

UNIEVANGÉLICA

CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

FABRÍCIO FERNANDES DE MORAES

JOÃO PAULO GOMES SILVA

ESTUDO DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA DE PAINÉIS

FOTOVOLTAICOS FIXOS E MÓVEIS

ANÁPOLIS / GO

2018

FABRÍCIO FERNANDES DE MORAES
JOÃO PAULO GOMES SILVA

ESTUDO DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA DE PAINÉIS
FOTOVOLTAICOS FIXOS E MÓVEIS

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO SUBMETIDO AO
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL DA UNIEVANGÉLICA

ORIENTADOR: FABRICIO NASCIMENTO SILVA

ANÁPOLIS / GO: 2018

FICHA CATALOGRÁFICA

MORAES, FABRÍCIO FERNANDES DE / SILVA, JOÃO PAULO GOMES

Estudo de eficiência energética de painéis fotovoltaicos fixos e móveis

91P, 297 mm (ENC/UNI, Bacharel, Engenharia Civil, 2018).

TCC - UniEvangélica

Curso de Engenharia Civil.

1. Funcionamento da célula fotovoltaica 2. Energia solar térmica
3. Célula de silício cristalizado 4. Célula Telureto De Cádmi (CDTE)
I. ENC/UNI II. Título (Série)

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

MORAES, Fabrício Fernandes de; SILVA, João Paulo. Estudo de eficiência energética de painéis fotovoltaicos fixos e móveis. TCC, Curso de Engenharia Civil, UniEvangélica, Anápolis, GO, 91p. 2018.

CESSÃO DE DIREITOS

NOME DO AUTOR: Fabrício Fernandes de Moraes

João Paulo Gomes Silva

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO DE TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO: estudo de eficiência energética de painéis fotovoltaicos fixos e móveis.

GRAU: Bacharel em Engenharia Civil

ANO: 2018

É concedida à UniEvangélica a permissão para reproduzir cópias deste TCC e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte deste TCC pode ser reproduzida sem a autorização por escrito do autor.

Fabrício Fernandes de Moraes
E-mail: fabricioffm@hotmail.com

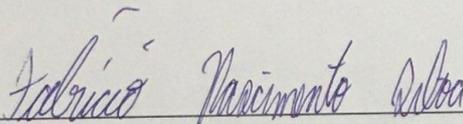
João Paulo Gomes Silva
João Paulo Gomes Silva
E-mail: joao_paulosilva_@hotmail.com

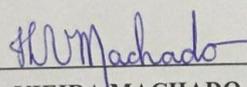
FABRÍCIO FERNANDES DE MORAES
JOÃO PAULO GOMES SILVA

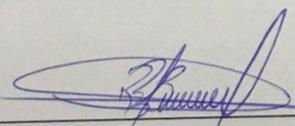
ESTUDO DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA DE PAINÉIS
FOTOVOLTAICOS FIXOS E MÓVEIS

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO SUBMETIDO AO CURSO DE
ENGENHARIA CIVIL DA UNIEVANGÉLICA COMO PARTE DOS REQUISITOS
NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE BACHAREL

APROVADO POR:


FABRÍCIO NASCIMENTO SILVA, Mestre (UniEvangélica)
(ORIENTADOR)


HAYDÉE LISBOA VIEIRA MACHADO, Mestra (UniEvangélica)
(EXAMINADOR INTERNO)


RODOLFO RODRIGUES DE SOUSA BORGES, Especialista (UniEvangélica)
(EXAMINADOR INTERNO)

DATA: ANÁPOLIS/GO, 29 de NOVEMBRO de 2018.

AGRADECIMENTOS

A nossa família, pela confiança e motivação.

Aos amigos e colegas, pela força em relação a esta jornada.

Aos professores e colegas de Curso, pois juntos trilhamos uma etapa importante de nossas vidas.

A todos que, com boa intenção, colaboraram para a realização e finalização deste trabalho.

RESUMO

O conjunto de alteração da energia solar em elétrica, mediante placas fotovoltaicas, é um meio imediato de amarrar energia elétrica pelo sol. As placas fotovoltaicas aproveitam a radiação do sol e a utilizam como fonte de energia natural, sendo esta a mais limpa e profusa, passível de se transformar em energia elétrica. Na atualidade, os componentes fotovoltaicos que existem, dispõem de capacidade de alteração de energia solar em elétrica muito abaixo do previsto, sendo este um fato representativo no sentido de não haver ainda tecnologias que possibilitem a melhoria de sua capacidade. Essa pesquisa se justifica pelo fato de que há um crescimento do consumo energético mundial, impulsionado pelo avanço tecnológico e o desenvolvimento humano, em conjunto com o declínio na produção de combustíveis fósseis, têm sido fatores incentivadores à pesquisa e desenvolvimento de fontes alternativas de energia, menos poluentes, modificáveis e que possibilitem produzir menor impacto ambiental. Para essa revisão foi realizada uma pesquisa qualitativa/descritiva o que nos possibilitou utilizar um conjunto de metodologias de diversas referências e estudos. Apesar das vantagens apresentadas, os sistemas fotovoltaicos de criação de energia elétrica encontram dificuldades para se popularizar. Dois aspectos impedem seu uso na atualidade, por exemplo, o alto gasto para produção e lucro insignificante diante a fontes de energia alternativa distintas. Ao buscar crescimento no desempenho de sistemas fotovoltaicos, utilizam-se rastreadores solares no desenvolvimento das pesquisas. São estes dispositivos que facilitam permanecer os painéis constantemente em direção ao sol, criando sempre uma superfície perpendicular aos raios solares. Deste modo o presente trabalho servirá como base para pesquisa de outros estudos, tendo assim uma grande significância dentro da engenharia e outros campos associados.

PALAVRAS-CHAVE:

Energia solar. Painel fotovoltaico. Rastreamento solar.

ABSTRACT

The solar energy transformation into electrical system through photovoltaic plates, is an instant way to purchase electricity through the sun. The photovoltaic plates are used of solar radiation as a source of natural energy, that has as its clean and abundant, turning it into electricity. Currently, existing photovoltaic elements, have their solar energy transformation into electrical capacity and the lower than expected, this is characteristic fact, with no further technologies that can improve their ability. This research is justified by the fact that there is a growth in world energy consumption, driven by technological advancement and human development, together with the decline in the production of fossil fuels, have fostered factors to research and development of alternative energy sources, less polluting, renewable and produce little environmental impact. For this review a qualitative / descriptive research which enabled us to use a set of methodologies from various references and studies was held. Despite the advantages presented, photovoltaic electricity generation are barriers to its popularization. Two factors limit their use today, namely, the high production costs and low yields compared to other alternative sources of energy. In the search for increased efficiency of photovoltaic systems, research has been developed with the use of solar trackers. These devices allow to keep the panels always directed toward the sun so as to keep always perpendicular to the sun surface. Thus this study will serve as a basis for research from other studies, so it has a great significance in the electrical engineering and other related fields.

KEYWORDS:

Solar energy. Photovoltaic panel. Solar tracking.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Espectro EletromagnéticoC.....	24
Figura 2 - Angulo de Incidência x Massa de Ar.....	25
Figura 3 - Irradiação Solar Total	26
Figura 4 - Efeito Fotovoltaico	27
Figura 5 - Representação dos eventos- chave no desenvolvimento das células fotovoltaicas.	30
Figura 6 - Fontes de geração de eletricidade no Brasil no ano de 2009.....	33
Figura 7 - Mapa brasileiro de irradiação solar em média anual.	34
Figura 8 - Medias mensais e anuais da radiação solar média diária incidente sobre um coletor inclinado de 10°N na região de Rio Branco. A média anual de cada série está mostrada por um símbolo sobre o eixo vertical no “mês zero”. Cada série proveniente de um banco de dados diferente.....	35
Figura 9 - Medias mensais e anuais da radiação solar média diária incidente sobre um coletor inclinado de 10°N na região de Manaus. A média anual de cada série está mostrada por um símbolo sobre o eixo vertical no “mês zero”. Cada série proveniente de um banco de dados diferente.....	35
Figura 10 - Representação de uma célula fotovoltaica silício cristalizado.....	39
Figura 11 - Célula fotovoltaica silício monocristalino.....	40
Figura 12 - Célula fotovoltaica silício Policristalino.....	41
Figura 13 - Célula fotovoltaica silício Amorfo..	42
Figura 14 - Célula Fotovoltaica Disseleneto de Cobre e Índio (CIS).....	44
Figura 15 - Modulo de Telureto de Cádmio (CdTe)..	45
Figura 16 - Sistema Tipo Polar de Eixo Único Rastreador..	48
Figura 17 - Sistema Tipo Horizontal de Eixo Único Rastreador.....	49
Figura 18 - Sistema Tipo Tubular de Eixo Único.	49
Figura 19 - Sistema Eixo Duplo.	50
Figura 20 - Geração de Energia Mensal – Athenas	53
Figura 21 - Geração de Energia Mensal – Stuttgart	54
Figura 22 - Geração de Energia Mensal – Aberdeen.....	54

LISTA DE TABELA

Tabela 1 - Tabela de Eficiência de tipos de Células Fotovoltáicas	45
---	----

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	19
1.1 JUSTIFICATIVA	19
1.2 OBJETIVOS	20
1.2.1 Objetivo Geral	20
1.2.2 Objetivos Específicos.....	20
1.3 METODOLOGIA.....	20
1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO	20
2 CARACTERÍSTICAS FISÍCAS.....	22
2.1 ABSORBÂNCIA	22
2.2 EMITÂNCIA	22
2.3 SUPERFÍCIES SELETIVAS	23
3 RADIAÇÃO SOLAR	24
4 FUNCIONAMENTO DA CÉLULA FOTOVOLTÁICA	27
4.1 HISTÓRICO DA CÉLULA FOTOVOLTÁICA	28
4.2 ENERGIA SOLAR NO BRASIL	31
4.3 IRRADIAÇÃO SOLAR NO BRASIL.....	32
4.4 COMPARATIVO ENTRE DADOS DE IRRADIAÇÃO SOLAR.....	35
4.5 ENERGIA SOLAR TÉRMICA	36
5 CÉLULAS FOTOVOLTÁICAS	38
5.1 TIPOS DE CÉLULAS FOTOVOLTÁICAS	38
5.2 CÉLULA DE SILÍCIO CRISTALIZADO.....	38
5.3 CÉLULAS DE SILÍCIO MONOCRISTALINO	39
5.4. CÉLULA DE SILÍCIO POLICRISTALINO	40
5.5 CÉLULAS DE PELÍCULA FINA	41
5.6 CÉLULA DE SILÍCIO AMORFO.....	42
5.7 CÉLULA DISSELENETO DE COBRE E ÍNDIO (CIS).....	43
5.8 CÉLULA TELURETO DE CÁDMIO (CDTE)	44
5.9 TABELA DE EFICIÊNCIA DE CÉLULAS FOTOVOLTÁICAS.....	45
6 TIPOS DE PAINÉIS SOLARES.....	47
6.1. SISTEMA FIXO	47
6.2. SISTEMA DE EIXO ÚNICO POLAR, HORIZONTAL E TUBULAR.....	47
6.3. SISTEMA DE EIXO DUPLO.....	50

7 COMPONENTES DO SISTEMA FOTOVOLTAICO.....	51
8 ANÁLISE ENTRE SISTEMAS FIXOS E MÓVEIS	52
CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	56
REFERÊNCIAS BIBLIOGRAFICAS	57

1 INTRODUÇÃO

Nos últimos anos tem-se assistido a uma maior demanda pelo uso de energia e no plano nacional o aumento dos períodos de estiagem, desta forma faz-se necessário uma busca por novos meios de geração de energia.

A Energia Solar é um caminho para gerar energia elétrica, juntamente com a Eólica, Biomassa e outras formas de energias renováveis, porém o custo de implantação versus a geração de energia ainda a torna dispendiosa em relação as demais, várias formas de melhorar seu custo benefício têm sido estudadas ao longo dos últimos anos.

A maior parte das linhas de pesquisa em relação aos painéis fotovoltaicos concentram-se na melhor dopagem dos painéis, melhorando sua capacidade de converter Energia Solar em Energia Elétrica, entretanto há pesquisas em relação as práticas de instalação que potencializam a geração de energia.

O uso de painéis móveis pode ser mais eficiente que os painéis fixos, uma vez que aproveitam o espaço para instalação e maximizam os períodos solares ao decorrer do dia.

Apesar das vantagens apresentadas, os sistemas fotovoltaicos de geração de energia elétrica deparam-se com impedimentos para que se tornem populares. Atualmente, são dois os elementos que balizam seu uso, por exemplo, o alto gasto para produção e lucro insignificante diante a fontes de energia alternativa distintas.

