 265 Wp. As especificações são observadas abaixo na Tabela 5.

Tabela 5 – Especificações do Painel Solar Canadian CS6P 265P

Dados Elétricos	
Parâmetros	Valores
Potência de pico (P_{max})	265 Wp
Tensão de pico (V_{mp})	30,6 V
Tensão de circuito aberto (V_{oc})	37,7 V
Corrente de pico (I_{mp})	8,66 A
Corrente de curto circuito (I_{sc})	9,23 A
Eficiência (η)	16,47 %
Tensão máxima do sistema	1000 V _{dc}
Características Térmicas	
Temperatura Nominal da Célula	45 ± 2 °C
Coefficiente de Temperatura (P_{max})	-0,41 % / °C
Coefficiente de Temperatura (V_{oc})	-0,31 % / °C
Coefficiente de Temperatura (I_{sc})	0,053 % / °C
Faixa de Temperatura em funcionamento	-40 °C – 85 °C
Dados Técnicos	
Tipo de Células	Silício Policristalino
Arranjo das Células	60(6 x 10)
Dimensões	1638 x 982 x 40 mm
Peso	18 kg
Proteção Frontal	Vidro Temperado
Caixa de Junção	IP67, 3 diodos
Cabo de ligação (comprimento/seção)	1000mm/4 mm ²

Fonte: *Manual do Usuário do Painel.*

Para calcular, por fim, o número de placas necessárias, divide-se a potência necessária após as perdas pelo valor da potência de pico do modelo de painel fotovoltaico escolhido.

Logo:

$$\text{Numero de placas} = \frac{\text{Potência}_{necessária}}{P_{max}} = \frac{14483.8}{265} = 54.655 \dots \cong 55 \text{ placas}$$

Logo, cinquenta e cinco placas serão suficientes para suprir a demanda estimada do projeto. Estas placas irão produzir no total 14575 Wp, de forma a atender todas as necessidades do consumo estimado.

5.1.4 Dimensionamento do Inversor de Frequência

Para o dimensionamento do inversor, deve-se utilizar o valor da potência nominal do sistema fotovoltaico implementado. Uma forma de descobrir se o inversor escolhido é adequado para o sistema fotovoltaico é aplicando a seguinte equação:

$$0.7 \times P_{SF} < P_{Inversor} < 1.2 \times P_{SF}$$

Onde, P_{SF} é a Potência total do Sistema Fotovoltaico calculado até agora ($P_{SF} = 14575 \text{ Wp}$) e $P_{Inversor}$ é a Potência do inversor que deseja-se instalar.

Outro teste semelhante é descrito pelo cálculo do Fator de Dimensionamento do Inversor, ou simplesmente FDI. Observa-se na equação abaixo:

$$FDI = \frac{P_{Nom\ CAI}}{P_{FV}}$$

Onde, $P_{Nom\ CAI}$ equivale a Potência nominal em corrente alternada do inversor (W) e P_{FV} equivale a Potência de pico do painel fotovoltaico (Wp). O FDI recomendado deve estar na faixa de $0.75 < FDI < 1.05$. Caso os valores não se enquadrem, será necessário a instalação de mais de um inversor.

Para este projeto, dimensionou-se o inversor da linha Sunny Tripower, modelo 25000TL. Este modelo foi escolhido pois se adequa a faixa de potência dos módulos, não apresenta transformador isolador na saída e possui controle de reativos. As informações utilizadas no dimensionamento podem ser observadas na Tabela 6 abaixo, enquanto que informações adicionais se observam em anexo a este trabalho.

Tabela 6 – Especificações dos Inversores Linha Sunny Tripower.

