



UNIVERSIDADE FEDERAL DE TOCANTINS
CAMPUS UNIVERSITÁRIO
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AMBIENTAL

NICHOLAS FONSECA MARTIN

MONITORAMENTO DA EFICIÊNCIA DE MÓDULOS FOTOVOLTAICOS
EM FUNÇÃO DA VARIAÇÃO DA RADIAÇÃO SOLAR

PALMAS (TO)

2021

NICHOLAS FONSECA MARTIN

**MONITORAMENTO DA EFICIÊNCIA DE MÓDULOS FOTOVOLTAICOS
EM FUNÇÃO DA VARIAÇÃO DA RADIAÇÃO SOLAR**

Monografia/ artigo apresentada a UFT -
Universidade Federal do Tocantins -
Campus universitário de Palmas para
obtenção do título de Bacharel em
Engenharia Ambiental sob orientação
do(a) Prof. Dr. Emerson Adriano Guarda.

PALMAS (TO)

2021

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal do Tocantins

M379m Martin, Nicholas Fonseca .

Monitoramento da eficiência de módulos fotovoltaicos em função da
variação da radiação solar. / Nicholas Fonseca Martin. – Palmas, TO, 2022.
53 f.

Monografia Graduação - Universidade Federal do Tocantins – Câmpus
Universitário de Palmas - Curso de Engenharia Ambiental, 2022.

Orientador: Emerson Adriano Guarda

1. Geração de energia. 2. Eficiência do módulo. 3. Parque fotovoltaico. 4.
Inclinado e horizontal. I. Título

CDD 628

TODOS OS DIREITOS RESERVADOS – A reprodução total ou parcial, de qualquer
forma ou por qualquer meio deste documento é autorizado desde que citada a fonte.
A violação dos direitos do autor (Lei nº 9.610/98) é crime estabelecido pelo artigo 184
do Código Penal.

**Elaborado pelo sistema de geração automática de ficha catalográfica da UFT com os
dados fornecidos pelo(a) autor(a).**

NICHOLAS FONSECA MARTIN

MONITORAMENTO DA EFICIÊNCIA DE MÓDULOS FOTOVOLTAICOS EM
FUNÇÃO DA VARIAÇÃO DA RADIAÇÃO SOLAR

Monografia/artigo foi avaliada(o) e apresentada(o) a UFT – Universidade Federal do Tocantins – Campus Universitário de Palmas Curso de Engenharia Ambiental para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Ambiental e aprovada(o) em sua forma final pelo orientador(a) e pela banca examinadora.

Data de Aprovação 10/02/2022

Banca examinadora:

Prof. Dr. Emerson Adriano Guarda Orientador, Universidade Federal do Tocantins

Profa Dr(a) Patricia Guarda Martins Examinadora, Universidade Federal do Tocantins

Profa Dr(a) Glaucia Eliza Gama Vieira Examinadora, -UFT.

Dedico este trabalho a minha falecida avó Erminda Prado Fonseca, a quem agradeço a base que sempre me incentivou a concluir a graduação, aos meus pais Olelice da Fonseca e Mauro Machado Martin, pois é graças ao seu esforço que hoje finalizo essa etapa.

RESUMO

A geração de energia elétrica por fonte alternativa de energia é muito importante para o desenvolvimento sustentável e preservação do meio ambiente. Este estudo apresenta uma análise teórica do ganho de eficiência e energia produzida por um módulo e parque fotovoltaico, utilizando dois métodos de estrutura de construção, sistema fixo e rastreamento solar (inclinado e horizontal). O sistema proposto consiste em analisar o ganho sistêmico para um módulo em estrutura fixa e comparar o resultado utilizando um sistema móvel de construção. Este mesmo processo é feito para o parque fotovoltaico, projetado para o município de Palmas (Tocantins). Os resultados mostram que, aplicando o sistema proposto, o ganho médio na eficiência de conversão dos módulos utilizando o método de instalação por rastreamento solar ao longo do ano está em, 4,3%. Isso equivale a um aumento médio na energia elétrica produzida de aproximadamente 38,3MW pelo parque fotovoltaico

ABSTRACT

The generation of electricity from an alternative energy source is very important for sustainable development and environmental preservation. This study presents a theoretical analysis of the efficiency and energy gain by a module and photovoltaic park, using two methods of construction structure, fixed system and solar tracking (tilted and horizontal). The proposed system consists of analyzing the systemic gain for a module in a fixed structure and comparing the result using a mobile construction system. This same process is carried out for the photovoltaic park, designed for the municipality of Palmas (Tocantins). The results show that, applying the proposed system, the average gain in the conversion efficiency of modules using the installation method for solar tracking throughout the year is 4.3%. This is equivalent to an average increase in useful electrical energy of approximately 38.3MW by the photovoltaic park

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Mapa da radiação solar do Brasil para o plano horizontal.....	28
Figura 2: Mapa da radiação solar da Alemanha para o plano horizontal.....	29
Figura 3: Trajetória dos raios de Sol, coeficiente de "Massa de Ar" (AM).....	32
Figura 4: Ilustração do espectro eletromagnético.....	33
Figura 5: Representação esquemática de uma junção tipo NP.....	35
Figura 6: Corte transversal de uma célula fotovoltaica.....	36
Figura 7: Esta figura está representando as células de silício	38
Figura 8: Arquitetura de um sistema fotovoltaico isolado.....	39
Figura 9: Sistema Híbrido Fotovoltaico-Eólico.....	40
Figura 10: Arquitetura de um sistema fotovoltaico conectado à rede elétrica.....	41
Figura 11: Inversor de corrente.....	44
Figura 12: Relógio Bidirecional.....	45
Figura 13: Quadro de Proteção Corrente CC.....	46
Figura 14: Quadro de proteção em CA.....	47
Figura 15: Modelos a serem estudados para o sistema de eficiência proposto.....	49
Figura 16 - Posição do sol relativa a uma superfície inclinada.....	50
Figura 17 - Representação das componentes da radiação solar.....	55
Figura 18 - Representa a energia gerada pelo módulo fotovoltaico.....	56
Figura 19 - Apresenta a energia produzida por um parque fotovoltaico.....	57
Figura 20 - Apresenta a eficiência de conversão.....	58
Figura 21 - Mostra o ganho na eficiência de conversão.....	58

LISTA DE SIGLAS

ANEEL	Agência nacional de energia elétrica
kW/m ²	kilo watts por metro quadrado
kWh	kilo watts hora
kWh/m ²	kilo watts hora por metro quadrado
GEE	Gases de efeito estufa
PRODEM	Programa de Desenvolvimento Energéticos dos Estados e Municípios
PUC	Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul
LEPTEN	Laboratório de Engenharia de Processo de conversão e tecnologia de energia
HCPV	High Concentration Photovoltaic

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	12
2 OBJETIVOS.....	14
2.1 Objetivo Geral.....	14
2.2 Objetivos específicos	14
3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	15
3.1 Energia solar fotovoltaica no brasil	15
3.1.1 Situação Atual	15
3.1.2 Potencial de Utilização.....	16
3.1.3 Benefícios.....	18
3.2 PRINCÍPIOS DA ENERGIA SOLAR.....	19
3.2.1 A energia que vem do sol.....	19
3.2.2 A radiação solar	20
3.3 CARACTERÍSTICAS DA CÉLULA FOTOVOLTAICA.....	23
3.3.1 O Efeito Fotovoltaico.....	23
3.3.2 Módulo Fotovoltaico.....	23
3.3.3 Célula Fotovoltaica	25
3.3.4 Silício monocristalino	26
3.3.5 Silício policristalino	26
3.3.6 Silício Amorfo.....	27
3.4 OS SISTEMAS FOTOVOLTAICOS.....	28
3.4.1 Sistemas Isolados	28
3.4.2 Sistemas Híbridos	29
3.4.3 Sistema Conectado à rede Elétrica.....	30
3.5 OS COMPONENTES DO SISTEMA FOTOVOLTAICO CONECTADO À REDE	31
3.5.1 Módulo Fotovoltaico.....	31

3.5.2 Inversor CC/CA.....	31
3.5.3 Relógio Bidirecional.....	33
3.5.4 Quadro de Proteção corrente CC	34
3.5.5 Quadro de proteção corrente CA	35
4 METODOLOGIA.....	37
5 RESULTADOS	39
5.1 CÁLCULO DA RADIAÇÃO SOLAR INCIDENTE SOBRE UM PLANO INCLINADO	39
5.1.1 Posição do sol para superfície inclinada.....	39
5.1.2 Cálculo do ganho por radiação solar	41
5.1.3 Cálculo da energia e eficiência do módulo fotovoltaico	43
5.2 AVALIAÇÃO DA RADIAÇÃO SOLAR.....	44
5.3 COMPARAÇÃO ENTRE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS EM ESTRUTURA FIXA E COM RASTREAMENTO SOLAR (Horizontal e Inclinada).....	45
5.3.1 Ganho na eficiência e energia produzida pelo módulo e parque fotovoltaico.....	45
6 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	48
7 REFERÊNCIAS	49

1 INTRODUÇÃO

A pesquisa por fontes alternativas de energia, motivada pela necessidade de novas matrizes energéticas, tem resultado em fortes avanços tecnológicos, visando à utilização de recursos renováveis, com o intuito de proporcionar sustentabilidade e poupar recursos naturais. Atualmente a energia solar fotovoltaica no Brasil é empregada principalmente em pequenos sistemas isolados e autônomos, instalados em locais não atendidos pela rede elétrica, em regiões de difícil acesso, ou onde a instalação de linhas de distribuição de energia elétrica não é economicamente viável. Outro sistema utilizado é o fotovoltaico conectado à rede, este, opera em sincronia com a rede elétrica convencional, e geralmente é utilizado em grandes centros. O setor fotovoltaico brasileiro está em amplo crescimento, por meio de parcerias de empresas interessadas no investimento de fontes alternativas de energia e a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), incentivadora do uso dessa tecnologia, possibilita aporte financeiro para a instalação de sistemas fotovoltaicos ligados à rede e sistemas autônomos. A quantidade de energia produzida por um sistema fotovoltaico depende da insolação do local onde este é instalado. No Brasil, as regiões nordeste e centro-oeste são as que recebem maiores incidência de radiação solar por dia, resultando em grande potencial de aproveitamento dessa energia. Outras regiões brasileiras também possuem boa incidência de radiação solar, exceto o sul do país, que é a região que apresenta a menor insolação. Insolação ou irradiação é o termo usado para definir a radiação solar que incide sobre uma superfície em determinado instante e local. Quando a insolação é descrita como potência, é expressa em função de watt por metro quadrado (m^2), e normalmente representa o valor médio diário para cada mês. Em um dia claro a insolação total que atinge a terra alcança em torno de $1000\text{W}/\text{m}^2$. A inclinação do eixo da terra também afeta a quantidade de energia emitida pelo sol. A latitude correspondente do hemisfério sul da terra apresenta sua inclinação em direção ao sol, principalmente no período de dezembro a março, caracterizando verão. Essa estação é caracterizada por dias mais longos e uma maior insolação diária, bem como uma intensidade de radiação solar maior, ao contrário da estação inverno, que apresenta um período de insolação menor. Valendo-se das premissas citadas, este trabalho propõe comparar o ganho de eficiência do módulo fotovoltaico em relação a radiação solar incidida na superfície do módulo, maximizando a energia produzida. Para isso, o estudo irá quantificar a energia total produzida por dois tipos de análise de radiação; radiação global e radiação inclinada. Serão desenvolvidos cálculos de dimensionamento para comparação de eficiência dos dois sistemas. Para o desenvolvimento desse trabalho, foi utilizado dados

disponíveis no software RADIASOL^R, desenvolvido pelo laboratório da Universidade do Rio Grande do Sul, sendo importante para realizar cálculos de determinação da radiação solar, para o território brasileiro. Por facilidade na disponibilização de informações, foi escolhida a cidade de Palmas - TO. O ano considerado foi o de 2021, disponível na base de dados. As variáveis de interesse, ou seja, dados de radiação, global, direta e difusa, estão armazenadas a cada dia. Os valores disponibilizados são médios mensais para cada mês do ano de interesse, logo, foi utilizado um único conjunto de dados para um dia típico (médio) de cada mês. Estes dados são retirados do programa RADIASOL^R. Ao final das simulações, foram obtidos os resultados do ganho de energia e eficiência do módulo fotovoltaico, elementos do sistema em estudo. As simulações são feitas para apenas um dia de cada mês. Os resultados são então, analisados e comparados com um sistema convencional, em análise da eficiência por radiação. Com o objetivo de quantificar o aumento da eficiência de geração de energia elétrica em função do emprego do sistema proposto. Feito a pesquisa, e após análise dos dados obtidos, foram comparados os resultados com o intuito de chegar a uma conclusão de viabilidade destacando a eficiência de geração de ambos os sistemas. Já que a instalação de um sistema gerador de energia elétrica, a partir de fontes renováveis se coaduna com o pensamento ambiental, pois é importante ter a consciência no desenvolvimento tecnológico, abrangendo métodos de maximização dos recursos naturais renováveis. De igual modo, preservar o meio ambiente é uma forma de valorizar o ser humano em todos os aspectos, desenvolvendo melhores condições para a qualidade de vida.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

Analisar o aumento da eficiência de geração de energia elétrica do módulo fotovoltaico em função da radiação solar.