1.1 JUSTIFICATIVA

Essa pesquisa se justifica pelo fato de que há um aumento do gasto de energia no mundo, catalisado pelo desenvolvimento tecnológico e o humano, em conjunto com o declínio na produção de combustíveis fósseis, têm sido fatores incentivadores à pesquisa e desenvolvimento de fontes alternativas de energia, menos poluentes, modificáveis e que gerem menos impacto ambiental.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo geral

Demonstrar que técnicas de instalação de painéis fotovoltaicos fixos e móveis baseados em sistemas com eixos móveis possuem maior rendimento e aproveitamento da energia solar ao longo do dia.

1.2.2 Objetivos específicos

- Realizar um estudo bibliográfico da entrega de energia de um sistema fotovoltaico;
- Analisar a aplicabilidade destes sistemas, ressaltando as vantagens e desvantagens;
- Verificar a geração e consumo dos sistemas.

1.3 METODOLOGIA

O trabalho desenvolvido seguindo os preceitos de estudo exploratório por meio de uma pesquisa bibliográfica que segundo Gil (2005), “é desenvolvido a partir do material já elaborado, constituído de livros e artigos científicos.”

Para essa revisão foi realizada uma pesquisa qualitativa/descritiva o que nos possibilitou utilizar um conjunto de metodologias de diversas referências e estudos.

Foram feitas buscas eletrônicas em 2018, baseando-se em registros disponíveis de pesquisadores anteriores, o que nos forneceu dados teóricos devidamente registrados, através do acesso aos sites de pesquisa de artigos científicos, além de livros, resoluções e portarias relacionados ao assunto.

1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO

O presente trabalho traz a seguinte abordagem, um capítulo sobre as características física, destacando a absorbância, emitância e superfície seletiva. O seguinte capítulo abordará sobre a radiação solar, em seguida sobre como funcionam as células fotovoltaicas. O próximo capítulo abordará acerca do histórico, em complementação a esse capítulo temos o de células

fotovoltaicas no qual aborda os tipos de células. E por fim os tipos de painéis solares, componentes do sistema fotovoltaico e análise entre os sistemas fixos e moveis. Destaca-se no fim as considerações finais, que é uma análise de todo referencial teórico levantando.

2 CARACTERÍSTICAS FÍSICAS

2.1 ABSORBÂNCIA

A absorvência ou absorvência de um corpo refere-se à capacidade deste absorver radiação de determinada frequência. A absorção dependerá do material e da constituição do corpo. A absorvência pode ser representada por α que será a relação entre a radiação absorvida e a radiação incidente (MARTÍN, 1994):

$$\alpha = \frac{\text{Radiação Absorvida}}{\text{Radiação Incidente}}$$

Os valores de α estarão compreendidos entre 0 e 1, onde $\alpha = 0$ indicará que este corpo não absorve nenhuma radiação, ou seja, comporta-se como um espelho perfeito; e $\alpha = 1$ indicará que este corpo absorve toda a radiação incidente.

Isto é um Corpo Negro perfeito assim como proposto pela Lei de Planck (MARTÍN, 1994).

Na prática não há materiais que se comportem como espelhos ou Corpos Negros perfeitos, com valores de α de 0,03 para superfícies espelhadas ou de 0,97 para materiais de cor negra. Desta forma, quanto mais escura a cor maior será a absorção de radiação e conseqüentemente maior a Absorvência deste corpo (MARTÍN, 1994).

Quanto maior a absorvência de um corpo mais alta será sua temperatura quando este for exposto às radiações solares, conseqüentemente a confecção de painéis solares na cor preta irá torna-los mais eficientes.

2.2 EMITÂNCIA

A emitância de um corpo é caracterizada pela relação entre a sua radiação emitida e a radiação emitida por um corpo negro perfeito a mesma temperatura (MARTÍN, 1994):

$$E = \frac{\text{Radiação Emitida}}{\text{Radiação de Corpo Negro}}$$

A variação da emitância é análoga a da absorbância, ou seja, varia entre 0 e 1, esta variação diz respeito a capacidade de esfriamento por radiação de um corpo, se dois corpos idênticos forem deixados em repouso, resfriará primeiro o que possuir maior valor de Emitância. Superfícies lisas e polidas possuem baixos valores de emitância em quanto nas rugosas e imperfeitas estes valores são mais altos (MARTÍN, 1994).

2.3 SUPERFÍCIES SELETIVAS

Para as células fotovoltaicas a superfície ideal seria onde a absorbância fosse alta e a emitância baixa, ou seja, sob a presença de radiação solar a superfície aqueceria satisfatoriamente e perderia pouco calor para o ambiente devido à baixa emitância, a estas dá-se o nome de superfícies seletivas. A razão entre a absorbância e a emitância chama-se Seletividade (MARTÍN, 1994):

3

$$\textit{Seletividade} = \frac{\alpha}{E}$$

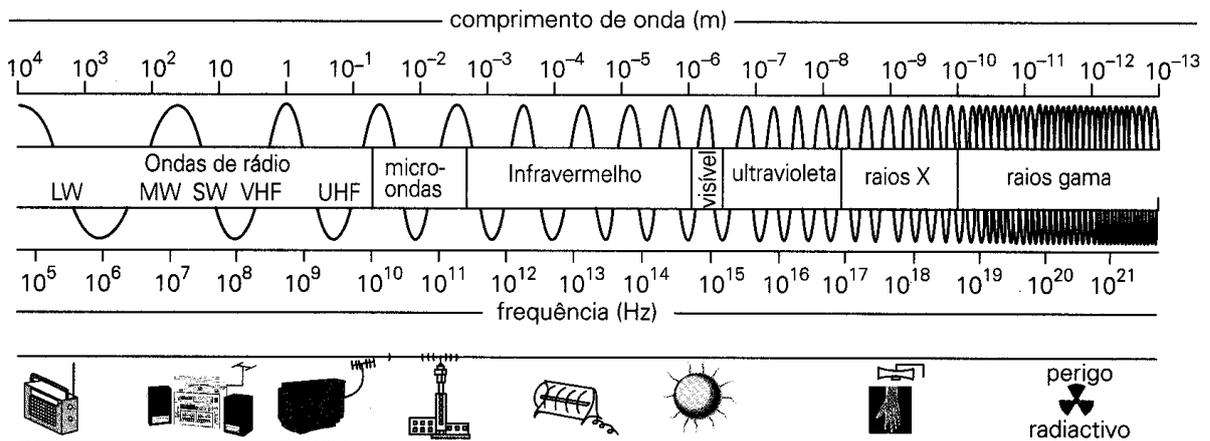
As superfícies comuns apresentam os valores de α e de E próximos de forma que sua Seletividade é próxima a 1, diz-se então que estas são Não Seletivas (MARTÍN, 1994).

As superfícies Seletivas são em sua maioria formadas por placas metálicas de materiais polidos, de forma a garantir baixa Emitância, e de cor escura, conseguida através de processos químicos ou de tintas especiais, garantindo assim alta absorbância. Com o passar do tempo a Seletividade de uma superfície diminui devido às variações nos valores de α e E causados pelas intempéries que estas são expostas, tais como formação de rugosidades sobre a superfície e a descoloração da mesma, desta forma a eficiência de uma célula fotovoltaica varia com o tempo (MARTÍN, 1994).

3 RADIAÇÃO SOLAR

A radiação eletromagnética é a maneira que a energia solar alcança a Terra, cerca de 97% desta radiação está entre 0,3 e 3,0 μm gerando anualmente aproximadamente $1,5125 \times 10^{18}$ KWh de energia (Figura 1). A efeito de comparação segundo Lopez a energia solar incidente sobre a terra em apenas 1 dia equivale a toda a energia consumida no mundo por 27 anos. Esta energia é produzida no interior do sol através de reações de fusão nuclear, entre átomos de Hidrogênio, que por sua vez as liberam em grande quantidade, ao chegar à superfície da estrela, chamada de fotosfera, esta viaja por cerca de 8 minutos até a atmosfera Terrestre através de seus portadores de energia chamados Fótons (FADIGAS, 2012).

Figura 1 – Espectro Eletromagnético



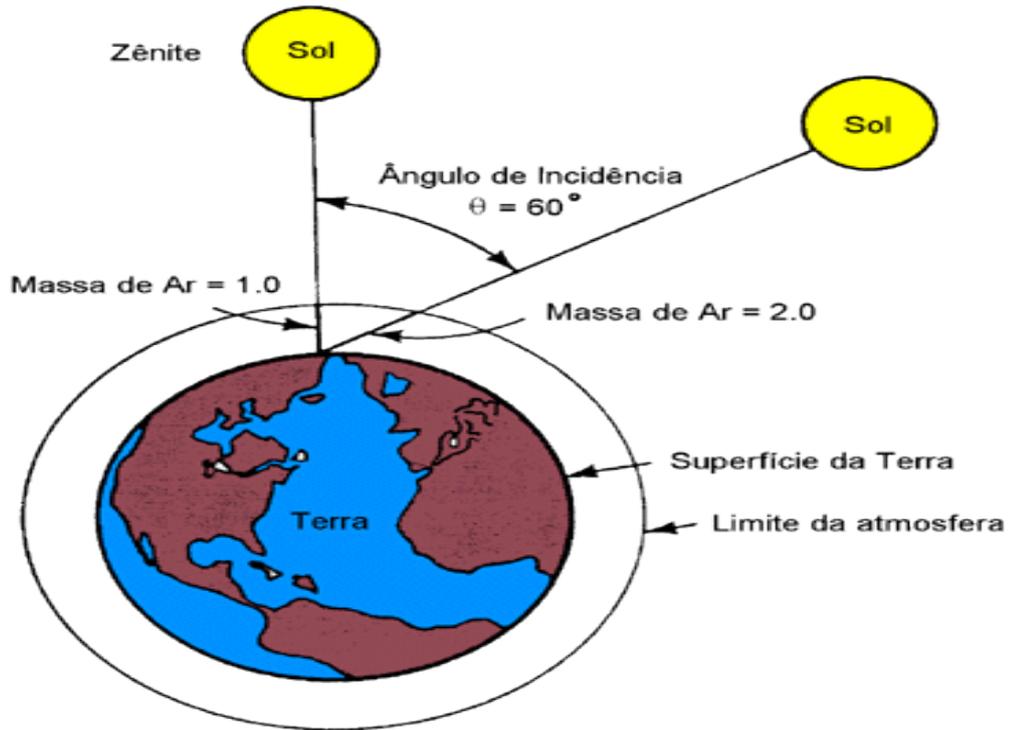
Fonte: (FADIGAS, 2012)

Ao atingir a atmosfera a radiação solar possui uma intensidade de aproximadamente $1,3 \text{ KW}/\text{M}^2$, e será consideravelmente reduzida devido a fenômenos de reflexões, dispersões e absorções. A própria atmosfera comporta-se como um filtro, a variação dos valores de redução da intensidade solar dependerá da localização geográfica e de variações climáticas no local, desta forma as características estocásticas desta redução nos permitem chegar apenas a valores estatísticos baseados na incidência solar ao longo de um período, não sendo possíveis valores absolutos desta intensidade (FADIGAS, 2012).

A espessura da Atmosfera também influenciara na intensidade de radiação solar, esta espessura e medida usando-se através do índice de Massa de Ar (MA). Quanto mais próximo de 90° for o ângulo de incidência solar (Figura 2) sobre as superfícies, menores serão os efeitos da camada atmosférica. Fatores como poluição, chuva e partículas suspensas também

influenciam nos espalhamentos, por dispersão Rayleigh e ou absorção Mie, devido ao tamanho pequeno da onda de radiação solar (0,3 a 3,0 μm). Sendo assim, a intensão da radiação sobre a superfície gira em torno de 1 KW/M^2 (FADIGAS, 2012).

