

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE CARATINGA

ALVARO LUÍS GOMES FERREIRA

WILKER MACIEL DOS SANTOS

**SISTEMA FOTOVOLTAICO EM RESIDÊNCIAS: UMA ABORDAGEM
DE SEU DIMENSIONAMENTO E UMA ANÁLISE DA VIABILIDADE DE
SUA IMPLANTAÇÃO EM CARATINGA - MG**

BACHARELADO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

DOCTUM – MINAS GERAIS

2013

ALVARO LUÍS GOMES FERREIRA
WILKER MACIEL DOS SANTOS

**SISTEMA FOTOVOLTAICO EM RESIDÊNCIAS: UMA ABORDAGEM
DE SEU DIMENSIONAMENTO E UMA ANÁLISE DA VIABILIDADE DE
SUA IMPLANTAÇÃO EM CARATINGA - MG**

ORIENTADOR: REGINALDO EUSTÁQUIO

Monografia apresentada à banca examinadora das Faculdades Integradas de Caratinga – FIC, curso de Bacharelado em Engenharia Elétrica, como exigência parcial para obtenção de grau de Bacharel em Engenharia Elétrica, sob a orientação do professor Reginaldo Eustáquio.

DOCTUM – MINAS GERAIS

2013

AGRADECIMENTOS

Primeiramente gostaria de agradecer a Deus, pois sem ele não somos ninguém.

A todos que contribuíram para a realização deste trabalho, fica expresso aqui a nossa gratidão, especialmente:

Aos meus colegas de classe, pela rica troca de experiências.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Corte transversal de uma célula fotovoltaica

Figura 2: Efeito fotovoltaico na junção P-N

Figura 3: Estrutura de uma célula fotovoltaica

Figura 4: Célula de Silício Monocristalino

Figura 5: Célula de silício Policristalino

Figura 6: Célula Fotovoltaica de filme fino

Figura 7: Curvas características de tensão e corrente de módulo fotovoltaico

Figura 8: Sistema de Conexão On-Grid

Figura 9: Funcionamento de um inversor CC-CA para conexão à rede elétrica

Figura 10: Quadro de proteção de corrente contínua CC da instalação fotovoltaica

Figura 11: Quadro de proteção de corrente alternada CA da instalação
Fotovoltaica

Figura 12: Irradiância Global Horizontal ao longo do ano em Caratinga

Figura 13: Irradiância Global Horizontal inclinado ao longo do ano em Caratinga.

Figura 14: Posição do sol definida pelos ângulos azimutal, zenital e altura solar.

LISTA DE TABELAS

Tabela 01: Parâmetros elétricos e físicos do módulo YXGF-200M72

Tabela 02: Parâmetros elétricos e físicos do inversor i-Manager-2000

Tabela 03: Escolha do ângulo de inclinação do módulo

LISTA DE SIGLAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANEEL - Agência nacional de energia elétrica
APPs - Áreas de Preservação Permanente
CA – Corrente Alternada
CC – Corrente Contínua
CEPEL - Centro de Pesquisas de Energia Elétrica
CHESF - Companhia Hidroelétrica do São Francisco
COFINS - Contribuição para Financiamento da Seguridade Social
CEMIG - Companhia Energética de Minas Gerais
CRESESB - Centro de Referência para Energia Solar e Eólica, Sergio de Salvo Brito
DDR - Disjuntor diferencial residual
DPS - Dispositivo de proteção de surto
EIA/RIMA - Estudos e relatórios de Impacto Ambiental
EPE - Empresa de Pesquisa Energética
ETAR - Estação de Tratamento de Águas Residuais
EUA - Estados Unidos da América
FV - Fotovoltaico
GHI - Irradiância Global Horizontal
GTES - Grupo de trabalho de energia solar
GW – Giga watts
IEC - *International Electrotechnical Commission* (Tradução Livre: Comissão Internacional Eletrotécnica)
IEEE - *Institute of Electrical and Electronics Engineers* (Tradução Livre: Instituto de Engenheiros Elétricos e Eletrônicos)
INMET - Instituto Nacional de Meteorologia
INPE - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
IP – Protocolo de Internet
LPF - Laboratório de Produtos Florestais
MJ - Mega Joule

MPPT - *Maximum Power Point Tracking* (Tradução Livre: Máxima Potência do ponto de Rastreamento)

MW - Mega watts

NBR - Norma Brasileira

NREL - *National Renewable Energy Laboratory* (Tradução Livre: Laboratório Nacional de Energia Renovável)

PIS - Programas de Integração Social

PNE - Plano Nacional de Energia

PRI - Prazo de Retorno do Investimento

PRODIST - Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional

SIN - Sistema Interligado Nacional

STC - Standard Test Conditions (Tradução Livre: Condições padrão de teste)

SWERA - *Solar and Wind Energy Resource Assessment* (Tradução Livre: Avaliação Solar e dos Recursos de Energia Eólica)

TUSD - Tarifas de uso dos sistemas elétricos de distribuição

TUST - Tarifas de uso dos sistemas elétricos de transmissão

UFPE - Universidade Federal de Pernambuco

UFSC - Universidade Federal de Santa Catarina

VDE - *Virtual Distributed Ethernet* (Tradução Livre: Virtual Distribuição Internet)

RESUMO

Neste trabalho foi abordado o funcionamento do sistema fotovoltaico e sugerido o uso no regime de compensação em residências para suprir parcialmente o consumo de energia elétrica. Considerando que a barreira técnica para a disseminação dessa forma de produção de energia descentralizada já foi superada, apresentar o funcionamento e seu uso poderá ajudar na propagação dessa tecnologia no país. A questão de busca de fontes alternativas e renováveis de produção de energia elétrica, que não ocasionam graves problemas ambientais, há muito deixou de ser uma ilusão. Já é uma realidade concreta e confiável e que já é presente em muitos países considerados desenvolvidos. No Brasil, a energia solar fotovoltaica ainda não conseguiu superar a barreira econômica, pois a energia gerada pelos módulos fotovoltaicos continua tendo um custo elevado em comparação à geração hidrelétrica, principal fonte energética na matriz de geração do país. A análise da viabilidade econômica é realizada pela identificação de todo o custo de projetos e equipamentos, considerando os preços, no Brasil, do Sistema Fotovoltaico e o prazo de retorno deste investimento.

Palavras-chave: Sistemas fotovoltaicos, Órgão regulador de distribuição, Regime de compensação residencial.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	11
2. OBJETIVOS	13
3. CONSIDERAÇÕES CONCEITUAIS	14
3.1 Conceitos de Energia Fotovoltaica	15
3.1.1 <i>Princípio de Seu Funcionamento</i>	16
3.2 Características Físicas	17
3.2.1 <i>Estrutura de uma Molécula Fotovoltaica</i>	20
3.2.2 <i>Silício Monocristalino</i>	20
3.2.3 <i>Silício Policristalino</i>	21
3.2.4 <i>Silício Amorfo</i>	22
3.2.5 <i>Sistemas Fotovoltaicos</i>	23
3.2.6 <i>Módulos Fotovoltaicos</i>	24
3.3 Aplicações	26
3.3.1 <i>Tipos de Conexão</i>	26
3.3.2 <i>Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede Elétrica</i>	27
3.3.3 <i>Inversores Para Conexão à Rede</i>	29
3.3.4 <i>Principais Características dos Inversores</i>	30
3.3.5 <i>Recursos e Funções dos Inversores</i>	32
3.3.6 <i>Demais Dispositivos</i>	32
3.3.7 <i>Requisitos Para Conexão à Rede</i>	33
3.3.8 <i>Integração Arquitetônica</i>	34
3.3.9 <i>Posicionamento dos Módulos</i>	35
4. APROVEITAMENTO DE ENERGIAS RENOVÁVEIS	37
4.1 Tipos de Energias Renováveis	37
4.1.1 <i>Energia Eólica</i>	37
4.1.2 <i>Energia de Biomassa</i>	40
4.1.3 <i>Energia das Ondas e das Marés</i>	41
4.1.4 <i>Energia Geotérmica</i>	42
4.1.5 <i>Energia Solar</i>	43
4.1.6 <i>Energia Hídrica</i>	45

4.1.7 Energia do Biogás.....	47
5. APROVEITAMENTO DA ENERGIA FOTOVOLTAICA EM RESIDÊNCIAS CONECTADA À REDE ELÉTRICA	49
5.1 O Aproveitamento.....	49
5.2 Princípios de Retorno Financeiro	50
5.3 Prazo de Retorno do Investimento	51
6. O PROJETO FOTOVOLTAICO CONECTADO À REDE	52
6.1 Energia Produzida	52
6.2 Módulos.....	53
6.3 Inversor	54
6.4 Sistema de Proteção	55
6.5 Cabeamento e Conexões.....	57
6.6 Suporte Estrutural	58
7. CÁLCULO DA ENERGIA PRODUZIDA.....	59
7.1 Irradiação Global Horizontal	60
7.2 Pay Back	63
8. CONSIDERAÇÕES FINAIS	64
9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	66

1. INTRODUÇÃO

O Sol é a principal fonte de energia do planeta Terra, sendo que todas as outras fontes conhecidas de energia (eólica, hidrelétrica, biomassa) derivam de forma direta ou indireta da energia solar. O Sol fornece anualmente para a atmosfera terrestre $1,5 \times 10^{18}$ kWh de energia, o que corresponde a 10.000 vezes o consumo mundial de energia neste período¹.

Pode-se dizer, que a radiação solar, no entanto se caracteriza por ser um recurso de grande variabilidade. Este fato se deve à alternância de dias e noites, as mudanças de estações do ano, a latitude e os períodos de passagem de nuvens e chuvas. Analisando o supracitado, compreende-se a necessidade de uma seleção de um sistema de estocagem de energia apropriado.

Neste sentido, a referente pesquisa objetiva estabelecer as condições gerais para um novo modelo de acesso de microgeração e minigeração distribuída aos sistemas de distribuição de energia elétrica, através do sistema de compensação para residências, segundo a Resolução Normativa Nº 482, de 17 de abril de 2012.

A utilização de mini e micro-geração conectada à rede de baixa tensão têm ganhado evidências atualmente, com iniciativas de regulamentações do mercado, a exemplo das resoluções normativas Nº 481 e 482 da ANEEL lançadas em Abril de 2012, que incentivam a utilização da energia solar.

A referida regulamentação da conexão da geração solar à rede para micro e mini geração pode despontar como um grande problema destes sistemas, onde a fonte de energia é variável: a acumulação de energia, que torna necessário o uso de acumuladores apropriados, geralmente um banco de baterias. Neste caso, a rede faz o papel do armazenador, reduzindo o custo de instalação do sistema. Desse modo a energia injetada na rede é controlada através de medidores bidirecionais e transformada em créditos com a concessionária para posterior consumo.

É importante compreender que busca de energia alternativa é sempre um desafio para a sociedade moderna e para as concessionárias de Energia Elétrica,

¹ CRESESB Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio de Salvo Brito, **Tutorial de Energia Fotovoltaica**, 2006.

haja vista que a maneira como os recursos naturais têm sido tratados, estes têm se tornado cada vez mais escassos.

É uma realidade que toda população sofre com o consumo de energia elétrica em todo Brasil, não somente pela escassez de recursos mas também pelo alto custo. Desta forma, o estudo de energia alternativa tem sido cada vez mais procurado para ajudar suprir essa demanda, mas, será que há garantia de um bom retorno econômico para o consumidor/gerador?

Todos estes fatores de redução de custo e regulamentação deixam a energia solar fotovoltaica residencial como geração complementar de energia a ponto de tornar-se economicamente viável. Aliado a um projeto de eficiência energética, promete reduzir custos para o consumidor e melhorar o desempenho do sistema economizando recursos naturais não renováveis.

Por isso, o objetivo principal deste estudo é discutir os aspectos da implantação do sistema fotovoltaico, bem como explorar os benefícios e potencialidades do uso destes sistemas, buscamos também proporcionar uma geração limpa sem agressão ao meio ambiente.

Como metodologia de pesquisa o presente projeto utiliza-se de uma pesquisa teórica-bibliográfica, pesquisa em fontes fornecidas pela ANEEL.

Como setores do conhecimento a pesquisa se revela transdisciplinar, considerando o intercruzamento de informações em diferentes ramos de engenharia elétrica, mas de forma mais enfática, a geração de energia.

2. OBJETIVOS

Este trabalho visa discutir os aspectos da implantação do sistema fotovoltaico, bem como explorar os benefícios e potencialidades do uso deste sistema. Buscou-se também mostrar o funcionamento, sugerindo o uso do mesmo através de uma análise como exemplo, sobre o consumo de energia adotado como alternativa energética pelas concessionárias e pelos consumidores/geradores em atendimento à legislação da ANEEL. Também servir este material para discentes e docentes que desejam encontrar uma nova fonte de energia alternativa.

3. CONSIDERAÇÕES CONCEITUAIS

A tendência mundial é a busca por novas fontes de energia que possam atender ao acelerado crescimento da demanda. Neste sentido, Cláudio Homero Ferreira da Silva, defende que:

O modelo de desenvolvimento atual implica necessariamente aumentar o consumo de energia. Existe ainda uma parcela significativa da população ávida por se desenvolver. Neste contexto, o esgotamento das fontes de energia tradicionais, os impactos ambientais decorrentes do uso das fontes fósseis e o crescimento vegetativo da população colocam em xeque a segurança energética das nações, podendo criar ou acirrar conflitos geopolíticos².

Ainda de acordo com Cláudio Homero Ferreira da Silva, uma das principais fontes de energia sustentável é a energia solar. Pode ser caracterizado como um processo que ocorre pela conversão direta da energia solar em energia elétrica transferida dos fótons da radiação incidente para os elétrons da estrutura atômica.

O Grupo de trabalho de energia solar (GTES da CEPEL) ressalta ainda que:

O aproveitamento da energia gerada pelo Sol, inesgotável na escala terrestre de tempo, tanto como fonte de calor quanto de luz, é hoje, sem sombra de dúvidas, uma das alternativas energéticas mais promissoras para enfrentarmos os desafios do novo milênio. E quando se fala em energia, deve-se lembrar que o Sol é responsável pela origem de praticamente todas as outras fontes de energia. Em outras palavras, as fontes de energia são, em última instância, derivadas, em sua maioria, da energia do Sol³.

De acordo com a Resolução Normativa nº482, da Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL, ficou regulamentada a liberação do aproveitamento de energias alternativas em residências, além de estipular as normas para o referido aproveitamento. Porém, a principal questão é se a utilização do aproveitamento energético com placas fotovoltaicas é viável, financeiramente, para o consumidor.

Segundo Carvalho e Calvete (2010), encontra-se que:

² SILVA, Cláudio Homero Ferreira da. **ALTERNATIVAS ENERGÉTICAS: UMA VISÃO CEMIG**. BELO HORIZONTE: CEMIG, 2012.

³ Grupo de trabalho de energia solar. Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos. RJ. Ago. 2004.

Esta fonte de energia tem tido entraves à sua generalização devido seus custos pouco cativantes. Em 2007, a eletricidade produzida por células solares (ou fotovoltaicas) custava cerca de 0,030 dólares por kilowatt hora (kWh), enquanto que a derivada dos ventos custava 0.005 dólares por kWh e a do gás natural cerca de 0,003 dólares por kWh⁴.

Neste sentido, analisando os dizeres de Jan Thomas Heineman, uma segunda visão de viabilidade vai além dos custos implicados na implantação. A viabilidade tem aspectos ambientais.