2.2 Objetivos específicos

- Conhecer as características do módulo fotovoltaico;
- Estudar os princípios da radiação solar;
- Verificar a eficiência do módulo fotovoltaico com base na radiação global e radiação inclinada;
- Calcular o ganho de energia elétrica produzida a partir da análise da radiação solar;

3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

De acordo com o relatado acima propõe, este projeto, analisar o ganho de eficiência do modulo fotovoltaico comparando dois tipos de radiação solar incididas na superfície do módulo, horizontal e inclinada.

Desse modo, serão estudados assuntos referentes ao contexto da energia solar no Brasil, como seu potencial de utilização e seus benefícios. Ademais, pretende-se aprofundar o conhecimento sobre a fonte de energia solar, conhecer as características das células solar, descrevendo o entendimento do princípio do efeito fotovoltaico, conhecer os três modelos de células fotovoltaicas, e também conhecer os tipos de sistema fotovoltaico.

3.1 Energia solar fotovoltaica no brasil

3.1.1 Situação Atual

Segundo Vilalva e Gazoli (2012), atualmente a energia solar fotovoltaica no Brasil é empregada, principalmente, em pequenos sistemas isolados e autônomos instalados em locais não atendidos pela rede elétrica, em regiões de difícil acesso ou onde a instalação de linhas de distribuição de energia elétrica não é economicamente viável.

Num primeiro momento, os sistemas autônomos de energia solar fotovoltaica são uma importante alternativa para a geração de eletricidade em locais em que a rede elétrica convencional não chega. Existem muitos projetos nacionais, de geração fotovoltaica de energia elétrica, sobretudo, para o suprimento de eletricidade em comunidades rurais e ou isoladas do Norte e Nordeste do Brasil. Esses projetos têm como atuação em iluminação pública, bombeamento de água, irrigação, piscicultura; e para uso doméstico.

A maioria dos sistemas autônomos, instalados no Brasil, precisa de dispositivos para armazenar a energia elétrica, produzida durante o dia, para consumo à noite, entre os quais se enquadram as baterias e controladores de carga. Como a vida útil desses equipamentos é relativamente pequena, precisa-se então da manutenção desses sistemas, destacando o desafio do Programa de Desenvolvimento Energéticos dos Estados e Municípios (PRODEM), que tem como função manter funcionando adequadamente os sistemas após alguns anos de uso,

envolvendo a troca de componentes que atingiram o fim da vida útil ou que tenham parado de funcionar. (ABINEE, 2012).

A experiência fotovoltaica nacional no atendimento a comunidades isoladas e com o constante apoio do PRODEEM, entre os quais está a instalação de sistemas de acionamento de bombas d'água em sistemas de irrigação, foi fundamental para uma compreensão mais clara de questões importantes como as dificuldades de implantação dos sistemas, entre elas a logística, a licitação de sistemas, a formação de mão de obra qualificada e a manutenção dos sistemas fotovoltaicos.

No entanto, a energia elétrica gerada a partir da energia solar fotovoltaica em breve estará conectada na rede elétrica convencional, pois o potencial de exploração dessa energia no Brasil é imenso. Com certeza surgirão aplicações em sistemas de micro e mini geração de energia distribuída, e também em parques de geração, atuando como grandes usinas de eletricidade.

O número de sistemas fotovoltaicos, conectados à rede, vem aumentando muito no Brasil. Sua utilização deverá ter um salto extraordinário nos próximos anos, especialmente, com a recente aprovação pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), que diz respeito à micro e mini geração com sistemas conectados em baixa tensão alimentados por fontes renováveis de energia. (VILALVA e GAZOLI, 2012).

O setor fotovoltaico brasileiro está começando a crescer gradativamente, por meio de parcerias de empresas interessadas no investimento de fontes alternativas de energia e a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), incentivadora do uso dessa tecnologia, possibilitando aporte financeiro para a instalação de sistemas fotovoltaicos ligados à rede e sistemas autônomos.

3.1.2 Potencial de Utilização

Segundo Vilalva e Gazoli (2012), a energia solar fotovoltaica apresenta mais regularidade no fornecimento de eletricidade do que a energia eólica e pode ser empregada em todo território brasileiro, pois o país é privilegiado com elevadas taxas de irradiação solar em todas as regiões.

A quantidade de energia produzida por um sistema fotovoltaico depende da insolação do local onde ele é instalado. No Brasil, as regiões nordeste e centro-oeste são as que recebem maiores incidência de radiação solar por dia, resultando em grande potencial de aproveitamento

dessa energia. Outras regiões brasileiras também possuem boa incidência de radiação solar, sendo o sul do país a região que apresenta a menor insolação.

De acordo com Salamoni (2008), o país apresenta uma série de outras vantagens significativas com relação aos países industrializados. Podemos comparar o potencial de radiação solar brasileiro com o potencial alemão para a utilização da energia FV. A Alemanha possui o maior investimento na tecnologia fotovoltaica, sendo a primeira colocada no ranking dos países em potência fotovoltaica instalada.

Analisando a diferença entre a radiação solar no Brasil e da Alemanha veremos que a radiação do Brasil é bem mais significativa do que no território alemão, onde o maior valor em radiação apresenta-se no sul de seu país.

A melhor insolação da Alemanha é cerca de 3.500 Wh/m² disponível em uma pequena parte ao sul de seu território e não possui mais que 3.500 Wh/m² por dia em radiação. Já o Brasil apresenta valores de insolação na casa dos 6.000 Wh/m² diários.

Tomando a média anual de radiação solar nesses dois países, é possível verificar na figura 1, que a região mais ensolarada da Alemanha recebe aproximadamente 40% menos radiação solar do que a região menos ensolarada do Brasil, representada na figura 2.

Figura 1: Mapa da radiação solar da Alemanha para o plano horizontal

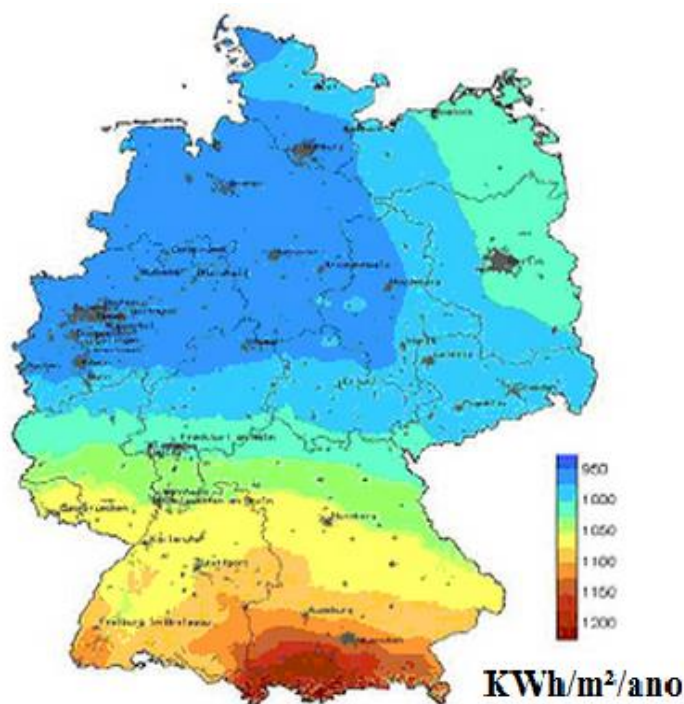
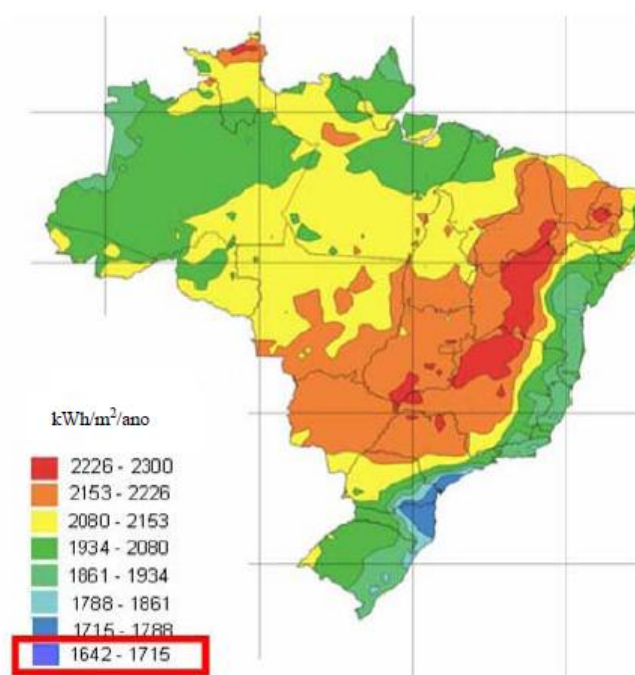


Figura 2: Mapa da radiação solar do Brasil para o plano horizontal



Fonte: Salamoni (2008).

Com base na análise dessas figuras se percebe quão promissor é o potencial energético solar em nosso país. Com o imenso potencial fotovoltaico, que o Brasil possui, este poderá se firmar como um dos principais líderes mundiais no emprego de energias renováveis alternativas.

Os sistemas fotovoltaicos podem gerar eletricidade em qualquer espaço onde for possível instalar um painel fotovoltaico. Destaca-se a geração de eletricidade em áreas urbanas e usinas fotovoltaicas poderão ser construídas em área aberta de qualquer dimensão, próximas ou distantes de centros de consumo. As condições climáticas e territoriais de nosso país são extremamente favoráveis para a energia solar fotovoltaica. (SALAMONI, 2008).

3.1.3 Benefícios

Para Abinee (2012), os sistemas fotovoltaicos conectados à rede em edificações podem atuar em sinergia com o sistema de distribuição, minimizando a carga, como aquela gerada por equipamentos de ar-condicionado em centros comerciais. Nos centros urbanos, os sistemas

fotovoltaicos poderão ser utilizados em áreas já ocupadas, telhados de residências, coberturas de estacionamentos e coberturas de edifícios, como unidades de geração distribuída.

No ponto de vista de Villalva e Gazoli (2012), a utilização dessa tecnologia também ajuda na preservação do meio ambiente, pois a energia gerada pelos módulos fotovoltaicos não provoca nenhuma agressão ambiental de modo que a energia gerada é 100% livre de emissões dos gases de efeito estufa (GEE). Além do aumento da disponibilidade de eletricidade, e dos benefícios ambientais do uso de uma fonte renovável, a inserção da energia solar fotovoltaica no país vai impulsionar o desenvolvimento tecnológico, criar empregos e mover a economia nacional.

3.2 Princípios da energia solar

3.2.1 A energia que vem do sol

A Terra se encontra a 150 milhões de quilômetros do sol e, a essa distância, somente uma pequena fração da energia solar chega a Terra. A energia nuclear produzida no interior do sol é quase toda convertida em energia luminosa que a Terra recebe como uma dádiva divina para criar e sustentar todas as suas manifestações de vida. Assim, podemos observar que é a partir dessa energia produzida pelo sol, que o projeto se apresenta com um viés sustentável.

Segundo Alvarenga (2000), nem toda energia solar está disponível; primeiramente a Terra reflete de volta para o cosmo cerca de 30% da energia, que fica definitivamente perdida para o uso na terra. Dos 70% restantes, 23% são armazenados na atmosfera, sobrando, assim, 47% como energia solar que incide diretamente sobre o solo brasileiro na forma de luz e calor.

De acordo com Alvarenga (2000), cerca de 1% do solo brasileiro pode ser utilizado para fins de coleta de energia solar. Como o Brasil tem aproximadamente 8,5 milhões de km² de superfície, 1% de sua superfície corresponde a 85 mil km² e a energia solar, incidente sobre esse 1% do solo brasileiro, tem a potência de 14,5 bilhões KW.

Levando-se em consideração que os módulos solares têm eficiência bastante limitada, em consequência disso só parte da energia solar pode ser convertida em energia elétrica. Os técnicos da Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul - (PUC) garantem que 10% de eficiência já foram alcançados; dessa forma, a energia de que podemos dispor pela coleta de energia solar sobre 1% do solo brasileiro, é de 1.450 milhões de KW que equivale a 145 centrais elétricas iguais a Itaipu.