Figura 2 - Angulo de Incidência x Massa de Ar

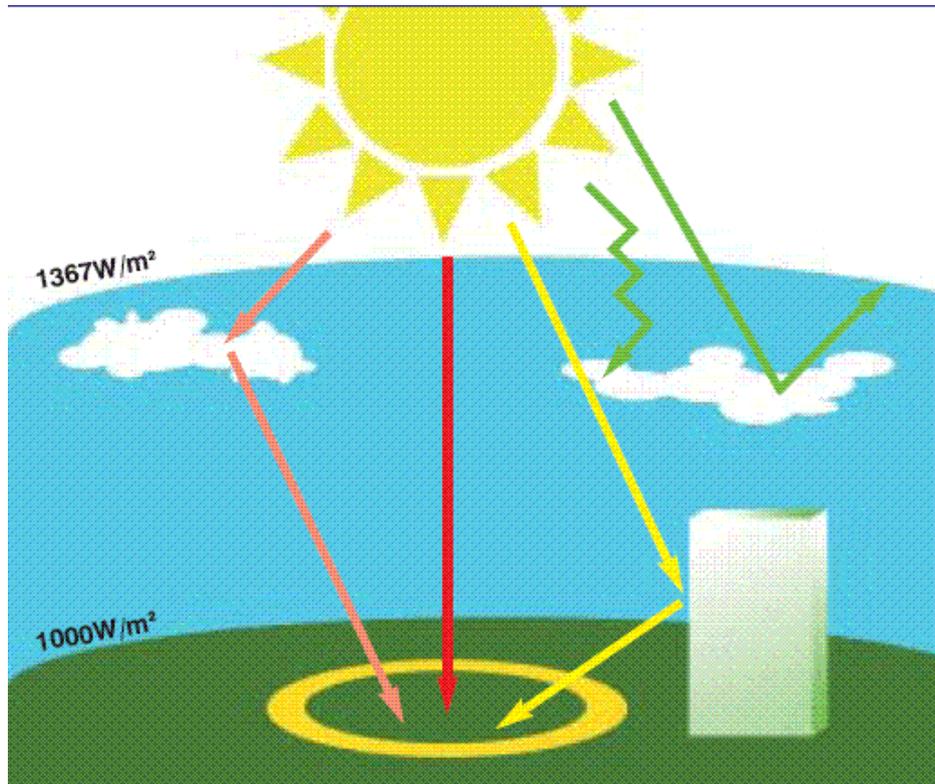


Fonte: (FADIGAS, 2012)

A radiação recebida por uma superfície é formada por três componentes:

- Radiação Direta – origina-se diretamente do sol,
- Radiação Difusa – origina-se através de reflexões atmosféricas,
- Radiação de Albedo – origina-se das reflexões em terra (Prédios, Árvores, Automóveis, etc.).

A soma destas componentes recebe o nome de Irradiação Solar Total (FADIGAS, 2012). Veja Figura 3.

Figura 3 - Irradiação Solar Total

Fonte: (FADIGAS, 2012)

A maior incidência de radiação solar acontece entre duas e três horas antes e depois do meio-dia solar, que corresponde à incidência dos raios solares na direção Norte-Sul no meridiano local, este varia ao longo do ano não sendo correspondente ao horário 12:00H (FADIGAS, 2012).

4 FUNCIONAMENTO DA CÉLULA FOTOVOLTAICA

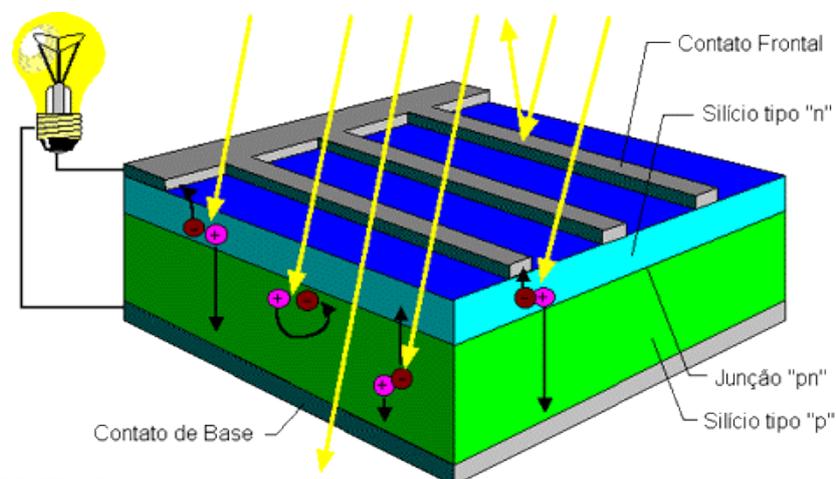
Segundo Pinho et al. (2014) há ferramentas na natureza que são classificadas como semicondutores, caracterizando-se por possuírem banda de valência plenamente ocupada por elétrons e uma banda de condução totalmente vazia em 0 K (Kelvin), temperatura na qual se comportam como isolantes.

A separação das bandas de energia recebe o nome de Gap e é representado por E_g , nos semicondutores possuem valores da ordem de 3eV o que os difere dos isolantes que possuem valores maiores (PINHO et al., 2014). Devido a estas bandas de energia os materiais semicondutores podem ter sua condutividade aumentada com o aumento de temperatura, devido à excitação térmica dos elétrons na camada de valência para a camada de condução, deixando desta forma as lacunas que são os portadores positivos. Neste cenário a qualquer temperatura acima de 0 K haverá elétrons na banda de condução (PINHO et al., 2014).

Quando os fótons incidentes possuem E_g superior ao Gap os elétrons preenchem os níveis de energia vagos a partir da banda de condução, esta é a propriedade fundamental para a construção de células fotovoltaicas (PINHO et al., 2014).

A foto geração dos elétrons e das lacunas movem-se ao longo do material aumentando sua condutividade elétrica, desta forma a resistência varia conforme a luminosidade incidente, no entanto para o aproveitamento de corrente e tensão é necessário aplicar um campo elétrico, de modo que ocorra a separação dos portadores de energia, esta separação é conseguida com uma junção PN (Figura 4), ou seja, através da dopagem do material semiconductor (PINHO et al., 2014).

Figura 4 - Efeito Fotovoltaico



Fonte: (PINHO ET AL., 2014)

4.1 HISTÓRICO DA CÉLULA FOTOVOLTAICA

Com a exploração das reservas esgotáveis de combustíveis fósseis e os danos causados ao meio ambiente, esses impactos apresentam circunstâncias impressionantes para os anos que virão. Neste contexto o homem assume uma crucial importância em busca de fontes alternativas de energias renováveis e não poluentes, como a solar, maremotriz e a eólica. (NASCIMENTO, 2004).

Considerada um tipo de energia pura e abundante, a energia solar que incide na Terra sempre foi escopo para realização de pesquisas. O homem através de avanços tecnológicos fez com que pudesse consegui-la de algum jeito e conservá-la. Os raios solares não transferem apenas calor a sistemas térmicos, pois possuem tamanhos de ondas diferentes, aos quais se pode gerar a energia elétrica. (PINHO et al., 2014).

Usando-se placas fotovoltaicas, obtém-se a transformação de energia solar em energia elétrica, é uma forma instantânea de adquirir energia elétrica. Como fonte de energia natural, as placas fotovoltaicas, usando o sol utilizam-se da radiação solar, limpa e abundante, transformando-a em energia elétrica. (PINHO et al., 2014).

“O efeito fotovoltaico foi observado pela primeira vez em 1839 pelo físico francês Edmund Becquerel, numa solução de selênio. Becquerel notou o aparecimento de uma tensão entre os eletrodos de solução condutora, quando esta era iluminada pela luz solar. Mais tarde, por volta do ano de 1870, o efeito fotovoltaico foi estudado em sólidos, tal como o selênio e por volta de 1880, a primeira célula fotovoltaica foi construída utilizando-se o selênio. A eficiência desta célula era na faixa de 2 %.” (BRAGA, 2008).

“Conforme BRAGA (2008), impulsionadas pelas novas descobertas da microeletrônica, pesquisas em aplicações práticas para a tecnologia fotovoltaica foram iniciadas nos Estados Unidos da América de 1950. Em 1954, o laboratório Bell produziu a primeira célula fotovoltaica de silício de junção PN. A partir de então se trabalhou na obtenção de um sistema realizável e de longa duração para sistemas de alimentação de satélites.”

“O elevado custo na sua fabricação inviabilizava sua utilização prática a não ser em aplicações especiais, como sistema autônomo de fornecimento de energia elétrica para satélites. Neste caso o custo não era um fator limitante e as características de confiabilidade e de baixo peso, tornaram as células fotovoltaicas a maneira mais conveniente e segura de gerar eletricidade no espaço.” (NASCIMENTO, 2004).

O primeiro uso comercial de células fotovoltaicas foi no espaço sideral, a partir de 1958. Esta continuou sendo a principal aplicação comercial até o início dos anos 70. (SILVA, 2006). Outro fator para aplicações diversas dessa tecnologia, inclusive complementando o que já existia, foi no ano de 1973, quando ocorreu a crise do petróleo. O governo dos Estados Unidos se sentiu atraído pela a energia solar, devido a possibilidade de esgotamento de reservas

petrolíferas. Porém o custo para produção das células fotovoltaicas era um dos fatores preocupantes se comparado com a energia por ela produzida. Para viabilidade de produção o custo significativamente era preciso reduzir. Com isso o avanço e desenvolvimento desse mercado foi lento (NASCIMENTO, 2004).

Entretanto, no ano de 1978 a produção já alcançava 1 Mwp/ano, (Megawatts por ano). Com o avanço de pesquisas de tecnologia em matérias utilizados na confecção de células, a despesa e o preço foram se reduzindo continuamente. E após quinze anos de produção já se alcançava 60 Mwp/ ano, (Megawatts por ano). (NASCIMENTO, 2004).

A indústria fotovoltaica teve o desenvolvimento acelerado na década de 90. Hoje vista a ampliação de novos horizontes para a utilização em larga escala de energia solar como uma opção de eficiência energética. Para utilização da energia solar fotovoltaica em projetos de eletrificação rural nos países em desenvolvimento, vários programas mundiais foram lançados para incentivo, com a demonstração da viabilidade técnica comercial da energia solar (NASCIMENTO, 2004).

Com o passar da crise do petróleo, empresas de petróleo deixaram a área no avanço de novas células. Porém, outros vários fatores continuaram impulsionando a indústria: o grande desenvolvimento no mercado da eletrificação rural os países subdesenvolvidos e o fortalecimento do movimento de defesa do meio ambiente. No ano de 1998, a produção esperada era por volta de 100 Mwp¹. A partir de então a indústria fotovoltaica cresceu rapidamente, principalmente nos últimos anos, atingindo vendas de 12 bilhões de Dólares, em 2005 (SILVA, 2006).

A redução de custos, dos sistemas fotovoltaicos é hoje um dos maiores problemas que o setor lida. Reduções significativas nos custos dos módulos fotovoltaicos poderão ser provocados com as novas tecnologias em desenvolvimento, principalmente com a dos filmes finos. O maior desafio com o desenvolvimento de sistemas fotovoltaicos é o de módulos autossustentados de eletrificações rural. Um grande limitante para o desenvolvimento do mercado é a baixa condição cultural e econômico de grande parte da população mundial. (NASCIMENTO, 2004).

Pelo motivo de a corroboração de suas particularidades e comportamento espacial, foram aplicadas células fotovoltaicas para fornecer energia elétrica em estações distantes de qualquer meio de telecomunicação. (NASCIMENTO, 2004).

As estimativas levam a crer que 2 milhões de pessoas, cerca de 30% da população mundial, ainda vivam em condições dependentes de outras fontes de energia como carvão ou biomassa para preparar alimentos e usando velas, pilhas, querosene e diesel para fabricação de

energia (NASCIMENTO, 2004). Os maiores ocorridos na história da evolução dos equipamentos de conversão de energia solar fotovoltaica são descritos na Figura 5, que segue abaixo:

Figura 5 - Representação dos eventos- chave no desenvolvimento das células fotovoltaicas.

1800	Descoberta do Selênio (Se) (Berzelius)
1820	Preparação do Silício (Si) (Berzelius)
1840	Efeito Fotovoltaico (Becquerel)
1860	Efeito Fotocondutivo no Se (Smith) Retificador de Ponto de Contato (Braun)
1880	Efeito Fotocondutivo no Se (Adams & Day) Célula Fotovoltaica de Se (Fritts/Uljanin)
1900	Fotosensibilidade em Cu-Cu ₂ O (Hallwachs)
1910	Efeito Fotovoltaico com Barreira de Potencial (Goldman & Brodsky)
1920	Monocristal a partir do Si Fundido (Czochralski) Retificador de Cu-Cu ₂ O (Grondahl)
1930	Célula Fotovoltaica de Cu-Cu ₂ O (Grondahl & Geiger) Teorias de Bandas em Sólidos (Strutt/Brillouin/Krönig & P) Teorias de Células com Barreiras V e H (Schottky et al)
1940	Teoria da Difusão Eletrônica (Dember) Aplicações Fotométricas (Lange) 1% de Eficiência em Células de Sulfeto de Tálio (Nix & Treptow)
1950	Crescimento de Células Fotovoltaicas com Junção (Ohl) Teoria da Junções p-n (Shockley)
1954	Célula Solar de Si (Pearson, Fuller & Chapin)
1955	Junções p-n Difundidas (Fuller)
1960	Célula Solar de CdS (Reynolds et al) Teorias de Células Solares (Piann & Roosbroeck/Prince)
1962	O "Bandgap" e a Eficiência das Células (Loferski, R. & W) Teoria da Resposta Espectral, Mecanismo de Perdas (Wolf) Efeitos de Resistência em Série (Wolf & Rauschenbach) Células de Si n/p Resistentes a Radiação (Kesperis & M.) Contatos Evaporados de Ti-Ag (BTL)
1973	Células Violeta com 15,2% de Eficiência
1976	Células de Silício Amorfo (a-Si)
1992	Células Metal-Insulator-Semiconductor (MIS) de 24% de Eficiência
1998	Células de Silício Monocristalino com Eficiência de 24,7%
1999	Potência Instalada Acumulada Atinge o Primeiro GWp
2002	Potência Instalada Acumulada Dobra em Relação a 1999
2005	Eficiência Superior a 20% para Células em Silício Policristalino
2006	Células Multijunção com Rendimentos Superiores a 34% Células de Tripla Junção Superam os 40 % de Eficiência
2008	Módulos de c-Si Dominam 87% do Mercado (John Wiley & Sons, 2011) Expansão de Módulos de Filme Fino (a-Si, CdTe e módulos CIS)
2009	Mais de 23 GWp Instalados (EPIA)
2011	Mais de 70 GWp de Potência Instalada Acumulada (EPIA, 2012)
2012	Potência Instalada Acumulada Supera 100 GWp (EPIA, 2013)

Fonte: Adaptado de (TREVELIN, 2014)

4.2 ENERGIA SOLAR NO BRASIL

O Brasil possui uma das maiores capacidades mundiais de exploração de energias renováveis, especialmente a energia solar. Ao se comparar com países da Europa, onde a tecnologia fotovoltaica é espalhada para gerar energia elétrica, o desenvolvimento da tecnologia no Brasil passa por fases de evolução e também por períodos difíceis. (PINHO et al., 2014).