Apesar de normalmente o custo das fontes solares de energia ser comparativamente superior às fontes fósseis, a sua utilização se justifica pelo baixo impacto ao meio-ambiente, pela diversificação na geração de energia e promover a sustentabilidade ecológica e social do planeta.⁵

Na mesma linha de raciocínio, ao fazer um projeto de geração fotovoltaico, vários fatores devem ser considerados para que o custo não fique acima do valor real de um projeto bem dimensionado. Seguindo os dizeres de Jan Thomas Heineman, este ressalta ainda que:

Fatores importantes a serem considerados no custo são as características particulares dos equipamentos necessários para atender a demanda energética (com qualidade, quantidade e capacidade adequadas), à distância e facilidade de acesso entre o lugar de venda dos equipamentos e o lugar onde se instalará o sistema, e a margem de lucro dos vendedores das placas.⁶

Desta forma, compreende-se que o crescimento da demanda energética nas áreas urbanas tem contribuído para o desenvolvimento de estudos de implantação de fontes alternativas de geração de energia, a fim de aumentar a oferta de eletricidade.

3.1 Conceitos da energia fotovoltaica

É de suma importância, compreender os conceitos relacionados à energia fotovoltaica e suas nuances. Assim sendo, este item se dedica a isto.

⁴ CARVALHO, E. F. A.; CALVETE, M. J. F. **Energia Solar: Um passo, um presente.** Rev. Virtual Quim., 2010.

⁵ HEINEMAN, Jan Thomas. **Estudo de viabilidade para implantação de um sistema híbrido-fotovoltaico de baixa potência.** RJ. Ago. 2007

⁶ Idem.

3.1.1 Princípio de seu funcionamento

De acordo com Maurício Tiomno Tolmasquin⁷, a energia utilizada pelas células fotovoltaicas provenientes da irradiação solar são medidas geralmente em Irradiação Global Horizontal e Irradiação Normal Direta. A irradiação normal direta é a quantidade que atinge o solo diretamente, e é muito variável ao longo do dia. Não obstante, os painéis solares atualmente fabricados não são sensíveis à Irradiação Normal Direta, mas tem sua eficiência relacionada à Irradiação Global Horizontal, que é pouco variável durante o dia. A Irradiação Global Horizontal é a soma das irradiações direta e difusa, que consiste na quantidade de luz incidente sobre uma superfície horizontal, levando em conta as parcelas atenuadas e dispersas por nuvens e poluição, o que faz com que os painéis continuem gerando eletricidade mesmo em dias nublados.

Nos dizeres de João Tavares Pinho⁸, para o cálculo do potencial de geração solar fotovoltaica, dois dados básicos são necessários: eficiência ou rendimento das placas e radiação solar, geralmente representada em kWh/m². Os dados de eficiência são dados de placa das células, obtidos em laboratório. O ponto mais importante torna-se, portanto uma análise da radiação solar do local onde se pretende instalar um sistema de geração fotovoltaico.

Alguns institutos formulam mapas de fluxo de radiação o que é comumente chamado de Atlas Solari métrico. Entre eles o Atlas Brasileiro de Energia Solar, de 2006, desenvolvido pelo INPE – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – e NASA – National Aeronautics and Space Administration em parceria com o projeto SWERA – Solar and Wind Energy Resource Assessment, e também o Atlas Solari métrico do Brasil, de 2000, desenvolvido pelo Centro de Referência para Energia Solar e Eólica, Sergio de Salvo Brito – CRESESB.⁹

O Brasil possui um ótimo potencial de geração solar, sendo o litoral leste a região mais beneficiada pelo Sol.

⁷ TOLMASQUIN, Maurício Tiomno. **Análise da Inserção da Geração Solar na Matriz Elétrica Brasileira**. Ministério de Minas e Energia, 2012.

⁸ PINHO, João Tavares. **Sistemas Híbridos: Soluções Energéticas para a Amazônia**. Ministério de Minas e Energia, 2008.

⁹ Grupo de trabalho de energia solar. **Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos**. RJ. Ago. 2004.

Ainda segundo Maurício Tiomno Tolmasquin¹⁰, a irradiação média anual brasileira varia entre 1.200 e 2.400 kWh/m²/ano, valores que são significativamente superiores a maioria dos países europeus, cujas estatísticas indicam intervalos entre 900 e 1.250 kWh/m²/ano na Alemanha, entre 900 e 1.650 kWh/m²/ano na França e entre 1.200 e 1.850 kWh/m²/ano na Espanha.

Assim, tendo em vista os incentivos nacionais, os avanços tecnológicos na geração fotovoltaica, assim como o uso crescente da mesma em todo o mundo, fica claro a importância que ela tem e terá na matriz energética mundial. Sendo assim importante desenvolver aplicações da mesma, procurando difundi-la e divulgá-la.

3.2 Características Físicas

Ao que diz respeito às células fotovoltaicas, estas são produzidas com material semicondutor, quer dizer, confeccionada com material com certo valor de condutividade. Suas características principais são banda de valência e condução separadas por uma faixa de energia (gap) menor ou igual a 3 eV¹¹.

Como representante principal dos semicondutores pode-se citar a dopagem de silício. Através de métodos adequados, ele pode ser encontrado em forma de areia, e por meio de processamento obtêm-se o cristal puro de silício.

O referido componente possui 4 elétrons na sua camada de valência em ligação covalente, no entanto, este não possui elétrons livres, podendo assim, ser considerado como um mal condutor.

Ainda quanto ao cristal de silício é possível afirmar:

O cristal de silício é então adicionado de outros elementos para alterar suas características, processo este chamado de dopagem. Dopando o silício com um elemento como o fósforo, que possui 5 elétrons na camada de valência, a cada átomo de fósforo adicionado resulta em um elétron livre na banda de condução. Isto caracteriza um material semicondutor de tipo N, ou portador de carga negativa.¹²

¹⁰ TOLMASQUIN, Maurício Tiomno. **Análise da Inserção da Geração Solar na Matriz Elétrica Brasileira**. Ministério de Minas e Energia, 2012.

¹¹ CARVALHO, Lucas Diniz Andrade. SILVA, Rodrigo Barbosa. ROBERTO, JÚNIA Taíse Santos. **Instalação de Iluminação no Meio Rural a Partir de Sistema Fotovoltaico como Fonte Complementar de Energia Elétrica**. UNIBH, 2013.

¹² Idem.

É importante salientar que se for adicionado um elemento com 3 elétrons na camada de valência, ocorrerão lacunas de elétrons que podem ser preenchidas por elétrons ligados a átomos vizinhos, onde ficará caracterizando um material semiconductor tipo P.

Analisando ainda os dizeres de Carvalho et al¹³ (2013), de maneira separada, cada material semiconductor tipo N ou P pode ser considerado eletricamente neutro. Mas ao ser unido à um semiconductor tipo P a um condutor tipo N, ou quando utilizada uma estrutura de silício e dopando-se duas extremidades, uma com um elemento doador e outra com um elemento receptor, está criada uma junção P-N. Nesta região, os elétrons livres da porção N do semiconductor movem-se para a região P preenchendo as lacunas. Como a princípio as duas partes eram eletricamente neutras, com o decorrer desta migração de elétrons da região tipo N para a região tipo P cria-se um potencial elétrico negativo na região P e positivo na região N. Esta migração ocorre até que a diferença de potencial entre as regiões criando um campo elétrico que atua como barreira impedindo a migração de elétrons e estabelecendo um equilíbrio elétrico.

O referido valor de campo elétrico de equilíbrio estabelece o valor do gap de energia suficiente para que novamente um elétron atravesse a junção. Desta forma, quando a junção é exposta à incidência de fótons com energia maior que o gap, acontece a geração de pares elétron-lacunas. De acordo com dados da Revista P&D (2009), se isto ocorrer onde o campo elétrico é diferente de zero, acontece a aceleração de cargas, e os elétrons na região P irão mover-se para a região N, gerando uma corrente através da junção. Em casos como este, cria-se uma ddp nos terminais externos das junções, e se forem conectadas através de um condutor cria-se uma circulação de corrente.

Como exemplo do supracitado, segue uma figura descrevendo o funcionamento de uma célula fotovoltaica, através de corte transversal. Podem ser observadas todas as partes integrantes da referida célula, bem como seu esquema de funcionamento.

¹³ Idem, ibidem.

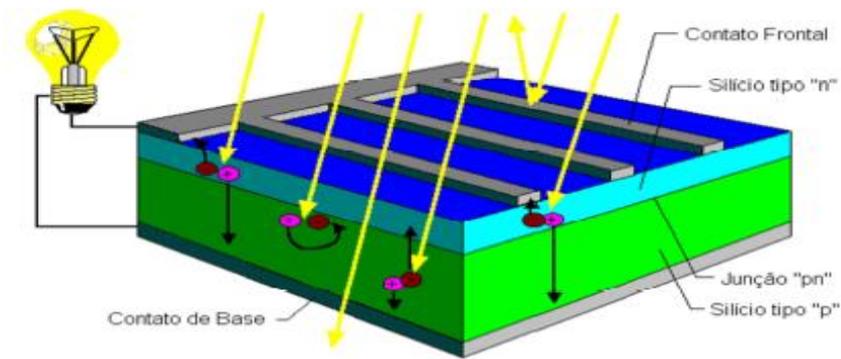


Figura 1: Corte transversal de uma célula fotovoltaica.

Fonte: Cresesb (2012).

Observando a figura 1, pode-se perceber descritas as partes integrantes de uma célula fotovoltaica, como o silício tipo “n”, o silício tipo “p”, a junção “pn”, contato com a base e o contato frontal.

Com relação à conversão de energia, é possível analisar os dizeres de O’Regan¹⁴ (1991): “Edmond Becquerel relatou o fenômeno em 1839, no qual podemos considerar que no processo de conversão da energia radiante em energia elétrica a célula é a unidade fundamental.”

A figura que se segue mostra a curva de potência máxima de um módulo em função da hora do dia.

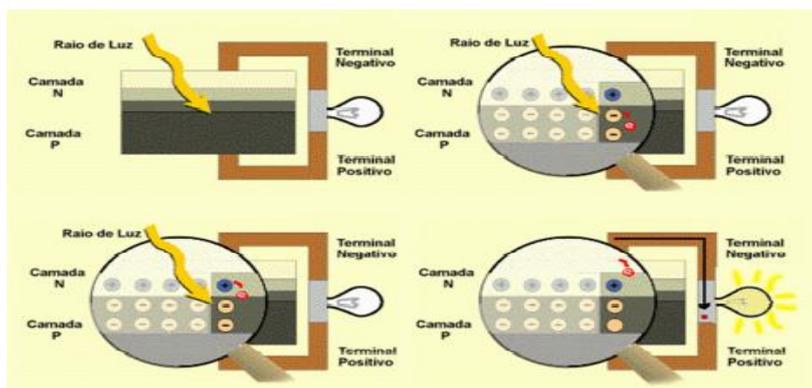


Figura 2: Efeito fotovoltaico na junção P-N.

Fonte: Cresesb (2012)

¹⁴ Idem, ibidem.

Após a demonstração do efeito fotovoltaico, passa-se à estrutura de uma célula fotovoltaica, visando demonstrar, a maneira como sua estrutura interfere no seu funcionamento.

3.2.1 Estrutura de uma Célula Fotovoltaica

Pode-se dizer, de acordo com João Tavares Pinho¹⁵, que as células fotovoltaicas são construídas a partir de uma fina camada de óxido de silício, que sejam transparentes e de alta condutividade elétrica. Tais células são fabricadas a partir de cristais monocristalinos, policristalinos ou amorfos. A figura 3 demonstra tal ideia:

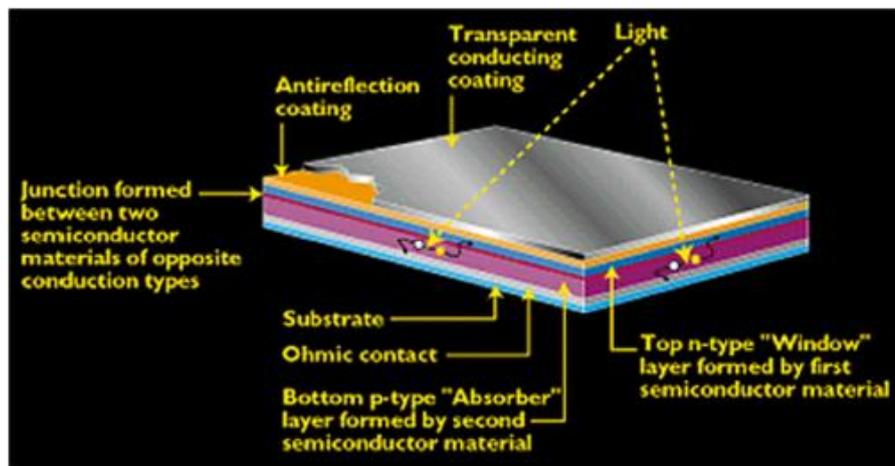


Figura 3: Estrutura de uma célula fotovoltaica

Fonte: João Tavares Pinho (2008)

De acordo com a figura acima, pode-se ver a entrada da luz, a junção formada pelos materiais semicondutores, o revestimento anti reflexo, o revestimento condutor transparente, o absorvedor tipo “p” semicondutor, dentre outros.

Assim sendo, passa-se à demonstração dos demais conceitos necessários para a estruturação deste estudo.

3.2.2 Silício Monocristalino

¹⁵ PINHO, João Tavares. **Sistemas Híbridos: Soluções Energéticas para a Amazônia**. Ministério de Minas e Energia, 2008.

De acordo com Renata Pereira Braga¹⁶, a célula de silício monocristalino (figura 4) é a mais amplamente utilizada comercialmente, de processo construtivo relativamente simples e boa eficiência comparada às células de cristal policristalino e amorfo, entre 12% e 15% para uso comercial.

Já nos dizeres de Cássio Araújo do Nascimento¹⁷, elas são obtidas a partir de barras de silício monocristalino produzidas em fornos especiais, que garantem um alto grau de pureza, devendo chegar a faixa de 99,9999%. O silício é fundido juntamente com uma pequena quantidade de dopante tipo P. Após o corte e limpeza de impurezas, é adicionado o dopante tipo N.

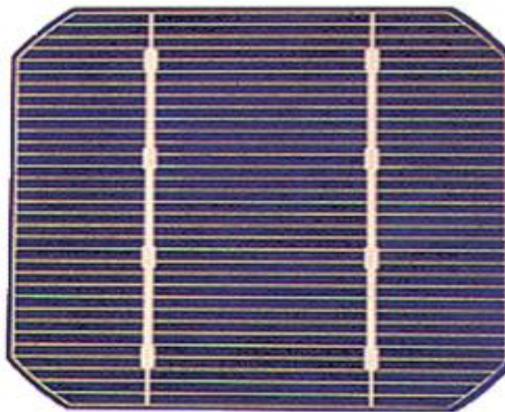


Figura 4: Célula de Silício Monocristalino

Fonte: Cresesb (2012)

Esta célula de silício monocristalino difere-se do silício policristalino, conforme descrito no item a seguir.

3.2.3 Silício Policristalino

Analisando os dizeres de Ellison Cooper e Wellyngton Moralles Martins Júnior¹⁸, percebe-se que:

¹⁶ BRAGA, Renata Pereira. **Energia Solar Fotovoltaica: Fundamentos e Aplicações**. UFRJ, 2008.

¹⁷ NASCIMENTO, Cássio Araújo do. **Princípio de Funcionamento de Célula Fotovoltaica**. UFL, 2004.

¹⁸ COOPER, Ellison. MARTINS JÚNIOR, Wellyngton Morales. **Aplicação de Painéis Solares Fotovoltaicos como Fonte Geradora Complementar de energia Elétrica em Residências**. Universidade Federal do Paraná, 2013.

O processo de fabricação de células de silício policristalino é menos rigoroso que das células de silício monocristalino, o que acarreta uma perda na eficiência, chegando no máximo a 12,5%, mas ganha-se no baixo custo de fabricação. Consiste na fusão de silício em moldes e resfriado lentamente, onde os átomos se reorganizam não em um único, mas em vários cristais.

