



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO
ESCOLA DE MINAS
COLEGIADO DO CURSO DE ENGENHARIA DE
CONTROLE E AUTOMAÇÃO - CECAU**



AYUME MILAGRES

**ESTUDO PARA IMPLANTAÇÃO DE UM SISTEMA FOTOVOLTAICO EM UMA
RESIDÊNCIA AUTOSSUSTENTÁVEL**

Ouro Preto, 2016

AYUME MILAGRES

**ESTUDO PARA IMPLANTAÇÃO DE UM SISTEMA
FOTOVOLTAICO EM UMA RESIDÊNCIA
AUTOSSUSTENTÁVEL**

Monografia apresentada ao Colegiado do Curso de Engenharia de Controle e Automação da Universidade Federal de Ouro Preto como parte dos requisitos para obtenção do Grau de Engenharia de Controle e Automação.

Orientador: Prof. Dr. Paulo Marcos de Barros Monteiro.

Ouro Preto
Escola de Minas – UFOP
Março/2016

Monografia defendida e aprovada, em 11 de março de 2016, pela comissão avaliadora constituída pelos professores:



Prof. Dr. Paulo Marcos de Barros Monteiro - Orientador



Prof. Dr. Luiz Fernando Rispoli Alves – Professor Convidado



Prof. Dr. Sávio Augusto Lopes da Silva – Professor Convidado

M637e Milagres, Ayume.

Estudo para implantação de um sistema fotovoltaico em uma residência autossustentável [manuscrito] / Ayume Milagres. – 2016.

lxiii, 63f. : il., color., graf., tab. e mapas.

Orientador: Prof. Dr. Paulo Marcos de Barros Monteiro.

Monografia (Graduação) – Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas. Colegiado do Curso de Engenharia de Controle e Automação e Técnicas fundamentais.

Área de concentração: Engenharia de Controle e Automação.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus por toda força, sabedoria e por todas as conquistas dentre as muitas que estão por vir. Agradeço à minha mãe por todo amor, incentivo e carinho. Ao meu pai, que sempre foi minha fonte de inspiração, pelas orações e por todo esforço feito por mim. Aos meus irmãos, por todo suporte e ensinamentos. À minha vó Ana, por ser minha segunda mãe e por todo amor e cuidados que me foi direcionado. Ao Marcelo, que está sempre ao meu lado apoiando minhas decisões e por todos os ensinamentos e carinho. Às minhas melhores amigas pelos vários anos de amizade. À UFOP, seu corpo docente, direção e administração por todo o aprendizado e oportunidades. Ao meu orientador Paulo Monteiro, pelo suporte no pouco tempo que lhe coube, pelas suas correções e incentivos. E a todos que direta ou indiretamente fizeram parte da minha formação, o meu muito obrigada.

“Não, não pares! É graça divina começar bem.
Graça maior persistir na caminhada certa, manter
o ritmo... Mas a graça das graças é não desistir,
podendo ou não, embora aos pedaços chegar até
o fim!”

DOM HELDER CÂMARA

RESUMO

O desenvolvimento da humanidade está há muito tempo dependente da disponibilidade energética. Atualmente, a matriz energética mundial está baseada nos combustíveis derivados do petróleo, que possui um alto coeficiente energético, mas que também gera grande degradação ambiental em sua exploração e utilização. No Brasil, a energia elétrica é proveniente principalmente das usinas hidrelétricas, nas quais as condições climáticas podem comprometer o fornecimento de eletricidade. Por isso, faz-se necessária a utilização de outras fontes de energia. Como alternativa para a diversificação da matriz energética brasileira, as fontes renováveis têm como vantagem a geração de energia sem danos significativos ao meio ambiente. Dentre essas, a energia solar fotovoltaica surge como um grande potencial de geração de energia limpa, silenciosa e descentralizada. No entanto, o alto custo de implantação de um sistema fotovoltaico ainda tem sido um obstáculo para a expansão da tecnologia. Neste trabalho foram desenvolvidos estudos sobre a aplicabilidade dos sistemas fotovoltaicos em residências autossustentáveis. Além disso, foram propostas diferentes alternativas de módulos fotovoltaicos com o objetivo de reduzir os custos do sistema.

Palavras-Chave: Matriz energética, fontes renováveis, energia solar fotovoltaica, sistemas fotovoltaicos, autossustentável.

ABSTRACT

The development of humanity has long been dependent on energy availability. Currently, the world energy matrix is based on petroleum-based fuels, which has high-energy coefficient, but also generates large environmental degradation in its exploitation and utilization. In Brazil, the electricity comes mainly from hydroelectric plants in which weather conditions can compromise the supply of electricity. Therefore, it is necessary to use other sources of energy. As an alternative to the diversification of the Brazilian energy matrix, renewable sources have the advantage of generating energy without significant damage to the environment. Among these, photovoltaic solar energy emerges as a great potential for clean, quiet and decentralized power generation. However, the high cost of implementation of a photovoltaic system also has been an obstacle to the expansion of technology. In this work, it has been developed studies on the applicability of photovoltaic systems in self-sustaining households. In addition, it has been proposed different options for photovoltaic modules in order to reduce system costs.