“Nos anos 50, iniciou-se o desenvolvimento de módulos fotovoltaicos no Instituto Nacional de Tecnologia (INT) e no Centro Tecnológico de Aeronáutica (CTA) – hoje Centro Técnico Aeroespacial, sendo realizado, em 1958 o Primeiro Simpósio Brasileiro de Energia Solar. O início do desenvolvimento de células fotovoltaicas de silício cristalino na Universidade de São Paulo (USP) teve por base o conhecimento em microeletrônica. As atividades foram focadas no desenvolvimento de lingotes de silício monocristalino com o método Czochralski (Si-Cz), que utilizados para a fabricação de células fotovoltaicas, resultaram em dispositivos com eficiência da ordem de 12,5%.” (PINHO et al., 2014).

Na década de 1970 começou o desenvolvimento de tecnologias de filmes finos, no Instituto Militar de Engenharia (IME), na cidade do Rio de Janeiro, com auxílio de outros países. Foi elaborada uma categoria para que as células fotovoltaicas de $\text{Cu}_2\text{S}/\text{CdS}$ (sulfeto de cobre / sulfeto de cádmio) com dimensões de 5 x 5 cm fossem processadas. Com a criação de um módulo fotovoltaico de 30 x 30 cm, obteve-se uma eficiência de 5%. Inicialmente a tecnologia evoluiu para células fotovoltaicas de filmes finos CIS, só que nos dias atuais esse grupo intervém somente na tecnologia de células CdTe. (PINHO et al., 2014).

Segundo Pinho et al. (2014), foram construídas no Brasil duas fabricantes de módulos fotovoltaicos de silício cristalino no final dos anos 70 e início da década de 80. Porém, nos anos 80, por falta de incentivos vários grupos de pesquisadores apontaram a direção de seus estudos para outros escopos, fazendo com que as fabricantes reduzissem a produção ou fossem encerradas. Nos dias atuais existe somente uma fábrica para encapsulamento de módulos fotovoltaicos em atividade no Brasil (Empresa Tecnometal, localizada em Campinas).

Conforme Pinho et al. (2014), células fotovoltaicas de silício cristalino foram criadas para utilização em teste no primeiro satélite do Brasil, no início da década de 90. Nos dias atuais, no Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), que fica em São José dos Campos, SP, estão sendo testadas e usadas de tripla junção, para aplicações espaciais.

A evolução de células fotovoltaicas de CdS/CdTe e de silício amorfo hidrogenado em diversos locais de estudo, sendo alcançados resultados eficientes de ordem de 6% e 7% respectivamente teve início no final dos anos 90. Porém na década atual, células fotovoltaicas sensibilizadas por corantes e em materiais orgânicos também estão sendo desenvolvidas em

universidades e centros de pesquisa, como o Instituto de Química da Universidade de São Paulo e o laboratório de Nanotecnologia e Energia Solar da UNICAMP, com eficiências de ordem de 2%. (PINHO et al., 2014).

Foi criado em Porto Alegre RS em 2004, o Centro Brasileiro para Desenvolvimento de Energia Solar Fotovoltaica (CB-Solar), por meio de um termo de cooperação Técnico-Científica entre entidades dos governos Federal (Ministério da Ciência e Tecnologia), Estadual (Secretaria Estadual de Energia, Minas e Comunicações) e Municipal (Secretaria Municipal da Produção, Indústria e Comércio), em conjunto com a companhia Estadual de Energia Elétrica (CEEE) e a Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul (PUC-RS). (PINHO et al., 2014).

Segundo Pinho et al. (2014), no final dos anos 90 foram conectados à rede elétrica os primeiros sistemas fotovoltaicos no Brasil em concessionárias de energia elétrica, universidades e centros de pesquisa. A pioneira nesta área ao instalar um sistema fotovoltaico de 11 KWp em 1995, foi a CHESF (Companhia Hidroelétrica de São Francisco), em sua rede em Recife, PE. Outros sistemas pioneiros foram instalados na UFRGS (Porto Alegre, RS), na UFSC (Florianópolis, SC), na USP (São Paulo, SP) e no Cepel (Rio de Janeiro, RJ).

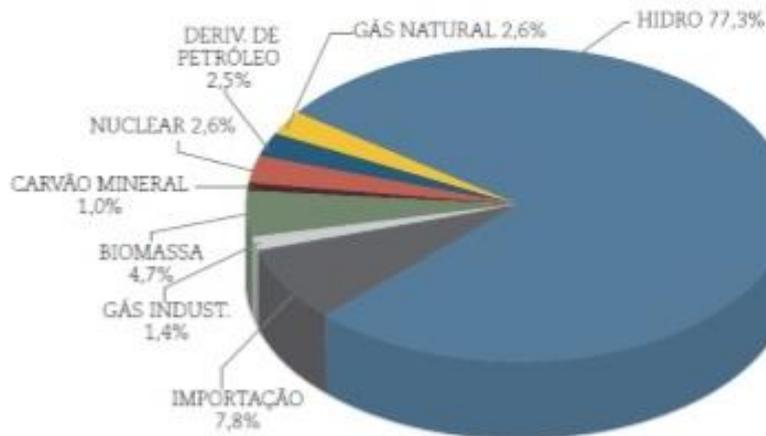
No Brasil, atualmente, a capacidade de sistemas fotovoltaicos instalados, incluindo sistemas conectados à rede e isolados, é na ordem de 30 a 40 MW, (Megawatts). Para instalação no país de indústrias de módulos fotovoltaicos, o mercado brasileiro ainda não apresenta atratividade, já que para instalação no país as indústrias de módulos fotovoltaicos precisam de um mercado anual de ordem de centenas de MWp. Sem políticas públicas de incentivo e por causa do ainda incipiente, o número de empresas domésticas instalações de sistemas fotovoltaicos é insignificante e, na maior parte, com mínima experiência, estima-se que o mercado fotovoltaico brasileiro irá crescer timidamente alguns megawatts ao ano. (PINHO et al., 2014).

4.3 IRRADIAÇÃO SOLAR NO BRASIL

Retirado do relatório feito por Travelin (2014), a situação do oferecimento de energia elétrica no Brasil, como mostra Fig. 6, demonstra forte engajamento do país em fontes renováveis de energia elétrica, com mais de 75% da energia do Brasil proveniente de hidrelétricas, e uma

porção considerável derivada da biomassa e metano biológico. Porém podemos notar a inexpressividade das fontes eólica e solar, não atingindo nem patamares de 1%.

Figura 6 - Fontes de geração de eletricidade no Brasil no ano de 2009.



Fonte: (TREVELIN, 2014)

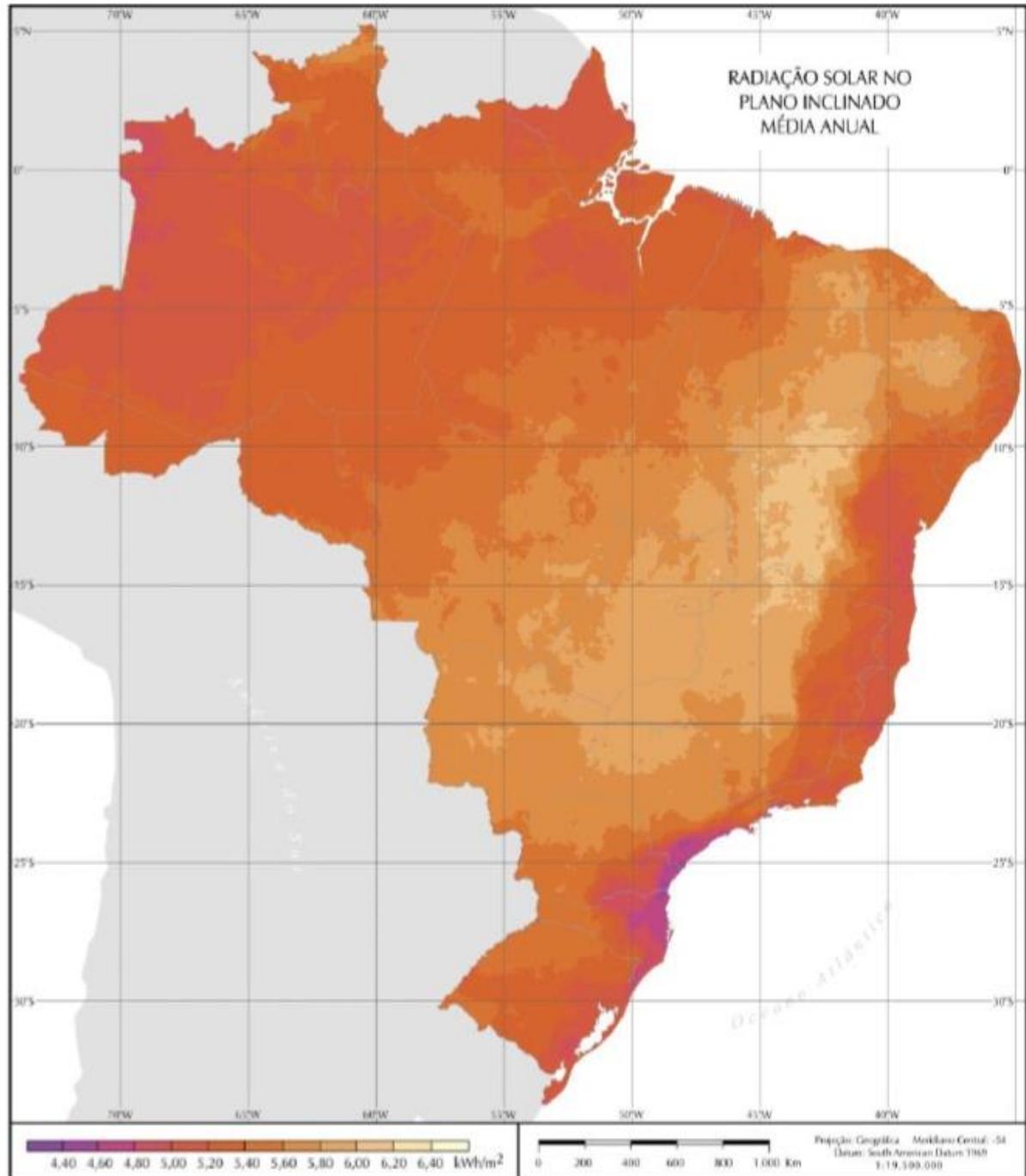
Com 92% do território localizado acima do trópico de Capricórnio, o Brasil tem a prerrogativa de ser país com clima tropical, o que o caracteriza como sendo um país com grande capacidade de produção de energia solar. Toda essa energia é lançada sob o aspecto de irradiação: 41% no espectro visível, 52% no infravermelho e 7% no ultravioleta próximo. O planeta guarda um décimo de bilionésimo dessa energia, isto é, aproximadamente 15 bilhões de MW. A parte propriamente aplicável é a radiação luminosa no nível do solo, que tem potência variável de 0 e 1.100 W/m² de superfície horizontal, em conformidade com a latitude (MARTINS, 1996).

Conforme MARTINS, 1996, o Brasil é um dos países que têm um índice relevante de radiação solar, uma média acima de 2500 horas/ano, principalmente o nordeste brasileiro. Na região do semiárido temos os melhores índices, com valores típicos de 200 a 250 W/m² de potência contínua, o que equivale entre 1752 kWh/m² a 2190kWh/m² por ano de radiação incidente. Colocando o país entre os lugares com maior capacidade de energia solar do mundo.