Em apenas uma hora, o Sol despeja sobre a Terra uma quantidade de energia superior ao consumo global de um ano inteiro; energia gratuita, renovável e não poluente. O efeito fotovoltaico transforma a energia luminosa proveniente do Sol em eletricidade para abastecer lâmpadas, TVs, bombas e dessalinizadores de água, computadores, refrigeradores e quaisquer outros equipamentos elétricos. (KANNEMBERG, 2001).

3.2.2 A radiação solar

De acordo com Lopez (2012), o termo usado para designar radiação solar que incide sobre uma superfície em determinado instante e local é insolação ou irradiação. Quando a insolação é descrita como potência, é expressa em função de watt por metro quadrado (W/m^2) e normalmente representa o valor médio diário para cada mês. Em um dia claro a insolação total que atinge a terra alcança em torno de 1000 W/m^2 .

Horas de pico solar é o número de horas por dia, quando a insolação solar é igual a 1000 W/m^2 . Neste caso, 5 horas de pico solar equivale a 5 KWh/m^2 , representando a energia recebida durante um número total de horas do dia.

A inclinação do eixo da terra também afeta a quantidade de energia emitida pelo sol, pois a latitude correspondente do hemisfério sul da terra apresenta sua inclinação em direção ao sol, no período de dezembro a março, caracterizando verão. A estação verão, representa dias mais longos e uma maior insolação diária, bem como uma intensidade de radiação solar maior ao contrário da estação inverno, cujo período de insolação é menor.

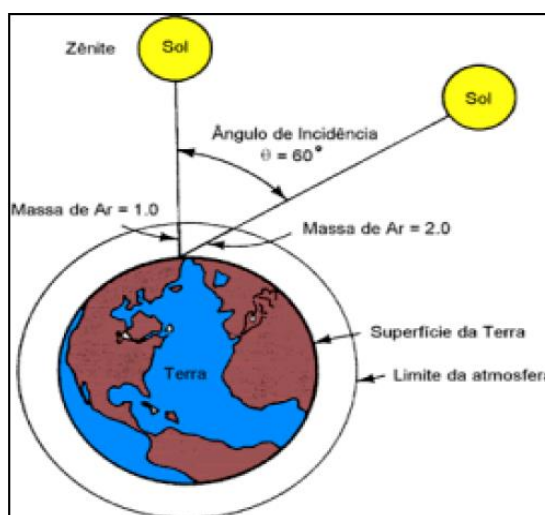
Segundo Cresesb (2004), devido à alternância de dias e noites, das estações do ano e períodos de passagem de nuvens e chuvosos, o recurso energético solar apresenta grande variabilidade, induzindo, conforme o caso, a seleção de um sistema apropriado de estocagem para a energia resultante do processo de conversão.

De acordo com Nascimento (2004), o Brasil apresenta uma radiação solar média acima de 2.500 horas/ano, por ter como característica um clima tropical. Dessa forma, a energia solar fotovoltaica poderá ser bem mais utilizada, sobretudo, em regiões remotas em que a rede de distribuição não tem acesso e, da mesma forma, em sistemas ligados à rede elétrica convencional.

Antes de atingir o solo, as características da radiação solar intensidade, distribuição espectral e angular são afetadas por interações com a atmosfera devido aos efeitos de absorção e espalhamento. Essas modificações são dependentes da espessura da camada atmosférica,

também identificada por um coeficiente denominado "Massa de Ar" (AM); e, portanto, do ângulo Zenital do Sol, da distância Terra-Sol e das condições atmosféricas e meteorológicas.(TIRADENTES, 2007); ilustrada na figura 3.

Figura 3: Trajetória dos raios de Sol na atmosfera e definição do coeficiente de "Massa de Ar" (AM)



Fonte: (Tiradentes, 2007).

Segundo Nascimento (2004), a Radiação Difusa é proveniente do espalhamento em todo céu, sendo constituída pela radiação solar, que é dispersa nas moléculas dos elementos químicos presentes na atmosfera, tais como: ação do ozônio, oxigênio, vapor d'água, etc.

Existe também a parcela de radiação, que é refletida ao atingir o solo, denominada de Radiação de Albedo, que é relevante quando em regiões de latitude próxima aos polos, e os índices de refletividade são próximos de 1,0.

Para efeito de estudos foram feitos vários experimentos sobre a radiação solar global, levando em consideração a insolação incidente na terra. No entanto, um grupo de pesquisadores utilizou dois métodos para a obtenção dos seus resultados nos quais se destacam a equação da regressão linear e a equação de Angström-Prescott.

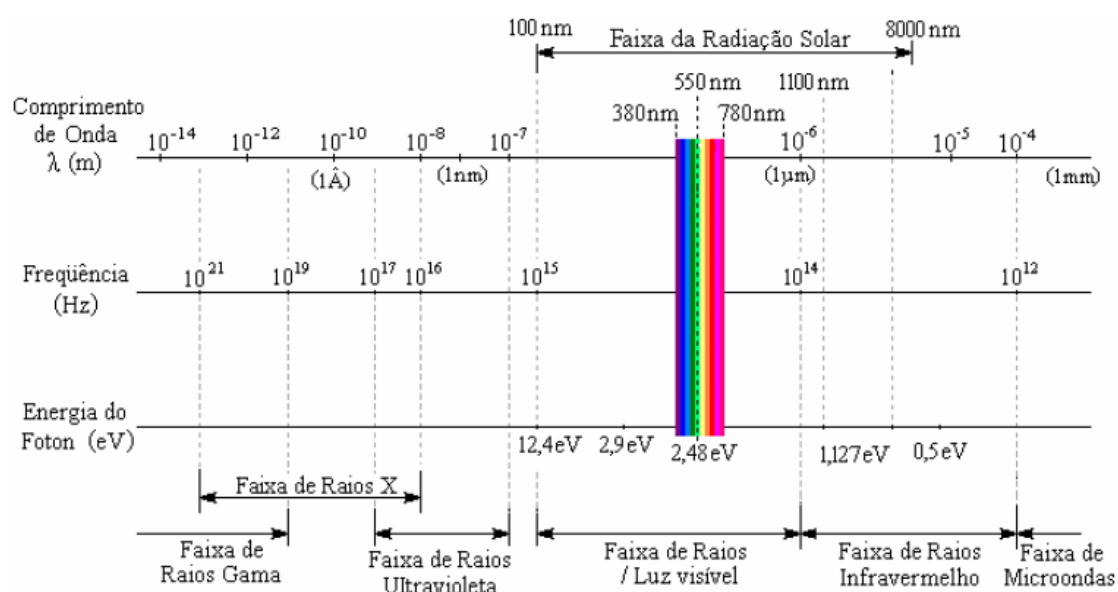
Com base nos estudos desses pesquisadores houve uma dedução na variação do brilho do sol em determinados meses do ano, com uma baixa insolação nas primeiras horas do dia, ou seja, quando o fluxo da radiação solar é menor, entre os meses de junho a novembro no equinócio do inverno e primavera.

Eles também determinaram o coeficiente da radiação solar difusa e o coeficiente de radiação solar direta, em que foi relatada que para o mês de janeiro a radiação difusa é maior e,

consequentemente, menor em julho, em contrapartida a radiação direta é menor em janeiro e maior em julho. (BURIOL et al., 2012).

De acordo com Ghensev (2006), o espectro da radiação solar pode ser caracterizado pela energia de seus fótons, onde os fótons com mais energia, possuem em torno de 12,4 eV (0,1m) e os fótons com menor índice de energia com 2,48 eV (0,5m). A energia associada a cada fóton (expressa em eV) pode ser relacionada com a frequência (Hz), com o comprimento de onda (γ) e da radiação solar (nm). Cada comprimento de onda corresponde a uma frequência e a uma energia. Quanto menor o comprimento de onda, maior é o índice de frequência e da energia. Uma pequena parcela do espectro de radiação solar é em forma de luz visível, outras faixas são de raios infravermelhos e ultravioletas, estes aspectos serão mostrados na figura 4.

Figura 4: Ilustração do espectro eletromagnético correspondente ao comprimento da onda (γ) da radiação solar (nm) a frequência (Hz) e a energia do fóton (eV)



Fonte: Ghensev,(2006).

Segundo Ghensev (2006), na faixa visível do espectro de radiação solar, encontramos na extremidade mais baixa de energia a cor VERMELHA e na extremidade mais alta de energia a cor Violeta. Nas faixas de radiação não visíveis ao olho humano, a ultravioleta tem maior índice de energia e dá a sensação de frio à pele epiderme, e o infravermelho, tem menor índice de energia e é sentida como calor.

De acordo com Ghensev (2006), a quantidade de fótons de radiação solar em forma de luz, que incide numa posição geográfica específica, é conhecida como insolação. Os valores de

insolação para um local físico específico são às vezes difíceis de obter. Quando a radiação solar alcança a terra, as diversas regiões recebem quantidades desiguais de energia, e as áreas próximas à linha de equador recebem radiação solar mais intensa. Vários fatores contribuem para a variação da incidência de raios solares sobre o solo, entre eles os movimentos de rotação e translação da terra, o clima, as nuvens, a poluição do ar em algumas regiões, etc.

3.3 CARACTERÍSTICAS DA CÉLULA FOTOVOLTAICA

3.3.1 O Efeito Fotovoltaico

Segundo Nascimento (2004), a conversão da energia solar em energia elétrica é realizada por meio do efeito fotovoltaico, observado por Edmond Bequerel em 1839. Bequerel observou uma diferença de potencial nas extremidades de uma estrutura semicondutora, quando incidia uma luz sobre esta. Baseados nas pesquisas de Bequerel e, impulsionados pelas novas descobertas da microeletrônica, em 1956, os cientistas construíram as primeiras células fotovoltaicas industriais.

O efeito fotovoltaico dá-se em materiais de natureza semicondutora, caracterizados pela presença de cargas de energia em que é permitida a presença de elétrons. O semicondutor mais usado é o silício.

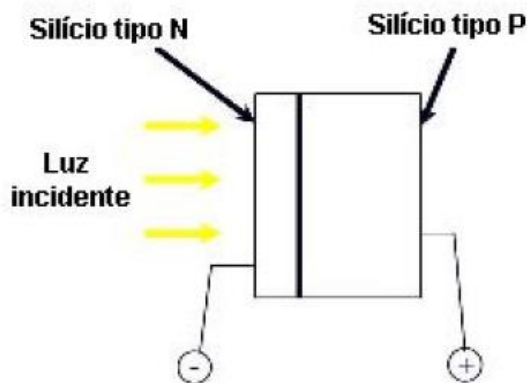
O silício é semicondutor de eletricidade, pois é um material com características intermediárias entre um condutor e um isolante, apresentando-se normalmente como areia; entretanto, por meio de métodos adequados obtém-se o silício em forma pura.

3.3.2 Módulo Fotovoltaico

O cristal de silício puro não possui elétrons livres e, portanto, é um mau condutor elétrico. Para alterar isso, é feita a dopagem, em que outros elementos são acrescentados. Mediante a dopagem do silício com o fósforo, obtém-se um material com elétrons livre ou material com portadores de carga negativa tipo N. Realizando o mesmo processo, mas acrescentando boro em vez de fósforo, obtém-se um material com características inversas, ou seja, déficit de elétrons ou material com cargas positivas livres (silício tipo P). Cada célula solar compõe-se de uma camada fina de material tipo N e outra com maior espessura de material tipo P. (GHENSEV, 2006).

Segundo Ghensev (2006), separadamente, ambas as camadas são eletricamente neutras. No entanto, ao serem unidas, exatamente na união P-N, gera-se um campo elétrico devido aos elétrons do silício tipo N, que ocupam os vazios da estrutura do silício tipo P, apresentado na figura 5.

Figura 5: Representação esquemática de uma junção tipo NP



Fonte: Nascimento (2004).

De acordo com Nascimento (2004), ao incidir a luz sobre a célula fotovoltaica, os fótons que a integram se chocam com os elétrons da estrutura do silício, dando-lhes energia e transformando-os em condutores. Devido ao campo elétrico gerado na união P-N, os elétrons são orientados e fluem da camada "P" para a camada "N".

Por meio de um condutor externo, conecta-se a camada negativa à positiva, gerando, assim, um fluxo de elétrons e uma corrente elétrica na conexão. Enquanto a luz continuar a incidir na célula, o fluxo de elétrons se manterá. A intensidade da corrente gerada variará proporcionalmente conforme a intensidade da luz incidente. (NASCIMENTO, 2004).

De acordo com Nascimento (2004), cada módulo fotovoltaico é formado por uma determinada quantidade de células conectadas em série. Como visto anteriormente, ao unir-se a camada negativa de uma célula com a positiva da seguinte, os elétrons fluem através dos condutores de uma célula para a outra. Este fluxo repete-se até chegar à última célula do módulo.