Keywords: Energy matrix, renewable sources, photovoltaic solar energy, photovoltaic systems, self-sustaining.

LISTA DE ABREVIACÕES E SIGLAS

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica

a-Si – Silício Amorfo Hidrogenado

BA – Bahia

c-Si – Silício cristalino

CA – Corrente alternada

CC – Corrente contínua

CdTe – Telureto de Cádmio

CEPEL – Centro de Pesquisa de Energia Elétrica

CIGS – Disseleneto de Cobre Índio Gálio

CIS – Disseleneto de Cobre Índio

CRESESB – Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio de Salvo Brito

EPE – Empresa de Pesquisa Energética

GTES – Grupo de Trabalho de Energia Solar

IEA – *International Energy Agency*

GaAs – Arseneto de Gálio

m-Si – Silício monocristalino

Namitec – Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia de Sistemas Micro e Nanoeletrônicos

ONS – Operador Nacional do Sistema Elétrico

OPV – Células Fotovoltaicas Orgânicas

PET – Politereftalato de etileno

PIB – Produto Interno Bruto

PQ – Pontos Quânticos

p-Si – Silício policristalino

Si – Silício

VCA – Voltagem corrente alternada

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 - Principais características do Sol.	24
Tabela 3.2 - Novas aplicações de Sistemas Fotovoltaicos no Tempo.	30
Tabela 3.3 - Aplicações de Sistemas Fotovoltaicos por intervalo de potência.....	31

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Matriz Elétrica Brasileira em 2013.....	19
Figura 2.2 - Evolução da capacidade instalada x Disponibilidade hidráulica.....	20
Figura 2.3 - Evolução da estrutura da oferta de energia: Brasil – 2000-2030.....	21
Figura 2.4 - Custo de Investimento (potência instalada US\$/kW).....	23
Figura 3.1 - Radiação solar no Brasil – média anual típica (Wh/m ² .dia).....	26
Figura 3.2 - Representação dos eventos-chave no desenvolvimento das células fotovoltaicas.	29
Figura 3.3 – Módulos solares fabricados diretamente sobre a telha de vidro.	31
Figura 3.4 - Sistema fotovoltaico de bombeamento de água para irrigação.....	32
Figura 3.5 - Uso da Energia Solar Fotovoltaica utilizada para iluminação pública.	33
Figura 3.6 – Exemplo de aplicação de módulos solares em um edifício.....	33
Figura 4.1 - Sistema de geração fotovoltaica de energia elétrica.	34
Figura 4.2 - Análise comparativa de custo/eficiência das três gerações de fotovoltaicos.....	35
Figura 4.3 - Gerações de fotovoltaicas e estruturas correspondentes.....	36
Figura 4.4 - Módulo de silício monocristalino.	37
Figura 4.5 - Módulo de silício policristalino.	38
Figura 4.6 - Células de silício amorfo flexíveis em substrato de plástico (Sanyo Solar Industries).....	39
Figura 4.7 - Módulos solares de CdTe em substrato de vidro para aplicações arquitetônicas.	40
Figura 4.8 - Módulo Flexível de CIS.....	41
Figura 4.9 - Diagramas de células fotovoltaicas orgânicas: (i) com vidro e (ii) com filme depositado sobre uma superfície de PET flexível.	43
Figura 4.10 - Exemplos de baterias para uso em sistemas fotovoltaicos.	45
Figura 4.11 - Controlador Solar de três funções.....	46

Figura 4.12 - Inversor solar fotovoltaico da Solar Energy do Brasil.....	47
Figura 4.13 - Diagrama cinemático do Sistema de Rastreamento.....	48
Figura 5.1 - Tipos de edifícios solares.....	51
Figura 5.2 - Diagrama esquemático de um sistema solar fotovoltaico integrado ao telhado de uma residência urbana e interligado à rede elétrica convencional.	52
Figura 6.1 - Modelagem sistêmica de uma edificação autossustentável.	53
Figura 6.2 - Relação de produtos, insumos e resíduos.	55

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	15
1.1	Objetivo Geral.....	16
1.2	Objetivos Específicos	16
1.3	Justificativa	17
1.4	Metodologia.....	17
1.5	Estrutura do Trabalho	18
2	MATRIZ ENERGÉTICA BRASILEIRA	19
2.1	Composições da Matriz Energética Brasileira.....	19
2.2	Oferta de Energia Elétrica no Brasil	20
2.3	Panorama da Matriz Energética Brasileira	21
2.4	Medidas para a inserção de novas fontes energéticas.....	22
3	ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA.....	24
3.1	As características do Sol	24
3.2	Radiação Solar	24
3.3	História e Estado da Arte	27
3.4	Aplicações da Tecnologia Fotovoltaica	30
4	SISTEMAS FOTOVOLTAICOS.....	30
4.1	Células Fotovoltaicas	35
4.1.1	Células de Silício Cristalino (c-Si)	36
4.1.2	Células de Silício Amorfo Hidrogenado (a-Si)	38
4.1.3	Células de Telureto de Cádmio (CdTe).....	40
4.1.4	Células de Disseleneto de Cobre (Gálio) e Índio (CIS e CIGS).....	41
4.1.5	Células de Arseneto de Galio (GaAs).....	42
4.1.6	Células Solares de Terceira Geração	42
4.2	Baterias	43
4.3	Controladores de Carga	45