Para se calcular a energia elétrica que pode ser convertida por um sistema fotovoltaico fixo, necessita-se da irradiação solar incidente em um plano direcionado para o Equador e com inclinação igual a latitude local. A Figura 7 apresenta o mapa do Brasil mostrando a irradiação

média anual. Observa-se que em todo o Brasil existe o desimpedimento para apropriação da irradiação solar (PINHO et al., 2014)

Figura 7 - Mapa brasileiro de irradiação solar em média anual.



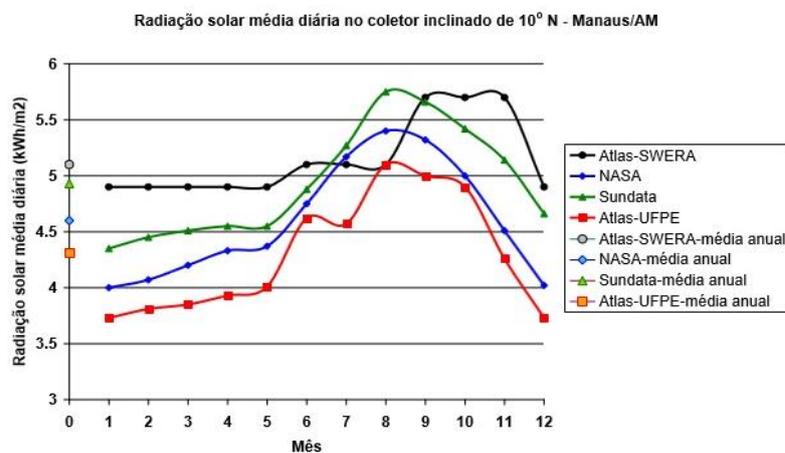
Fonte: (PINHO et al., 2014)

A maior parte da irradiação encontra-se no Norte do país.

4.4 COMPARATIVO ENTRE DADOS DE IRRADIAÇÃO SOLAR

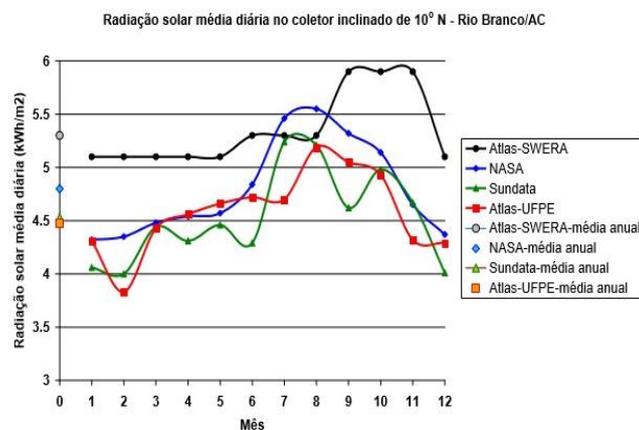
Segundo Pinho et al. (2014), as informações de irradiação solar acessíveis para o Brasil nas fontes mencionadas poderão demonstrar diferenças consideráveis. Nas imagens 8 e 9, há demonstradas médias por dia, mês e ano de incidência no tocante a um painel com inclinação de 10° sobre um plano horizontal e orientado na direção do Norte geográfico, para as localidades na região Norte do país: Rio Branco AC ($\sim 10^\circ\text{S } 68^\circ\text{W}$) e Manaus AM ($\sim 3^\circ\text{S } 60^\circ\text{W}$), segundo diversas fontes.

Figura 8 - Médias mensais e anuais da radiação solar média diária incidente sobre um coletor inclinado de 10°N na região de Rio Branco. A média anual de cada série está mostrada por um símbolo sobre o eixo vertical no “mês zero”. Cada série proveniente de um banco de dados diferente.



Fonte: (PINHO et al., 2014).

Figura 9 - Médias mensais e anuais da radiação solar média diária incidente sobre um coletor inclinado de 10°N na região de Manaus. A média anual de cada série está mostrada por um símbolo sobre o eixo vertical no “mês zero”. Cada série proveniente de um banco de dados diferente.



Fonte: (PINHO et al., 2014).

Visto as diferenças comparando os gráficos, surge o problema de quais informações de irradiação deverão ser aplicadas para realizar a dimensão dos sistemas fotovoltaicos. Como por exemplo, a Eletrobrás, que aplica as informações do Atlas SWERA para dimensionamento dos sistemas tipo SIGFI. (PINHO et al., 2014)

Considera-se um número singular de irradiação solar de certo sistema caso se dimensione e escolha por uma ação mais tradicional, o número escolhido para a dimensão será o “pior mês” entre as fontes às quais houver acesso, o que, na figura 4, por exemplo, é correspondente ao mês de fevereiro no Atlas - UFPE. (PINHO et al., 2014).

Porém caso se necessite a sequência de valores mensais de irradiação para dimensionamento, no caso utilizar algum software de simulação, então a atitude conservadora a ser adotada seria compor uma sequência utilizando os piores valores para cada mês disponíveis em todas as fontes. No caso da Figura 4, por exemplo, seria uma composição entre os valores do SunData e do Atlas-UFPE. (PINHO et al., 2014).

4.5 ENERGIA SOLAR TÉRMICA

O contexto energético do mundo e o aumento da atenção para com o meio ambiente desenvolvem uma nova forma de raciocinar, a denominada pela literatura de Economia Verde. Tal modelo vislumbra desenvolvimento sustentável num misto entre os aspectos ambientais e sociais, dando visibilidade e apresentando as ideias de economia com baixa emissão de carbono, redução dos impactos ao equilíbrio do clima, inclusão social e a utilização eficaz dos recursos naturais. Dessa forma, o uso de energias renováveis se aprimora e cresce em todos os continentes, sendo uma delas a energia solar. (LODI, 2011).

A radiação do sol é a fonte mais abundante que a Terra dispõe e grande parte das energias utilizadas vem, de alguma forma, da energia solar. Além de que, a energia do sol não degrada o ambiente. Dessa forma, há de se concluir que é de extrema importância pesquisar essa fonte de energia natural. A utilização da energia solar para criação da elétrica cresce cada vez mais, abrindo destaque para a energia solar fotovoltaica e a energia solar térmica concentrada. Esta última, conhecida no meio internacional como CSP (Concentrated Solar Power), é o principal assunto desta monografia. Na primeira, as células fotovoltaicas convertem a energia solar diretamente em eletricidade. Na segunda, a energia solar foi transformada em calor para uma corrente na forma de energia solar térmica para a transformação em eletricidade em uma turbina e um gerador (LUCEMA, 2010).

A energia térmica do sol é a transformação da energia solar em energia de calor usável. A radiação que atinge a superfície terrestre diariamente (tendo em conta o período de 24h) é de cerca de 165 W/m^2 (com significativas variações dependendo da latitude, altitude e estado do tempo). De maneira a conseguir usar tal recurso energético, o ser humano começou a olhar de forma mais acentuada em relação a pautas da energia solar térmica (calor da radiação solar) e fotovoltaico (eletricidade adquirida a partir do sol). A totalidade da energia que incide na superfície terrestre é mais de cinco mil vezes superior do que a energia necessária para a humanidade, o potencial é maior do que qualquer outra energia renovável em conjunto (LUCEMA, 2010).

5 CÉLULAS FOTOVOLTAICAS

A unidade de célula solar é um fotodiodo com larga área que pode ser exibida à luz, seja ela solar ou não, qualquer diodo (junção p-n) em que a extensão possa ser exibida à luz tornar-se-á uma célula solar, o diodo vai se portar como uma célula solar, porém não irá gerar energia o bastante para uma utilização comercial como fonte de energia. As células fotovoltaicas são fabricadas, na sua grande maioria, usando o silício (Si) podendo ser constituída de cristais monocristalinos, de cristais policristalinos ou de silício amorfo. Hoje em dia já podemos encontrar as células CIGS (Cobre-Índio-Gálio-Selênio) e células CDTE (Telureto de Cádmio) (LOPEZ, 2012).

A energia solar é a fonte de energia mais antiga disponível na Terra. A quantidade de energia solar que atinge a Terra em dez dias é equivalente a todas as reservas de combustível conhecidas, sendo ainda uma fonte não poluente e praticamente inesgotável. Estima-se em alguns bilhões de anos o tempo necessário para o esgotamento da energia solar.

Goldenberg afirma que: “A manutenção da vida na Terra só poderá ser conseguida mediante o expurgo da ameaça da poluição térmica e da poluição química.”

5.1 TIPOS DE CÉLULAS FOTOVOLTAICAS

Existem sete tipos de células fotovoltaicas: célula de silício cristalizado, célula de silício monocristalino, célula de silício policristalino, célula de película fina, célula de silício amorfo, Célula Disseleneto de Cobre e Índio, Célula Telureto de Cádmio (LOPEZ, 2012).

5.2 CÉLULA DE SILÍCIO CRISTALIZADO

O segundo material mais profuso na natureza é o silício, que perde apenas para o oxigênio. O silício se combina de forma natural a outros materiais e apresenta-se na forma de dióxido de silício e silicatos. Areia e quartzo são as formas mais habituais. A areia possui alta proporção de impureza para processamento, enquanto os depósitos de quartzito dispõem de até 99% de Si. Essa areia sílica é processada para que se consiga matéria pura (LOPEZ 2012).

Para o uso do silício em forma de matéria prima para criação de células fotovoltaicas, o silício deve ser purificado.

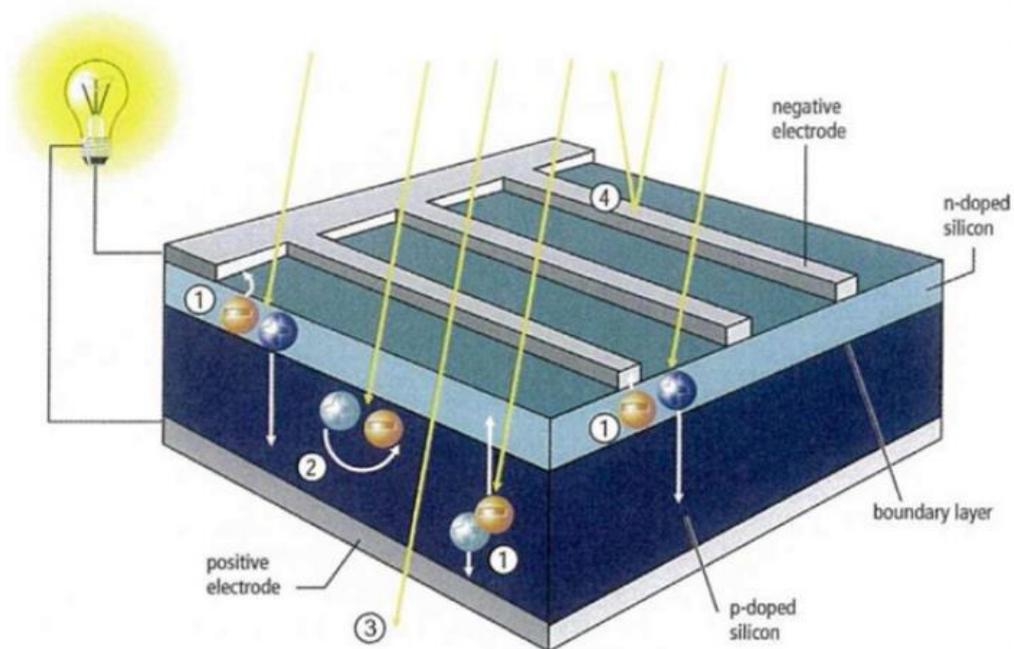
Os graus de purificação do silício podem ser divididos em dois tipos:

1) Silício metalúrgico, combinado ao quartzito quantidades controladas de carbono a altas temperaturas. O oxigênio presente no quartzito é removido na formade CO_2 e, depois de outros processos, serão obtidas barras de silício com pureza de 98%.

2) Silício grau semiconductor (eletrônico e solar), onde o silício é convertido através de ácido clorídrico (HCl) a triclosano: $\text{Si} + 3 \text{HCl} \Rightarrow \text{SiHCl}_3 + \text{H}_2$. Devido ao seu baixo ponto de ebulição ($31,8^\circ \text{C}$), este pode ser purificado pelo método de destilação fracionada, processo semelhante ao utilizado em refinarias de petróleo (LOPEZ, 2012).

Com a adição de H_2 acontece a seguinte reação química: $\text{SiHCl}_3 + \text{H}_2 \Rightarrow \text{Si} + 3 \text{HCl}$. Após essa purificação, teremos criado um cristal de silício com até 99,9999% de pureza, que é um dos materiais mais puros produzidos pelo homem (Figura 10). É exatamente esse procedimento purificador que deixa a criação das células fotovoltaicas mais caras (LOPEZ, 2012).