Tipicamente, uma célula fotovoltaica isolada, produz 1,5 W de potência, com tensão e corrente respectivamente 0,5 V e 3 A. No entanto, para aumentar o potencial de uma célula, devem-se realizar associações entre as células de tal forma a formarem um módulo fotovoltaico.

Complementando a explicação de Nascimento (2004), correspondente à formação dos módulos fotovoltaica, o princípio de montagem se caracteriza na adição de células individuais

conectadas em série, permitindo adicionar tensões. Geralmente, produzem-se módulos formados por 30, 32, 33 e 36 células em série, conforme a aplicação e tensões desejadas.

Procura-se dar ao módulo, rigidez na sua estrutura, isolamento elétrico e resistência aos fatores climáticos. Por isso, as células conectadas em série são encapsuladas num plástico elástico Etilvinilacetato-EVA, que faz também o papel de isolante elétrico, um vidro temperado com baixo conteúdo de ferro, na face voltada para o sol, e uma lâmina plástica multicamada Poliéster na face posterior. Em alguns casos o vidro é substituído por uma lâmina de material plástico transparente.

3.3.3 Célula Fotovoltaica

Quando dois tipos de semicondutores são inseridos em uma junção PN e os portadores possuem cargas opostas, os elétrons se movimentam na direção um do outro. Podem atravessar a junção, deplecionando a região de onde se originaram e transferiram sua carga para a nova região. Por meio desse efeito irá produzir um campo elétrico, chamado gradiente, que alcança rapidamente o equilíbrio com a força de atração dos portadores em excesso. Este campo se torna uma parte permanente do dispositivo. Neste caso, forma um tipo de rampa em que os portadores tendem a deslizar pela junção, quando estão próximo. (LOPEZ, 2012).

O semicondutor mais usado é o silício. Seus átomos se caracterizam por possuírem quatro elétrons que se ligam aos vizinhos, formando uma rede cristalina. Ao adicionarem-se átomos com cinco elétrons de ligação, a exemplo do fósforo, haverá um elétron em excesso, que não poderá ser emparelhado e que ficará sobrando, fracamente ligado a seu átomo de origem.

A figura 6 mostra o corte transversal de uma célula fotovoltaica.

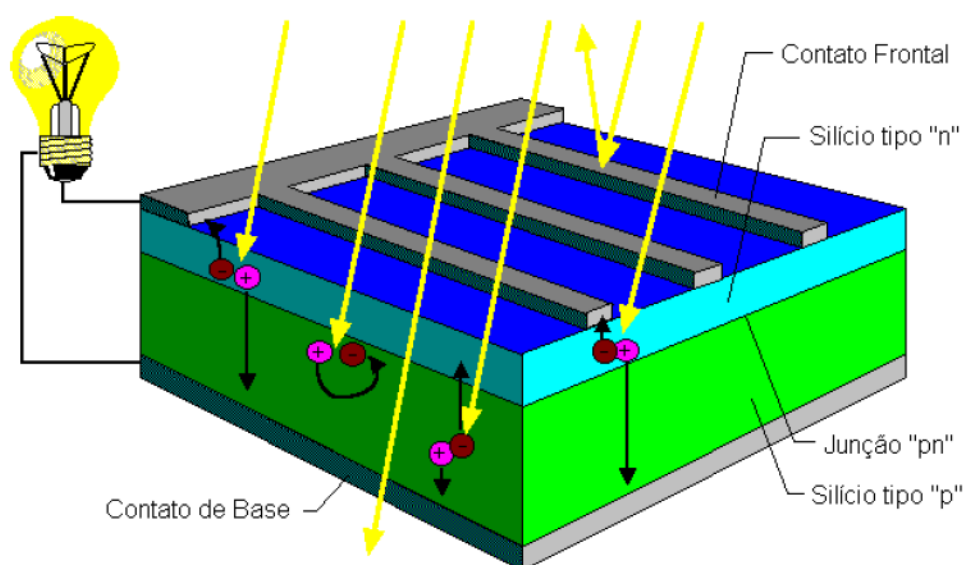


Figura 6: Corte transversal de uma célula fotovoltaica
Fonte: Cresesb, (2004).

Para o entendimento mais claro do funcionamento da célula fotovoltaica representa-se na figura 6, um modelo em corte de uma célula, exemplificando a incidência dos raios solares na superfície e, a partir daí, a movimentação dos elétrons migrando de uma camada para outra gerando um fluxo contínuo de elétrons.

Atualmente, as indústrias dessa tecnologia estão usando vários materiais e tipos de estruturas para a produção de células fotovoltaicas. O silício ainda é o insumo mais empregado, graças ao conhecimento tecnológico desenvolvido sobre esse material e a facilidade de estar disponível na natureza. As formas de semicondutores mais conhecidos são o silício monocristalino o amorfo e o policristalino.

3.3.4 Silício monocristalino

A célula de silício monocristalino é historicamente a mais usada, e comercializada, como conversor direto de energia solar em eletricidade e a tecnologia para sua fabricação é um processo básico muito bem constituído. A fabricação da célula de silício começa com a extração do cristal de dióxido de silício. Este material é desoxidado em grandes fornos, purificado e solidificado.

Para se utilizar o silício na indústria eletrônica, além do alto grau de pureza, o material deve ter a estrutura monocristalina e baixa densidade de defeitos na rede. O processo mais utilizado para se chegar às qualificações desejadas é chamado Processo Czochralski. O silício é fundido com uma pequena quantidade de dopante, normalmente, o boro que é do tipo P.

3.3.5 Silício policristalino

As células de silício policristalino são produzidas a partir de blocos de silício obtidos por fusão de silício puro em moldes especiais. Uma vez nos moldes, o silício esfria lentamente e se solidifica. Neste processo, os átomos não se organizam num único cristal. Forma-se uma estrutura policristalina com superfícies de separação entre os cristais.

Ao longo dos anos, o processo de fabricação tem alcançado eficiência máxima de 12,5% em escalas industriais.

3.3.6 Silício Amorfo

Uma célula de silício amorfo difere das demais estruturas cristalinas por apresentar alto grau de desordem na estrutura dos átomos. A utilização de silício amorfo para uso em fotocélulas tem mostrado grandes vantagens tanto nas propriedades elétricas quanto no processo de fabricação.

Essas células são obtidas por meio da deposição de camadas finas de silício sobre superfícies de vidro ou metal. A célula de silício amorfo apresenta duas desvantagens; a baixa eficiência de conversão com uma proporção entre 5% a 7% comparada às células mono e policristalinas de silício; em segundo, as células são afetadas por um processo de degradação logo nos primeiros meses de operação, reduzindo, assim, a eficiência ao longo da vida útil.

A figura 7 representa as células de silício amorfo, monocristalino, policristalino, respectivamente da esquerda para direita.

Figura 7: Esta figura está representando as células de silício amorfo, monocristalino, policristalino, respectivamente da esquerda para direita



Fonte: Marin, (2010).

Pesquisadores e cientistas do Laboratório de Engenharia de Processo de conversão e tecnologia de energia (LEPTEN), por meio de atividades em laboratório, conseguiram um novo método para aumentar a eficiência dos módulos solares. Tais estudos comprovaram que obtiveram um aumento na eficiência num valor aproximado de 43%, representando praticamente o dobro de eficiência referente ao módulo mais usado, atualmente, que no caso é o de silício monocristalino.

Essa tecnologia se denomina *High Concentration Photovoltaic* (HCPV), cujo princípio de funcionamento é baseado na concentração da radiação solar, feito através de uma célula fotovoltaica com lente ou espelho chamado lente de Fresnel, estando essas células numa ligação em série formando o módulo fotovoltaico. Uma das condições para fazer o uso desse

tipo de equipamento fotovoltaico é a necessidade da incidência perpendicular dos raios solares na superfície do módulo, com o objetivo de alcançar-se a máxima eficiência deste. Porém, para satisfazer-se esta condição, ter-se-á que avaliar o local de instalação do sistema. As áreas próximas à linha do equador apresentam um melhor aproveitamento dos raios solares incididos perpendicularmente.

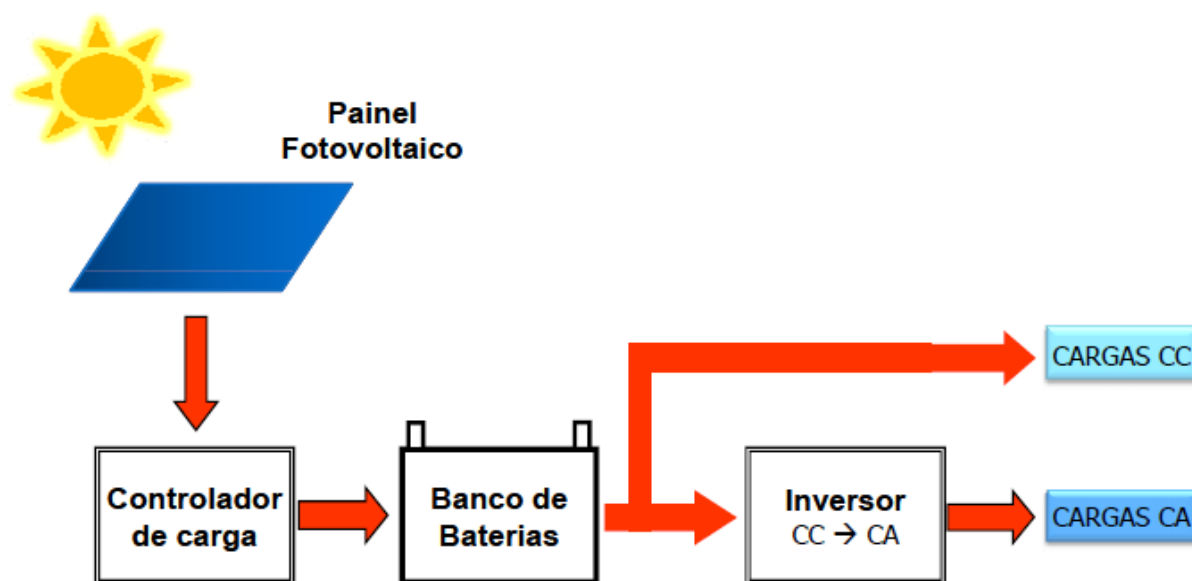
Além disso, esses módulos terão que ser instalados em sistemas com seguidores, ou seja, estruturas giratórias em que o módulo acompanha a direção do sol para que possa aproveitar o máximo à radiação solar. Fato importante, relativo à estrutura giratória, é o sombreamento sobre os módulos, pois ao dimensionar se deve levar em consideração este caso, haja vista que, se uma parte do arranjo estiver em meia sombra, poderá acarretar em deficiência no desempenho do sistema como todo. (FERNANDES et al., 2014).

3.4 OS SISTEMAS FOTOVOLTAICOS

3.4.1 Sistemas Isolados

São autônomos, isto é, independentes da rede elétrica convencional e outras formas de geração. Esses sistemas utilizam alguma forma de armazenamento para que se possa utilizar a energia elétrica fora do período de geração dos painéis. Esse armazenamento é obtido através de baterias, as quais são associadas a um dispositivo de controle de carga e descarga. (GUZZO, 2008).

Na figura 8 observa-se a arquitetura de um sistema fotovoltaico isolado.



Fonte: Viana, 2011.

Observando a arquitetura do sistema fotovoltaico isolado vimos que é essencial o uso de um banco de bateria devido à falta de geração da energia elétrica no período noturno, desse modo, a bateria cobrirá o consumo de uma determinada carga dimensionada durante a noite.

Em sistemas isolados, caso haja necessidade de corrente alternada, faz-se necessária a utilização do inversor de tensão com o objetivo de converterem-se sinais CC (corrente contínua) para sinais CA (corrente alternada).