4.4	Inversores.....	46
4.5	Sistemas de Posicionamento.....	47
5	ENERGIA SOLAR EM HABITAÇÕES.....	49
5.1	Geração Distribuída.....	49
5.2	Generalidades.....	49
6	A RESIDÊNCIA COMO UM SISTEMA.....	53
6.1	Insumos e sistemas autônomos.....	54
6.2	Dimensionamento.....	54
6.3	A Residência Autossustentável.....	55
6.4	Controle e Monitoramento.....	55
7	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	57
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	58

1 INTRODUÇÃO

A Energia, nas suas mais diversas formas, é indispensável à sobrevivência da espécie humana. Em termos de suprimento energético, a eletricidade tornou-se uma das formas mais comuns de energia, passando a ser um recurso necessário e estratégico para o desenvolvimento socioeconômico de diferentes países e regiões (ANEEL, 2005).

O progressivo desenvolvimento do setor industrial mundial e a utilização de dispositivos eletroeletrônicos nas variadas atividades desenvolvidas pelo homem gerou, nas últimas décadas, uma grande demanda por energia elétrica. Este aumento na demanda associado aos precários investimentos no setor de energia elétrica (ROSA, 2000) resultou em um princípio de colapso no sistema energético de diversos países (FORTH; TOBIN, 2002) (MIRANDA, 2003), gerando um alerta mundial a este respeito.

O impacto ambiental é altamente degradante quando se utilizam fontes não renováveis derivadas do petróleo. A emissão de gases tóxicos na atmosfera, resultantes da queima do petróleo, afetam o clima e podem resultar em graves consequências em longo prazo.

O incentivo ao uso de fontes alternativas renováveis é uma das medidas utilizadas pela comunidade científica para resolver o problema da falta de energia elétrica mundial (MARTINS, 2000).

O Sol é a principal fonte de energia para a Terra. Além de ser responsável pela manutenção da vida no Planeta, a radiação solar constitui-se numa inesgotável fonte energética, constituindo um grande potencial de sua utilização por meios de sistemas de captação e conversão em outra forma de energia, como por exemplo, a térmica e a elétrica (GTES, 2014).

O aproveitamento da energia gerada pelo Sol, inesgotável na escala terrestre de tempo, tanto como fonte de calor e de luz, é hoje uma das alternativas energéticas mais promissoras para fornecer a energia necessária ao desenvolvimento humano. Quando se fala em energia, é importante ressaltar que o Sol é responsável pela origem de praticamente todas as outras fontes de energia na Terra (GTES, 2014).

A energia elétrica é obtida através da conversão direta da luz por meio do efeito fotovoltaico. Edmond Becquerel relatou esse efeito em 1839, que é notado através do surgimento de uma diferença de potencial nos extremos de uma estrutura de um material semicondutor, produzida pela absorção da luz (CRESESB, 2006). Os sistemas capazes de gerar esse tipo de energia são chamados de geradores fotovoltaicos e são constituídos por células fotovoltaicas associadas em série e paralelo com o intuito de se obter as características requeridas.

Os sistemas fotovoltaicos podem ser classificados em três categorias principais: autônomos, híbridos ou conectados à rede. Sistemas autônomos, não conectados à rede elétrica, podem ou não apresentar fontes de energia complementares à geração fotovoltaica. Normalmente, estes sistemas necessitam de algum tipo de armazenamento, utilizando baterias para o fornecimento de energia (ALVES, 2008).

1.1 Objetivo Geral

Este trabalho possui como objetivo a realização do estudo bibliográfico e do estado da arte dos sistemas fotovoltaicos, além de um estudo teórico para um projeto de implantação de um sistema fotovoltaico em uma residência autossustentável.

1.2 Objetivos Específicos

- Estudo bibliográfico sobre a matriz energética brasileira;
- Estudo bibliográfico da geração de energia utilizando a luz solar;
- Informar o estado da arte da energia solar fotovoltaica;
- Fazer um breve estudo teórico sobre os tipos de células solares utilizadas atualmente;
- Abordar um estudo teórico de um projeto de implantação de um sistema fotovoltaico em uma residência autossustentável;
- Fornecer material de consulta para profissionais que desejam aprofundar seus conhecimentos nos assuntos discutidos.

1.3 Justificativa

No Brasil, a maior porcentagem da energia elétrica consumida é utilizada por edificações residenciais (GELLER, 1994) (LAMBERTS et al., 1997). Devido a isso, é de grande importância a realização de estudos e incentivo à implantação de fontes renováveis para a geração de energia elétrica em edificações brasileiras autossuficientes.