Figura 10 - Representação de uma célula fotovoltaica silício cristalizado.



Fonte: (Introdução a sistemas de energia solar fotovoltaica Blue Solar).

5.3 CÉLULAS DE SILÍCIO MONOCRISTALINO

Uma das maneiras de se alcançar o cristal único de silício, é pelo método Czochralski. No decorrer desse procedimento, insere-se uma semente de cristal de silício com silício

policristalino e, ao mesmo tempo que o conjunto voltaia lentamente, a semente é levantada. A semente de silício guia os átomos do mosto que resulta num formato cristalino e, por esse motivo, dá-se a ele o nome de monocristal (Figura 11) (LOPEZ, 2012).

Eficiência: 15–18% (Czochralski)

Forma: Geralmente arredondadas, ou em formato de fatia de pizza.

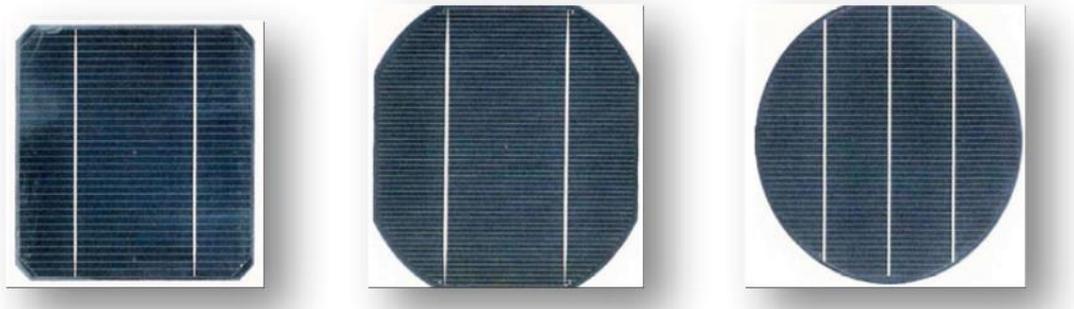
Tamanho: geralmente 10x10 cm² ou 12,5x12,5 cm²; diâmetro 10, 12,5 ou 15cm.

Espessura: 0,3mm.

Cor: geralmente azul-escuro ou quase preto (com antirreflexo), cinza ou azul-acinzentado (sem antirreflexo).

Fabricantes: a Astro Power, Bharat Electronics, BHEL, BP Solar, Canrom, CEL, CellSiCo, Deutsche Cell, Eurosolare, GE Energy, GPV, Helios, Humaei, Isofoton, Kaifeng Solar Cell.

Figura 11 - Célula fotovoltaica silício monocristalino.



Fonte: (Introdução a sistemas de energia solar fotovoltaica Blue Solar).

Após o corte do cristal em pastilhas, é depositado o fósforo, através de difusão de vapor a temperaturas entre 800-1200°C, e criada a rede de contatos frontais e traseiras que recolherão os elétrons liberados pelo efeito fotovoltaico. Também é feito um tratamento antirreflexo na parte posterior (LOPEZ, 2012).

5.4. CÉLULA DE SILÍCIO POLICRISTALINO

Um dos processos de criação de silício policristalino mais utilizado é o de fundição de lingotes, onde o silício em estado bruto é aquecido no vácuo até uma temperatura de 1.500°C e depois resfriado até uma temperatura de 800°C. Pode-se aproveitar o processo de purificação do silício, e já adicionar o Boro. (Figura 12) (LOPEZ, 2012).

Eficiência: 13–15% (com antirreflexo)

Forma: geralmente quadrada.

Tamanho: 10x10cm², 12,5x12,5cm², 15x15cm².

Espessura: 0,3mm.

Estrutura: durante o resfriamento, formam-se vários cristais de silício com orientações diversas. Essa formação multicristalina é facilmente reconhecida.

Cor: azul (com antirreflexo), cinza prateado (sem antirreflexo).

Fabricantes: Al-Afandi, BP Solar, Deutsche Cell, ErSol, Eurosolare, GPV, Kwazar JSC, Kyocera, Maharishi, Mitsubishi, Motech, Photovoltech, Photowatt, Q-Cells, RWE Schott Solar, Sharp, Shell Solar, Solar Power Industries, Solartec, Solterra, Suntech, Sunways, Tianjin Jinneng Solar Cell.

Figura 12 - Célula fotovoltaica silício Policristalino.



Fonte: (Introdução a sistemas de energia solar fotovoltaica Blue Solar).

Nesse processo é utilizado menos energia. Serão criados blocos de silício de 40x40 cm² com altura de 30cm. O processo segue como o do silício monocristalino, com o corte, tratamento antirreflexo e criação dos contatos frontais

5.5 CÉLULAS DE PELÍCULA FINA

As células fotovoltaicas de película fina desenvolvem-se desde a década de 90. De forma que o semicondutor é colocado em substrato de vidro (em sua maioria) mediante deposição por vaporização deposição catódica ou banho eletrolítico. Os semicondutores mais usados para esse processo são o silício amorfo (a-Si), o disseleneto de cobre e índio (gálio) (CIS-CIGS) e o telureto de cádmio (CdTe). Em razão da alta absorção luminosa, camadas de espessura menor (0,001 mm) são, em tese, bastantes para transformar a luz solar em eletricidade. Além do que, esses materiais podem ser dopados de forma mais fácil e demandam temperaturas menores (entre 200°C e 500°C) para sua produção, o que, mesclado com o

potencial de automação para fabricação em larga escala, tem chances de deixar o preço final dos módulos mais baixo.

Células de película fina não tem sua dimensão e formato restrito como as células de silício cristalizado (LOPEZ, 2012).

5.6 CÉLULA DE SILÍCIO AMORFO

O silício amorfo não dispõe de estrutura cristalina, mas de rede irregular. Por esse motivo, formam-se ligações livres que infiltra hidrogênio até a saturação. Esse silício amorfo hidrogenado (a-Si:H) é gerado por reatores plasmáticos, mediante vaporização química de silano gasoso (SiH_4), que demanda temperaturas um tanto baixas, em torno de 200°C a 250°C (Figura 13).

Figura 13 - Célula fotovoltaica silício Amorfo.



Fonte: (Introdução a sistemas de energia solar fotovoltaica Blue Solar).

A grande desvantagem das células de a-Si é a sua baixa eficiência, que diminui nos primeiros 6 a 12 meses de funcionamento, devida à degradação provocada pela luz, pelo chamado Efeito Staebler-Wronski, até atingir um valor estável (LOPEZ, 2012).

Eficiência: entre 5% a 9% de eficiência do módulo.

Forma: formato livre.

Tamanho: módulo standard $0,77 \times 2,44 \text{ m}^2$; módulos especiais $2 \times 3 \text{ m}^2$.

Espessura: 1-3mm para o substrato (plástico, vidro, etc.), com um revestimento de silício amorfo de aproximadamente 0,001mm.

Cor: castanho avermelhado a azul escuro.

Fabricantes: BP Solar, Canon, Dunasolar, ECD Ovonic, EPV, Free Energy Europe, Fuji Electric, ICP, Iowa Thin Film Technologies, Kaneka, MHI, RWE Schott Solar, Sanyo, Shenzhen Topray Solar, Sinonar, Solar Cells, Terra Solar, Tianjin Jinneng Solar Cell, United Solar Ovonic, VHF Technologies.

5.7 CÉLULA DISSELENETO DE COBRE E ÍNDIO (CIS)

Para a fabricação de células CIS, o substrato é envolto com camada fina de molibdênio por meio de deposição catódica e a camada CIS, tipo P, que pode ser gerada por meio da vaporização simultânea do cobre, índio e selênio, em câmara de vácuo a 500°C, ou por meio da prática de deposição camada a camada dos materiais (LOPEZ, 2012).

O óxido de zinco contaminado com alumínio (ZnO:Al) é usado como contato frontal transparente. Esse material é do tipo N e é inserida uma camada interposta de óxido de zinco intrínseco (i-ZnO). Há uma camada de sulfato de cádmio (CdS) do tipo N, que é utilizada para diminuir as perdas ocasionadas pela mistura inapropriada das redes cristalinas das camadas de CIS e ZnO (LOPEZ, 2012).

Ao contrário do silício amorfo, as células CIS não são sujeitas a degradação em razão da luz, porém demonstram dificuldades de estabilidade em meios quentes e com alta umidade. Em razão disso, os módulos produzidos com essa célula devem ter boa selagem. (Figura 14). (LOPEZ, 2012).

Eficiência: 7,5% a 9,5 % de eficiência do módulo.

Forma: formato livre.

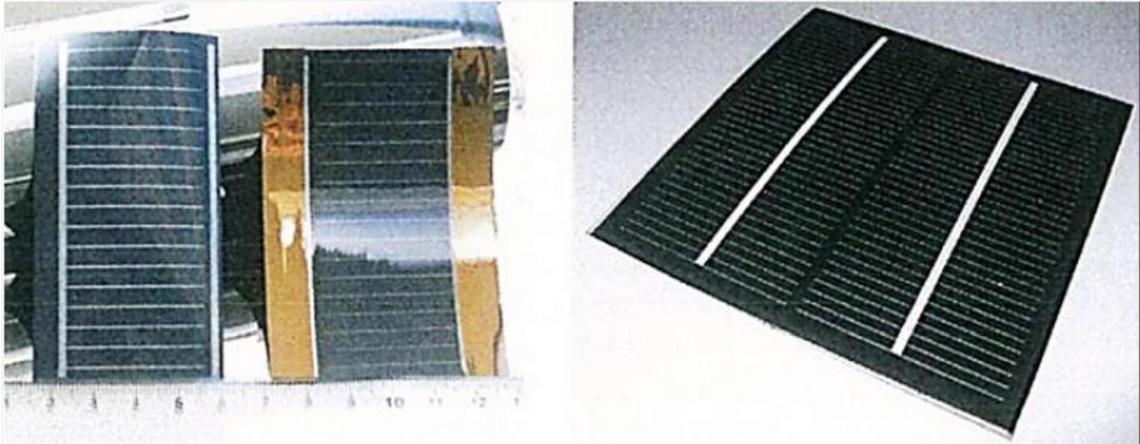
Tamanho: geralmente entre 1,2 x 0,6m².

Espessura: 3 mm para o substrato com revestimento de 0,003mm.

Cor: preto.

Fabricantes: Shell Solar, Würth Solar, Showa Shell, EPV, GlobalSolar, Daystar.

Figura 14 - Célula Fotovoltaica Disseleneto de Cobre e Índio (CIS).



Fonte: (Introdução a sistemas de energia solar fotovoltaica Blue Solar).

Dentre os módulos demonstrados aqui, os CIS demonstram maior eficiência, sendo provável que a produção em massa desses torne seus preços mais atraentes que os do silício amorfo, por exemplo. Lamentavelmente, as reservas de índio estão sendo cada vez mais destinadas à fabricação de telas *touch-screen* dos *smartphones* e *tablets*, obrigando o uso desse material à indústria fotovoltaica. (LOPEZ, 2012).

5.8 CÉLULA TELURETO DE CÁDMIO (CDTE)

Células de CdTe são produzidas sobre um substrato de vidro; com uma camada de óxido de estanho índio (OTI) de contato frontal, envolto com uma camada transparente de sulfato de cádmio (CdS), tipo N; e, finalmente, com a camada de telureto de cádmio (CdTe) - tipo P. Podem ser produzidos através de *silk screen* de posição galvânica ou pirólise pulverizada (Figura 15).

Figura 15 - Modulo de Telureto de Cádmiio (CdTe).



Fonte: (Introdução a sistemas de energia solar fotovoltaica Blue Solar).

Bem como o CIS, a tecnologia de produção do CdTe pode ter seu custo ainda menor com o aumento da produção em escala. A desvantagem está no fato de que o cádmio é tóxico. O CdTe tem composição atóxica estável, mas pode demonstrar risco para o ambiente e a saúde na condição de gás. Felizmente o estado gasoso só ocorre durante a sua produção, em centros de produção controlados (LOPEZ, 2012).

Eficiência: 6– 9% de eficiência dos módulos.

Forma: formato livre.

Espessura: 3mm para o substrato com 0,008mm de revestimento.

Tamanho: geralmente 1,2 x 0,6m².

Cor: verde-escuro a preto

Fabricantes: Antec, First Solar, Matsushita.

5.9 TABELA DE EFICIÊNCIA DE CÉLULAS FOTOVOLTAICAS

A tabela abaixo demonstra a eficiência de todos os tipos de células fotovoltaicas.

Tabela 1 - Tabela de Eficiência de tipos de Células Fotovoltaicas

Material	Eficiência em Laboratório	Eficiência em Produção	Eficiência em Produção em Série
Silício Mono	24,7%	18%	14%
Silício Poly	19,8%	15%	13%
Silício Amorfo	13%	10,5%	7,5%
CIS, CIGS	18,8%	14%	10%
CdTe	16,4%	10%	9%

Fonte: (Introdução a sistemas de energia solar fotovoltaica Blue Solar).