DC Input

	STP 15000TL-30	STP 20000TL-30	STP 25000TL-30
Maximum DC power at $\cos \varphi = 1$	15330 W	20440 W	25550 W
Maximum input voltage	1000 V	1000 V	1000 V
MPP voltage range	240V to 800 V	320 V to 800 V	390 V to 800 V
Rated input voltage	600 V	600 V	600 V
Minimum usable input voltage	150 V	150 V	150 V
Initial input voltage	188 V	188 V	188 V
Maximum input current, input A	33 A	33 A	33 A
Maximum input current, input B	33 A	33 A	33 A
Maximum short-circuit current per string*	43 A	43 A	43 A
Maximum reverse current in the system for max. 1 ms	0 A	0 A	0 A
Number of independent MPP inputs	2	2	2
Strings per MPP input	3	3	3
Overvoltage category in accordance with IEC 62109-1	II	II	II

* In accordance with IEC 62109-2: I_{scW} Fonte: *Manual do Inversor*.

Ao utilizar-se os testes mencionados acima, tem-se:

Teste 1:

$$0.7 \times P_{SF} < P_{Inversor} < 1.2 \times P_{SF} \rightarrow 10,202.5 < P_{Inversor} < 17,490$$

Como $P_{Inversor} = 15000W$, tem-se que o inversor pode ser aplicado para esse sistema.

Teste 2:

$$FDI = \frac{P_{Nom CAI}}{P_{FV}} = \frac{15000}{14575} = 1.03$$

Como o Fator de Dimensionamento do Inversor deve estar na faixa de $0.75 < FDI < 1.05$, o modelo selecionado também passa nesse teste.

Dimensiona-se então a quantidade necessária de módulos ligados em série de forma a garantir que a tensão conectada seja próxima à tensão nominal do inversor. Logo, tem-se a seguinte equação:

$$N_{\text{módulos em série}} = \frac{V_{\text{inversor}}}{V_{\text{max FV}}} = \frac{600}{30.6} = 19.6 \cong 20 \text{ módulos}$$

Onde, V_{inversor} equivale a Tensão nominal do inversor dimensionado e $V_{\text{max FV}}$ é a Tensão máxima do módulo fotovoltaico selecionado. Observa-se que o número de módulos ligados em série por fileira será de 20 unidades. Deve-se então checar a tensão submetida a entrada do inversor no caso dos painéis se comportarem como circuito aberto. Logo, tem-se:

$$V_{ca} = N_{\text{módulos em série}} \times V_{CA \text{ módulo}} = 20 \times 37.7 = 754V$$

Onde, $V_{CA \text{ módulo}}$ equivale a tensão de circuito aberto de cada um dos módulos. Como observa-se nos dados do inversor, a tensão de circuito aberto é inferior a tensão máxima permitida pelo inversor. Calcula-se então a potência total fornecida pelos módulos. Logo:

$$P_{\text{tot módulos}} = N_{\text{módulos em série}} \times P_{\text{módulo}} = 20 \times 265 = 5300W$$

Onde, $P_{\text{módulo}}$ equivale a potência do módulo. Baseado nesse valor, é possível determinar o número de arranjos dos módulos para ligação no inversor. Logo:

$$N_{\text{arranjos/inversor}} = \frac{P_{\text{inversor}}}{P_{\text{tot módulos}}} = \frac{15340}{5300} = 2.89 \cong 3$$

Onde, P_{inversor} é a potência do inversor. Temos então que o número de arranjos será 3 e irá conter até 20 módulos ligados em série cada. Como este projeto possui 55 módulos conectados ao inversor e cada um com tensão de pico em $P_{\text{max}} = 265 Wp$, temos que a potência total é inferior a potência do inversor, Ainda é necessário o cálculo da corrente de curto circuito do arranjo. Logo:

$$C_{cc \text{ arranjo}} = N_{\text{arranjos/inversor}} \times C_{cc \text{ módulo}} = 3 \times 27.69A$$

Onde, $C_{cc \text{ módulo}}$ equivale a corrente de curto-circuito de cada um dos módulos. Observa-se que a corrente máxima suportada na entrada do inversor equivale a 33^a, logo o arranjo está dimensionado corretamente para este inversor escolhido.

Podemos observar, por fim, que apenas um inversor Sunny Tripoer15000TL é suficiente para garantir a demanda deste projeto.