Fontes de energia renováveis não produzem resíduos prejudiciais, não consomem combustíveis e não geram consequências prejudiciais ao meio ambiente. A energia fotovoltaica é uma das fontes mais promissoras para geração de energia elétrica. Essa é uma fonte de energia confiável e silenciosa, uma vez que não existem movimentos mecânicos.

Nos últimos anos, pode-se notar uma maior preocupação do governo brasileiro em expandir o uso da energia fotovoltaica no país. Um Sistema de Compensação de Energia Elétrica foi aprovado pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), permitindo que o consumidor instale pequenos geradores, tais como painéis fotovoltaicos, em sua unidade consumidora e troque energia com a distribuidora local com o objetivo de reduzir o valor de sua fatura energética (ANEEL, 2015).

Além disso, deve-se considerar também o elevado preço das placas fotovoltaicas, o que prejudica a propagação do uso desse tipo de energia no cenário brasileiro. Por isso, neste trabalho há uma preocupação também em apresentar alternativas de baixo custo para fabricação de células fotovoltaicas e contribuir para a divulgação desse tipo de tecnologia.

1.4 Metodologia

Primeiramente foi realizado um estudo bibliográfico sobre a situação da matriz energética brasileira e os benefícios da diversificação das fontes energéticas utilizadas no país.

Logo após, foi realizado um estudo que diz respeito ao uso da energia solar, utilizando a implantação da energia fotovoltaica em residências autossustentáveis.

Foi feito também um estudo sobre os tipos de células fotovoltaicas disponíveis no mercado atual e a partir disso, foi feita também uma pesquisa sobre alternativas de baixo custo para as células mais utilizadas recentemente.

Por último, foi abordado um estudo sobre o funcionamento de uma edificação autossustentável visando um projeto de implantação de um sistema de energia fotovoltaica em residências.

1.5 Estrutura do Trabalho

Este trabalho está dividido em 7 capítulos. O primeiro apresenta uma introdução sobre o conteúdo do trabalho desenvolvido; no segundo capítulo foi feito um estudo acerca da matriz energética brasileira, abordando sua composição, evolução de demanda e cenário. No capítulo 3, a energia solar é apresentada como forma alternativa para geração de energia elétrica, com ênfase na energia fotovoltaica, sua história e aplicações. O capítulo 4 apresenta os sistemas fotovoltaicos: sua composição e seus principais elementos. No quinto capítulo foi feito um estudo sobre a implantação da energia solar em residências, abordando suas principais características e vantagens. No capítulo 6, pode-se encontrar um estudo de um projeto sobre a implantação da tecnologia fotovoltaica em casas autossustentáveis, apresentado as principais características. Por fim, no último capítulo são tratadas as conclusões e considerações finais.

2 MATRIZ ENERGÉTICA BRASILEIRA

2.1 Composições da Matriz Energética Brasileira

As previsões sobre o crescimento da economia mundial são otimistas. Segundo (MONTTOYA et al., 2013), está previsto um aumento do PIB a uma taxa de 3,2% a.a. até 2035. Esse crescimento terá uma expressiva participação no aumento da demanda de energia dada sua vital importância para o desenvolvimento de qualquer sistema econômico.

No Brasil, o aumento da produção de energia primária dos últimos 30 anos tem acompanhado de perto o crescimento do PIB, entretanto, o consumo de eletricidade tem aumentado em ritmo mais acelerado, como consequência da eletrificação crescente do país e da instalação de indústrias eletro intensivas, como as de alumínio (GOLDEMBERG; LUCON, 2007). Como solução para esse dilema, o país deverá passar por uma grande mudança em sua matriz energética, com forte aumento da participação das fontes renováveis (VICHI; MANSOR, 2009).

Atualmente, a produção de energia elétrica nacional é proveniente em sua maior parte, de usinas hidrelétricas. De acordo com a Empresa de Pesquisa Energética (EPE, 2014), essas usinas são responsáveis por aproximadamente 70% da produção nacional, como pode ser visualizado na figura abaixo:

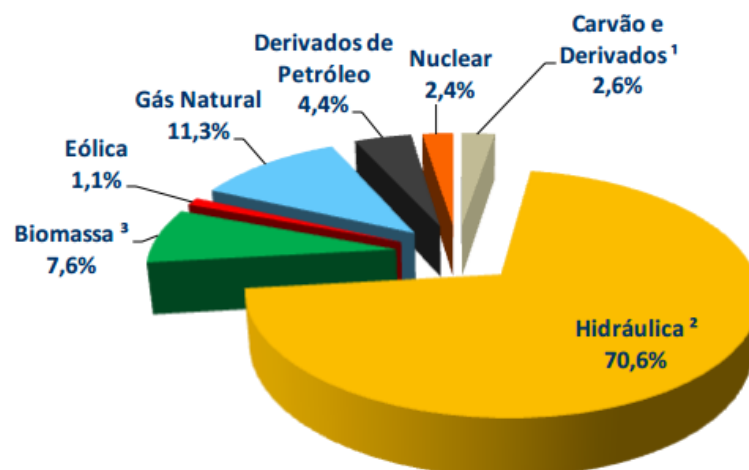


Figura 2.1 - Matriz Elétrica Brasileira em 2013.