A tabela demonstra que as células fotovoltaicas de silício Mono têm 14% de eficiência em produção em série, enquanto os de silício amorfo têm apenas 7,5%. Nota-se grande eficiência na produção em série das células fotovoltaicas de silício Poly (13%).

6 TIPOS DE PAINÉIS SOLARES

Existem cinco tipos de painéis solares: Sistema Fixo, Sistema de eixo único Polar e Horizontal, Sistema de eixo único Tubular, Sistema de eixo duplo.

6.1. SISTEMA FIXO

Sistemas de painéis fixos não apresentam nenhum tipo de rastreamento solar, ficam posicionados por um ângulo otimizado. Este ângulo seria um ponto médio da variação de ângulo da posição do sol, nas orientações Norte-Sul e Leste-Oeste. A altitude no relevo, ou clima da região pode alterar este ângulo, sendo necessário um estudo da região antes da instalação do painel (LOPEZ, 2012).

De forma geral, o painel fotovoltaico é formado por um total de 32 módulos. Eles são condensados em ligações em série de 04 (quatro) módulos cada uma, obtendo-se uma tensão de 48 Volts de corrente contínua. Esses 08 (oito) agrupamentos em série de quatro módulos são, então, ligados em paralelo. O painel fotovoltaico fixo possui uma potência total de 1450 Wpico (KALOGIROU, 2009).

6.2. SISTEMA DE EIXO ÚNICO POLAR, HORIZONTAL E TUBULAR

Sistemas de eixos únicos são construídos de forma que os painéis acompanhem um eixo de movimentação do sol, norte-sul ou leste-oeste. O eixo pode ser orientado de modo que as células se levantam a uma inclinação (chamado eixo polar) ou deitado (chamado eixo horizontal). O eixo horizontal é mais adequado para pequenas latitudes, o eixo polar é adequado para maiores latitudes. O eixo leste-oeste é o mais comumente usado, por ter a maior diferença do movimento do sol, que é alterado diariamente, em alguns casos é interessante a mudança para o acompanhamento do eixo norte-sul (LOPEZ, 2012).

Este tipo de seguidor tem um eixo N-S fixo num ângulo, normalmente a latitude do local. Este será o eixo de rotação para o seguidor. Ao eleger este eixo como o de rotação, irá certificar-se de que o painel vai estar em posição perpendicular ao sol nos equinócios da Primavera e de Outono. Em alguma outra data qualquer, um pequeno erro pode ocorrer. Os seguidores do eixo polar são um tanto simples e podem aumentar o grau de eficiência do sistema (KALOGIROU, 2009).

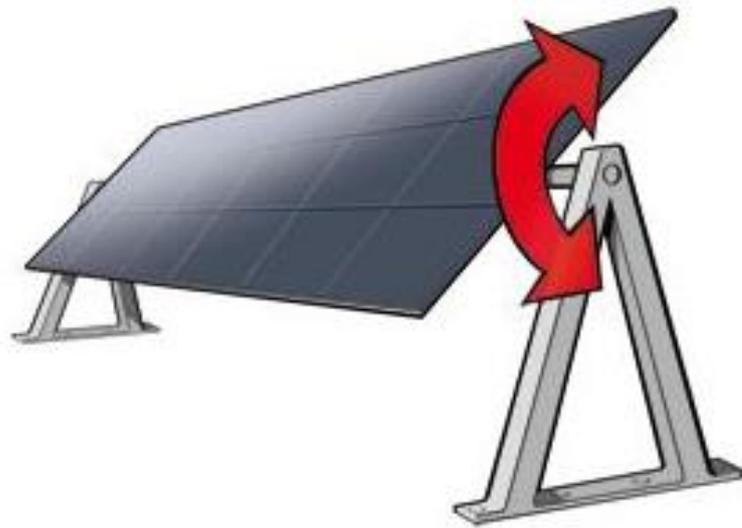
Os rastreadores solares de eixo único são desenvolvidos de modo que os painéis sigam somente um eixo de movimentação solar; Leste-Oeste ou Norte-Sul. A utilização de um motor transforma o sistema em mais acessível e com menor consumo de energia. O eixo Leste-Oeste é majoritariamente utilizado por possuir movimentação de maior variação do Sol (PEREIRA, 2012), podendo se transformar dia após dia, só que em locais mais próximos dos polos. Tal variação diária pode ficar menor sendo, em um número expressivo de casos, importante a mudança do sistema para o seguimento do eixo Norte-Sul. Este seguidor possui um eixo horizontal que vai auxiliar como peça fundamental para os painéis (Figura 16), permitindo desta forma um segmento estacional do sol. São seguidores muito comuns, de instalação econômica e com pouca manutenção. A sua eficiência não é tão grande como a dos outros seguidores, mas ainda assim são a melhor opção a se ponderar quando o objetivo é aumentar a eficiência total do sistema, visto que este sistema pode aguentar uma extensa quantidade de painéis. O sistema de eixo horizontal, oposto aos outros sistemas, não necessita de um sistema automático de seguimento, pois pode funcionar antes mediante variadas localizações fixas, determinadas anteriormente a instalação.

Figura 16 - Sistema Tipo Polar de Eixo Único Rastreador.



Fonte: BHAVNAGRI (2010).

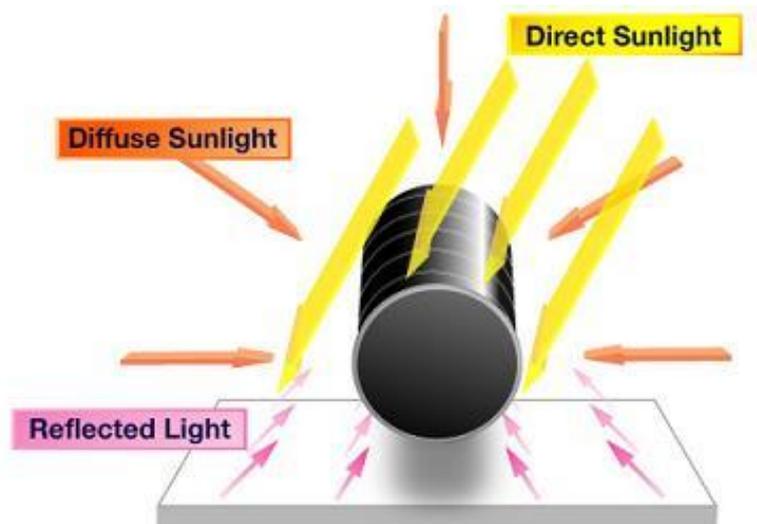
Figura 17 - Sistema Tipo Horizontal de Eixo Único Rastreador.



Fonte: BHAVNAGRI (2010).

Além das opções de painéis de eixo único, uma nova tecnologia de energia solar fotovoltaica tem sido desenvolvida, chamado solares tubulares, onde que as próprias células são cilíndricas, permitindo que capture uma máxima quantidade de luz solar (LOPEZ, 2012).

Figura 18 - Sistema Tipo Tubular de Eixo Único.



Fonte: BHAVNAGRI (2010).

6.3. SISTEMA DE EIXO DUPLO

Sistema de eixo duplo permite que os painéis acompanhem o sol nos dois eixos, permite que as células acompanhem perpendicularmente os raios solares durante todo o tempo ao longo do dia (Figura 19).

Figura 19 - Sistema Eixo Duplo.



Fonte: BHAVNAGRI (2010).

Esses sistemas são capazes de ajustar a altura do sol, leste-oeste ou norte-sul, aumentando o percentual de energia comparando ao eixo único (LOPEZ, 2012).

7 COMPONENTES DO SISTEMA FOTOVOLTAICO

Um sistema fotovoltaico é constituído por bloco gerador, bloco de condicionamento de potência e bloco de armazenamento. Bloco gerador é constituído por módulos fotovoltaicos, cabeamento elétrico e suporte. Bloco de condicionamento de potência é constituída por conversores, inversores, controladores de carga, dispositivos de proteção, supervisão e controle. Bloco de armazenamento é constituído por baterias (PINHEIRO ET AL., 2014).

Módulos fotovoltaicos: compostos por células fotovoltaicas conectadas, produzindo tensão e corrente para utilização de energia e ao mesmo tempo a proteção das células fotovoltaicas.

Controladores de cargas: tem como objetivo de proteger o banco de baterias contra cargas e descargas excessivas, tipos de controladores: gerenciador de carga, regulador de carga e regulador de tensão.

Inversores: dispositivo eletrônico que transforma energia de corrente contínua para corrente alternada.

Conversores: é como controlador de carga, os conversores e possível controlar de forma precisa a corrente e a tensão no banco de baterias.

Dispositivos de proteção, supervisão e controle: são dispositivos auxiliares que reduzem a possibilidade de falhas nos sistemas, e na ocorrência de falhas notificam imediatamente o operador.

Baterias: têm vários tipos de baterias (automotivas, tração, estacionárias, fotovoltaicas, baterias abertas e baterias seladas) as baterias são recarregáveis e apresentam constituição química que permite reações reversíveis.

8 ANÁLISE ENTRE SISTEMAS FIXOS E MÓVEIS

Painéis Fotovoltaicos foram desenvolvidos inicialmente para aplicações espaciais, porém devido à grande oferta de energia sobre o planeta e o desenvolvimento de novas técnicas de produção houve uma queda nos custos dos projetos (AXAOPOULOS, 2013) o que tornou o sistema mais acessível.

Paralelo ao desenvolvimento de novas técnicas de produção mais baratas, há a análise de desempenho dos sistemas, onde não são estudados apenas os meios construtivos dos painéis, mas também as várias técnicas de montagem e movimentação dos mesmos.

Segundo Axaopoulos (2013), o ângulo de incidência dos raios solares sobre uma célula fotovoltaica é um dos fatores mais críticos do desempenho destes sistemas. Quando os Painéis Fotovoltaicos são instalados em suportes fixos o ângulo de incidência solar nunca é satisfatório e o desempenho degrada consideravelmente, especialmente durante os períodos da manhã e final da tarde (AXAOPOULOS, 2013).

Vários estudos a respeito da diferença de desempenho entre os sistemas fixos e móveis estão sendo realizadas principalmente em baixas latitudes (AXAOPOULOS, 2013), destacam-se entre elas as realizadas por Ali Al-Mohamad em Damasco na Síria, experimento este executado em Agosto de 2004; durante os testes foi observado um aumento de eficiência de 20% dos Painéis Móveis em relação aos fixos (AL-MOHAMAD, 2004), este estudo foi realizado em apenas um dia, não podendo servir de referência durante períodos que englobem todas as estações do ano; os experimentos realizados por Maatal.ah na cidade de Monastir na Tunísia em contrapartida aos de Al-Mohamad foram executados durante o ano de 2011 e obtiveram ganhos de 30% no inverno e 44% no verão (MAATAL.AH, 2011).

Outros estudos foram executados em várias partes do mundo, principalmente na Espanha onde destaca, se os realizados por Francisco Javier Gomez-Gil em 2012 no sul do país, foi realizada a comparação de desempenho entre quatro configurações de montagem diferentes, nesse estudo houve um incremento de desempenho de 25,2% dos sistemas móveis sobre os fixos anualmente (GOMEZ-GIL, 2012).

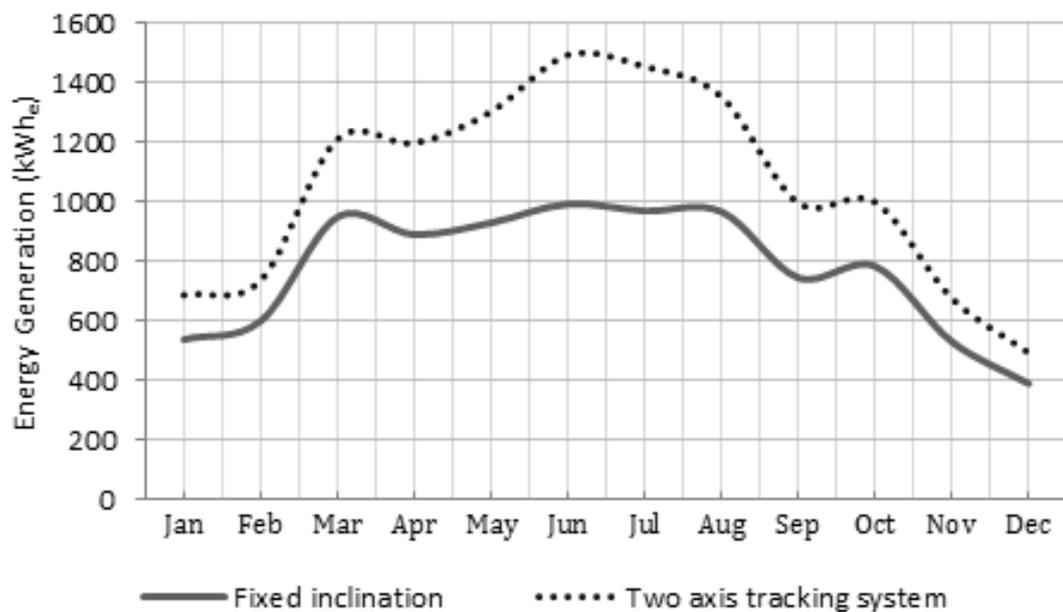
Analisando esses estudos pode-se concluir desempenha o ganho de performance dos sistemas móveis em relação aos fixos, levando-se em conta o maior valor investido e maiores custos de manutenção dos sistemas há a necessidade de estudo prévio para verificar a viabilidade dos sistemas móveis em relação aos fixos (AXAOPOULOS, 2013).