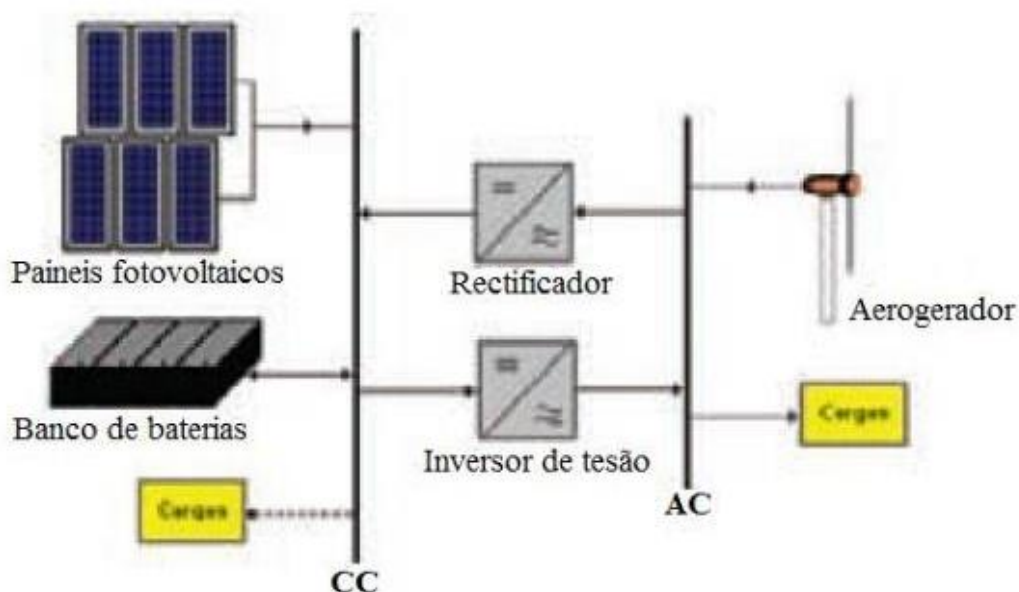
3.4.2 Sistemas Híbridos

Consistem na combinação dos sistemas fotovoltaicos com outras fontes de geração de energia, que assegurem a carga das baterias na ausência de sol. As fontes de energia auxiliares podem ser geradores eólicos, diesel, gás, gasolina ou outros combustíveis.

No entanto, são utilizados em sistemas de maior porte, com potência gerada na faixa de dezenas e centenas de quilowatt-hora-pico (kWp). Devido à grande complexidade de arranjos e multiplicidade de opções, a forma de otimização do sistema torna-se um estudo particular para cada caso e necessidade. (GUZZO, 2008).

Na figura 9 mostra-se o Sistema Híbrido Fotovoltaico-Eólico.

Figura 8: Sistema Híbrido Fotovoltaico-Eólico



Fonte: Viana, 2011.

Um sistema híbrido de geração do tipo fotovoltaico-eólico é baseado nos aproveitamentos solar fotovoltaico e eólico. A combinação dessas fontes procura explorar satisfatoriamente a complementaridade entre ambas no tempo. Uma importante vantagem do sistema híbrido fotovoltaico-eólico é não empregar recursos não renováveis, por exemplo, o óleo diesel. Entretanto, devido à característica intermitente e aleatória das fontes, faz-se necessário o uso de um sistema de armazenamento de energia maior que o utilizado nas configurações que possuem geração diesel-elétrica.

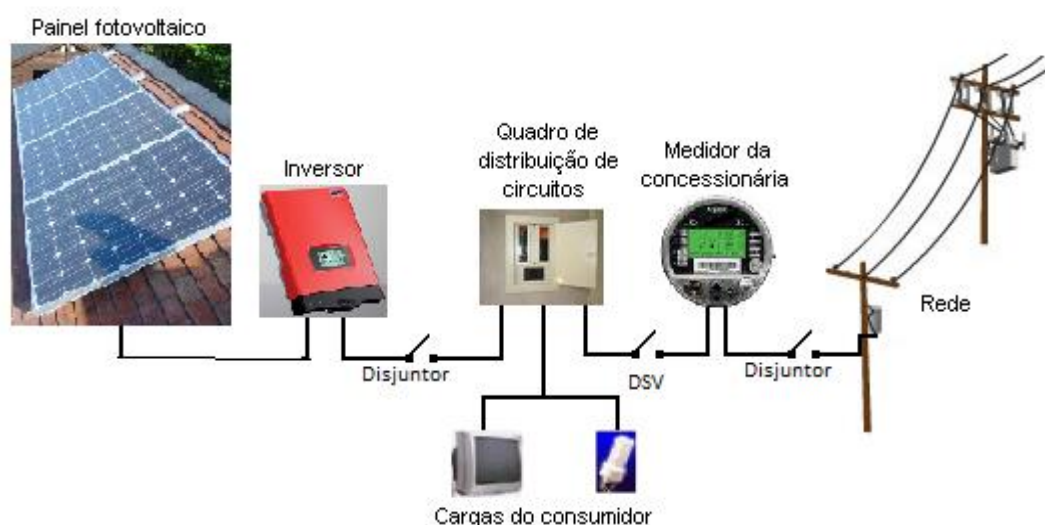
3.4.3 Sistema Conectado à rede Elétrica

Sistemas conectados à rede são aqueles em que a potência gerada pelo arranjo fotovoltaico é entregue à rede elétrica. Para tanto é indispensável que se utilize um inversor, que deve satisfazer as exigências de qualidade e segurança para que não degrade a qualidade do sistema no qual se interliga o arranjo fotovoltaico.

A potência fotovoltaica instalada nesse tipo de sistema é muito variável, podendo atingir centenas de kWp em centrais fotovoltaicas e dezenas de kWp para alimentação de cargas residenciais. (CRESESB, 2014).

Vê-se na figura 10, a arquitetura de um sistema fotovoltaico conectado à rede elétrica.

Figura 9: Arquitetura de um sistema fotovoltaico conectado à rede elétrica



Fonte: Viana, 2011.

De acordo com a figura 10, que está representando a geração fotovoltaica conectada à rede elétrica convencional, cujos componentes dos sistemas são os módulos, inversor *grid tie*, neste caso é um inversor, especialmente, para sistemas conectados a rede, um medidor de energia que geralmente é um relógio bidirecional e o quadro de distribuição para fazer uma organização entre cargas específica e a energia injetada a rede convencional.

Esse sistema vem crescendo gradativamente em nosso país, pois a energia gerada pelos módulos fotovoltaicos será injetada diretamente na rede de distribuição e, desse modo, não será preciso de acumuladores para armazenar a energia e usar durante a noite.

3.5 OS COMPONENTES DO SISTEMA FOTOVOLTAICO CONECTADO À REDE

3.5.1 Módulo Fotovoltaico

O módulo fotovoltaico é a unidade básica de todo o sistema. O módulo é composto por células conectadas em arranjos, produzindo tensão e corrente suficientes para a utilização da energia.

As explicações correspondentes ao funcionamento dos módulos estão apresentadas na seção 3.3.2.

3.5.2 Inversor CC/CA

Os inversores têm a finalidade de transformar uma corrente contínua em corrente alternada, mudando a sua forma de onda. São utilizados, por exemplo, quando se quer alimentar uma carga CA através de uma fonte CC. Como os módulos fotovoltaicos geram tensão sob a forma de corrente contínua, precisa-se do inversor para utilizar equipamentos: como TVs, rádios, motores ou qualquer outro tipo de carga que opere em corrente alternada.

Em um SFCR o inversor serve para adequar as características da energia gerada pelos módulos às características da rede elétrica convencional. (CRESESB, 2014).

Já os inversores central são utilizados em parques fotovoltaico em que a potência instalada geralmente é alta e não necessita de ligações com vários inversores de baixa potência.

Os inversores passam por testes como o STC (condições de teste padrão), no qual representa as especificações técnicas do inversor como tensão, corrente, eficiência, potência e etc.

Os Inversores utilizados em sistemas fotovoltaicos conectados à rede têm as principais funções: Rastreamento do ponto de máxima potência Maximum Power Point Tracking (MPPT), converter a corrente CC gerada pelos módulos em corrente CA, Desconexão e isolamento e relatório de status.

O MPPT tem a função de rastrear o ponto de máxima potência, a fim de ajustar a corrente e tensão de cada módulo, visando deixar funcionando corretamente independente da radiação solar incidente.

Os módulos fotovoltaicos geram uma corrente contínua (CC) e, como a corrente disponível na rede convencional é corrente alternada (CA) precisa-se de equipamento específico com a função de conversão da corrente contínua em corrente alternada.

Na situação de desenergização da rede de energia elétrica convencional, seja por falhas técnicas ou operações de manutenção, o inversor deve isolar o gerador FV dessa rede, evitando possíveis acidentes com operadores que estiverem trabalhando no restabelecimento operacional. As funções de desconexão e isolamento, do inversor, são responsáveis por essa manobra.

Relatório de *status*: quando o sistema está em funcionamento é importante que haja um monitoramento, para que se possa saber se o inversor está funcionando corretamente, e também se os módulos não apresentam falha na geração da eletricidade. Uma dessas falhas é o sombreamento parcial dos módulos, prejudicando a eficiência do sistema. O método para acesso a esse relatório será através do *display* inserido no inversor ou com auxílio de um computador através de portas USB. (PEREIRA et al., 2008).

Ilustra-se na figura 11, um inversor de corrente.

Figura 10: Inversor de corrente



Fonte: Santerno, 2013

3.5.3 Relógio Bidirecional

O sistema de medição de energia, utilizado pelos usuários que possuem um sistema fotovoltaico de autoprodução de energia, será do tipo bidirecional. Em outras palavras, o medidor instalado na entrada desse usuário será capaz de registrar o consumo e a geração de eletricidade. O consumo corresponde ao fluxo de potência com o sentido tradicional da concessionária para o usuário. A geração corresponde à injeção ou exportação de energia para a rede elétrica, que ocorrerá nos instantes em que a geração fotovoltaica for superior ao consumo do usuário.

O medidor do tipo bidirecional terá dois registradores, com numerações distintas, um para o consumo e outro para a geração de eletricidade. Isso permitirá a apresentação de dois valores, um de geração e outro de consumo, nas faturas de eletricidade dos usuários que possuem um sistema fotovoltaico registrado na concessionária. (GUERRA, et al. 2008).

A figura 12 apresenta um relógio bidirecional.



Figura 11: Relógio Bidirecional
Fonte: Ecilenergia, 2010.

3.5.4 Quadro de Proteção corrente CC

Em toda a instalação elétrica, que trabalhe com tensões superiores a 48 V, devem-se tomar cuidados com problemas relativos à segurança e utilizar exclusivamente materiais homologados. Deve-se dar especial atenção à resistência de isolamento e resistência de terra da instalação, pois mesmo realizando todos os procedimentos recomendados, podem aparecer falhas que ponham em risco os utilizadores.

Justifica-se, desse modo, a necessidade de instalação do quadro de proteção no lado CC do sistema fotovoltaico, pois além de possuir fusíveis para a conexão dos *strings*¹, também precisa de uma chave de desconexão e um dispositivo contra surto. Nesse mesmo quadro deverá ser instalado o barramento de aterramento para dar mais proteção ao sistema isolando-o de possíveis descargas elétricas ou sobretensão. (VILLALVA GAZOLI, 2013).

¹ Conjunto de módulos fotovoltaicos ligados em série, visando o aumento de tensão de alimentação.

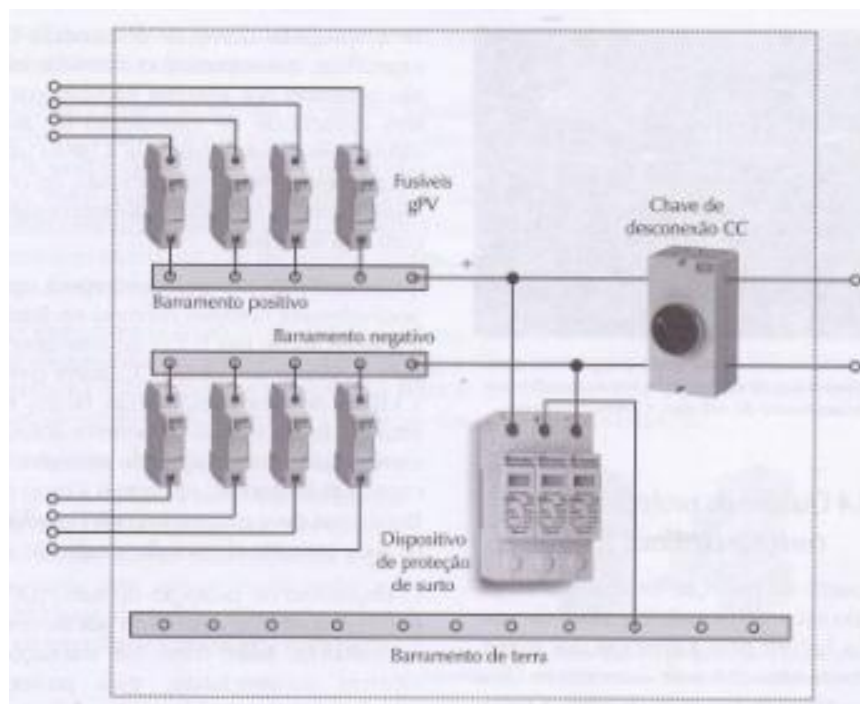


Figura 12: Quadro de Proteção Corrente CC.
Fonte: Villalva e Gazoli, 2013.