A referida célula de silício policristalino pode ser observada na figura 5, que se segue:

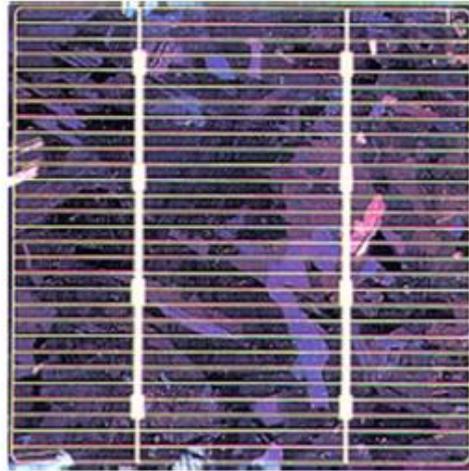


Figura 5: Célula de silício policristalino.

Fonte: Cresesb (2012)

O próximo silício a ser analisado é o silício amorfo. Além das diferenças entre o silício monocristalino e policristalino, será abordado o amorfo, com conceituação e uma figura para demonstração, conforme item que se segue.

3.2.4 Silício Amorfo

Ainda de acordo com Ellison Cooper e Wellington Moralles Martins Júnior¹⁹, as células de silício amorfo são as de mais baixo custo, produzidas a partir da disposição de camadas finas de silício sobre vidro ou outros substratos. Apresenta alto grau de desordem entre os cristais, desse modo atingindo baixas taxas de eficiência, entre 5% e 7%. Outra desvantagem é sua acelerada deterioração.

Pode ser produzido células de filmes finos utilizando o Silício Amorfo. Estas células se diferenciam das de outras tecnologias pela espessura das lâminas de

¹⁹ Idem.

material semiconductor utilizado em suas estruturas (geralmente na faixa de 1 μm contra 300 a 400 μm das células de C-Si). Estes filmes finos são depositados sobre substratos de baixo custo, como vidro, aço, inox e alguns plásticos. Apesar de sua menor eficiência, as características mecânicas destes filmes, aliados ao seu reduzido custo devido à quantidade de material envolvido, estão ampliando o mercado fotovoltaico e dando uma maior versatilidade ao uso das células solares na arquitetura²⁰.



Figura 6: Célula Fotovoltaica de filme fino

Fonte: <http://www.newhome.com.br/HTMLs/Ekohome/Solar/Fotovoltaico/>

Após as definições aqui realizadas, segue-se destacando os requisitos inerentes aos sistemas fotovoltaicos.

3.2.5 Sistemas fotovoltaicos

Os sistemas fotovoltaicos consistem basicamente dos seguintes elementos²¹:

- Módulos fotovoltaicos para coleta da radiação solar: São conjuntos de células fotovoltaicas;

²⁰ OLIVEIRA, Hallyson Eduardo. **Tecnologia Fotovoltaica em Filmes Finos**. Universidade Federal de Lavras, 2008.

²¹ LIMA, Fábio de Souza. CORDEIRO, Lucas Carvalho. SOUZA, Rubem César Rodrigues. **Sistema de Monitoramento à Distância para UNIDADE DE Célula a Combustível**. Congresso Brasileiro de Planejamento Energético. Curitiba, 2012.

- Inversores: equipamentos que convertem a energia gerada em corrente contínua pelos módulos fotovoltaicos para corrente alternada. Isto faz com que o sistema seja compatível com as redes de distribuição de energia e equipamentos elétrico-eletrônicos comumente utilizados para transformação da corrente contínua gerada pelos módulos para corrente alternada;
- Conjunto de baterias (no caso de um sistema isolado e não utilizando o sistema de compensação);
- Suportes estruturais para orientação espacial dos módulos.

3.2.6 Módulos Fotovoltaicos

As células fotovoltaicas, n que diz respeito às suas dimensões construtivas, apresentam baixa tensão e corrente de saída, tipicamente 3 A e 0,7 V quando são células de silício monocristalino. Desta forma, várias células fotovoltaicas são agrupadas para compor um módulo fotovoltaico. Este arranjo geralmente é feito em série, para se obter uma tensão de saída mais elevada e compatível com as tensões de consumo, geralmente 12 ou 24 V²².

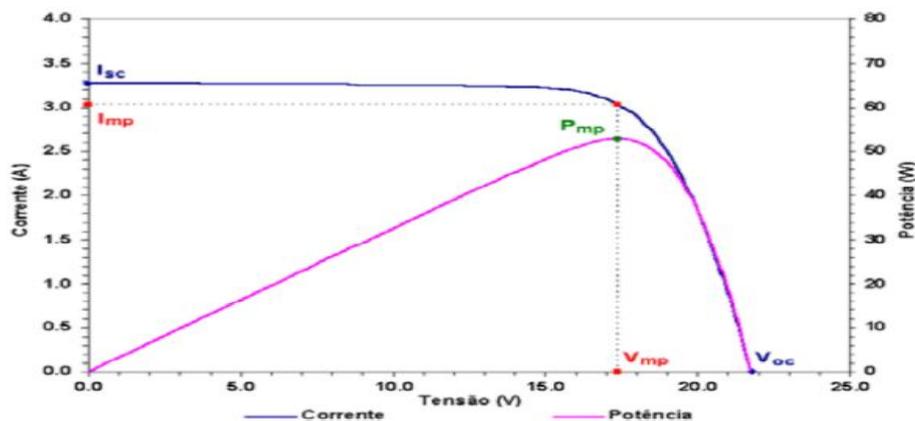


Figura 7: Curvas características de tensão e corrente de módulo fotovoltaico

Fonte: Cooper e Martins Júnior (2013)

²² COOPER, Ellison. MARTINS JÚNIOR, Wellyngton Morales. **Aplicação de Painéis Solares Fotovoltaicos como Fonte Geradora Complementar de energia Elétrica em Residências.** Universidade Federal do Paraná, 2013.

No gráfico da Figura 7, pode-se observar o comportamento de um módulo fotovoltaico. De acordo com João Tavares Pinho²³, nota-se que o mesmo não se comporta como uma fonte elétrica convencional, uma vez que não apresenta tensão de saída constante, pois esta depende da corrente de saída e vice-versa. Este módulo somente opera com valores de tensão e corrente que estejam de acordo com as curvas $I - V$ e $P - V$. Seu ponto de operação depende da carga conectada aos terminais. Se a carga consome muita corrente, a tensão tende a cair, se a corrente diminuir, a tensão tende à tensão de curto-circuito (V_{oc}) conforme a curva azul $I - V$.

Nota-se na curva $P - V$ um ponto P_{mp} : este é o ponto de potência máxima do módulo ou sistema, e é neste ponto que devemos operá-lo.

Os principais parâmetros de um módulo fotovoltaico incluem²⁴:

- Tensão de curto-circuito (V_{oc}): valor de tensão na saída do módulo em circuito aberto, quando $I = 0$. É a máxima tensão de saída do módulo;
- Corrente de curto-circuito (I_{sc}): corrente de curto circuito, quando $V = 0$. É a máxima corrente fornecida pelo módulo;
- Potência de pico ou Máxima Potência (P_{mp}): potência máxima que pode ser extraída da célula, referente ao ponto P_{mp} do gráfico da Figura 7;
- Tensão de máxima potência (V_{mp}): tensão para qual ocorre à potência máxima, referente ao ponto de máxima potência mostrado no gráfico da Figura 7;
- Corrente de máxima potência (I_{mp}): corrente para a qual ocorre a potência máxima, referente ao ponto de máxima potência mostrado no gráfico da Figura 7;
- Eficiência do módulo (η): A eficiência de um módulo é a taxa de desperdício na conversão de energia em forma de irradiação solar para energia elétrica. Embora não esteja presente em algumas folhas de dados de equipamentos pode ser calculada através da seguinte fórmula:

²³ PINHO, João Tavares. **Sistemas Híbridos: Soluções Energéticas para a Amazônia**. Ministério de Minas e Energia, 2008.

²⁴ COOPER, Ellison. MARTINS JÚNIOR, Wellyngton Morales. **Aplicação de Painéis Solares Fotovoltaicos como Fonte Geradora Complementar de energia Elétrica em Residências**. Universidade Federal do Paraná, 2013.

$$\eta_p = P_{\text{máx}} / (A_p \times 1000)$$

Onde $P_{\text{máx}}$ é a máxima potência do módulo e A_p é a área do módulo, calculada a partir das dimensões fornecidas na folha de dados.

Os parâmetros dos módulos são definidos para uma radiação de 1000 W/m² (valor médio de superfície terrestre em dia claro, ao meio dia), e temperatura de 25° (a eficiência da célula é reduzida com o aumento da temperatura), padronização denominada STC (Standard Test Conditions) que torna possível a comparação entre módulos de diversos fabricantes.

3.3 Aplicações

3.3.1 Tipos de conexão

De acordo João Tavares Pinho²⁵, analisando as necessidades e recursos disponíveis, pode-se adaptar e classificar os sistemas fotovoltaicos em 3 tipologias básicas:

- **Sistemas Isolados ou Autônomos:** nesse caso não há conexão com a rede de distribuição, por esta ser inexistente no local ou se o sistema é dedicado à alimentação de cargas específicas. Faz-se necessário o uso de baterias para garantir continuidade de fornecimento, controlador de carga e inversores para equipamentos CA. Como exemplo de aplicação pode citar estações meteorológicas, de telecomunicação, sistemas de bombeamento d'água e até carregadores para celular.
- **Sistemas Híbridos:** têm como característica o uso de mais de uma fonte de energia. Um bom exemplo é um sistema solar/eólico/diesel, onde a variedade de fontes garante um suprimento mais confiável, utilizando as fontes solar e eólica como primárias e o diesel como fonte reserva. Este sistema geralmente ainda utiliza baterias como acumuladores de energia, necessitam de uma unidade de controle de condicionamento e potência para diferentes fontes.

²⁵ PINHO, João Tavares. **Sistemas Híbridos: Soluções Energéticas para a Amazônia**. Ministério de Minas e Energia, 2008.

Pode ser aplicado em locais fora do alcance da rede elétrica, como pequenas comunidades rurais.

- **Sistemas conectados à rede:** os sistemas conectados à rede têm como característica principal o fato de estarem ligadas à rede de distribuição da concessionária. Sua principal vantagem é o fato de não precisar utilizar baterias, uma vez que na falta de suprimento por parte do sistema fotovoltaico, a energia consumida é proveniente da rede de distribuição. Uma vez que o presente trabalho está focado nos sistemas conectados à rede, passaremos a analisar este tipo de conexão e não nos aprofundaremos nos sistemas isolados e híbridos.

3.3.2 Sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica

Inicialmente, os sistemas de conexão à rede elétrica se desenvolveram somente para centrais fotovoltaicas de grande porte, já que se pensava que poderiam, no futuro, resolver certos problemas existentes na geração e distribuição de energia convencional. A medida que avançou o mercado da eletrônica, começaram também a ser desenhados sistemas de menor porte com a finalidade de atender a pequenas centrais domésticas²⁶.

Recentemente, os sistemas solares fotovoltaicos têm sido utilizados de forma integrada à rede elétrica pública. Estas instalações podem apresentar duas configurações distintas: instaladas de forma integrada à edificação (no telhado ou fachada) e, portanto próximo ao ponto de consumo, ou de forma centralizada, como em uma usina geradora convencional, neste caso, mais distante do ponto de consumo.

O sistema integrado junto ao ponto de consumo auxilia na redução do pico de demanda e diminui a dependência das fontes convencionais de energia, de forma não poluente e não prejudicial ao meio ambiente. Além disto, dado o caráter complementar da geração hidrelétrica e solar, onde períodos chuvosos acarretam pouco sol e vice versa, a geração solar em grande escala pode contribuir significativamente para melhor balancear a grande dependência do setor elétrico

²⁶ Idem.

brasileiro em uma fonte geradora dominante e sazonal como é a geração hidráulica²⁷.

A Figura 8 ilustra uma instalação de módulos fotovoltaicos de uma residência conectada na rede elétrica.

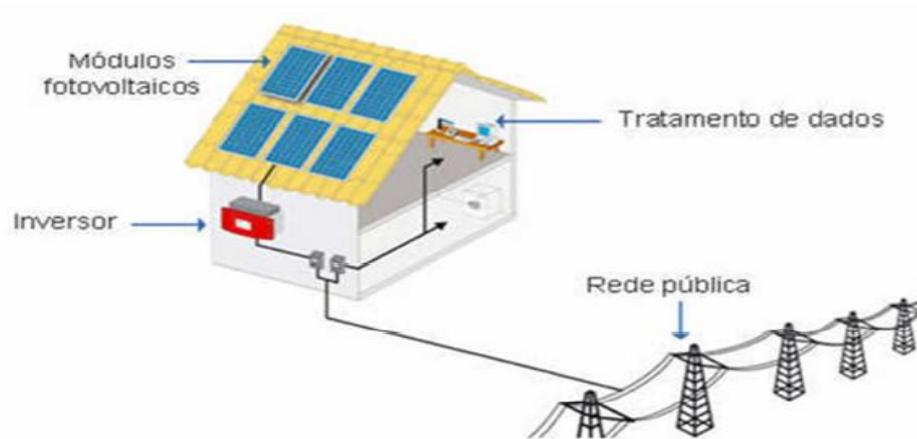


Figura 8: Sistema de Conexão On-Grid

Fonte: Cooper e Martins Júnior (2013)

Analisando a figura descrita acima, é possível perceber os módulos fotovoltaicos instalados, o tratamento dos dados, o inversos e a ligação à rede pública.

Os sistemas fotovoltaicos conectados à rede podem ser classificados em três categorias, segundo seu tamanho, conforme definições utilizadas pelas ANEEL:

1. Microgeração: potência instalada até 100 kW;
2. Minigeração: potência instalada entre 100 kW e 1 MW;
3. Usinas de eletricidade: potência acima de 1 MW;

As usinas de geração de energia elétrica contam com conjuntos de módulos, inversores centrais com potências que vão além de 1 MW, e transformadores que conectam a usina diretamente às redes de transmissão. Atualmente, a maior usina no mundo conectada à rede esta instalada em Ravenna, Itália, com potência de 124 MW²⁸.

²⁷ Idem, ibidem.

²⁸ COOPER, Ellison. MARTINS JÚNIOR, Wellyngton Morales. **Aplicação de Painéis Solares Fotovoltaicos como Fonte Geradora Complementar de energia Elétrica em Residências.** Universidade Federal do Paraná, 2013.

Os sistemas de minigeração são geralmente instalados em consumidores industriais e comerciais, construídos com o objetivo de suprir parcialmente a demanda de energia elétrica destes consumidores.

Por terem uma característica modular e terem poucos componentes, são de fácil instalação, geralmente sendo fixados aos telhados com técnicas semelhantes às empregadas na instalação de coletores térmicos.

Sua estrutura ainda permite que o sistema seja conectado a redes monofásicas ou trifásicas, dependendo da rede pública de distribuição.

Os sistemas de geração microvoltaica se assemelham à estrutura dos sistemas de minigeração, tendo como diferença sua menor potência instalada, geralmente em consumidores residenciais.

3.3.3 Inversores para conexão à rede

Ainda de acordo com Cooper e Martins Júnior²⁹ (2013), os inversores de frequência utilizados em sistemas elétricos fotovoltaicos fazem-se necessários para converter a corrente contínua coletada nos terminais dos módulos fotovoltaicos em corrente alternada, padrão da rede elétrica pública e dos equipamentos eletroeletrônicos convencionais.

No entanto, há uma diferença básica entre os inversores utilizados em sistemas autônomos e em sistemas conectados. Em sistemas autônomos, os inversores CC-CA funcionam como fonte de tensão para os equipamentos, sendo a única fonte geradora.

Já nos sistemas conectados à rede, cuja tensão e frequência já estão regulados e o inversor CC-CA funciona como fonte de corrente elétrica. Neste caso, os inversores possuem sofisticados sistemas de controle para garantir a injeção de uma corrente senoidal pura e sincronizada com a tensão senoidal na rede de distribuição.

Outra importante função do sistema de controle do inversor é o desligamento automático do mesmo em caso de falha no fornecimento de energia elétrica pela

²⁹ Idem.

distribuidora. Esta é uma medida de segurança para proteger pessoas que possam estar efetuando a manutenção da rede e também dos próprios equipamentos.