5.1.5 Dimensionamento das Proteções

Para fornecer um projeto seguro e afim de evitar danos permanentes nos equipamentos do sistema, evitando possíveis trocas e despesas desnecessárias, dimensionou-se proteções para o sistema tanto do lado de tensão contínua (DC) como para o lado de tensão alternada (AC).

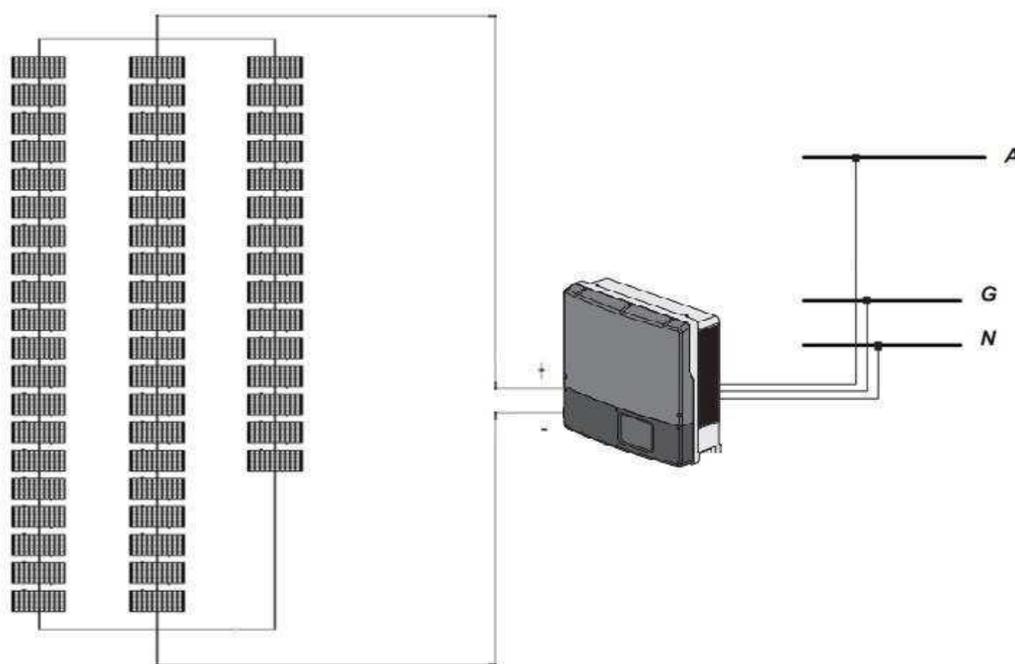
Para o lado contínuo (DC), ou seja, próximo aos painéis e antes dos inversores, dimensionou-se um disjuntor de 40A, de forma a assegurar que a corrente que entrará no inversor não irá ultrapassar a corrente máxima deste (que como já foi citado, foi limitada a 45,45A). Ainda foi dimensionado o dispositivo de proteção contra surtos, de forma a proteger tanto os equipamentos quanto a instalação contra surtos, sobretensões ou transientes, sejam estes diretos ou indiretos.

Enquanto isso, para o lado de corrente alternada, que se encontra após os inversores, dimensionou-se também um disjuntor de 40^a devido a elevada corrente demandada pela central de ar condicionado

5.1.6 Configuração do Sistema

Encontra-se abaixo um esquema de como deverá ser interligado os painéis aos inversores.

Figura 30 – Configuração do Sistema.