Fonte: EPE, 2014.

2.2 Oferta de Energia Elétrica no Brasil

Um dos maiores potenciais hidroelétricos do mundo está concentrado no Brasil (DOROCHE, ANSCHAU, 2015), já que a matriz energética do país é composta, predominantemente, por essa fonte, como pôde ser visto na figura 2.1.

Para Marengo et al. (2010), o Brasil possui uma extensa disponibilidade de água, no entanto a distribuição é bastante desigual em diferentes regiões do país. Como exemplo, foi citada a região Sudeste que possui uma grande oferta hídrica, mas é afetada pela escassez de água devido à sua urbanização descontrolada. Marengo et al. (2010) também cita que a oferta hídrica no Brasil está diretamente relacionada ao clima e que atrasos nas estações chuvosas podem prejudicar a geração de energia.

A figura 2.2 abaixo demonstra de forma precisa essa condição de sazonalidade climática:

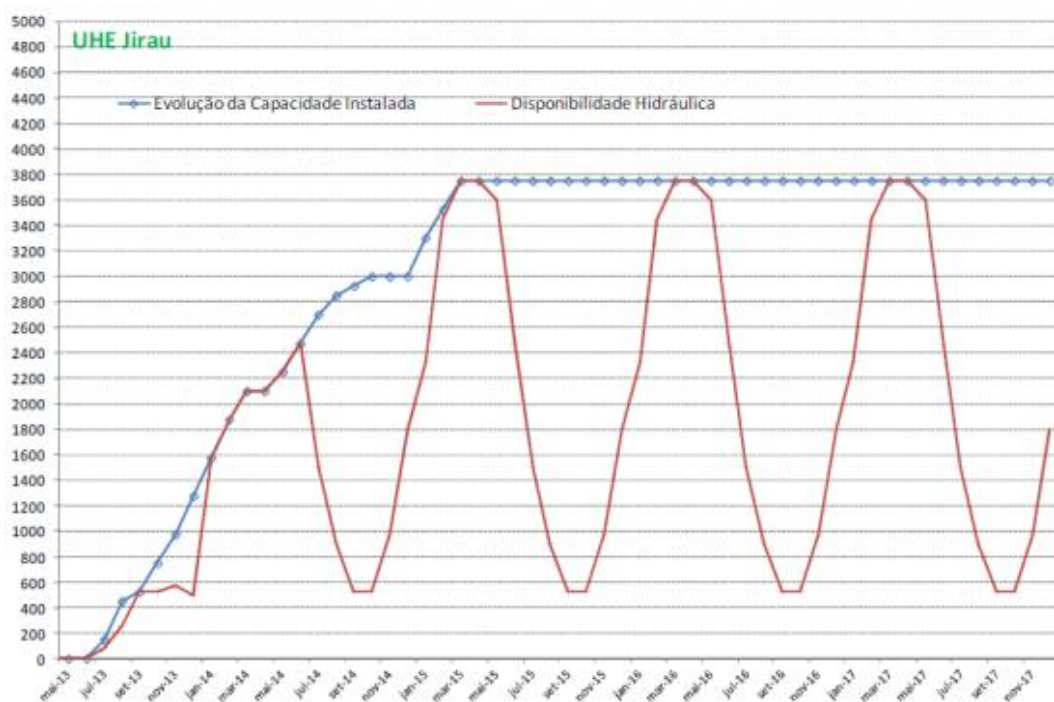


Figura 2.2 - Evolução da capacidade instalada x Disponibilidade hidráulica.

Fonte: ONS – PLANO DA OPERAÇÃO ENERGÉTICA 2013/2017 – PEN 2013.

Na figura 2.2 é possível constatar a influência das baixas vazões no período seco, quando a ausência de chuvas significativas à capacidade de geração da usina fica limitada por não ter

capacidade de armazenamento de água. Essa influência do período seco e úmido, afeta a capacidade de geração de todas as usinas hidroelétricas (DOROCHE; ASCHAU, 2015).

Sendo a matriz energética brasileira composta em sua maioria por recursos hídricos, é necessário assegurar que a oferta de energia não dependa, majoritariamente, de uma única fonte para geração de energia, buscando um equilíbrio entre as diferentes fontes, evitando que as condições climáticas determinem a quantidade de geração de energia elétrica no país (DOROCHE; ANSCHAU, 2015).

2.3 Panorama da Matriz Energética Brasileira

No Brasil, a energia elétrica produzida pelas usinas hidrelétricas é um elemento significativo para o desenvolvimento do país, propiciando uma geração de energia elétrica autossuficiente e de baixo custo (BRONZATTI; NETO, 2008).