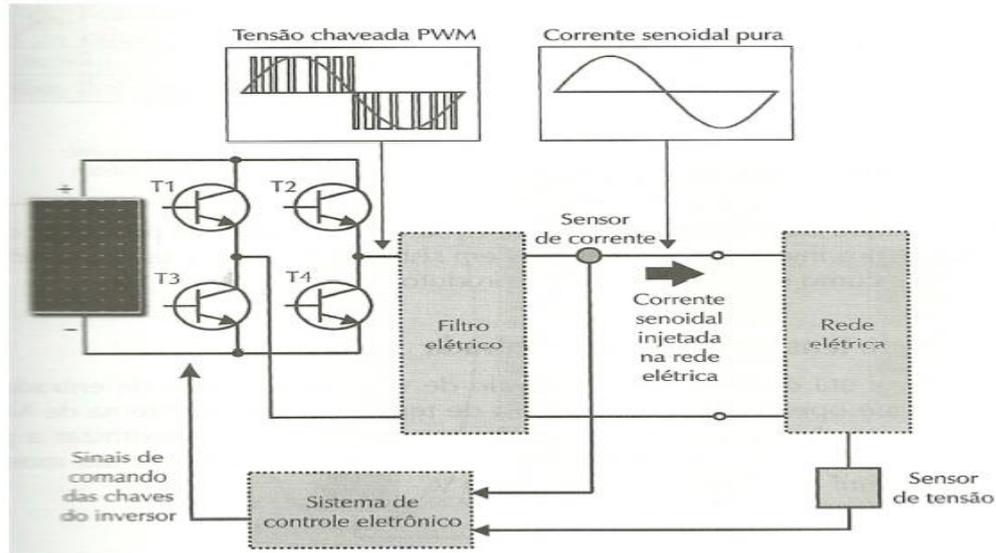


Figura 9: Funcionamento de um inversor CC-CA para conexão à rede elétrica.

Fonte: Villalva (2012)

Os inversores utilizados em sistemas fotovoltaicos de pequeno porte têm sua faixa de potência variando de 250 W, compatível com um único painel fotovoltaico, até aproximadamente 5 kW. Podem ser conectados à sistemas trifásicos utilizando inversores monofásicos em conexões trifásicas, embora isto seja mais comum em usinas de geração e inversores com vários kW de potência.

3.3.4 Principais Características dos Inversores:

Analisando os dizeres de Villalva³⁰ (2012), no que diz respeito às principais características dos inversores, pode encontrar:

- Faixa útil de tensão contínua na entrada (MPPT range): é o intervalo de valores nos quais o inversor consegue operar maximizando a produção de

³⁰ VILLALVA, M.G.; GAZOLI J.R., **Energia Solar Fotovoltaica: Conceitos e Aplicações**, 1. Ed, São Paulo : Ética, 2012.

energia dos painéis fotovoltaicos. O ponto de máxima potência do conjunto de módulos deve estar dentro dessa faixa.

- Tensão contínua máxima na entrada: máximo valor de tensão de entrada CC suportado pelo inversor sem sofrer danos. Deve ser superior à tensão de curto-circuito do conjunto de módulos.
- Número máximo de strings na entrada: Strings são módulos conectados em série, a fim de aumentar a tensão do conjunto. Adicionalmente, strings são conectados em paralelo para aumentar a potência do conjunto. Inversores comerciais geralmente têm quatro. Entradas MC4, conexão padrão para painéis solares. No caso do sistema conter mais strings, devem ser utilizados conectores paralelos ou string box.
- Número de entradas independentes com MPPT (Maximum Power Point Tracking): Os inversores comerciais para conexão à rede dispõem de um sistema de rastreamento que força o inversor a operar no ponto de máxima potência. Caso haja mais de uma entrada independente, os sistemas MPPT são individuais para cada entrada, ou seja, para cada string ou conjunto de strings. Desse modo, se uma string está operando com potência diferente, como por efeito de sombreamento, esta compensação se dá automaticamente.
- Tensão de operação na conexão com a rede: tensão nominal de saída CA do inversor, tipicamente nas faixas ao redor de 120 V e 220 V com faixa de tolerância de aproximadamente 15%.
- Frequência da rede elétrica: frequência de saída CA, padrão de 60 Hz no Brasil.
- Distorção da corrente injetada na rede: percentual de distorção da onda de corrente CA. Em geral, as normas permitem 5% de distorção.
- Grau de proteção (IP): define a capacidade do equipamento de operar em diversos ambientes agressivos, suportando chuva, calor, frio e poeira.
- Temperatura de operação: faixa de temperatura dentro da qual o inversor opera normalmente.
- Umidade relativa do ambiente: valor máximo de umidade relativa do ar para operação do inversor em condições normais.
- Consumo de energia parado: consumo do inversor mesmo não estando em operação, pelos circuitos internos.

- Consumo de energia em stand-by: energia consumida à noite, ou quando o inversor está desligado, para manter suas funções mínimas.
- Potência de corrente contínua na entrada: valor máximo de potência CC aproveitada proveniente dos painéis fotovoltaicos. Deve estar o mais próximo possível, pois módulos de menor potência subutilizarão o inversor e módulos de maior potência subutilizarão os módulos.
- Potência de corrente alternada de saída: máxima potência injetada pelo inversor na rede elétrica.
- Rendimento: este valor indica a relação entre a potência de saída e a potência de entrada do inversor. Este valor é obtido em laboratório, possuindo valores normalmente superiores a 90%.

3.3.5 Recursos e Funções dos Inversores

Ainda de acordo com Villalva³¹ (2012), no que diz respeito aos recursos e funções dos inversores, podem ser citados:

- Chave de desconexão de corrente contínua: chave manual de desligamento para manutenção dos equipamentos.
- MPPT (Maximum Power Point Tracking) – Rastreamento do Ponto de Máxima Potência: recurso que garante a operação no ponto de máxima potência, maximizando constante e instantaneamente a produção de energia.
- Detecção de ilhamento e reconexão automática: recurso exigido pelas normas de conexão à rede elétrica (ABNT NBR IEC62116:2012), necessário para garantir a segurança de pessoas e equipamentos em situações de interrupção no fornecimento de energia pela rede pública.

3.3.6 Demais Dispositivos

Ainda nos dizeres de Villalva (2012)³²:

³¹ Idem.

³² Idem, ibidem.

- Além dos principais componentes dos sistemas – Conjuntos de módulos FV e Inversores – existem dispositivos importantes a serem adicionados em um projeto de instalação de um sistema fotovoltaico conectado à rede.
- String Box: caixa de conexões que concentra os cabos elétricos das diversas fileiras de strings, protegida contra intempéries e geralmente possuindo fusíveis de proteção;
- Quadro de proteção de corrente contínua (CC): é o quadro que incorpora a caixa de strings e os fusíveis de proteção e adiciona uma chave de desconexão CC, um dispositivo de proteção contra surto (DPS) e o barramento de aterramento. Necessária para manutenção e segurança do sistema;
- Quadro de proteção de corrente alternada (CA): faz a conexão entre os inversores do sistema FV e a rede elétrica, de modo semelhante às instalações convencionais de baixa tensão. Observa-se a presença de um disjuntor diferencial residual (DDR) e um dispositivo de proteção de surto (DPS);
- Dispositivos de proteção de surto: Protegem as instalações contra surtos elétricos (sobre tensão) geralmente provenientes de descargas atmosféricas. É baseado no princípio de funcionamento de um para-raios, composto de um varistor e um centelhador que na mudança de um estado de tensão normal para alta tensão muda sua propriedade de alta resistência para baixa resistência, permitindo a passagem da corrente elétrica de descarga.

3.3.7 Requisitos para conexão à rede

Na visão de Cláudio Homero Ferreira da Silva³³, percebe-se que a literatura internacional liderada pelo IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers) dos EUA e IEC (International Electrotechnical Commission), reúne diversas normas e procedimentos referentes à padronização de conexões de sistemas fotovoltaicos à rede elétrica. Esta padronização e regulamentação não estão consolidadas, devido à constante evolução dos sistemas FV.

³³ SILVA, Cláudio Homero Ferreira da. **ALTERNATIVAS ENERGÉTICAS: UMA VISÃO CEMIG**. BELO HORIZONTE: CEMIG, 2012

Como exemplo, podemos citar algumas normas importantes relacionadas à conexão de sistemas FV à rede:

- IEEE 1547: Padrão para interconectar recursos distribuídos com sistemas de energia elétrica;
- IEEE 929-2000: Prática recomendada para a interface do utilitário de sistemas fotovoltaicos;
- IEC 61727: Características da interface de utilidade;
- IEC 62116: Procedimento de teste de ilhamento métodos de prevenção para inversores fotovoltaicos;
- VDE 0126-1-1: Dispositivo automático de desconexão entre um gerador e a rede pública de baixa tensão.

Estes documentos abordam assuntos como faixa de tensão e frequência de operação de inversores aceitáveis, limites de injeção de corrente contínua na rede por parte dos inversores, distorção harmônica admissível, fator de potência e atuação na detecção de ilhamento.

Os procedimentos e requisitos para conexão à rede no Brasil ainda não estão definidos, mas estão em fase de desenvolvimento, tendo seu primeiro passo com a publicação da norma ABNT NBR IEC 62116:2012 – Procedimento de ensaio de anti-ilhamento para inversores de sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica.

3.3.8 Integração arquitetônica

De acordo com dados da Cresesb³⁴ (2006), no passado, eram projetados módulos somente para geração de energia e a estética e integração com o entorno construído eram negligenciadas. Recentemente, arquitetos e engenheiros se depararam com a necessidade de buscarem uma parceria para estudar uma maior integração arquitetônica destes elementos. Assim surge uma maior variabilidade de modelos, tamanhos e cores, tornando-os mais versáteis e possibilitando uma integração com design agradável.

³⁴ BRITO, Sérgio de Salvo. **Tutorial de Energia Fotovoltaica**. CRESESB – Centro de Referência para Energia Solar e Eólica. 2006.

Considerações apontam para elementos construtivos que podem ter a dupla função: gerar energia elétrica e funcionar como elemento arquitetônico na cobertura de telhados, paredes, fachadas ou janelas; e servir como substituição de vidros, mármore ou outros elementos decorativos, diminuindo, assim, o custo final da instalação.

O sistema fotovoltaico tem um grande potencial para o design dos edifícios, tornando-se, possivelmente, um elemento importante não somente para os sistemas construtivos, mas para o meio ambiente. Cada vez mais os países desenvolvidos vêm utilizando este sistema, não somente para uso residencial, mas também em edificações industriais, comerciais e públicas, pois estas muitas vezes apresentam grandes áreas planas, que são bastante adequadas à integração de geradores fotovoltaicos.

A utilização do sistema fotovoltaico tem sido viável em muitos casos onde as exigências mínimas para seu bom funcionamento são cumpridas e em locais onde o custo para geração de energia elétrica é muito alto. Os painéis fotovoltaicos interligados à rede elétrica podem ser integrados a qualquer edificação, sendo o único requisito uma orientação solar favorável (superfícies voltadas para norte, leste ou oeste), sendo que a orientação ideal são as superfícies voltadas para o norte geográfico, no hemisfério sul, pois permitem uma maior captação da energia gerada pelo sol.

Considerações arquitetônicas também são necessárias a fim de minimizar ou eliminar o efeito de sombreamento em parte ou totalidade das placas, onde o movimento do sol durante o dia pode prejudicar o potencial total de geração do sistema fotovoltaico.

3.3.9 Posicionamento dos Módulos

De acordo com Villalva³⁵ (2012), a irradiação incidente sobre os módulos depende diretamente de sua posição em relação ao Sol. Sistemas avançados de rastreamento automático da posição do Sol são amplamente utilizados em sistemas de energia solar Helio térmico e em algumas usinas fotovoltaicas, mantendo os

³⁵ VILLALVA, M.G.; GAZOLI J.R., **Energia Solar Fotovoltaica: Conceitos e Aplicações**, 1. Ed, São Paulo : Ética, 2012.

painéis alinhados ao longo do dia, mas devido ao seu alto custo de instalação e manutenção esta não é uma opção viável para micro e mini sistemas fotovoltaicos.

Como os painéis solares de aplicações residenciais são fixos, é necessário uma correta escolha do posicionamento e ângulo dos módulos solares, otimizando a captação de energia.

Além de evitar o sombreamento, o ângulo de inclinação dos painéis deve ser escolhido observando-se alguns critérios referentes aos ângulos azimutal e zenital, como sugere Villalva (2012):

- **Ângulo Azimutal:** É o ângulo de orientação com relação ao norte geográfico, tendo o ângulo nulo quando o sol está na metade de seu trajeto desde o instante em que nasce até se pôr. Este é o melhor ângulo de posicionamento para o painel quando se está no hemisfério sul, uma vez que aproveita tanto a luz da manhã quanto da tarde, tendo seu ponto de máxima captação ao meio dia solar.
- **Ângulo Zenital:** É o ângulo formado entre o ponto em questão e o zênite. Devido à inclinação do eixo de rotação terrestre em relação à sua órbita em torno do Sol, este assume diferentes ângulos zenitais durante o ano, o que define a altura solar. O ideal seria ter um painel com a mesma inclinação zenital que o Sol a cada dia. Como isto não é viável, podemos utilizar diferentes métodos para escolher um ângulo que possibilite uma boa média de captação de energia solar durante o ano. Um deles, apresentado no “Installation and Safety Manual of the Bosch Solar Modules” consiste em escolher um ângulo de inclinação.

4. APROVEITAMENTO DE ENERGIAS RENOVÁVEIS

Pode se considerar que existem vários tipos de energias renováveis, e com o crescente desenvolvimento das tecnologias, há inovações e são descobertas novas formas de produzir energia elétrica por meio de fenômenos naturais, citando-se como exemplo a criação de um hidrogerador cujo princípio é semelhante ao de um aerogerador, mas com diferenças no fato do movimento das pás serem impulsionados pelas correntes marítimas. Dos vários tipos de energias renováveis existentes iremos tratar apenas de alguns.

4.1 Tipos de energias renováveis

Podem ser consideradas como inesgotáveis, quer dizer, energias que continuamente se produzem de novo, de maneira constante. Sua origem pode ser vegetal, como madeira, biomassa proveniente das plantas ou as consideradas completamente inesgotáveis, que são a energia solar, eólica, das marés, etc.

De acordo com Clóvis Cavalcanti³⁶, em relação aos recursos renováveis, os mais importantes são considerados “limpos”, ou seja, os que não causam poluição nem prejudicam o meio ambiente, sendo assim, serem também designadas por Energias Limpas.

Infelizmente estas energias não são ainda aproveitadas ao máximo, haja vista que as tecnologias utilizadas não permitem o máximo aproveitamento destas. No entanto, essas tecnologias têm também consequências prejudiciais para o ambiente. Estas passam principalmente pelo impacto que as construções necessárias têm nos ecossistemas.

4.1.1 Energia Eólica

³⁶ CAVALCANTI, Clóvis. **Desenvolvimento e Natureza: Estudos para uma Sociedade Sustentável**. INPSO/FUNDAJ, Instituto de Pesquisas Sociais, Fundação Joaquim Nabuco, Ministério de Educação, Governo Federal, Recife, Brasil. Outubro, 1994

A energia eólica, de acordo com Cláudio Homero Ferreira da Silva³⁷, é aquela produzida a partir da força dos ventos. Pode ser considerada como abundante, renovável, limpa e disponível em muitos lugares. Sua geração é dada por meio de aerogeradores, onde se capta a força dos ventos por meio de hélices ligadas a uma turbina que aciona um gerador elétrico. A quantidade de energia gerada se dá em função da densidade do ar, da área coberta pela rotação das pás (hélices) e da velocidade do vento.