Fonte: *Próprio Autor.*

5.2 Sistema Fotovoltaico Interligado a Rede

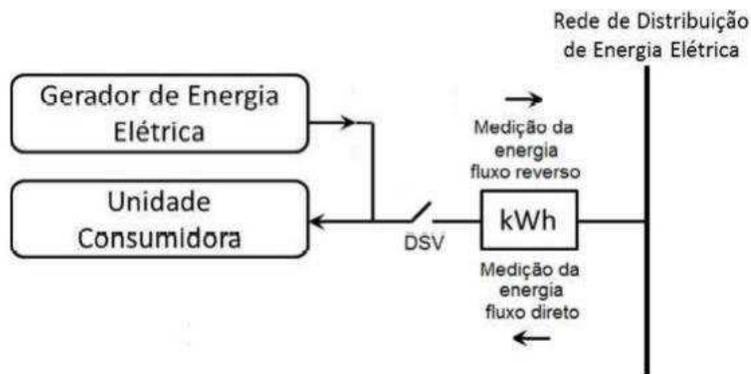
Como pode se observar no projeto dimensionado até então, para suportar este sistema durante a noite e evitar uma possível interrupção do fornecimento de energia elétrica, faz-se necessário a utilização de um banco de baterias composto por 51 baterias.

Infelizmente, os custos médios do tipo de bateria aplicada nestes projetos são elevados (acima dos R\$2.000) e possui vida útil relativamente curto, em média 10 anos (RTA, 2014), principalmente quando espera-se um retorno do investimento em um sistema fotovoltaico.

Uma forma de contornar este gasto elevado é tornar o sistema fotovoltaico conectado à rede (SFCR). Nesta classificação dispensa-se a utilização de baterias, pois a energia gerada pelos painéis fotovoltaicos instalados será consumida diretamente pela carga ou injetadas na rede elétrica convencional. Desta forma o consumidor gera crédito com a concessionária de

energia, podendo utilizar esta energia gerada quando precisar. Pode-se observar esta conexão com a rede na Figura 31 a seguir.

Figura 31 – Disposição Simplificada do Medidor Bidirecional.



Fonte: *NDU 013*.

Para tornar o sistema fotovoltaico desenvolvido em um interligado a rede, faz-se necessário a utilização de um relógio ou medido bidirecional (Portal Solar). Estes medidores são regulados pela NDU 013 e tem a instalação promovida pela concessionária de energia do estado da Paraíba, a Energisa. Pode-se ver um exemplo de um medido bidirecional da marca CFE na Figura 32 abaixo.

Figura 32 – Medidor Bidirecional.



Fonte: *WeboSolar*.

5.3 Projeto Reduzido de Central de Ar Condicionado

O projeto desenvolvido até então demanda um número elevado de placas fotovoltaicas (55 placas), o que torna o custo muito mais elevado. Este número requerido elevado ocorre devido a potência que a unidade de climatização requer e ao elevado número de fan coils (8, no total).

Fez-se então uma nova proposta, em que utilizaria-se uma unidade central que comporta quatro fan coils e não oito como no projeto original. Também se estimou que apenas os dois principais trocadores de calor seriam alimentados pelo sistema fotovoltaicos, enquanto que os outros dois, utilizados em quartos de hóspedes, teriam sua demanda alimentada pela energia oriunda da rede. Para este caso foram escolhidos fan coils classe High Wall Compacto, modelo ASBG07LMCA de 7.000Btu e potência de 2.0kW. A entrada total (em kW) durante a utilização de dois ou quatro unidades internas pode ser observada abaixo na Tabela 7.

Tabela 7 - Entrada Total (em kW) Utilizando 2 e 4 Unidades Internas em uma Central Externa.

Multi-4 Ambientes – Refrigeração																				
AOBG30LAT4																				
min. 27 kBtu max. 49 kBtu	Modelo interno para ambiente					Capacidade de refrigeração para cada unidade interna Class. (kBtu/h)				Capacidade de refrigeração para cada unidade interna Max (kBtu/h)				Capacidade total de refrigeração (kBtu/h)			Entrada total (kW)			EER (W/W)
	ambiente 1	ambiente 2	ambiente 3	ambiente 4	Total	ambiente 1	ambiente 2	ambiente 3	ambiente 4	ambiente 1	ambiente 2	ambiente 3	ambiente 4	min	class	max	min	class	max	
	7	7	-	-	14	7.1	7.1	-	-	8.8	8.8	-	-	6.1	14.3	17.7	0.60	1.42	1.62	
7	7	7	7	28	6.7	6.7	6.7	6.7	8.2	8.2	8.2	8.2	5.5	27.0	32.8	0.68	2.20	3.41	3.60	

Fonte: *Manual do Usuário da Fujitsu.*

Estimando uma utilização de oito horas diárias e estimando o consumo para a entrada total máxima de energia requeria, chega-se a uma demanda diária 12,960Wh para a utilização de dois aparelhos de ar condicionado e 27,280Wh para a utilização de quatro.