A figura 13 está esquematizando um quadro de proteção para sistemas fotovoltaicos em corrente contínua CC, ilustrando os diversos dispositivos de proteção contra surtos de tensão e sobrecorrente.

3.5.5 Quadro de proteção corrente CA

Este quadro de proteção faz a conexão entre os inversores do sistema fotovoltaico e a rede elétrica. O quadro de proteção em CA é um tipo especial de conexão, que tem a função de abrigar e organizar os disjuntores e componentes adicionais pertencentes aos diversos circuitos elétricos de um projeto. (VILLALVA GAZOLI, 2013).

Os componentes que se apresenta nesse quadro são: Disjuntores bipolar, DPS (Dispositivo de Proteção de Surto), Barramento de Terra e o disjuntor diferencial residual. A figura 14, a seguir, ilustra um esquema do quadro de proteção corrente CA.

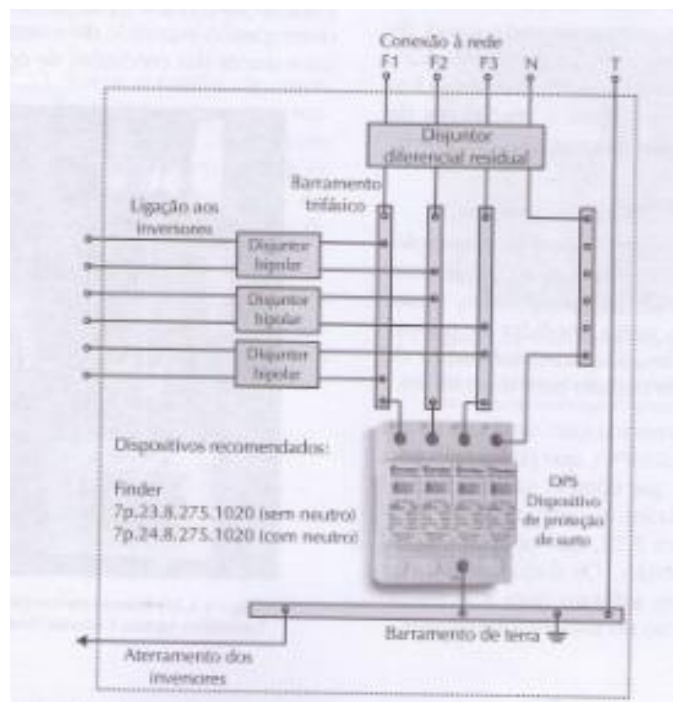


Figura 13: Quadro de proteção em CA.
Fonte: Villalva e Gazoli, 2013.

4 METODOLOGIA

Este projeto está classificado como pesquisa Descritiva com o foco no levantamento de informações sobre o assunto estudado. De acordo com Gil, 2010, a pesquisa descritiva tem como objetivo a descrição das características de determinada população. Podem ser elaboradas também com a finalidade de identificar possíveis relações entre variáveis.

Entre as pesquisas descritivas, salienta-se aquela que tem por objetivo estudar as características de um grupo, comunidade ou realidade estudada. Em síntese, a pesquisa descritiva, em suas diversas formas, trabalha sobre dados ou fatos colhidos da própria realidade. SILVA, et al 2007.

A pesquisa qualitativa será utilizada para dar sustentação ao tema estudado, indicando a parte estrutural e funcional do projeto. Segundo Chizzotti, 2006, a pesquisa, quando qualitativa, opera uma compreensão profunda de certos fenômenos sociais, apoiados no pressuposto do aspecto subjetivo da ação social, visto que foca fenômenos complexos e/ou únicos. “O termo qualitativo implica uma partilha densa com pessoas, fatos e locais que constituem objetos de pesquisa, para extrair desse convívio os significados visíveis e latentes que somente são perceptíveis a uma atenção sensível”, pois, os estudos qualitativos descrevem a complexidade de determinado problema e a interação de certas variáveis.

Este projeto terá informações numéricas, com isso será quantificado os dados estudados e por esse motivo a pesquisa se caracteriza também como quantitativa. A pesquisa quantitativa enfatiza os indicadores numéricos e os percentuais sobre determinado fenômeno pesquisado. Apresenta-se em forma de gráficos e tabelas, comparativas ou não, sobre determinado objeto/fenômenos pesquisados e pode ser, na maioria das vezes, aplicada juntamente com a pesquisa qualitativa. CHIZZOTTI, 2006.

Este projeto terá como fonte de pesquisa, Pesquisa Bibliográfica: A pesquisa bibliográfica procura explicar um problema a partir de referências teóricas publicado em artigos, livros, dissertações e teses. Pode ser realizada independentemente ou como parte da pesquisa descritiva ou experimental. A pesquisa bibliográfica é meio de formação por excelência e constitui o procedimento básico para os estudos monográficos, pelos quais se busca o domínio do estado da arte sobre determinado tema. SILVA, et al 2007.

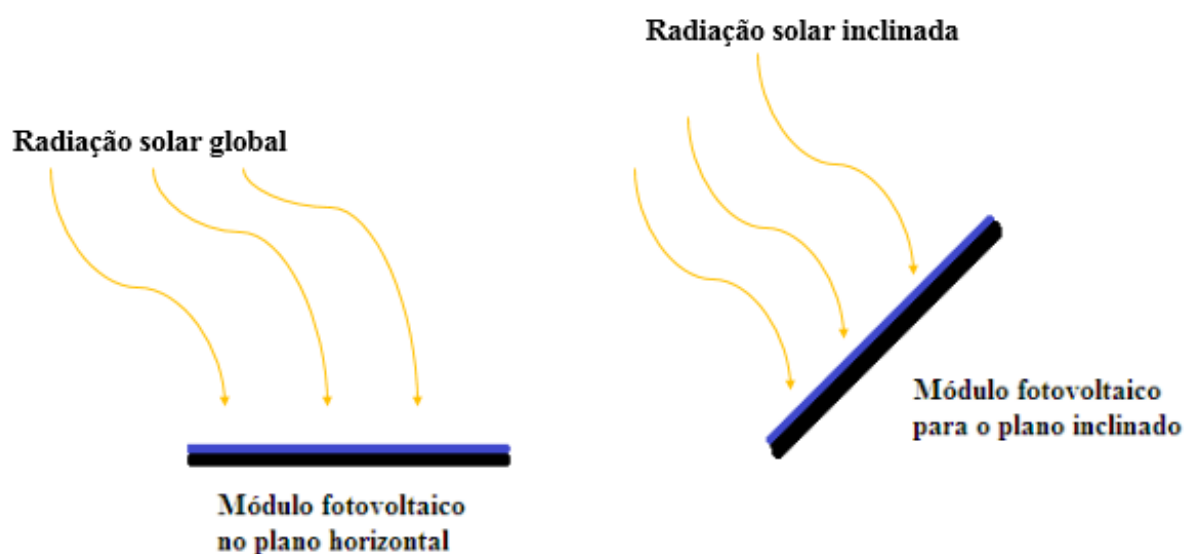
Com base nas informações acima, este projeto final será elaborado em três fases: teórica, pesquisa descritiva e pesquisa quantitativa. A fase teórica servirá para embasamento teórico e estará apoiada na revisão bibliográfica. A pesquisa descritiva focará no levantamento de informações relativas a dados práticos de dimensionamento do sistema de eficiência dos

módulos fotovoltaicos, tendo a finalidade de do projeto e indicação da sustentabilidade do mesmo. A pesquisa quantitativa levantará dados e modelos matemáticos relativos ao projeto, dando suporte ao dimensionamento do sistema de eficiência com intuito de minimizar as perdas por radiação solar e maximizar o ganho de energia produzida.

Conforme já mencionado, propusesse a analisar a viabilidade técnica do aumento na eficiência de produção de energia elétrica do modulo fotovoltaico em função da variação da radiação solar incidida na superfície do módulo, foi escolhida a cidade de Palmas (TO) pela facilidade na disponibilização de informações.

A Figura 15 apresenta um esboço do sistema proposto. Ele consiste basicamente dos módulos fotovoltaicos, comparando os dois modelos a serem estudados para o sistema de eficiência, utilizando a radiação solar global em superfície horizontal e radiação solar em superfície inclinada.

Figura 15: Modelos a serem estudados para o sistema de eficiência proposto



Fonte: Autor

Com base na figura 15 foi feito o dimensionamento do sistema de eficiência, considerando a radiação global e comparando com os cálculos da radiação solar no plano inclinado. Após a análise das radiações solares, fez-se o cálculo do ganho de eficiência e energia produzida pelos módulos fotovoltaicos obedecendo a configuração do sistema proposto.

5 RESULTADOS

Nesta seção serão apresentados os resultados da pesquisa, com finalidade em obter a eficiência de conversão e energia produzida pelo módulo fotovoltaico a partir da análise da radiação solar incidida.

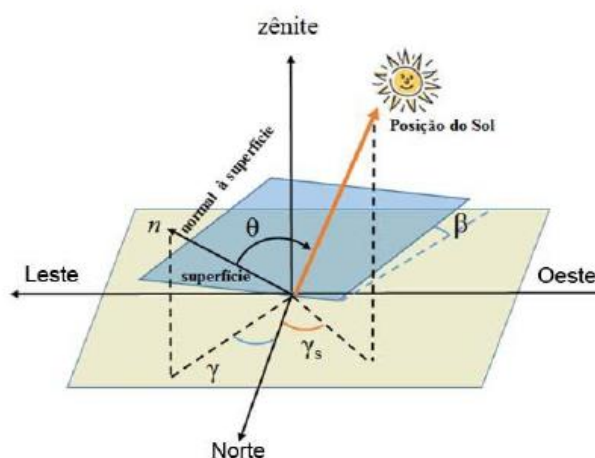
5.1 CÁLCULO DA RADIAÇÃO SOLAR INCIDENTE SOBRE UM PLANO INCLINADO

Neste tópico será abordado a metodologia de cálculo para radiação solar que incide sobre um plano inclinado, ou seja, o recurso solar necessário para geração de energia elétrica pelos módulos fotovoltaicos.

5.1.1 Posição do sol para superfície inclinada

Para estimar a radiação solar incidente sobre um painel fotovoltaico, é necessário determinar a posição do sol com relação a essa superfície. A Fig. 16 apresenta um esquema de alguns dos ângulos que definem a posição do sol em relação a uma superfície inclinada.

Figura 16 - Posição do sol relativa a uma superfície inclinada



Fonte: Cresesb 2014.

Como já mencionado, os dados de radiação global, direta e difusa são médias mensais, ou seja, tem-se o conjunto de dados de um único dia típico (média) para cada mês do ano. Isso

significa que, ao invés uma simulação diferente para cada dia do ano, foi considerado que cada mês possui 28, 30 ou 31 dias idêntico, com mesmos dados de radiação e dn (número do dia do ano). Assim, define-se o número do dia do ano médio de cada mês de acordo com a tabela 1.

Tabela 1 - Dias médios para cada mês do ano

Mês	Número do dia do ano (dn)	Data
Janeiro	17	17
Fevereiro	47	16
Março	75	16
Abril	105	15
Maio	135	15
Junho	162	11
Julho	198	17
Agosto	228	16
Setembro	258	15
Outubro	288	15
Novembro	318	14
Dezembro	344	10

Fonte: Yang *et al*, 2015.

O ângulo de declinação solar (δ) é formado entre o plano equatorial e a linha que une o centro da terra ao do sol, como apresentado na fig. 4. Este ângulo muda continuamente, logo, nos equinócios de primavera e outono é igual a zero, no solstício de inverno é $23,45^\circ$, e no solstício de verão é $-23,45^\circ$. Ele é dado por:

$$\delta = 23,45 \text{sen} \left[\frac{360(dn + 284)}{365} \right] \quad 1)$$

O ângulo horário (ω) representa o movimento relativo do sol em torno da terra, utilizando o tempo solar verdadeiro como referência. Ele é dado por:

$$\omega = 15^\circ (TSV - 12) \quad 2)$$

Esse ângulo é negativo na parte da manhã, e positivo no período da tarde. O ângulo do zênite (θ_z) é dado por:

$$\theta_z = \cos^{-1}(\sin(\delta)\sin(\varphi) + \cos(\delta)\cos(\varphi)\cos(\omega)) \quad 3)$$

Onde, φ é a latitude local. O ângulo de elevação solar (α_s) é dado por:

$$\alpha_s = (90 - \theta_z) \quad 4)$$

O ângulo de azimute solar (γ_s) é dado por:

$$\gamma_s = 180 - \cos^{-1}\left(\frac{\sin(\alpha_s)\sin(\varphi) - \cos(\delta)}{\cos(\varphi)\cos(\alpha_s)}\right) \quad 5)$$

Finalmente, o ângulo de incidência solar (θ_s), que é o ângulo entre os raios solares e normal à superfície do módulo fotovoltaico. Ele é dado por:

$$\theta_s = \cos^{-1}(\cos(\beta)\cos(\theta_z) + \sin(\beta)\sin(\theta_z)\cos(\gamma_s - \gamma)) \quad (6)$$

Onde β é a inclinação do módulo fotovoltaico em relação a horizontal.