O estudo desenvolvido por Axaopoulos ocorreu em três países Europeus em diferentes Latitudes ao longo de 2013, foram escolhidas as cidades de Athenas na Grécia, Stuttgart na

Alemanha e Aberdeen na Escócia, durante suas análises foram levados em conta o clima, latitude e custos de implantação e operação. Os ganhos de desempenho foram de 34,8%, 28,7% e 30,4% na Grécia, Alemanha e na Escócia respectivamente (AXAPOULOS, 2013), é importante observar que o incremento de 1% no desempenho de captação fotovoltaica é algo perseguido pelas fabricantes de painéis, a partir disto pode-se entender que ganhos de 30% com os sistemas móveis são um grande avanço (APPLEYARD, 2009). Axaopoulos pode observar durante este experimento que a distância do Equador terrestre também influenciava no aumento de desempenho do sistema, uma vez que quanto mais distante do equador menor é o ganho devido a difusão da radiação solar e aos dias serem mais curtos quanto maior a proximidade geográfica com os polos terrestres (AXAPOULOS, 2013), analogia esta que é válida no hemisfério sul. As temperaturas amenas nas latitudes mais distantes do equador também colaboram positivamente para o ganho de performance, porém este aspecto atinge tanto o sistema fixo como o móvel.

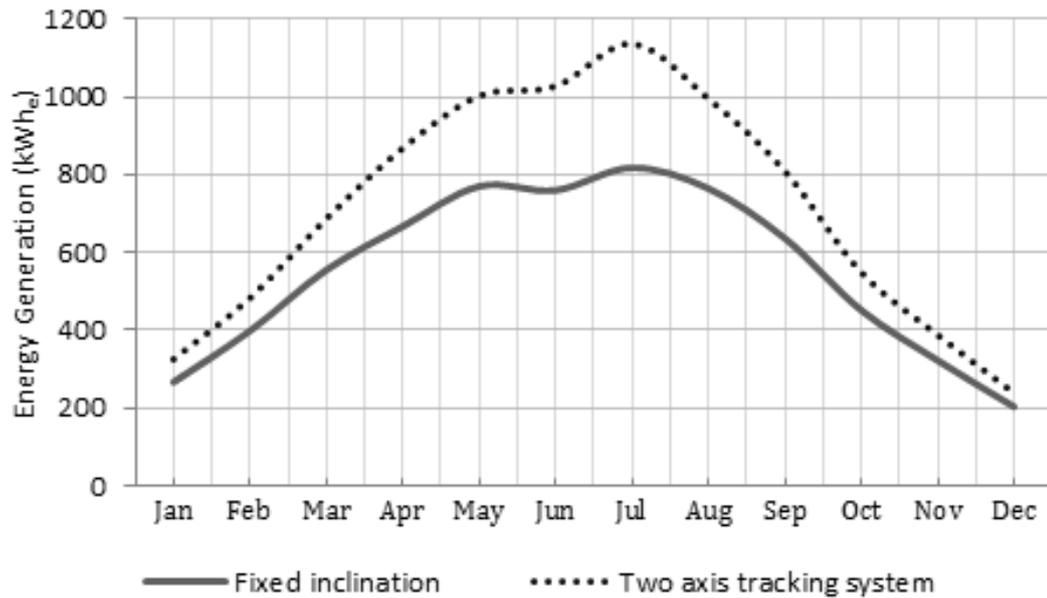
Abaixo seguem os dados da análise de Axaopoulos (2013) nos três países em 2013:

Figura 20 - Geração de Energia Mensal – Athenas



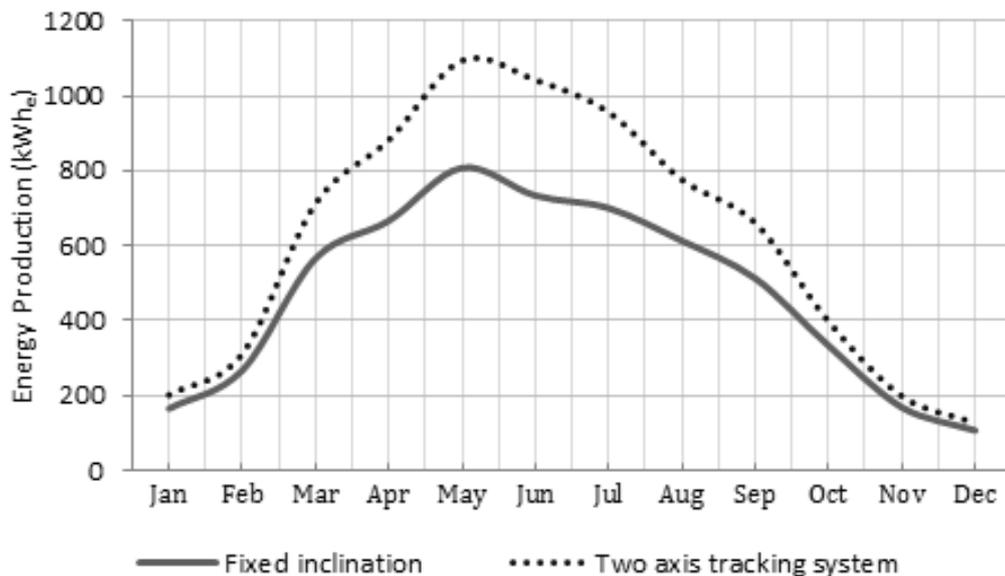
Fonte: (Axaopoulos, 2013).

Figura 21 - Geração de Energia Mensal – Stuttgart



Fonte: (Axaopoulos, 2013).

Figura 22 - Geração de Energia Mensal – Aberdeen



Fonte: (Axaopoulos, 2013).

A partir dos gráficos pode-se supor que a energia gerada em Atenas é superior as outras duas cidades devido a sua maior proximidade com o equador terrestre. Outro aspecto levado em consideração por Axaopolous (2013) diz respeito aos custos de implantação e manutenção dos sistemas bem como as tarifas de cada país estudado, estes aspectos tornam-se importantes uma vez que o ganho de performance do sistema pode ser suprimido pelos gastos

com a manutenção do mesmo, uma vez que o próprio sistema gasta energia para manobrar os painéis (APPLEYARD, 2009).

Segundo Appleyard (2009), é necessário levar em consideração os maiores custos de implantação de sistemas móveis não somente pelos equipamentos necessários, mas também a maior área necessária para sua instalação, visto que deve haver espaço entre as células Fotovoltaicas para a sua movimentação e o cuidado de uma célula não sombrear a vizinha, estas preocupações devem ser levadas em conta durante o projeto e sua execução (APPLEYARD, 2009).

CONSIDERAÇÕES FINAIS

O aumento do gasto de energia no mundo, estimulado pelo desenvolvimento tecnológico e humano, em conjunto com o declínio na produção de combustíveis fósseis, têm sido fatores incentivadores à pesquisa e desenvolvimento de fontes alternativas de energia, menos poluentes, renováveis e que gerem o menor impacto possível ao meio ambiente.

Apesar das vantagens apresentadas, os sistemas fotovoltaicos de geração de energia elétrica se deparam com impedimentos à sua popularização. Dois aspectos impedem sua utilização nos dias atuais, por exemplo, o alto custo de produção e baixo rendimento frente a outras fontes alternativas de energia.

Na busca pelo aumento da eficiência dos sistemas fotovoltaicos, estudos estão sendo desenvolvidos com uso de rastreadores solares. Tais meios conseguem manter os painéis constantemente virados em direção ao sol, de maneira a manter a superfície sempre perpendicular aos raios solares. Sendo assim, existe maior captação de energia solar e, conseqüentemente, elevação da produção energética.

Um provável desenvolvimento da atividade realizada é a análise da produção de energia do sistema durante o período de um ano, observando a consequência das estações sobre rastreadores diversos, de que forma a mudança da altura relativa do Sol atinge o sistema, observar as diferenças na incidência do sol nos meses distintos e conseguir um resultado real da aplicabilidade da utilização de rastreadores mediante as circunstâncias locais.

Deste modo o presente trabalho servirá como base para pesquisa de outros estudos, tem assim uma grande significância dentro da engenharia e outros campos associados.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AL-MOHAMAD, Ali. "Efficiency Improvements of Photo-Voltaic Panels Using a Sun-Tracking System." *Applied Energy* 79, no. 3 (2004): 345-54.

APPLEYARD, David. *Solar Trackers: Facing the Sun*. 2009. Disponível em: <<http://www.renewableenergyworld.com/articles/print/volume-12/issue-3/solar-energy/solar-trackers-facing-the-sun.html>> Acesso em: abril de 2018.

AXAOPOULOS, Petros; Fylladitakis, Emmanouil. Energy and Economic Comparative Study of a Tracking Vs a Fixed Photovoltaic System. *European Scientific Journal*, Atenas, v.09, N.12.2013.

BHAVNAGRI, Kobad. *Solar Trackers*. 2010. Disponível em: <www.solarchoice.net.au/blog/solar-trackers/> Acesso em: Acesso em: abril de 2018.

BRAGA, Renata Pereira. *Energia Solar Fotovoltaica: Fundamentos e Aplicações* – Universidade Federal do Rio de Janeiro. Escola politécnica Departamento de Engenharia Elétrica. – Rio de Janeiro RJ, Novembro de 2008.

FADIGAS, Eliane Aparecida Faria Amaral. *Energia Solar Fotovoltaica: Fundamentos, Conversão e Viabilidade Técnico – Econômica*. São Paulo: GEPEA – USP, 2012.

Fotovoltaica. 2004. Dissertação (Especialização), Escola de Engenharia da Universidade Federal de Lavras. Lavras, 2004.

GÓMEZ-GIL, Francisco Javier, Xiaoting Wang, and Al.en Barnett. "Energy Production of Photovoltaic Systems: Fixed, Tracking, and Concentrating." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 16, no. 1 (January 2012): 306-13.

ITO, Masakazu; Kato, Kazuhiko; Komoto, Keiichi; Kichimi, Tetsuo; Sugihara, Hiroyuki; Kurokawa, Kosuke. Comparative Study of Fixed and Tracking System of Very Large Scale PV (VLS-PV) Systems in the World Deserts. Tokyo University of Agriculture and Technology.

LODI, C. *Perspectivas para a Geração de Energia Elétrica no Brasil utilizando a Tecnologia Solar Térmica Concentrada*. Dissertação de M.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2011.

LOPEZ, Ricardo Aldabó. *Energia Solar para Produção de Eletricidade*. São Paulo: Artliber Editora, 2012.

LUCENA, A. *Proposta Metodológica para Avaliação da Vulnerabilidade às Mudanças Climáticas Globais no Setor Hidroelétrico*. Tese de D.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2010.

MAATALAH, Taher, Souheil El Alimi, and Sassi Ben Nassral.ah. "Performance Modeling and Investigation of Fixed, Single and Dual-Axis Tracking Photovoltaic Panel in Monastir City, Tunisia." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 15, no. 8 (October 2011): 4053-66.

MARTÍN, Jaume Ribot. Curso de Energia Solar, Tomo 2. 3. Ed. Barcelona: CTE – Centro de Tecnologia Educativa, 1994. Leccion 5, p. 12 – 21.

MARTINS, A. Conhecendo o sol Folha de São Paulo. São Paulo, 15 set. 1996.

NASCIMENTO, Cássio Araújo. Princípio de funcionamento da célula

PINHO, João Tavares; Galdino, Marco Antônio. Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos. Rio de Janeiro: CEPEL – CRESESB, 2014.

SILVA, Arthur José. Investimentos de Empresas de Petróleo em Energia Fotovoltaica: O Caso da BP Solar e Motivações da Petrobras. 2006. Dissertação (Mestrado), Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio De Janeiro. Rio de Janeiro, 2006.

TREVELIN, Felipe Camargo. Estudo Comparativo Entre Métodos de Rastreamento Solar Aplicados a Sistemas Fotovoltaicos. 2014. Dissertação (Graduação) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos, 2014.