De acordo com a Empresa de Pesquisa Energética (2015), o consumo atual de energia elétrica varia em torno de 474 TWh/ano. Segundo Bronzatti e Neto (2008), estima-se que em 2030 o consumo de energia elétrica irá variar entre 950 e 1.250 TWh/ano. Esse expressivo aumento no consumo de energia implicará em maiores investimentos para a expansão da oferta de energia elétrica.

Na figura 2.3 é possível visualizar a evolução da estrutura da oferta de energia no Brasil, citada por Brozatti e Neto (2008).

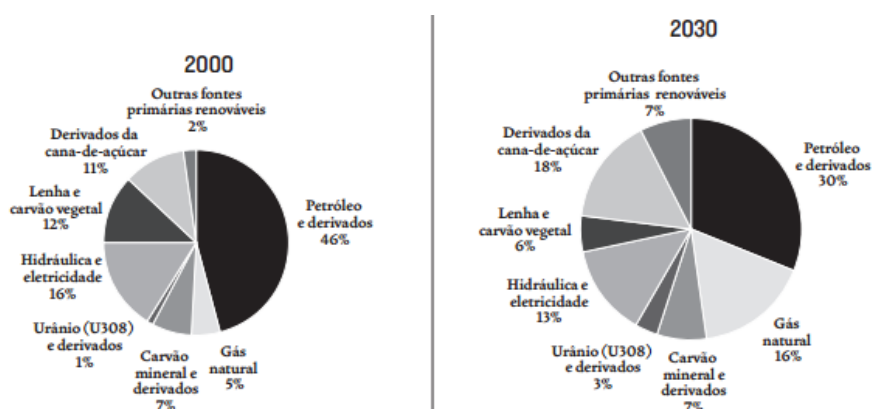


Figura 2.3 - Evolução da estrutura da oferta de energia: Brasil – 2000-2030.

Fonte: Adaptado de TOLMASQUIM et al., 2007.

De acordo com Tolmasquim et al. (2007), no ano 2000 três fontes correspondiam a 74% do consumo: petróleo, lenha e energia hidráulica. Para 2030, pode-se notar uma queda na oferta dessas fontes. Em contrapartida, nota-se um aumento da utilização das fontes renováveis na matriz energética brasileira, utilizadas como recurso para suprir a crescente demanda energética.

2.4 Medidas para a inserção de novas fontes energéticas

Segundo Bronzatti e Neto (2008), em alguns anos, quando a tecnologia de geração via fonte eólica e solar apresentarem melhorias e redução de custos, a introdução dessas matrizes energéticas em maior escala será imprescindível. O desenvolvimento dessas fontes renováveis requer a execução de algumas ações como:

- Investimento em tecnologia local e inovação para produção de células solares e geradores eólicos de eletricidade;
- Aumento do investimento em Engenharia de Materiais;
- Regulamentação e incentivos às empresas privadas para produção de energia utilizando fontes renováveis.

O principal obstáculo para a propagação das fontes renováveis na matriz energética brasileira deve-se ao alto custo de investimento e de produção energética, sendo que para a energia solar se torne viável, esta precisa de uma redução de custo na ordem de 5 vezes (BRONZATTI; NETO, 2008).

Na figura 2.4, é possível visualizar o custo de investimento por KW de potência instalada.

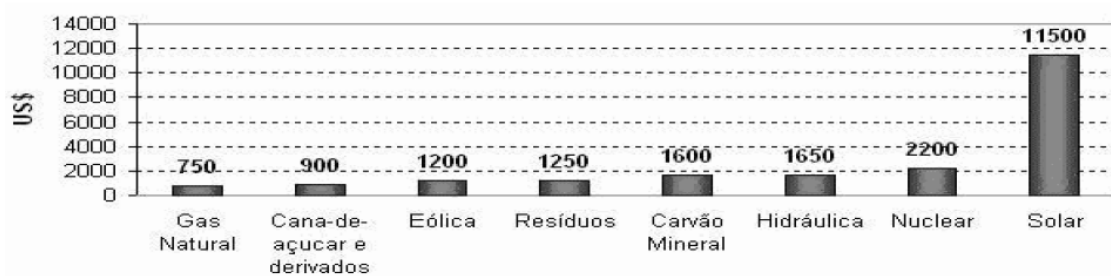


Figura 2.4 - Custo de Investimento (potência instalada US\$/kW).

Fonte: W. C Turkenburg Utrecht University, 2003 apud Bronzatti; Neto, 2008.

Nos próximos anos, a necessidade de investimentos em tecnologia e engenharia de materiais tende a crescer, já que a produção de equipamentos de geração de energia eólica e solar a custos competitivos, assim como, a execução de projetos eficazes, serão um fator determinante para o fornecimento de energia a um baixo custo e de boa eficiência (BRONZATTI; NETO, 2008).

3 ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA

3.1 As características do Sol

O Sol é basicamente uma gigante esfera de gás incandescente, e possui um núcleo, com temperatura de cerca de 15 milhões de kelvin, que é a região mais densa e onde a energia é produzida por reações termonucleares (GTES, 2014).