Seriam necessários, então apenas 14 painéis fotovoltaicos para alimentar um banco de baterias formado por 15 unidades, um número bem inferior ao calculado anteriormente. Nesta nova versão do projeto também poderia ser utilizado o sistema fotovoltaico interligado a rede, de forma a reduzir ainda mais o custo do projeto.

6 Conclusão

Ao final deste trabalho concluiu-se que é possível prover a alimentação de um sistema de climatização interna utilizando os módulos fotovoltaicos atuais, mesmo ainda sendo uma tecnologia muito cara. Também foi possível refletir e estudar a teoria sobre energia solar fotovoltaica, sistemas conectados à rede e microgeração distribuída.

Observou-se que o custo total da implantação do projeto dos módulos fotovoltaicos é bem elevado. Isto ocorre principalmente devido ao custo das placas fotovoltaicos que utilizam células de silício policristalino que, por mais que possuam custo inferior em relação as placas de silício monocristalinos, ainda possuem custos elevados devido as taxas e custos de importação. A demanda de uma central de climatização também é elevada, o que implica na necessidade de vários módulos fotovoltaicos para suprir este sistema.

É importante salientar ainda que as placas selecionadas para este projeto utilizam silício policristalino, mesmo esta tecnologia possuindo uma eficiência um pouco reduzida em altas temperaturas se comparado ao silício monocristalino. Contudo, nas placas comercializadas atualmente esta diferença é bem pequena e pode ser desconsiderada. Vale salientar ainda que placas com silício policristalino possuem custo reduzido devido ao método de tratamento do silício para obter esta estrutura, o que torna a aplicação desta tecnologia interessante para este projeto (já que se faz necessárias muitas placas para a energia demandada).

Outro custo elevado encontrado no desenvolvimento seria o armazenamento da energia gerada durante o dia em baterias, pois o custo unitário de cada bateria de chumbo-ácido é bem elevado (para as baterias de 195 Ah, utilizados neste trabalho, custa em média R\$3,500). Devido a isto, optou-se por tornar o sistema fotovoltaico desenvolvido em um sistema conectado à rede. Neste caso, então, será utilizado um medidor bidirecional em que a energia gerada, em vez de armazenada em baterias, é injetada na rede elétrica e gerando um crédito com a concessionária, podendo utiliza-la posteriormente (no caso, será utilizada no período noturno, onde não há luz solar para gerar energia).

Tornar este sistema fotovoltaico em conectado à rede é uma boa solução também pois adiciona confiabilidade ao sistema, algo necessário quando se utiliza eletrodomésticos com

tamanha demanda de potência. Esta confiabilidade garante a não interrupção do fornecimento de energia elétrica ao sistema.

Levantou-se também a possibilidade de implantação de telhas fotovoltaicas em vez de painéis fotovoltaicos como normalmente é feito. Contudo, observou-se que esta tecnologia ainda está em estágios muito iniciais de desenvolvimento e permanece restrito a poucos países, como Itália. Estas telhas possuem ainda um custo muito superior que o valor dos módulos utilizados neste trabalho e possuem uma eficiência inferior, o que impossibilita a aplicação neste projeto.

Outra possibilidade observada é a implantação de painéis fotovoltaicos otimizado com um sistema de guia, permitindo um aumento de 10% na energia elétrica gerada. Contudo, os módulos dimensionados neste projeto serão instalados no telhado da residência em questão, o que torna mais difícil a aplicação desta tecnologia.