Citando Villalva (2012)³⁸, para que seja realizada uma avaliação técnica do potencial eólico, faz necessário um conhecimento detalhado do comportamento dos ventos. Na coleta de tais dados, para que se possa determinar o potencial eólico de uma região – é preciso que se estabeleçam quesitos relativos à intensidade da velocidade e à direção do vento. Para que se obtenham esses dados, faz-se necessário também analisar os fatores que tendem a influenciar o regime dos ventos na localidade do empreendimento. Entre eles pode-se citar o relevo, a rugosidade do solo e outros obstáculos distribuídos ao longo da região.

De acordo com Ramos e Seidler (2011):

Para que a energia eólica seja considerada tecnicamente aproveitável, é necessário que sua densidade seja maior ou igual a 500 W/m^2 , a uma altura de 50 metros, o que requer uma velocidade mínima do vento de 7 a 8 m/s. Segundo a Organização Mundial de Meteorologia, o vento apresenta velocidade média igual ou superior a 7 m/s, a uma altura de 50 m, em apenas 13% da superfície terrestre. Essa proporção varia muito entre regiões e continentes, chegando a 32% na Europa Ocidental.³⁹

Utilizar a força dos ventos para gerar eletricidade, em escala comercial, iniciou historicamente na década de 1970, com o crescimento da crise internacional de petróleo. Os primeiros interessados nessa modalidade foram EUA e alguns países da Europa, e investiram no desenvolvimento de fontes alternativas para a produção de energia elétrica, para que se minimizasse a dependência do petróleo e carvão.

³⁷ SILVA, Cláudio Homero Ferreira da. **ALTERNATIVAS ENERGÉTICAS: UMA VISÃO CEMIG**. BELO HORIZONTE: CEMIG, 2012

³⁸ VILLALVA, M.G.; GAZOLI J.R., **Energia Solar Fotovoltaica: Conceitos e Aplicações**, 1. Ed, São Paulo : Ética, 2012.

³⁹ RAMOS, Filipe G. SEIDLER, Nelson. **Estudo da Energia Eólica para Aproveitamento em Pequenos Empreendimentos**. Rev. Elet. De Extensão da URI, out/2012.

Já no território brasileiro, a aplicação desse tipo de energia no Brasil, as grandes centrais eólicas não são tão exploradas quanto deveriam. Elas podem ser conectadas à rede elétrica, haja vista que possuem um grande potencial para atender o Sistema Interligado Nacional (SIN). Com relação às pequenas centrais, podem ser utilizadas no suprimento de eletricidade a comunidades ou sistemas isolados, colaborando assim, no atendimento universal de energia para todos. Em relação ao local, a instalação pode ser feita em terra firme (on-shore) ou no mar (off-shore).

Dados da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) demonstra que o Brasil possui 248 megawatts (MW) de capacidade instalada de energia eólica, derivados de dezesseis empreendimentos em operação. Observando o Atlas do Potencial Eólico Brasileiro, criado pelo Centro de Pesquisas de Energia Elétrica (Cepel), é possível perceber um potencial bruto de 143,5 GW, fazendo com que a energia eólica seja uma alternativa importante para a diversificação do "mix" de geração de eletricidade no País.

De acordo com Dados do Ministério do Meio Ambiente⁴⁰, mesmo que o Atlas do Potencial Eólico Brasileiro não demonstre os pontos referentes à potencialidade energética dos ventos na plataforma continental do litoral brasileiro, tal expediente não pode ser ignorado e necessita ser cuidadosamente avaliado, pois estes projetos apresentam um maior volume específico de energia elétrica gerada, através do benefício da constância dos regimes de vento no oceano.

A maior vantagem do desenvolvimento deste tipo de fonte energética no Brasil é com relação à integração ao sistema interligado de grandes blocos de geração nos sítios de maior potencial. Em determinadas regiões, como é o caso da região Nordeste, observa-se uma situação de conveniente complementaridade da geração eólica com o regime hídrico, pois no tempo de estiagem, como o fluxo de água não é o suficiente para a produção de energia, o sistema eólico pode complementar o déficit encontrado. Desta forma, a energia eólica se apresenta como uma interessante alternativa de complementaridade no sistema elétrico nacional.

Ainda segundo o Ministério do Meio Ambiente:

⁴⁰ Ministério do Meio Ambiente. Energia Eólica. Disponível em: <http://www.mma.gov.br/clima/energia/energias-renovaveis/energia-eolica?tmpl=component&print=1>

Embora se insira dentro do contexto mundial de incentivo por tecnologias de geração elétrica menos agressivas ao meio ambiente, como qualquer outra tecnologia de geração de energia, a utilização dos ventos para a produção de energia elétrica também acarreta em alguns impactos negativos - como interferências eletromagnéticas, impacto visual, ruído, ou danos à fauna, por exemplo. Atualmente, essas ocorrências já podem ser minimizadas e até mesmo eliminadas por meio de planejamento adequado, treinamento e capacitação de técnicos, e emprego de inovações tecnológicas.⁴¹

Passa-se agora, ao estudo de outras fontes de energia, como é o caso da Energia de Biomassa.

4.1.2 Energia da Biomassa

Como Biomassa, pode-se considerar, de acordo com o Ministério do Meio Ambiente:

Todo recurso renovável que provém de matéria orgânica - de origem vegetal ou animal - tendo por objetivo principal a produção de energia. A biomassa é uma forma indireta de aproveitamento da luz solar: ocorre a conversão da radiação solar em energia química por meio da fotossíntese, base dos processos biológicos de todos os seres vivos. Uma das principais vantagens da biomassa é que seu aproveitamento pode ser feito diretamente, por meio da combustão em fornos, caldeiras, etc. Para que seja aumentada a eficiência e sejam reduzidos os impactos socioambientais no processo de sua produção, porém, estão sendo desenvolvidas e aperfeiçoadas tecnologias de conversão mais eficientes como a gaseificação e a pirólise, também sendo comum a co-geração em sistemas que utilizam a biomassa como fonte energética.⁴²

Na atualidade, pode-se compreender que a biomassa tem sido bastante utilizada na geração de eletricidade, de forma mais frequente em sistemas de co-geração e no fornecimento de energia elétrica para demandas isoladas da rede elétrica.

Pode-se considerar como vantagem é que o aumento com o aumento da utilização da biomassa como recurso energético, pode ocorrer a redução no consumo de combustíveis fósseis, como o petróleo e seus derivados, que não são matérias-primas renováveis.

⁴¹ Idem.

⁴² Idem, ibidem.

Para Clóvis Cavalcanti⁴³, são consideradas como principais fontes de biomassa:

- Biomassa de cultivos agrícolas: Entre as biomassas de cultivos agrícolas, o bagaço e a palha de cana são considerados algumas das mais importantes no contexto da agricultura brasileira, sendo aproveitado em caldeiras para gerar energia nas usinas, além do excedente energético ter a possibilidade de ser acrescido ao sistema elétrico. Além dos resíduos provenientes da cultura da cana-de-açúcar, a grande maioria das culturas brasileiras gera biomassa que podem se utilizadas para a geração de energia. No entanto grande parte é queimada ou retorna ao solo através da incorporação dos restos de cultura. Podemos citar outros resíduos tais como: a casca de arroz, cascas de castanhas, coco da bahia, coco de babaçu e dendê, cascas de laranjas, etc.
- Biomassa de origem vegetal: Parte da demanda energética brasileira ainda é atendida pela queima de madeira. De acordo com o LPF/Ibama, os cerca de 50 milhões de metros cúbicos de madeira em tora extraídos por ano na região amazônica produzem apenas 20 milhões de metros cúbicos de madeira serrada. Do total, aproximadamente 60% é desperdiçado nas serrarias durante o processamento primário. Em geral, mais 20% são desperdiçados no processamento secundário, gerando um imenso volume de resíduos.

4.1.3 Energia das Ondas e das Marés

Cláudio Homero Ferreira da Silva⁴⁴, destaca que existem diversas maneiras de se aproveitar a energia proveniente dos oceanos. Assim como a que se origina dos ventos e do sol, a energia vinda das águas dos oceanos - por meio da energia térmica e da energia contida no fluxo das marés, nas correntes marítimas e nas ondas - é classificada como limpa e autossustentável.

De acordo com Dados do Ministério do Meio Ambiente:

⁴³ CAVALCANTI, Clóvis. **Desenvolvimento e Natureza: Estudos para uma Sociedade Sustentável**. INPSO/FUNDAJ, Instituto de Pesquisas Sociais, Fundação Joaquim Nabuco, Ministério de Educação, Governo Federal, Recife, Brasil. Outubro, 1994

⁴⁴ SILVA, Cláudio Homero Ferreira da. **ALTERNATIVAS ENERGÉTICAS: UMA VISÃO CEMIG**. BELO HORIZONTE: CEMIG, 2012

A energia maremotriz é uma forma de produção de energia proveniente da movimentação das águas dos oceanos, por meio da utilização da energia contida no movimento de massas de água devido às marés. Dois tipos de energia maremotriz podem ser obtidas: energia cinética das correntes devido às marés; e energia potencial pela diferença de altura entre as marés alta e baixa. O sistema de maremotriz é aquele que aproveita o movimento regular de fluxo do nível do mar (elevação e abaixamento). Funciona de forma semelhante a uma hidrelétrica: uma barragem é construída, formando-se um reservatório junto ao mar; quando a maré enche, a água entra e fica armazenada no reservatório, e, quando baixa, a água sai, movimentando uma turbina diretamente ligada a um sistema de conversão, gerando assim eletricidade.⁴⁵

Ainda de acordo com o Ministério do Meio Ambiente⁴⁶, a primeira usina maremotriz do mundo foi construída em La Rance, na França, em 1966. Atualmente, a geração de energia por esse meio é principalmente utilizada no Japão, na Inglaterra e no Havaí – apesar das existências de usinas maremotrizes em construção ou em fase de planejamento no Canadá, no México, no Reino Unido, nos EUA, na Argentina, na Austrália, na Índia, na Coreia e na Rússia.

Para que esse sistema seja implementado, faz-se necessária uma localização geográfica favorável e uma grande amplitude de maré, o que pode variar de local para local. O Brasil apresenta condições adequadas para a implementação desse sistema em litorais, como o maranhense, onde as marés chegam a oito metros.

Pode-se considerar a utilização deste tipo de energia como uma opção para o futuro, apesar de ser necessário se levar em conta, os possíveis impactos ambientais ligados à construção deste tipo de usinas, além da necessidade de análise econômica da viabilidade do sistema.

4.1.4 Energia Geotérmica

Pode-se caracterizar a Energia Geotérmica como aquela que é oriunda da Terra. É a energia gerada a menos de 64 quilômetros da superfície terrestre de forma calorífera, originada no magma, podendo atingir até 6.000°C. Compreende-se que o magma é resultado das fortes pressões abaixo da superfície e com a decomposição de substâncias radioativas, como o urânio e o tório que gera calor.

⁴⁵ Ministério do Meio Ambiente. Energia Eólica. Disponível em: <http://www.mma.gov.br/clima/energia/energias-renovaveis/energia-maremotriz>

⁴⁶ Idem.

Pode ser encontrado nas fissuras na crosta terrestre, onde ele explode em erupções vulcânicas, ou através de gases que são liberados com o resfriamento e consequente aquecimento das águas subterrâneas que surgem na superfície na forma de gêiseres ou minas de água quente.⁴⁷

Para se obter energia elétrica se fará a perfuração do solo em locais onde existir grande quantidade de vapor e água quente, que serão drenados para a superfície através de tubulações específicas. Neste momento, o vapor é levado à uma central elétrica geotérmica, onde serão giradas as lâminas de uma turbina. A energia gerada por meio da movimentação das lâminas (energia mecânica) sendo transformada em energia elétrica por meio de um gerador⁴⁸.

Cláudio Cavalcanti⁴⁹ destaca quais são os aspectos positivos e negativos desse tipo de energia:

- Quase não há emissão de gases poluentes (CO₂ e SO₂), não aumentando o efeito de estufa, o que ocorre comumente na queima dos combustíveis de origem fóssil.
- Por ser necessária uma área pequena para a instalação da usina, comunidades isoladas e pequenas podem ser beneficiadas.
- Necessita de altos investimentos na estrutura e é de baixa eficiência, tornando-se cara.
- Pode ocorrer o esgotamento do campo geotérmico.
- Caso haja perda de calor, há aumento da temperatura do ambiente.
- Há emissão de ácido sulfídrico (H₂S), substância corrosiva e que pode ser danoso à saúde.

4.1.5 Energia Solar

Pode-se compreender a energia solar, de acordo com Cláudio Homero Ferreira da Silva⁵⁰, como uma energia bastante rentável, já que, todos os anos, o sol

⁴⁷ CAVALCANTI, Clóvis. **Desenvolvimento e Natureza: Estudos para uma Sociedade Sustentável**. INPSO/FUNDAJ, Instituto de Pesquisas Sociais, Fundação Joaquim Nabuco, Ministério de Educação, Governo Federal, Recife, Brasil. Outubro, 1994

⁴⁸ SILVA, Cláudio Homero Ferreira da. **ALTERNATIVAS ENERGÉTICAS: UMA VISÃO CEMIG**. BELO HORIZONTE: CEMIG, 2012

⁴⁹ CAVALCANTI, Clóvis. **Desenvolvimento e Natureza: Estudos para uma Sociedade Sustentável**. INPSO/FUNDAJ, Instituto de Pesquisas Sociais, Fundação Joaquim Nabuco, Ministério de Educação, Governo Federal, Recife, Brasil. Outubro, 1994

fornece energia aproximadamente 10 000 vezes maior do que é consumido pela população mundial. A energia solar pode ser convertida em energia elétrica (célula fotovoltaica), em energia térmica (coletores solares, casas solares e fornos solares) ou em energia mecânica (motores solares).

Da mesma maneira que a energia eólica e a energia do mar, a energia solar pode ser considerada como inesgotável, além de ser uma alternativa energética adequada para se enfrentar os desafios da expansão da oferta de energia, visando sempre um menor impacto ambiental.

Na prática, a energia solar podem ser dividida em dois grupos distintos: energia solar fotovoltaica, que se caracteriza pelo processo onde há o aproveitamento da energia solar por meio de conversão direta em energia elétrica, onde são utilizados os painéis fotovoltaicos, e a energia térmica, onde são utilizados coletores planos e concentradores, e está relacionada basicamente aos sistemas de aquecimento de água.

José Valderi Cavalcante Silva⁵¹ assevera:

As vantagens da energia solar ficam evidentes quando os custos ambientais de extração, geração, transmissão, distribuição e uso final de fontes fósseis de energia são comparados à geração por fontes renováveis, como elas são classificadas. O Brasil, por sua localização e extensão territorial, recebe energia solar da ordem de 1013 MWh (mega Watt hora) anuais, o que corresponde a cerca de 50 mil vezes o seu consumo anual de eletricidade. Apesar disso, possui poucos equipamentos de conversão de energia solar em outros tipos de energia, que poderiam estar operando e contribuindo para diminuir a pressão para construção de barragens para hidrelétricas, queima de combustíveis fósseis, desmatamentos para produção de lenha e construção de usinas atômicas.

De acordo com dados do Ministério do Meio Ambiente⁵², no Brasil, entre os esforços mais recentes e efetivos de avaliação da disponibilidade de radiação solar, destacam-se os seguintes: a) Atlas Solarimétrico do Brasil, iniciativa da Universidade Federal de Pernambuco (UFPE) e da Companhia Hidroelétrica do São Francisco (CHESF), em parceria com o Centro de Referência para Energia Solar e Eólica

⁵⁰ SILVA, Cláudio Homero Ferreira da. **ALTERNATIVAS ENERGÉTICAS: UMA VISÃO CEMIG**. BELO HORIZONTE: CEMIG, 2012

⁵¹ SILVA, José Valderi Cavalcanti. **Pré-dimensionamento de um Sistema Fotovoltaico Conectado à Rede Elétrica para a Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia, Campus de Itapetinga**. Universidade Federal de Lavras, 2013.