A energia proveniente do Sol é liberada a partir de reações termonucleares, onde quatro prótons são fundidos em um núcleo de hélio, com a liberação de energia. Presume-se que o Sol possua reserva de hidrogênio suficiente para alimentar as reações nucleares por mais 5 bilhões de anos (NASA, 2013a, 2013,b).

Na tabela 3.1 exibida abaixo, é possível verificar as principais características do Sol:

Tabela 3.1 - Principais características do Sol.

Principais características do Sol	
Massa	$1,989 \times 10^{30}$ kg
Raio	696.000 km
Densidade média	1.409 kg m^{-3}
Densidade central	$1,6 \cdot 10^5 \text{ kg m}^{-3}$
Distância	1 UA ou $1,499 \cdot 10^8$ km
Potência Luminosa	$3,83 \cdot 10^{26}$ W
Temperatura efetiva	5.785 K
Temperatura central	$1,5 \times 10^7$ K
Composição química principal	Hidrogênio = 91,2 % Hélio = 8,7 % Oxigênio = 0,078 % Carbono = 0,043 %
Período rotacional no Equador	25 dias
Período rotacional na latitude 60°	29 dias

Fonte: OLIVEIRA FILHO e SARAIVA, 2004.

3.2 Radiação Solar

De acordo com o Grupo de Trabalho de Energia Solar do CEPEL – CRESESB/RJ, em sua publicação “Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos” (GTES, 2014), a constante solar é a densidade média anual do fluxo energético proveniente da radiação solar. Esta,

quando medida num plano perpendicular à direção da propagação dos raios solares no topo da atmosfera terrestre possui o valor de 1.367 W/m^2 .

Como a Terra possui um raio médio de 6.371 km e o valor da irradiância solar é de 1.367 W/m^2 , pode-se concluir que a potência total dissipada pelo Sol a Terra, no topo da atmosfera é de aproximadamente 174 mil TW (GTES, 2014). O fornecimento anual de energia pela radiação solar, para a superfície terrestre, é de $1,5 \times 10^{18} \text{ KWh}$ (CRESESB, 2006).

Segundo Trenberth et al. (2009), cerca de 54% da irradiância solar que incide no topo da atmosfera, 7% é refletida e 47% é absorvida pela superfície terrestre. Já os 46% restantes são absorvidos ou refletidos diretamente pela atmosfera. Desta forma, pode-se concluir que da potência total disponibilizada pelo Sol à Terra, aproximadamente 94 mil TW chegam de fato à superfície terrestre.

Como visto anteriormente, a radiação solar depende também das condições climáticas e atmosféricas. Apenas parte da radiação solar atinge a superfície terrestre, devido à reflexão e absorção dos raios solares pela atmosfera. Ainda assim é estimado que a energia solar incidente sobre a superfície terrestre seja de ordem de 10 mil vezes o consumo energético mundial (CRESESB, 1999).

No Brasil, os maiores índices de radiação são observados no Nordeste, com destaque para o Vale do São Francisco, onde a média anual é aproximadamente 6 kWh/m^2 . Já os menores índices são observados no Litoral Sul-Sudeste e na Amazônia Ocidental, respectivamente. As regiões do Amapá e leste do Pará também apresentam índices inferiores à média nacional (ANEEL, 2002).

De acordo com a Agência Nacional de Energia Elétrica (2002), mesmo as regiões que apresentam os menores índices de radiação solar no território brasileiro possuem um excelente potencial de aproveitamento energético. A figura 3.1 abaixo apresenta o índice médio anual de radiação solar no país.



Figura 3.1 - Radiação solar no Brasil – média anual típica (Wh/m².dia).

Fonte: INMET e LABSOLAR, 1998 apud ANEEL, 2002.

Para exemplificar o potencial da energia solar no Brasil, Ruther (2004) fez uma comparação utilizando a usina hidrelétrica de Itaipu, que contribui com aproximadamente 25% da energia elétrica consumida no país. Segundo o autor, colocando-se módulos solares fotovoltaicos de filmes finos sobre a área do lago de Itaipu, seria possível obter o dobro da energia gerada pela hidrelétrica.

Segundo Oliveira e Ruther (2001), a criação de um programa nacional para incentivar o uso de painéis fotovoltaicos em edificações é essencial. Deve-se também observar as práticas utilizadas por países que já possuem experiência com esta fonte de geração. Os autores afirmam que esta é uma medida necessária para que a redução dos custos desta tecnologia

possa ser atingida e resulte conseqüentemente, no aumento da implantação da tecnologia no país.

3.3 História e Estado da Arte

Segundo Perlin (1999), em 1876 foi concebido o primeiro aparato fotovoltaico construído a partir de estruturas de estado sólido, e apenas em 1956 iniciou-se a produção industrial, seguindo o crescimento da eletrônica. Inicialmente, o alto custo de produção e a baixa eficiência dos painéis solares tornavam esta tecnologia inacessível à população em geral, sendo que até as décadas de 50 e 60 sua utilização restringiu-se a aplicações militares, como os satélites artificiais russos e norte-americanos.