A utilização da tecnologia multi-split da Fujitsu foi fundamental no desenvolvimento deste projeto, pois esta que permitiu a economia de 56,7% em relação a tecnologia tradicional (com uma unidade externa para cada unidade interna). A utilização do modelo tradicional acarretaria em um aumento significativo no número de placas e no valor total do projeto.

A economia por mês deste projeto foi calculada utilizando o simulador de consumo de energia elétrica, disponível no site da Furnas. Tem-se que a energia demandada por esta central de climatização gera um custo mensal estimado em R\$998,40.

Sabe-se que o custo da energia solar no Brasil é em média 40% mais elevada que as demais fontes de energia em uso no país. Isso ocorre principalmente devido à falta de pesquisa e desenvolvimento na área de energia solar no país, além das altas taxas de imposto tanto para importação de uma tecnologia estrangeira quanto para a produção nacional (a CELIC, por exemplo). Faz-se necessário, então, um maior incentivo do governo na utilização destes módulos, pois o país tem apenas a ganhar com uma maior diversificação da matriz energética.

Referências Bibliográficas

América do Sol (2011). *Energia Fotovoltaica*. Disponível em: www.americadosol.org. Acesso em: 19 de fevereiro de 2017 as 20:36.

Araújo, P. G. S. (2016). *Viabilidade da Geração Solar de uma Residência Típica*. Trabalho de Conclusão de Curso, Universidade Federal de Campina Grande, Paraíba.

Baterias Seladas Estacionárias Chumbo-Acido Reguladas por Válvulas (VRLA). Manual Técnico. Acessado em 20 de março as 12:24.

Bazar 339. *Caixa de Passagem PVC Embutir 20x20 CPT 20*. Disponível em: http://www.bazar339.com.br/exibe_produto.asp?cod_produto=1357&area=Caixa%20de%20Passagem%20Pvc%20Embutir%2020x20%20CPT%2020%20Tigre. Acessado em 28 de março de 2017 as 23:20.

Câmara, C. F. (2011). *Sistemas Fotovoltaicos Conectados Á Rede Elétrica*. Disponível em: <http://www.solenerg.com.br/files/monografia-Carlos-Fernando-Camara.pdf>. Acessado em 10 de fevereiro de 2017 as 11:15.

Carvalho, P. S., Mesquita, P.P., & Rocio, M. A. (2014). *A rota metalúrgica de produção de silício grau solar: uma oportunidade para a indústria brasileira?* São Paulo: BNDS

Casa & Construção. *Disjuntor Din Curva C 40ª Monopolar – Siemens*. Disponível em: <http://www.cec.com.br/material-eletrico/disjuntores-e-armacoes/unipolar/disjuntor-din-curva-c-40a-monopolar-ref-5sx1-140-7?produto=1047413>. Acessado em 28 de Março as 22:45.

CEMIG. *Tabelas ND-51: Potência Médias de Aparelhos Eletrodomésticos*. Disponível em: http://www.ufjf.br/ivo_junior/files/2010/12/1%C2%AA-Tabelas-ND51.pdf. Acessado em 28 de março de 2017 as 12:59.

Cigame. *Cabo de Cobre PVC Flexível*. Disponível em: <http://www.cigame.com.br/>. Acessado em 28 de março de 2017 as 23:45.

CiviSolar. *SMA Sunny Tripower*. Disponível em: <https://www.civisolar.com/product/sma-sunny-tripower-15kw-tl-1000-vdc-480-277-vac-wye-transformerless-inverter-w-swdm-us-10-st>. Acessado em 20 de março de 2017 as 23:50.

CRESESB-CEPEL. (s.d.). *Energia solar - princípios e aplicações*. CRESESB. Fonte: www.cresesb.cepel.br

Energia Total. *Painel Solar Fotovoltaico Policristalino 260W*. Disponível em : <https://www.energiatotal.com.br/br/painel-solar-fotovoltaico-policristalino-260w>. Acessado em 28 de março de 2017 as 23:25.