⁵² Ministério do Meio Ambiente. Energia Eólica. Disponível em: <http://www.mma.gov.br/clima/energia/energias-renovaveis/energia-solar>

Sérgio de Salvo Brito (CRESESB); b) Atlas de Irradiação Solar no Brasil, elaborado pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) e pelo Laboratório de Energia Solar (Labsolar) da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC).

Os resultados dos estudos supracitados⁵³ demonstram que a radiação solar no Brasil tem uma variação de 8 a 22 MJ/m² durante o período do dia, sendo que as menores variações são nos meses de maio a julho, quando a radiação gira em torno de 8 e 18 MJ/m². Neste quesito o Nordeste brasileiro pode ser considerado como a região de maior radiação solar, tendo média anual comparável às melhores regiões do mundo, como a cidade de Dongola, no deserto do Sudão, e a região de Dagget, no Deserto de Mojave, Califórnia, EUA.

4.1.6 Energia Hídrica

Analisando os dizeres de Souza et al (2013), encontra-se:

De acordo com o Plano Nacional de Energia (PNE 2030), a energia elétrica de origem hidráulica no Brasil correspondia, em 2005, a 89,5% da oferta existente no país - fato que traduz a grande rede hidrográfica existente no país e a característica renovável da matriz energética brasileira. O planejamento atual indica a necessidade estratégica de diversificar essas fontes e aponta para um fato: grande parte desse potencial se encontra na região amazônica. Prevê-se que, em 2030, essa participação caia para 77,4%.⁵⁴

Entre as questões ambientais, o Ministério do Meio Ambiente⁵⁵ destaca os impactos sobre a fauna, em especial a aquática: barramentos são obstáculos às espécies migratórias, em especial para os grandes bagres (surubim, jaú, dourada, etc), que precisam nadar contra a correnteza para ativação do processo hormonal que desencadeia a reprodução. O impacto pode ser reduzido, mas não suprimido, pela construção de mecanismos de transposição como escadas e canais. O desequilíbrio ictiofaunístico favorece a proliferação das espécies de ambientes lênticos (águas paradas) em prejuízo daquelas de ambientes lóticos (correnteza).

O Ministério do Meio Ambiente ainda destaca que:

⁵³ Idem.

⁵⁴ SOUSA, E.M. CASTRO, K.G. DIDIO, R. RAUBER, P. **Arquitetura Futurística e Energia Sustentável**. Revista de Ciências Exatas e da Terra, UNIGRAN, 2013.

⁵⁵ Ministério do Meio Ambiente. Energia Eólica. Disponível em: <http://www.mma.gov.br/clima/energia/energias-renovaveis/hidroeletricidade>

O impacto de áreas inundadas e perda de vegetação são menos importantes do que as queimadas e os desmatamentos causados pelas atividades ilegais que ainda persistem na Amazônia, mas a perda de áreas ribeirinhas afeta de modo mais crítico as comunidades tradicionais - que, via de regra, não possuem conhecimento técnico para adequar suas técnicas de plantio a áreas mais pobres em nutrientes e água. O assoreamento é uma outra questão importante no planejamento hidrelétrico: más práticas agrícolas podem carrear quantidades expressivas de solo aos reservatórios, onde se depositam por desaceleração, diminuindo o volume disponível para geração de energia e podendo inviabilizar a hidrelétrica a médio ou a longo prazos. Outros fatores - como a agricultura, a mineração, as obras de infraestrutura e os impactos globais, por exemplo - afetam a viabilidade da geração de energia hidráulica, atuando sobre suas áreas de influência direta e indireta.⁵⁶

Assim, o acúmulo de gases de efeito estufa, as queimadas, os desmatamentos, a ocupação indevida de Áreas de Preservação Permanente (APPs) e a inexistência de áreas de Reserva Legal em muitas propriedades rurais, por exemplo, têm afetado o regime hídrico e os índices pluviométricos em muitas regiões do país, fazendo com que os períodos de seca se acentuem, com conseqüente diminuição dos volumes dos reservatórios. Esta é uma das razões estratégicas que levaram o governo a planejar o aumento da participação de outras fontes, sejam elas renováveis ou não, na matriz energética brasileira.

Nos dizeres de Adriana Akemi Kuniy⁵⁷, encontra-se:

Todas essas questões são bem conhecidas dos órgãos ambientais e das empresas, e os licenciamentos dos empreendimentos e a qualidade dos estudos e relatórios de Impacto Ambiental (EIA/RIMA) têm melhorado acentuadamente ao longo dos anos. Muitas vezes são atribuídos aos órgãos ambientais impasses que se encontram, na realidade, em outras esferas de decisão, como o Ministério Público, comunidades indígenas, organizações não governamentais - ou que resultam de inviabilidade econômica.

Desta forma, considera-se que sejam necessários diversos tipos de investimentos em repotenciação de usinas, na melhoria das estruturas, em equipamentos mais eficientes e em tecnologias para a redução de perdas de energia a longa distância.

⁵⁶ Idem.

⁵⁷ KUNIY, Adriana Akemi. **Desajustes Identificados em Relatórios de Estudos de Impactos Ambientais em Empreendimentos Hidrelétricos Focando os Grupos de Aves e Mamíferos Silvestres**. USP, 2013.

4.1.7 Energia do Biogás

De acordo com Rafael Deléo e Oliveira:

O biogás é um gás combustível constituído por cerca de 60% de metano e 40% de dióxido de carbono. Este é produzido através de resíduos orgânicos, ou seja, pela decomposição de resíduos que é feita por bactérias que são capazes de fazer na ausência de oxigênio. As áreas de agropecuária, a indústria agroalimentar, as ETAR e nos aterros sanitários são alguns dos locais onde o biogás pode ser facilmente aproveitado para produção de eletricidade, através da sua queima. Este é mesmo o processo mais viável para a sua aplicação, uma vez que através dele o metano, que contribui para o efeito de estufa, vai ser eliminado.⁵⁸

Diante do exposto, compreende-se que as bactérias que são encontradas nos lixões se proliferam, levando à fermentação e proporcionando a liberação do biogás. Desta forma, nos aterros sanitários de lixo urbano, existem dutos que captam os gases liberados. Em seguida, tais gases passam por processos de limpeza e desumidificação. Por fim, são pressurizados e queimados, onde o metano (CH_4) é convertido em gás carbônico (CO_2), que possui um potencial de aquecimento global cerca de 20 vezes menor.⁵⁹

Desta forma, deve-se considerar algumas vantagens: pode ser considerado como um recurso energético renovável, pois está ligado à degradação de matéria orgânica, e esta é praticamente inesgotável. Assim, gera energia ecologicamente correta, diminuindo a utilização de recursos fósseis.

É importante considerar também que a liberação de gases nos lixões é notadamente um risco de saúde pública, pois são gases liberados são tóxicos e oferecem riscos de explosão, além do que, o metano liberado na atmosfera é o principal responsável pelo efeito estufa. Assim sendo, o biogás colabora nessa questão do aquecimento global, reduzindo os efeitos causados principalmente para a população em torno do aterro.

⁵⁸ OLIVEIRA, Rafael Deléo e. **Geração de Energia Elétrica a Partir do Biogás Produzido pela Fermentação Anaeróbia de Dejetos em Abatedouro e as Possibilidades no Mercado de Carbono**. USP, 2009.

⁵⁹ SOUSA, E.M. CASTRO, K.G. DIDIO, R. RAUBER, P. **Arquitetura Futurística e Energia Sustentável**. Revista de Ciências Exatas e da Terra, UNIGRAN, 2013.

Além de tudo, ainda contribui na diminuição da quantidade cada vez mais crescente de resíduos sólidos (lixo) que são gerados pela população, que configura um grave problema para a administração pública.

É de conhecimento, que nos aterros, existem dutos para captação do líquido originado da decomposição de resíduos orgânicos, o chamado chorume, pois podem poluir os recursos hídricos. Portanto, sua captação diminui os impactos ambientais.

Como desvantagens, podem ser citadas que devido a alta concentração de gás metano em sua constituição, o biogás de certa maneira polui o meio ambiente, aumentando o efeito estufa e o aquecimento global.

5. APROVEITAMENTO DA ENERGIA FOTOVOLTAICA EM RESIDÊNCIAS CONECTADA A REDE ELÉTRICA

5.1 O Aproveitamento

De acordo com Claudia Valéria Távora Cabral⁶⁰:

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. Estes sistemas são basicamente de um único tipo e são aqueles em que o arranjo fotovoltaico representa uma fonte complementar ao sistema elétrico de grande porte ao qual está conectado. São sistemas que normalmente não utilizam armazenamento de energia, pois toda a potência gerada é entregue à rede instantaneamente.

Seguindo neste raciocínio, considera-se que Instalações deste tipo são cada vez mais populares em diversos países da Europa, no Japão, Estados Unidos e maneira mais recentemente, no Brasil. As potências instaladas vão desde poucos kWp em instalações residenciais, até alguns MWp em grandes sistemas operados por empresas. Conforme apresentado a seguir, estes sistemas se diferenciam quanto à forma de conexão à rede; nos sistemas residenciais esta dependerá fortemente da legislação local.

De acordo com dados da CRESESB⁶¹, existem basicamente três tipos de conexão quanto à forma de medição da energia. Todas elas devem atender as exigências de qualidade de energia da concessionária local quanto aos limites em distorção harmônica, desvio de frequência e fator de potência. Estas exigências recaem sobre o inversor.

Já para Fabrícia de Castro Leyen⁶², além da qualidade é importante a questão de segurança. A concessionária deve ser capaz de isolar Sistema Fotovoltaico

⁶⁰ CABRAL, Claudia Valéria Távora. **Energia Fotovoltaica**. UFV, 2013.

⁶¹ BRITO, Sérgio de Salvo. **Tutorial de Energia Fotovoltaica**. CRESESB – Centro de Referência para Energia Solar e Eólica. 2006.

⁶² LEYEN, Fabrícia de Castro. **Estudo da Influência de Medidas de Eficiência Energética no Dimensionamento de Sistemas Solares Fotovoltaicos Integrados à Rede Elétrica Pública**. UFRJ, 2008.

sempre que desejar e isto deverá ser feito de forma simples e sistemática, evitando riscos para os técnicos de manutenção da rede elétrica.

5.2 Princípios de Retorno Financeiro

Renata Foltran Mancini e Hiroshi Wilson Yonemoto⁶³, mesmo com os riscos e incertezas que são apresentados às decisões dos empreendedores, também estes são favorecidos pelos retornos proporcionados pela alternativa escolhida, sendo que ao adotar estratégias que decorram em elevados riscos ao empreendimento deve-se observar concomitantemente se o retorno proporcionado é compatível ou não com aquele.

Ainda de acordo com Renata Foltran Mancini e Hiroshi Wilson Yonemoto⁶⁴, por mais metucioso que o empreendedor tenha sido na elaboração do processo de planejamento, é imprescindível que haja um adequado monitoramento das ações para o alcance dos objetivos, com vistas a detectar e corrigir eventualidades que impeçam ou dificultem a realização dos resultados almejados. Para tanto, a utilização de indicadores financeiros mostram-se úteis na identificação de discrepâncias no desempenho organizacional, entre os quais se pode citar:

- Break even Point (Ponto de Equilíbrio): obtido pela equação Receita Total igual aos Custos e Despesas totais, representa o momento em que as Receitas igualam-se aos custos e despesas, ou seja, lucro igual a zero, demonstrando o quanto a empresa precisar produzir/vender para suprir seus gastos;
- Return on Investment (Retorno do Investimento): é a taxa obtida segundo dados contábeis, sendo representada pela razão entre lucro operacional e investimento. Este indicador quantifica o retorno proporcionado por um investimento, possibilitando com isso a comparação, conseqüentemente o conhecimento do investimento que decorrerá em maior benefício econômico/financeiro a empresa. Também tem por finalidade avaliar o desempenho tanto do negócio como dos concorrentes, sendo que neste

⁶³ MANCINI, Renata Foltran. YONEMOTO, Hiroshi Wilson. Risco e Retorno Financeiro nas Decisões Empresariais. Revista UNITOLEDO, 2009.

⁶⁴ Idem.

ultimo caso propicia o conhecimento de como as outras empresas estão sendo geridas.

- Return on Equity (Retorno sobre Patrimônio Líquido): Representado pela razão entre Resultado do Exercício e Patrimônio Líquido, este indicador mede a rentabilidade do investimento quando comparado aos recursos aplicados pelos investidores, demonstrando qual investimento possibilitará melhor retorno.

6. PROJETO DE SISTEMA FOTOVOLTAICO CONECTADO À REDE

A seguir, será apresentada uma solução baseada em painéis solares com conexão à rede elétrica de baixa tensão para uma residência de consumo equivalente a 300kWh/mês, consumo típico de uma família de classe média/baixa com 4 moradores.

Para o estudo levou-se em conta a localidade da cidade de Caratinga-MG, com as seguintes coordenadas: latitude: 19,74° Sul; longitude: 42,13° Oeste.

João Tavares Pinho⁶⁵ afirma que a partir dos dados de insolação combinados com o potencial de geração do painel solar escolhido foi possível determinar a energia mensal gerada pelo painel, que comparada com o investimento do sistema é possível fazer uma avaliação da viabilidade da implantação.

Para a escolha dos produtos e execução do projeto, foi escolhido a empresa GENIX SOLAR. Esta empresa é uma importadora de equipamentos de energia solar e prestadora de serviços para a montagem.

6.1 Energia Produzida

A quantidade de energia que se pretende produzir é o primeiro item a ser definido e depende do tipo de sistema a ser implementado. No caso de um sistema conectado à rede nos moldes do padrão do sistema de Compensação, é vantajoso planejar uma geração ligeiramente inferior ao consumo, uma vez que o excedente de geração não poder ser comercializado e que a minoria da classe média baixa não terá outro imóvel para utilizar a sobra. Outro fator para produzir uma quantidade inferior de energia é que os créditos gerados tem data de vencimento de 36 meses. Desta forma, a geração solar fotovoltaica irá trabalhar como fonte complementar de energia, suprimindo parcialmente a demanda de energia do consumidor.

⁶⁵ PINHO, João Tavares. **Sistemas Híbridos: Soluções Energéticas para a Amazônia**. Ministério de Minas e Energia, 2008.

Assim sendo, para um consumidor com média mensal de 300kWh será considerada uma parcela de 85% de carga a ser suprida, o que implica em um projeto de 255kWh de energia mensal gerada.

Um segundo item a ser considerado é o posicionamento dos painéis. Um ótimo posicionamento é necessário para conseguir o melhor rendimento das placas e garantir a geração calculada. Neste caso, iremos partir do princípio que as placas estarão no posicionamento excelente, pois, em muitos casos onde já existe a construção, conseguir um bom posicionamento é muito difícil.

O terceiro ponto refere-se às características do módulo, como a potência máxima de pico Pmp, área do módulo e eficiência, que serão abordados no item a seguir.

6.2 Módulos

Os módulos fotovoltaicos disponíveis no mercado são compostos geralmente de 60 e 72 células. Para a definição da sua faixa de potência de pico é preciso levar em conta o número de células e o tamanho da placa. As potências podem variar de 195 a 240Wp

Ainda segundo João Tavares Pinho⁶⁶, para os sistemas conectados à rede, são indicados os módulos de 72 células, uma vez que os níveis de tensão costumam ser mais elevados e assim garantem uma menor perda na distribuição.

Para este estudo serão utilizados módulos YXGF-200M72, de silício monocristalino, com potência nominal de 195W, do fornecedor importador “GENIX SOLAR”. Estas placas além de atender as normas de eficiência IEC 61215, IEC 61730 de padrões internacionais, ela é a que melhor encaixou no custo benefício do mercado atualmente.

Tabela 1: Parâmetros elétricos e físicos do módulo YXGF-200M72.

⁶⁶ Idem.