5.1.2 Cálculo do ganho por radiação solar

Na seção anterior foi apresentada a metodologia para o cálculo dos ângulos de zênite e de incidência dos raios solares com relação à superfície do módulo fotovoltaico em função do tempo, e para uma dada orientação da superfície. Esses ângulos são essenciais para o cálculo do ganho de radiação solar.

A radiação direta (G_{dm}) corresponde aos raios solares que incidem diretamente no plano horizontal sem nenhum tipo de obstruções. Através da radiação direta incidida no plano horizontal, pode-se calcular a radiação normal à superfície inclinada (G_{bb}) através da seguinte equação:

$$G_{bb} = G_{dm} R_b \quad 7)$$

Onde G_{dm} [W/m²] é o ganho por radiação direta média e R_b é um fator de conversão geométrico, dado por:

$$R_b = \frac{\cos \theta_s}{\cos \theta_z} \quad 8)$$

A radiação difusa (G_{db}) é calculada utilizando o mesmo processo para radiação direta, porém com dados da radiação difusa média:

$$G_{db} = G_{fm} R_b \quad 9)$$

Onde, G_{fm} é correspondente a radiação difusa média.

Por fim chegamos à equação para o cálculo do ganho por radiação inclinada, incidida na superfície dos módulos fotovoltaicos:

$$G_{radtra} = (G_{bb} + G_{db}).(1 - \rho) \quad 10)$$

Onde ρ é a refletividade da cobertura do painel, dada pelo fabricante em forma de tabela. A tabela 3 mostra os valores empregados neste trabalho. Observe que os valores mudam com as horas do dia.

Tabela 2 - Valores de Índice de refletividade

Horas do dia	Índice de refletividade [ρ]
8	0,25
9	0,20
10	0,15
11	0,10
12	0,05
13	0,10
14	0,15
15	0,20
16	0,25
17	0,25
18	0,30

Fonte: Autor.

Essa é quantidade de energia que efetivamente atinge a superfície dos módulos. Portanto, para o cálculo da radiação total aplica-se as equações acima. Percebe-se que é utilizado o cosseno do ângulo de incidência solar e ângulo referência zênite, porque os módulos

estão orientados para o norte em estrutura fixa. Nesta situação pode ser determinado o valor de potência gerado pelo sistema fotovoltaico fixo.

Já um sistema móvel por rastreamento não utiliza o R_b para o cálculo da radiação, pois a estrutura acompanha a trajetória do sol ao longo do dia. Logo, o valor final da radiação solar será maior e mais bem aproveitado, pois se trata da radiação global inclinada.

5.1.3 Cálculo da energia e eficiência do módulo fotovoltaico

Encontrado o valor do ganho por radiação solar em superfície inclinada, e conhecendo os dados técnicos de um módulo fotovoltaico, é possível determinar a energia total produzida por um módulo E_m ou até mesmo calcular a produção de energia elétrica de um parque fotovoltaico:

$$E_m = G_{radtra} \cdot A_m \cdot \eta_m \quad 11)$$

Em que, A_m é a área superficial do módulo fotovoltaico e η_m a eficiência unitária encontrada no *datasheet* do fabricante do módulo fotovoltaico. Para calcular a energia produzida por um parque fotovoltaico utiliza-se a equação 11, porém deve-se salientar que a área de instalação sofre uma grande variação, pois na maioria dos parques instalados no Brasil há milhares de metros quadrados.

Além disso, podemos calcular a eficiência de conversão de ambos os sistemas, considerando a radiação inclinada e horizontal, com o intuito de obter a comparação de rendimento:

$$\eta = \frac{E_u}{E_t} \quad 12)$$

Onde, E_u corresponde a energia útil produzida pelo módulo ou parque fotovoltaico. E_t é a energia total entregue pelo sistema, esse valor é padrão, sendo calculado em condições normais de temperatura, radiação solar em fase de teste na sua produção.

5.2 AVALIAÇÃO DA RADIAÇÃO SOLAR

Como já citado, para determinar os níveis médios de radiação solar que incide na superfície horizontal e inclinada na cidade de Palmas (TO), utilizou-se o software Radiasol².

Portanto os dados de radiação solar foram computados e transferidos para uma planilha de cálculo no Excel. Após ter realizado os cálculos a partir das equações apresentadas no tópico 3, foram comparados os resultados de eficiência e potência gerada para dois métodos de montagem do sistema fotovoltaico inclinada e horizontal.

A figura 17 apresenta uma demonstração dos dados de radiação.

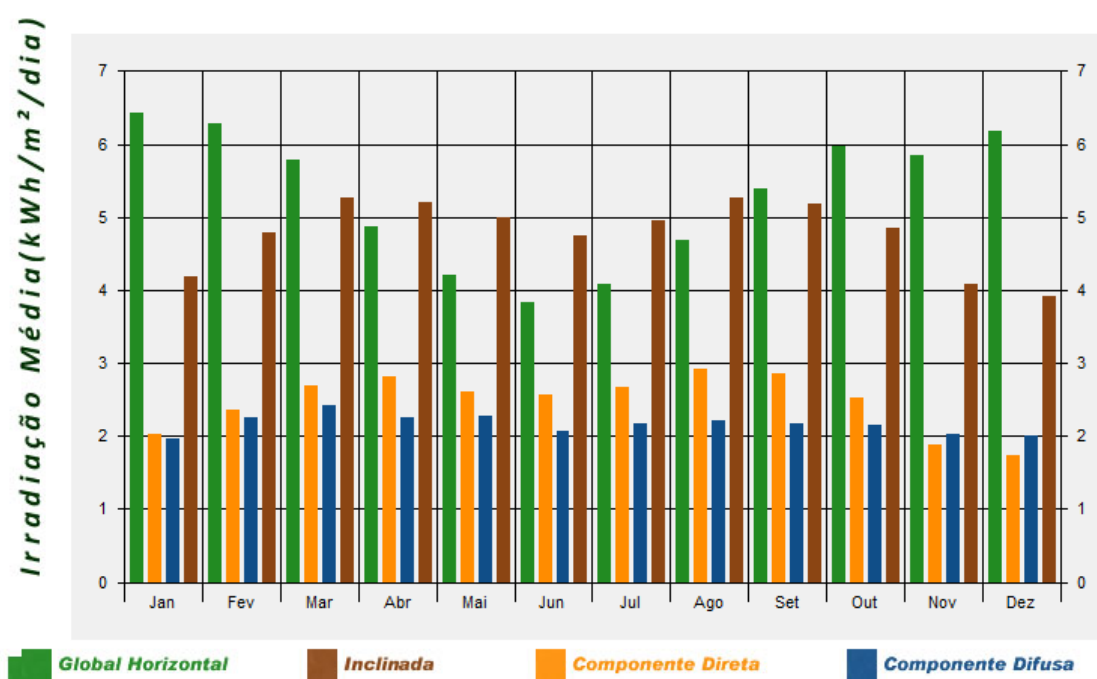


Figura 17 - Representação das componentes da radiação solar.
Fonte: Autor.

Os dados acima são um exemplo, pois quando se trata de radiação solar a cidade de Salvador (BA) é a que mais recene esse recurso, mais especificamente Bom Jesus da Lapa no ano de 2019. As colunas da radiação global horizontal, direta e difusa são utilizadas para o cálculo do ganho de radiação em sistema fixo. Já a barra descrita como radiação inclinada, representa a incidência perpendicular em cima de uma superfície plana orientada pela trajetória do sol, portanto, utilizada em sistema de montagem móvel.

5.3 COMPARAÇÃO ENTRE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS EM ESTRUTURA FIXA E COM RASTREAMENTO SOLAR (Horizontal e Inclínada)

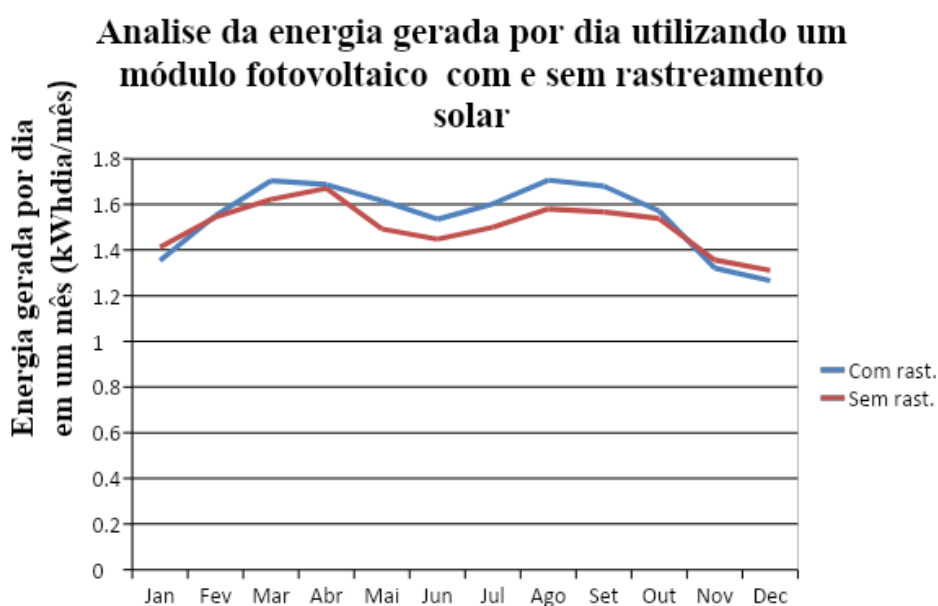
A partir dos dados coletados pelo software utilizado para simulação, foi possível comparar o desempenho de um sistema fotovoltaico fixo e por um sistema com rastreamento solar.

Esta análise permitiu a comparação entre um módulo fotovoltaico, verificando o desempenho do módulo nas duas formas de estrutura de montagem, bem como analisar o ganho de eficiência do parque fotovoltaico projetado.

5.3.1 Ganho na eficiência e energia produzida pelo módulo e parque fotovoltaico

A figura 18 apresenta a evolução do ganho de energia elétrica produzida por um módulo fotovoltaico em um dia típico de um mês.

Figura 18 - Representa a energia gerada pelo módulo fotovoltaico.



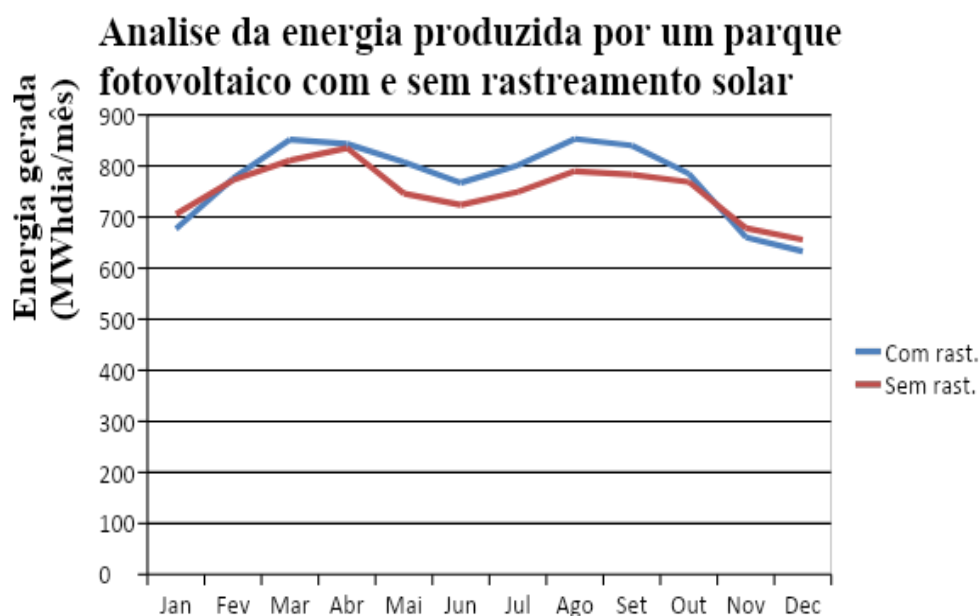
Fonte: Autoria própria.

A energia produzida pelo módulo fotovoltaico sofre variação ao utilizar os dois tipos de estrutura de montagem. Percebe-se que há um aumento no ganho de energia utilizando o sistema com rastreamento solar principalmente nos meses de fevereiro a novembro.