Energisa (2017). *Taxas, prazos e normas: tipos de tarifa*. Nota técnica, Energisa, Paraíba. Fonte: <http://www.energisa.com.br/Paginas/informacoes/taxas-prazos-e-normas/tipos-tarifas.aspx>. Acesso 2 de março de 2017.

EPE. (2016). *Energia Renovável: Hidráulica, Biomassa, Eólica, Solar, Oceânica*. Nota técnica, EPE, Rio de Janeiro. Fonte: www.epe.gov.br

Figueiredo, C.; Maia, D.L.; Souza, D.C; Duarte, E.L.; Ventura, L.C.F.; Souza, R.A.; Barbosa, R.M.; Costa, T.S (2016). *Energia Solar: Ativa e Passiva*. Disponível em: http://www.academia.edu/28572847/ENERGIA_SOLAR_ATIVA_E_PASSIVA. Acessado em 31 de março de 2017 as 14:25.

Ghensev, A. (2006). *Materiais e processos de fabricação de células fotovoltaicas*. Dissertação, Universidade Federal de Lavras.

Luque, A., & Hegedus, S. (2011). *Handbook of photovoltaic Science and engineering*. (2º edição). Wiley.

Mendonça, Y. M. (2016). *Eficiência Fotovoltaica: um Estudo da Evolução*. Trabalho de Conclusão de Curso, Universidade Federal de Campina Grande, Paraíba.

Monteiro, M. C. (2016). *Células Fotovoltaicas de Silício Cristalino: Tecnologias e Processos de Fabricação*. Trabalho de Conclusão de Curso, Universidade Federal de Campina Grande, Paraíba.

NeoSolar. *DPS Schneider PRD-DCr 600PV Fotovoltaico*. Disponível em: <https://www.neosolar.com.br/loja/dps-schneider-prd-dc40r-600pv-fotovoltaico.html>. Acessados em 28 de março de 2017 as 23:02.

Oliveira, T.S. (2008). *Refino de silício por solidificação direcional*. Dissertação. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo.

Pereira, L. M. N. (2008). *Produção e Caracterização de Silício Policristalino e Sua Aplicação a TFTs*. Universidade Nova de Lisboa. Lisboa.

Pinho, J. T., & Galdinho, M. A. (2014). *Manual de Engenharia para sistemas fotovoltaicos*. (CEPELCRESESB, Ed.) Rio de Janeiro.

Portal Eletricista. *Tabela de Disjuntores*. Disponível em: <http://www.portaleletricista.com.br/tabela-de-disjuntores/>. Acessado 9 de março de 2017 as 23:20.

Portal Energia. *Telhas Solares Fotovoltaicas: uma Aposta no Futuro*. Disponível em: <http://www.portal-energia.com/telhas-solares-fotovoltaicas-uma-aposta-no-futuro/>. Acessado em 21 de março as 18:23.

Portal Solar. *Célula Fotovoltaica*. Disponível em: <http://www.portalsolar.com.br/celula-fotovoltaica.html>. Acessado em 22 de fevereiro de 2017 as 16:54.

Potencial Solar – SunData. Disponível em: <http://www.cresesb.cepel.br/index.php?section=sundata>. Acesso em: 02 de março de 2017.

Resnick, R; Eisberg, R. *Física Quântica. Átomos, Moléculas, Sólidos, Núcleos e Partículas*. Rio de Janeiro: Campus, 1979. ISBN 85-7001-309-4

Ruther, R. (2004). *Edifícios Solares Fotovoltaicos: o Potencial da Geração Solar Fotovoltaica Integrada a Edificações Urbanas e Interligada à Rede Elétrica Pública no Brasil*. Florianópolis – SC. 1º edição. Editora UFSC.

Santos, P. D. F. L. *Arquitetura Solar em Cabo Verde*. Monografia (Licenciatura em Arquitetura) – Universidade Jean Piaget de Cabo Verde – 2014.

Serodio, L.M. (2009). *Estado da arte da obtenção de silício grau solar*. Monografia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

SRS Energy Solutions. *Solar Roof Tiles*. Disponível em: <http://srsenergysolutions.com/solar-roof-tiles/>. Acessado em 20 de fevereiro de 2017 as 13:22.