Células	125x125mm Monocristalino
Num. de células	série de 72 (6 * 12)
Dimensão	1580 x 808 x 35 mm
Dimensão total	950 x 764 mm
Peso	15,8 Kg
Cabo de saída	4.0 mm ² , conector 05-IMC4

Características elétricas

Característica	Valor
Tensão máxima	37,1 V
Corrente máxima	5,26 A
Tensão de circuito aberto	44,6 V
Corrente de curto circuito	5,64 A
Potência	195 W
Eficiência	15,2 %
Temperatura de operação	-40°C +90°C
Tensão máxima de sistema	1.000V DC
Corrente máxima de sistema	15A
Tolerância de potência	+/- 3%

Características físicas

Teste de impacto	225g de esfera metálica a uma altura de 1m sem danos
Resistência ao vento	≥ 2.400 Pa
Resistência à pressão	≥ 5.400 Pa

Fonte: Catalogo do fabricante - Painel Fotovoltaico (2013)

O sistema será composto de 10 módulos de 195 Wp, resultando em um sistema fotovoltaico de 1,95kWp.

6.3 Inversor

Leonardo Poltronieri Sampaio⁶⁷ afirma que o inversor ca-cc de conexão à rede é responsável pela transformação da energia de corrente contínua proveniente dos

⁶⁷ SAMPAIO, Leonardo Poltronieri. **Controle da injeção de potências ativa e reativa em inversor de Geração Distribuída conectado à rede de distribuição em corrente alternada em baixa**

painéis para corrente alternada senoidal, em sincronismo de tensão e frequência com a rede de distribuição pública.

Como são equipamentos de pequeno porte, não possuem partes móveis e não apresentam ruído, portanto podem ser instalados dentro da edificação, ou ainda junto aos módulos fotovoltaicos, desde que protegidos das intempéries e com grau de proteção (IP) adequado.

O inversor escolhido para o sistema foi um inversor da “i-Manager” de 2 kW. Este inversor irá atender a potência projetada de 1,95Kwp.

Tabela 2: Parâmetros elétricos e físicos do inversor i-Manager-2000.

Potência de saída (Contínua)	2000 W
Potência de saída (Pico)	4000 W
Tensão nominal de entrada	12V (10~15V) / 24 (20~30V)
Tensão Nominal de Saída (AC)	115VAC OU 230VAC
Frequência	50 ou 60Hz
Eficiência	90~95%
Proteção Térmica	65°C + / - 5°C
Sobrecarga	Desliga e soa o alarme
Proteção Contra Inversão de Polaridade da Bateria	Fusível de Proteção
Curto-Circuito	Proteção contra curto-circuito
Refrigeração (com ventilador)	Sim
Fusível Substituível	12V –12x25 A/24V –12x10 A
Dimensões (cm)	43 X 19,8 X 7
Peso (Kg)	5,2

Fonte:

Catálogo do fabricante – CRESESB (2013)

6.4 Sistema de Proteção

De acordo com Máximo Luiz Pompermayer⁶⁸, após a passagem dos cabos em eletrodutos separados por pólos, os condutores de corrente contínua devem chegar a um quadro de proteção antes de serem conectados ao inversor. Essa proteção serve para seccionar o circuito de alimentação em cc, seja para manutenção ou qualquer ajuste do inversor. Adicionalmente, este quadro pode ter a função de caixa de strings.

tensão, empregando LMIs com realimentação de estados e critérios de D-estabilidade. UNESP, 2013.

⁶⁸ POMPERMAYER, Máximo Luiz. **Desafios e Perspectivas para Inovação Tecnológica no Setor de Energia Elétrica**. Revista P&D, junho, 2009.

No mesmo quadro devem estar presentes:

- Barramento de aterramento para estruturas metálicas e carcaças de módulos FV;
- Fusíveis para conexão das strings;
- Chave de desconexão;
- Dispositivo de proteção contra surto (DPS);

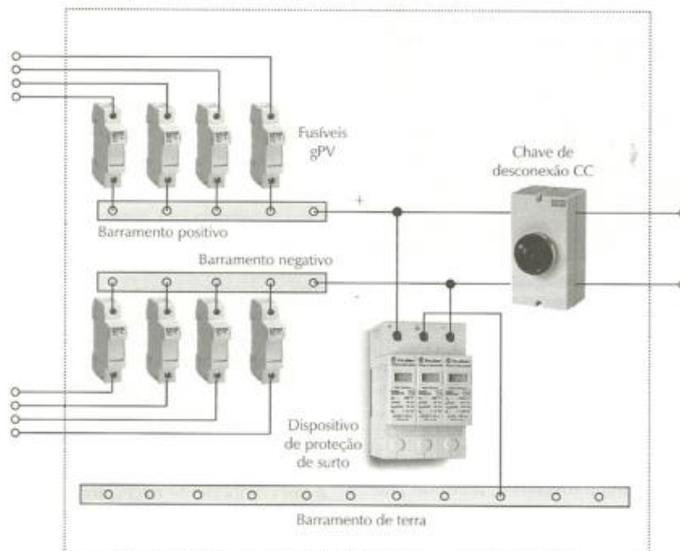


Figura 10: Quadro de proteção de corrente contínua CC da instalação fotovoltaica
Fonte: VILLALVA (2012).

O quadro de proteção de corrente alternada faz a conexão entre os inversores do sistema fotovoltaico e a rede elétrica.

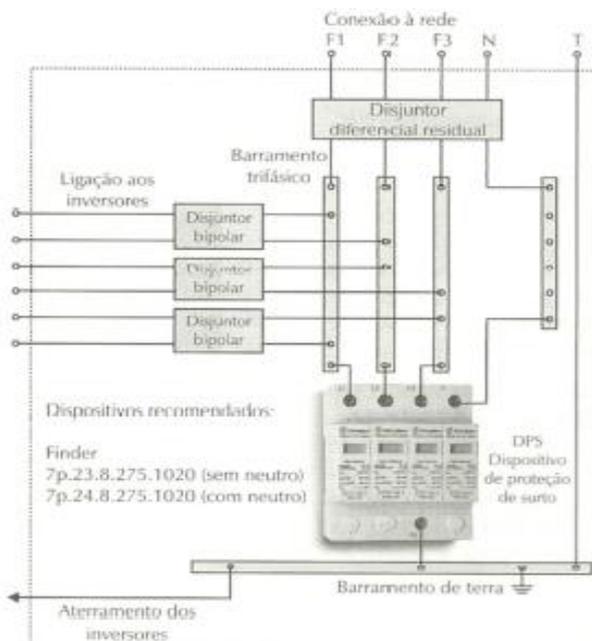


Figura 11: Quadro de proteção de corrente alternada CA da instalação Fotovoltaica.

Fonte: VILLALVA (2012).

Os dispositivos e o dimensionamento são os mesmos utilizados nas instalações elétricas de baixa tensão e atendem à norma NBR 5410, cujos principais componentes são:

- Barramento de terra;
- Disjuntor diferencial residual;
- Barramento trifásico ou monofásico;
- Dispositivo de proteção contra surto.

6.5 Cabeamento e Conexões

De acordo com Máximo Luiz Pompermayer⁶⁹, os sistemas fotovoltaicos estão sujeitos aos rigores da intempérie e das singularidades de instalações com painéis que podem emitir grande quantidade de calor nas suas caixas de ligações. Portanto, os cabos que farão a conexão entre os módulos e o inversor em corrente contínua devem:

- Limitar ao máximo a queda de tensão;
- Ser unipolares;
- Possuir duplo isolamento;
- Estar separados por polos (positivo e negativo) em eletrodutos distintos;
- Possuir caixa de passagem e conexão com boa vedação e isolamento e também separadas por polos;
- Possuir isolamento que suporte temperaturas elevadas.

Orlando Lisita Júnior⁷⁰ destaca que como a temperatura dos módulos fotovoltaicos pode ultrapassar os 50° C, nessas condições, de acordo com a norma brasileira NBR 5410, a capacidade de condução de corrente fica limitada a aproximadamente a 40% daquela a 30° C.

⁶⁹ Idem.

⁷⁰ LISITA JÚNIOR, Orlando. Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede. Estudo de Caso -3 kWp instalados no Estacionamento do IEE – USP. São Paulo, 2005.

Devido ao uso em ambiente externo e às necessidades de conexão entre os painéis em série e paralelo, foram desenvolvidos os conectores tipo MC4, especiais para sistemas FV, que juntamente com as caixas de conexão formam o sistema de conexões.

Esses requisitos asseguram maior confiabilidade ao sistema fotovoltaico, pois diminuem a chance de ocorrer curtos-circuitos entre os potenciais positivo e negativo decorrente de possíveis falhas. Toda a instalação deve ser feita seguindo-se as normas para instalações elétricas de baixa tensão NBR 5410.

Os 10 painéis fotovoltaicos podem ser organizados com topologias diversas. Uma alternativa de projeto seria considerar 2 strings de 5 painéis conectados em série, ligadas em paralelo. Cada conjunto gera um potencial de 371 V, com uma corrente de saída de 5,26 A, que ligados em paralelo geram uma saída de $V_{cc} = 185,5 \text{ V}$ e $I = 10,52 \text{ A}$ para alimentar o inversor. A área ocupada pelo conjunto dos módulos é de aproximadamente 20 m^2 .

6.6 Suporte Estrutural

A estrutura de suporte dos módulos fotovoltaicos deve ser montada de forma a facilitar tanto a instalação quanto a manutenção. Também deve ser projetada para a estética e não quebrar a harmonia arquitetônica da edificação onde será montada. Recomenda-se ser instalada o mais próximo possível do ponto de conexão afim de diminuir o comprimento dos cabos que fazem a conexão com o inversor.

7. CÁLCULO DA ENERGIA PRODUZIDA

Júlio Igor López Seguel⁷¹ ressalta que para o cálculo da energia produzida foi utilizado o método da irradiação global, método utilizado em sistemas MPPT onde durante todo o tempo o módulo funciona em seu ponto de máxima potência.

Segundo Villalva (2012)⁷², a energia produzida pode ser calculada da seguinte maneira:

$$(1) E_p = E_s \times A_m \times n$$

Onde:

E_p : Energia produzida pelo módulo diariamente [kWh]

E_s : irradiação global diária [kWh/m²/dia]

A_m : Área da superfície do módulo [m²]

n : Eficiência do módulo

Ainda segundo Villalva (2012)⁷³, quando não se tem a eficiência do módulo, esta pode ser calculada utilizando-se a seguinte fórmula:

$$(2) n = P_{\text{máx}} / (A_m \times 1000)$$

Onde:

n : Eficiência do módulo

$P_{\text{máx}}$: Potência máxima de pico do módulo [Wp]

A_m : Área da superfície do módulo [m²]

Obs.: A constante 1000 refere-se à taxa de irradiação padronizada de 1000 W/m² em STC.

Alternativamente, energia produzida pode ser calculada diretamente a partir da irradiação solar global diária e da potência máxima de pico do módulo:

$$(3) E_p = (E_s \times P_{\text{máx}}) / 1000$$

Onde:

⁷¹ SEGUEL, Júlio Igor López. **Projeto de um Sistema Fotovoltaico Autônomo de Suprimento de Energia Usando Técnica MPPT e Controle Digital**. UFMG, 2009.

⁷² VILLALVA, M.G.; GAZOLI J.R., **Energia Solar Fotovoltaica: Conceitos e Aplicações**, 1. Ed, São Paulo : Ética, 2012.

⁷³ Idem.

Ep : Energia produzida pelo módulo diariamente [kWh]

Es : irradiação global diária [kWh/m²/dia]

Pmáx : Potência máxima de pico do módulo [Wp]

7.1 Irradiação Global Horizontal

Nesta análise foi considerado o índice GHI – Global Horizontal Irradiance (Irradiância Global Horizontal), índice mais utilizado como parâmetro em estudos de sistemas fotovoltaicos. É possível encontrar bases de dados de irradiação global horizontal provenientes de diversas fontes, como NASA, INPE, NREL e CRESESB . A base de dados escolhida para esta análise foi a base de dados do CRESESB – Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio Brito por apresentar uma média anual dos dados de uma estação solarimétrica mais próxima do local. A partir de dados de irradiação solar global horizontal mensal, foi construído o gráfico da Figura 12. Foram consideradas as médias entre 2000 a 2012, calculados a partir das coordenadas (Lat: 19,74; Long: 42,13), município de Caratinga, MG.

Coordenada geográfica de Caratinga:

Latitude: 19,740000° Sul

Longitude: 42,130000° Oeste

					Irradiação solar diária média [kwh/m ² .dia]														
#	Município	UF	Latitude [°]	Longitude [°]	Distância [km]	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Média	Delta
✓	Caratinga	MG	19,789722°S	42,139166°O	5,6	5,81	5,78	5,31	4,44	4,00	3,39	4,03	4,61	4,39	4,78	5,11	5,22	4,74	2,42

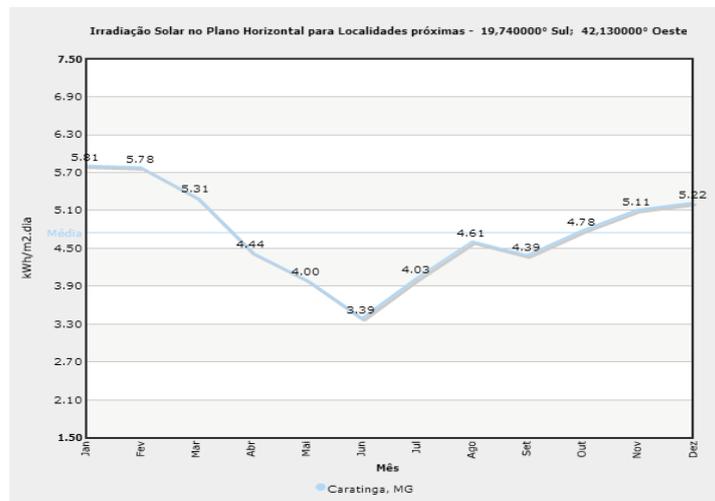


Figura 12: Irradiância Global Horizontal ao longo do ano em Caratinga.

Fonte: Villalva (2012)

Cálculo no plano inclinado:

Município: Caratinga - MG
Latitude: 19,789722° Sul
Longitude: 42,139166° Oeste
Distância: 5,6 km

#	Ângulo	Inclinação	Irradiação solar diária média mensal [kwh/m ² .dia]												Média	Delta
			Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez		
✓	Plano Horizontal	0° N	5,81	5,78	5,31	4,44	4,00	3,39	4,03	4,61	4,39	4,78	5,11	5,22	4,74	2,42
✓	Ângulo igual a latitude	20° N	5,29	5,51	5,41	4,89	4,76	4,15	4,94	5,29	4,59	4,66	4,73	4,72	4,91	1,36
✓	Maior média anual	18° N	5,36	5,56	5,43	4,87	4,71	4,09	4,87	5,24	4,59	4,69	4,78	4,78	4,91	1,47
✓	Maior mínimo mensal	29° N	4,92	5,24	5,30	4,96	4,97	4,37	5,20	5,43	4,55	4,48	4,44	4,38	4,85	1,06

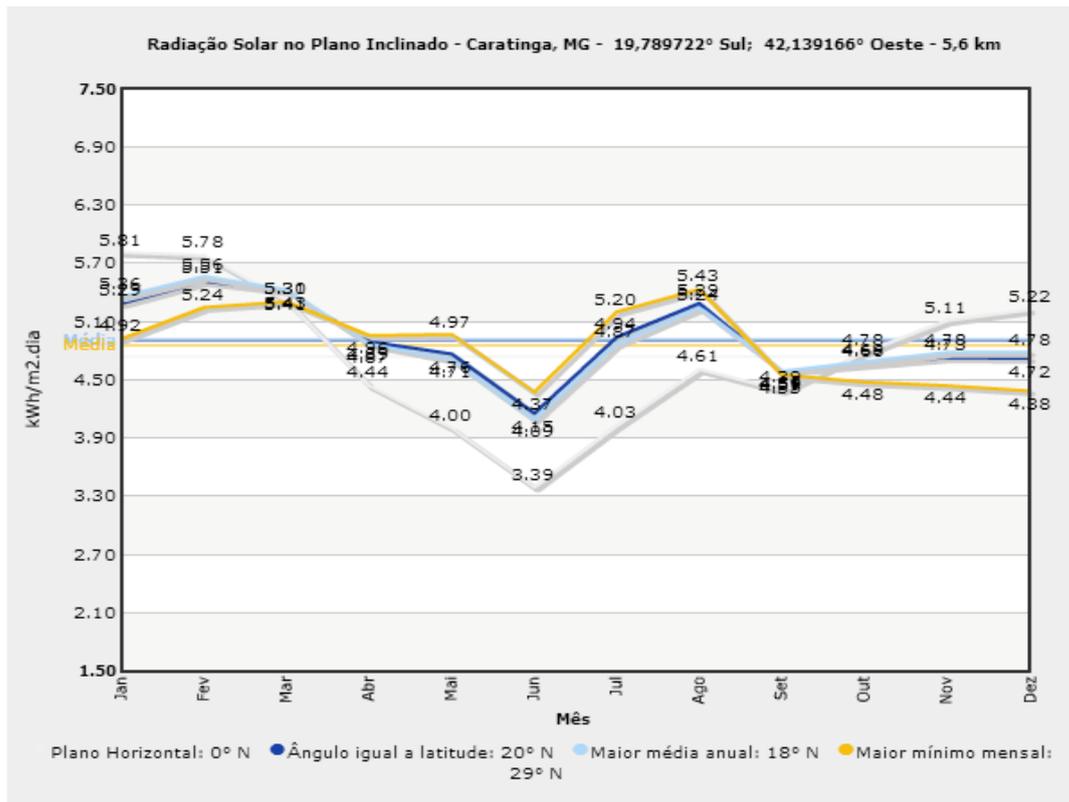


Figura 13: Irradiância Global Horizontal inclinado ao longo do ano em Caratinga.