Nota-se ainda que o valor de energia gerada nos meses de janeiro e dezembro é maior para o sistema sem rastreamento, isso ocorre devido aos desvios e rotação da terra (chamado de eixo de rotação e translação).

A figura 19 representa a energia gerada pelo parque fotovoltaico dimensionado para cidade em estudo, tendo como análise dois métodos de estrutura de montagem, fixo e por rastreamento solar. (Inclinado e horizontal)

Figura 19 - Apresenta a energia produzida por um parque fotovoltaico.

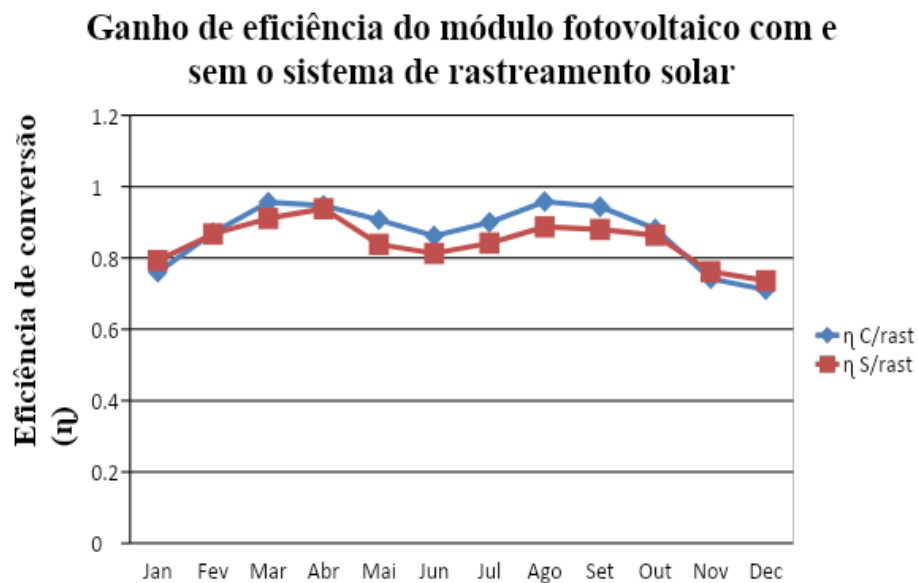


Fonte: Autoria própria.

É visto que existe um aumento gradativo na energia produzida pelo parque fotovoltaico. Como aconteceu no caso anterior, apenas os meses de janeiro e dezembro tiveram uma média menor de energia gerada e isso aconteceu pelo mesmo motivo anterior.

Portanto, o resultado mostra que há um aumento no desempenho do parque fotovoltaico utilizando sistema por rastreamento solar, comparando os dois métodos de estrutura de montagem dos módulos. A figura 20 apresenta os resultados de eficiência de conversão de um módulo fotovoltaico.

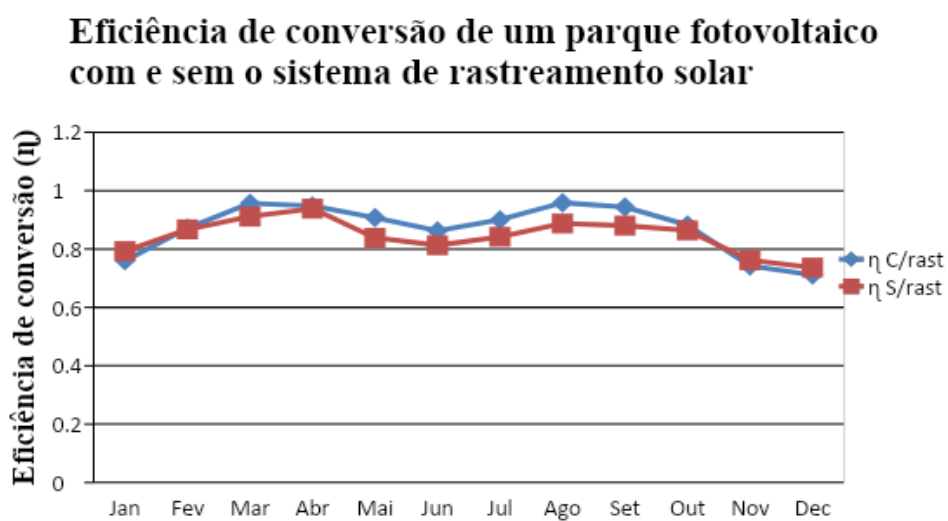
Figura 20 - Apresenta a eficiência de conversão.



O gráfico mostra uma oscilação positiva para o ganho de eficiência do módulo fotovoltaico ao utilizar o sistema por rastreamento solar em sua estrutura de montagem. Percebe-se que há um aumento médio de 4,5% na eficiência de conversão, isso representa um ganho na energia produzida de 68Wh/dia.

A figura 21 representa o aumento na eficiência de um parque fotovoltaico com e sem o sistema de rastreamento solar.

Figura 21- Ganho na eficiência de conversão.



Da mesma forma como analisado anteriormente, o ganho na eficiência foi positivo para o parque fotovoltaico, onde foram levados em consideração os dois tipos de estrutura de montagem e, comparando os resultados, foi obtido um aumento na eficiência de conversão para o sistema com rastreamento solar em relação à estrutura de montagem fixa.

O ganho médio na eficiência é de 4,3%, relacionando esse percentual ao aumento em energia produzida pelo menos em uma hora por dia, isso equivale a 38,3MWh/dia, pelo parque fotovoltaico.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O aumento na eficiência de conversão aplicado no sistema de rastreamento solar foi realmente atingido. Tanto o módulo quanto o parque fotovoltaico tiveram um ganho médio de 4,3% na eficiência.

Com o sistema proposto utilizando a estrutura de montagem por rastreamento solar, ocorre um aumento na energia produzida para o módulo e parque fotovoltaico. Os seguintes valores de energia foram de 68Whdia/mês e 38,3MWhdia/mês para o módulo e parque fotovoltaico respectivamente, obedecendo os 4,3% de ganho médio em sua eficiência garantindo assim a longo prazo uma economia significativa tanto de produção quanto econômica.

Este sistema proposto apresenta vantagem nos meses de março a outubro, isso se dá pela orientação da geometria terra-sol, onde é levado em consideração o equinócio da primavera e outono, bem como o solstício do verão e inverno, em que os ângulos de declinação, horário e incidência solar sofrem variações conforme os dias do ano passam.

Para possíveis estudos futuros é interessante que seja feito uma abordagem prática para o projeto, sendo estudado os valores de depreciação e manutenção para sistemas fixos e móveis, considerando os elementos e resultados concluídos até o presente momento.

7 REFERÊNCIAS

AGRIZZIIWAND, F. **Estudo técnico-econômico de implantação de um grupo gerador de emergência em fábrica de refrigerantes**. 2007. 53f. Monografia, Departamento de Engenharia, da Universidade Federal do Espírito Santo, Vitoria, 2008.

BIAGIO, Arthur C. M. Miranda. **Análise de viabilidade econômica de um sistema fotovoltaico conectado à rede**. 2014. 98f. Monografia (Projeto de Graduação da escola Politécnica do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2014.

BURIOL, Adeli G., ESTEFANEL, V., HELDWEIN, Bernardo A., PRESTES, Damé S., HORN, Francisco Carlexo J. **Estimativa da radiação solar global a partir dos dados de insolação, para Santa Maria – RS**. Disponível em: HTTP: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0103847820120009000008&lang=pt>. Acesso em: 3 mar. 2014.

CHIZZOTTI, A. **Pesquisa em ciências humanas e sociais**. São Paulo: Cortez, 1991.

CRESESB, C. **Grupo de trabalho em energia solar**. Rio de Janeiro, Brasil: PRC - Prodeem, 2004.

CRESESB, C. **Grupo de trabalho em energia solar**. Rio de Janeiro, Brasil: PRC - Prodeem, 2014.

ECILENERGIA, **Medição inteligente**, Santana de Parnaíba, São Paulo Brasil 2010. Disponível em: <<http://www.ecilenergia.com.br/download/Medidores.pdf>>. Acesso em: 17 maio 2014.

FERNADES, Fernanda P., SAUTHIER, Lucas C., PASSOS, Julio C., COLLIUI, Sergio. **Sistema fotovoltaico de alta concentração: um salto tecnológico na conversão da energia solar**. Disponível em: HTTP:<<http://www.scielo.org/php/index.php>>. Acesso em: 3 mar. 2014.

GHENSEV, Almir. **Materiais e processo de fabricação de células fotovoltaicas**. 2006. 154f. Monografia (Pós-graduação Latu Sensu em Fontes Alternativas de Energia) - Departamento de Pesquisa, da Universidade Federal de Lavras, Minas Gerais, 2006.

GIL, Antonio Carlos. **Como elaborar projetos de pesquisa**. 5. ed. São Paulo: Atlas, 2010.

GUERRA, J., VILALVA, Gradella M., GAZOLI, Rafael J. **Energia solar fotovoltaica Sistemas conectados à rede elétrica: requisitos para a conexão e proteções**. 8f. Disponível em: <www.osestoreletrico.com.br/.../Ed83_fasc_energia_renovavel_cap11.pdf>. Acesso em: 27 Abr. 2014.

GUZZO, Costas R. **Projeto básico de um sistema fotovoltaico para geração de energia elétrica**. 2008. 72f. Monografia, Departamento de Engenharia, da Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2008.

KANNEMBERG, Renato A. **Estudo da viabilidade economica da implantação residencial de paineis fotovoltaicos**. Itajai, Santa Catarina, Brasil, 2001.

LISITA, Júnior O. **Sistema Fotovoltaico conectados à rede: Estudo de caso, 3KWp instalado no estacionamento do IEE-USP**. 2005. 87f. Dissertação (Programa Interunidade de Pós-Graduação em Energia) Instituto de Elétrotecnica e Energia, da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2005.

NASCIMENTO, C. A. **Princípios do funcionamento da célula fotovoltaica**. 2004. 21f. Monografia (Pós-graduação Latu Sensu em Fontes Alternativas de Energia especialização) - Departamento de Pesquisa, da Universidade Federal de Lavras, Minas Gerais, Lavras, Minas Gerais, 2004.

OLIVEIRA, Pagliari F., GARCIA, Testa J. **Célula Fotovoltaica de Silício**. Disponível em: <<http://www.scielo.org/php/index.php>>. Acesso em: 16 mar. 2014.

PEREIRA, O., GONSALVES, F. **Dimensionamento de inversores para sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica: estudo de caso do sistema de tubarão – SC**. 2008. 21f. Revista Brasileira de energia, vol.14. Disponível em: <<http://www.sbpe.org.br/socios/download.php?id=219>>. Acesso em: 28 abr. 2014.

PETRILLI, Lenon E., SOUSA, Lopes L., LEITE, Simeão V., BADIN, Antonio de Campos J. **Proposta de autogeração de energia elétrica no horário de ponta**. 2009. 19f. Artigo proposto para o curso de tecnologia de manutenção industrial, Fatec – SP. São Paulo, 2009.

SALAMONI, Tourinho I. **O Paradigma do alto custo da energia elétrica no Brasil e a paridade tarifária**. 2008. 16f. Monografia apresentada ao Eco_lógicas (Concurso Catarinense de Monografias sobre Energias Renováveis e Eficiência Energética, promovido pelo Instituto IDEAL), Florianópolis, 2008.

SANTERNO, **Solar and wind energy**. 2. ed. 2013.

SILVA, R., BERVIAN, Alcino P., CERVO, Luiz A. **Metodologia científica** 6. ed. São Paulo: Person Prentice Hall, 2007.

SILVA, Stamford A., SOUZA, Menezes Campello F. **Viabilidade econômica da energia solar**. 2001. 8f. Artigo científico, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, Universidade Federal de Pernambuco Recife, Pernambuco, 2001.

SOLENERG ENGENHARIA. **Módulo fotovoltaico para geração de eletricidade, 2000**. Belo Horizonte , Minas Gerais, Brasil, 9 p.

TERRA, S. **Energia Alternativa**. Tomas Carvalhau, São Paulo, Brasil, 2006.

TIRADENTES, Rodrigues Antonio A. **Uso da energia solar para geração de eletricidade e para aquecimento de água**. 2006. 54f. Monografia (Pós-graduação Lato Sensu em Fontes Alternativas de Energia, especialização em Energia Solar) - Departamento de Pesquisa, da Universidade Federal de Lavras Lavras, Minas gerais, 2006

TOLMASQUIM, Mauricio T. **Análise da Inserção da Geração Solar na Matriz Elétrica Brasileira**. 2012. 64f. Nota técnica (Empresa de pesquisa energética EPE). Rio de Janeiro, 2012.

WEG, **Inversor solar central SIW 700**, 2014. 6f. Jaraguá do Sul Santa Catarina 2014.