STA Eletrônica. *Vantagens e Limitações das Baterias Chumbo Ácido*. Disponível em: <http://www.sta-eletronica.com.br/artigos/vantagens-e-limitacoes-das-baterias-chumbo-acido>. Acessado 8 de março de 2017 as 12:40.

Tiradentes, A. A. R. (2007). *Uso da Energia Solar para Geração de Eletricidade e para Aquecimento de Água*. Universidade Federal de Lavras. Lavras – MG.

Tudor (2015). *Catalogo Técnico 2015 – 2016. Baterias Tudor*. Catalogo técnico. Disponível em: http://tudor.com.br/assets/upload/layout_catalogo_tudor_tracionarias.pdf. Acessado em 12 de março de 2017 as 23:25.

Viva Green. *Telha Cerâmica Fotovoltaicas*. Disponível em: <http://vivagreen.com.br/10mais/telha-ceramica-fotovoltaica/>. Acessado em 21 de março as 19:20.

Web Solar. *Interconexión Solar Medidor Bidireccional CFE*. Disponível em: <http://www.webosolar.com/foro/interconexion-solar-medidor-bidireccional-cfe/>. Acessado em 13 de março de 2017 as 14:14.

Wind and Sun. *SMA Tripower Inverters*. Disponível em: http://www.windandsun.co.uk/products/Inverters/SMA-Inverters/Sunny-Tripower-Inverters#.WM_qpG8rLIU. Acessado em 10 de março de 2017 as 13:25.

Anexo A – Orçamento do Projeto de Geração Solar

Item	Descrição	Quantidade	Unidade	Valor Unitário (R\$)	Subtotal (R\$)
1	Painel Solar Fotovoltaico Policristalino, 265 Wp. Modelo: CS6P-265P. Fabricante: Canadian	55	PC	749,00	41.195
2	Cabo de Cobre 4,0 mm ² com isolamento em PVC 750 V – 70°C. Cor: Vermelho. Fabricante: Atox Afumex	4	M	2,55	10,20
3	Cabo de Cobre 4,0 mm ² com isolamento em PVC 750 V – 70°C. Cor: Preto. Fabricante: Atox Afumex	4	M	2,55	10,20
4	Cabo de Cobre 2,5 mm ² com isolamento em PVC 750 V – 70°C. Cor: Preto. Fabricante: Atox Afumex	6	M	1,33	7,98
5	Cabo de Cobre 4,0 mm ² com isolamento em PVC 750 V – 70°C. Cor: Azul. Fabricante: Atox Afumex	6	M	2,55	15,30
6	Cabo de Cobre 4,0 mm ² com isolamento em PVC 750 V – 70°C. Cor: Verde. Fabricante: Atox Afumex	6	M	2,55	15,30
7	Caixa de passagem em PVC. Dimensões 20x20 cm. Fabricante: Tigre.	1	PC	31,50	31,50
8	Dispositivo de Proteção Contra Surtos (DPS) fotovoltaico – Modelo: PRD-DC40rb 600PV. Fabricante: Schneider	1	PC	549,00	549,00
9	Disjuntor CC – 40A – Série: C60PV-DC. Fabricante: Schneider	1	PC	350,00	350,00
10	Disjuntor monopolar 40 ^a . Referência: 5SX 140-7. Fabricante: Siemens.	1	PC	10,90	10,90
11	Tomada Universal 2P+T – 10 A/250 V	1	PC	5,00	5,00
12	Inversor SMA Sunny Tripower 15kW	1	PC	12.073,10	12.073,10
13	Conector	3	PC	0,75	2,25
14	Placa de Advertência – Dimensões: 25x18 cm – Padrão Especificado pela Energisa	1	PC	50,00	50,00
15	Medidor Bidirecional – Padrão Energisa	1	PC	150,00	150,00
Total do material (R\$)					54.475,73
Mão de Obra Estimada (R\$)					1.000
Total (R\$)					55.475,73