Fonte: Villalva (2012)

Devido à inclinação do eixo de rotação terrestre em relação à sua órbita em torno do Sol, este assume diferentes ângulos, chamados de Ângulo Zenital, durante o ano, o que define a altura solar. O ideal seria ter um painel com a mesma inclinação zenital que o Sol a cada dia. Como isto não é viável, podemos utilizar diferentes métodos para escolher um ângulo que possibilite uma boa média de captação de energia solar durante o ano. Um deles, apresentado no “Installation and Safety Manual of the Bosch Solar Modules” consiste em escolher um ângulo de inclinação.

Latitude Geográfica do Local	Ângulo de inclinação recomendado
0° a 10°	$\alpha = 10^\circ$
10° a 20°	$\alpha = \text{latitude}$
21° a 30°	$\alpha = \text{latitude} + 5^\circ$
31° a 40°	$\alpha = \text{latitude} + 10^\circ$
41° ou mais	$\alpha = \text{latitude} + 15^\circ$

Fonte: Villalva (2012)

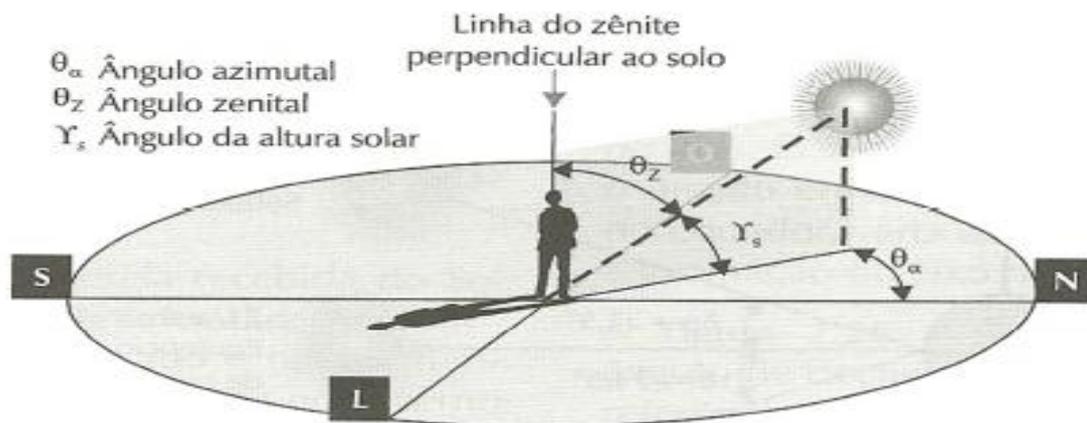


Figura 14: Posição do sol definida pelos ângulos azimutal, zenital e altura solar.

Fonte: VILLALVA (2012).

Desta forma se utilizará a tabela inclinada para os cálculos de geração. A utilização do plano inclinado dará um aumento de 3,6% de geração.

Os valores representam a média do montante de energia recebida durante os meses do ano.

João Tavares Pinho⁷⁴ destaca que a partir destes dados de irradiância global horizontal e das especificações e características do sistema fotovoltaico definido em projeto anteriormente, pode-se calcular o total de energia gerado durante o período desejado. A seguir, é apresentado o total de energia gerado pelo sistema fotovoltaico proposto, calculado a partir da equação 3, considerando os dados do CRESESB e uma potência instalada de 1,95kWp:

Para a obtenção da energia, iremos utilizar a média anual de radiação para o cálculo de geração diário, pois como o objetivo é uma análise de viabilidade em longo prazo, o período de retorno será medido em anos.

⁷⁴ PINHO, João Tavares. **Sistemas Híbridos: Soluções Energéticas para a Amazônia**. Ministério de Minas e Energia, 2008.

Cálculos:

$$E_p = (E_s \times P_{\text{máx}}) / 1000$$

$$E_p = (4,91 \times 195) / 1000 \therefore E_p = 0,957\text{KW/Placa/dia}$$

Para 10 placas a geração total será $E_p = 9,57\text{KW/dia}$.

$$\text{Média mês } E_p = 9,57 \times 30 = 287,1\text{KW/mês ou } 3445,2\text{KW/Ano}$$

7.2 Pay Back

Para a instalação do sistema solar fotovoltaico já descrito, composto de 10 painéis de 195Wp totalizando 1,95kWp instalados, mais inversor de 2 kW e acessórios, foram consultados quatro fornecedores e optou-se pela empresa Genix especializada em soluções para geração de energia solar fotovoltaica que apresentou o melhor custo por kWp instalado. O valor total do sistema proposto foi apresentado em orçamento no valor de R\$ 19.500,00, incluindo todas as despesas: impostos, taxas, frete e instalação.

A partir do cálculo da energia gerada, pode-se obter o tempo gasto pelo consumidor para ter o retorno do investimento (PayBack). Como o consumidor é residencial (categoria B1), 220/127V, o valor economizado é a quantidade energia gasta multiplicado pelo valor do Mega Watts mais impostos.

Logo:

$$\text{PayBack} = C_{\text{imp}} / (E_{\text{pmês}} \times T)$$

Onde:

PayBack: número de meses gastos para recuperar o investimento;

C_{imp} : Custo de implantação do sistema;

$E_{\text{pmês}}$: Geração mensal

T: Tarifa de energia da concessionária, em R\$/kWh.

Assim, considerando-se o valor da tarifa igual a R\$0,3470/KWh, Icms 12%, PIS e COFINS 9,71%, chegamos a um valor final de R\$0,4223/KWh, como registrado na fatura do mês de novembro de 2013, teremos:

$$\text{PayBack} = 19500 / (287,1 \times 0,4223)$$

$$\text{PayBack} = 160,8 \text{ meses ou } 13,4 \text{ anos.}$$

8. CONSIDERAÇÕES FINAIS

No momento em que o mundo se encontra, em meio a crises ambientais e em busca da diminuição do impacto ao meio ambiente, como redução da emissão global de gases do efeito estufa, juntamente com a racionalização de recursos e crescente aumento do custo de energias estabelecidas como uso de petróleo, a necessidade do estudo e da implementação de fontes alternativas de energia se torna cada vez mais premente.

O uso da tecnologia solar fotovoltaica é uma realidade presente em vários países do chamado primeiro mundo, com grande inserção no sistema elétrico em países como a líder mundial neste segmento, Alemanha, em pleno funcionamento.

No Brasil, o potencial de geração de energia solar é ótimo em quase toda a sua extensão, e mesmo as áreas menos privilegiadas tem médias comparáveis à líder mundial em energia solar.

Um importante passo na caminhada para a disseminação do uso de sistema fotovoltaicos conectados à rede foi a resolução da ANEEL nº 482, publicada em Abril de 2012, que regulamenta a conexão de sistemas de micro e mini geração de energia à rede elétrica.

Apesar do potencial disponível, regulamentação e conhecimento técnico disponível, que foi demonstrado neste presente trabalho a sua facilidade de implementação, a aplicação do uso de energia solar fotovoltaica no Brasil ainda é inviável por fatores econômicos. Podemos citar a falta de incentivos por parte do governo como diferença crucial e decisiva entre o Brasil e países desenvolvidos que já fazem uso desta tecnologia. Incentivos estes que podem e devem ir desde redução ou isenção de taxas e impostos sobre materiais e produtos para o consumidor até o desenvolvimento de uma política de produção de empregos incentivando a implementação de fábricas de montagem e fabricação de módulos fotovoltaicos e inversores CC/CA.

Foram verificadas as tarifas vigentes e realizado um estudo final de viabilidade econômico-financeira, verificando um turning point na situação atual onde a aplicação de sistemas fotovoltaicos está prestes a tornar-se economicamente viável para o consumidor.

Desta forma, vale ressaltar que o objetivo deste estudo foi ressaltar a viabilidade da utilização do sistema fotovoltaico em residências. No entanto, apesar de ser um sistema de energia limpa, o seu custo ainda é alto, o que faz com que haja a inviabilidade da implantação do sistema.

Entretanto, devido ao constante desenvolvimento desta tecnologia, longe de estar consolidada, torna-se necessário um estudo periódico dos índices e valores obtidos no presente trabalho para acompanhar a evolução do mercado.

9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BRAGA, Renata Pereira. **Energia Solar Fotovoltaica: Fundamentos e Aplicações**. UFRJ, 2008.

BRITO, Sérgio de Salvo. **Tutorial de Energia Fotovoltaica**. CRESESB – Centro de Referência para Energia Solar e Eólica. 2006.

CABRAL. Claudia Valéria Tavora. **Energia Fotovoltaica**. UFV, 2013.

CARVALHO, E. F. A.; CALVETE, M. J. F. **Energia Solar: Um passo, um presente**. Rev. Virtual Quim., 2010.

CARVALHO, Lucas Diniz Andrade. SILVA, Rodrigo Barbosa. ROBERTO, JÚNIA Taíse Santos. **Instalação de Iluminação no Meio Rural a Partir de Sistema Fotovoltaico como Fonte Complementar de Energia Elétrica**. UNIBH, 2013.

CAVALCANTI, Clóvis. **Desenvolvimento e Natureza: Estudos para uma Sociedade Sustentável**. INPSO/FUNDAJ, Instituto de Pesquisas Sociais, Fundação Joaquim Nabuco, Ministério de Educação, Governo Federal, Recife, Brasil. Outubro, 1994

COOPER, Ellison. MARTINS JÚNIOR, Wellyngton Morales. **Aplicação de Painéis Solares Fotovoltaicos como Fonte Geradora Complementar de energia Elétrica em Residências**. Universidade Federal do Paraná, 2013.

Grupo de trabalho de energia solar. **Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos**. RJ. Ago. 2004.

HEINEMAN, Jan Thomas. **Estudo de viabilidade para implantação de um sistema híbrido-fotovoltaico de baixa potência**. RJ. Ago. 2007

KUNIY, Adriana Akemi. **Desajustes Identificados em Relatórios de Estudos de Impactos Ambientais em Empreendimentos Hidrelétricos Focando os Grupos de Aves e Mamíferos Silvestres**. USP, 2013.

LEYEN, Fabrícia de Castro. **Estudo da Influência de Medidas de Eficiência Energética no Dimensionamento de Sistemas Solares Fotovoltaicos Integrados à Rede Elétrica Pública**. UFRJ, 2008.

LIMA, Fábio de Souza. CORDEIRO, Lucas Carvalho. SOUZA, Rubem César Rodrigues. **Sistema de Monitoramento à Distância para UNIDADE DE Célula a Combustível**. Congresso Brasileiro de Planejamento Energético. Curitiba, 2012.

LISITA JÚNIOR, Orlando. **Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede. Estudo de Caso -3 kWp instalados no Estacionamento do IEE – USP**. São Paulo, 2005.

MANCINI, Renata Foltran. YONEMOTO, Hiroshi Wilson. **Risco e Retorno Financeiro nas Decisões Empresariais**. Revista UNITOLEDO, 2009.

Ministério do Meio Ambiente. Energia Eólica. Disponível em: <http://www.mma.gov.br/clima/energia/energias-renovaveis/hidroeletricidade> acessado em (03/09/2013).

Ministério do Meio Ambiente. Energia Eólica. Disponível em: <http://www.mma.gov.br/clima/energia/energias-renovaveis/energia-solar> acessado em (03/09/2013).

Ministério do Meio Ambiente. Energia Eólica. Disponível em: <http://www.mma.gov.br/clima/energia/energias-renovaveis/energia-maremotriz> acessado em (03/09/2013).

Ministério do Meio Ambiente. Energia Eólica. Disponível em: <http://www.mma.gov.br/clima/energia/energias-renovaveis/energia-eolica?tmpl=component&print=1> acessado em (03/09/2013).

NASCIMENTO, Cássio Araújo do. **Princípio de Funcionamento de Célula Fotovoltaica**. UFL, 2004.

OLIVEIRA, Hallyson Eduardo. **Tecnologia Fotovoltaica em Filmes Finos**. Universidade Federal de Lavras, 2008.

OLIVEIRA, Rafael Deléo e. **Geração de Energia Elétrica a Partir do Biogás Produzido pela Fermentação Anaeróbia de Dejetos em Abatedouro e as Possibilidades no Mercado de Carbono**. USP, 2009.

PINHO, João Tavares. **Sistemas Híbridos: Soluções Energéticas para a Amazônia**. Ministério de Minas e Energia, 2008.

POMPERMAYER, Máximo Luiz. **Desafios e Perspectivas para Inovação Tecnológica no Setor de Energia Elétrica**. Revista P&D, junho, 2009.

RAMOS, Filipe G. SEIDLER, Nelson. **Estudo da Energia Eólica para Aproveitamento em Pequenos Empreendimentos**. Rev. Elet. De Extensão da URI, out/2012.

SAMPAIO. Leonardo Poltronieri. **Controle da injeção de potências ativa e reativa em inversor de Geração Distribuída conectado à rede de distribuição em corrente alternada em baixa tensão, empregando LMIs com realimentação de estados e critérios de D-estabilidade**. UNESP, 2013.

SEGUEL. Júlio Igor López. **Projeto de um Sistema Fotovoltaico Autônomo de Suprimento de Energia Usando Técnica MPPT e Controle Digital**. UFMG, 2009.

SILVA, Cláudio Homero Ferreira da. **ALTERNATIVAS ENERGÉTICAS: UMA VISÃO CEMIG**. BELO HORIZONTE: CEMIG, 2012.

Grupo de trabalho de energia solar. **Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos**. RJ. Ago. 2004.

SOUSA, E.M. CASTRO, K.G. DIDIO, R. RAUBER, P. **Arquitetura Futurística e Energia Sustentável**. Revista de Ciências Exatas e da Terra, UNIGRAN, 2013.

TOLMASQUIN, Maurício Tiomno. **Análise da Inserção da Geração Solar na Matriz Elétrica Brasileira**. Ministério de Minas e Energia, 2012.

VILLALVA, M.G.; GAZOLI J.R., **Energia Solar Fotovoltaica: Conceitos e Aplicações**, 1. Ed, São Paulo : Ética, 2012.