O desenvolvimento inicial da tecnologia fotovoltaica foi apoiado por empresas do setor de telecomunicações, que buscavam fontes de energia para sistemas instalados em localidades remotas. A corrida espacial foi outro fator importante para impulsionar o uso da tecnologia. A célula fotovoltaica era, e continua sendo, o melhor meio para fornecer energia necessária para equipamentos eletrônicos no espaço (GTES, 2014).

As primeiras células solares foram desenvolvidas a partir de pesquisas sobre o efeito fotovoltaico no selênio e em óxidos de cobre e em 1914, já apresentavam eficiência de 1 a 2%. Essas pesquisas tiveram início em 1873, quando SMITH demonstrou o fenômeno da fotocondutividade no selênio (FALCÃO, 2005).

Nos anos 40 e 50, foi dado início à era moderna da tecnologia de células solares com o desenvolvimento do processo Czochralski para a produção de silício cristalino de alta pureza. Em 1954, CHAPIN e colaboradores, dos laboratórios Bell, reportaram uma eficiência de 6% para células de silício monocristalino. Desenvolvimentos tecnológicos permitiram alcançar eficiência de 14% para essas células já em 1958 (FAHRENBRUCH et al, 1983 apud FALCÃO, 2005).

O programa espacial deu à tecnologia fotovoltaica sua primeira e maior aplicação. Avanços na indústria de informática, principalmente na tecnologia de transistores semicondutores, contribuíram muito para o desenvolvimento da tecnologia de células solares, uma vez que

ambos dispositivos são feitos de materiais similares e o funcionamento dos mesmos é baseado em princípios físicos semelhantes (FALCÃO, 2005).

No início dos anos 70, o custo dos dispositivos solares ainda era bastante elevado para aplicações terrestres. Somente na metade dos anos 70, com o crescente aumento do custo de outras fontes de energia, impulsionado pela crise do petróleo, é que o interesse em tornar a energia fotovoltaica mais acessível foi retomado. Com isso, dispositivos baseados no silício cristalino tiveram grande avanço (FALCÃO, 2005).

Atualmente, o alto custo das células fotovoltaicas permanece como um grande desafio para a indústria e é o principal obstáculo para a difusão dos sistemas fotovoltaicos em larga escala. Porém, devido ao crescente custo das demais formas de produção de energia e o aumento da preocupação com os impactos ambientais causados por outras fontes energéticas, a tecnologia fotovoltaica tem se tornado cada vez mais competitiva. Em 2013, o preço do módulo fotovoltaico para venda em maior escala de c-Si encontrava-se em cerca de 0,60 €/Wp na Europa, de 0,65 U\$/Wp nos EUA e menos de 3 R\$/Wp no Brasil (GTES, 2014).

Na figura 3.2 são apresentados os principais eventos associados ao desenvolvimento dos equipamentos de conversão da energia solar fotovoltaica.



Figura 3.2 - Representação dos eventos-chave no desenvolvimento das células fotovoltaicas.

Fonte: GTES, 2014.

3.4 Aplicações da Tecnologia Fotovoltaica

Como visto anteriormente, um dos grandes inconvenientes da tecnologia fotovoltaica continua a ser o seu preço muito elevado, quando comparado com as tecnologias mais usadas para produção de eletricidade. No entanto, o leque de aplicações tem vindo a crescer cada vez mais, resultado de descobertas tecnológicas e do decréscimo do custo de produção das células (PROENÇA, 2007).

Na tabela 3.2 estão descritas as aplicações da tecnologia fotovoltaica no tempo. Na tabela 3.3 é possível visualizar como a modularidade do sistema fotovoltaico permite as mais variadas aplicações.

Tabela 3.2 - Novas aplicações de Sistemas Fotovoltaicos no Tempo.

Data	Aplicação
Finais Século XIX	Fotómetros para Máquinas Fotográficas
1958	Satélites Espaciais
1960-1969	Sistemas de Telecomunicações Remotos, Bóias de Navegação, etc.
1982	Início da massificação: Primeira Grande Central Solar (1 MWp) na Califórnia
1990	Programa dos 100 000 Telhados Solares, na Alemanha
1993	Programa dos 70 000 Telhados Solares, no Japão
2001	Primeiro voo do Helios, um avião a energia solar

Fonte: PROENÇA, 2007.

Tabela 3.3 - Aplicações de Sistemas Fotovoltaicos por intervalo de potência.

Tamanho	Exemplos de Aplicações
Até 10 W	Calculadoras de bolso; Rádios; Sensores wireless remotos; Pequenos carregadores; Cercas eléctricas.
10 W a 100 W	Pequenos sistemas de iluminação; Sinais de trânsito luminosos; Parquímetros; Luzes de navegação; Estações meteorológicas; Caixas de comunicação de auto-estrada.
100 W a 1 kW	Sistemas de bombagem e irrigação; propulsão de pequenos barcos de recreio; Produção de electricidade para pequenos edifícios; Sistemas híbridos pequenos.
1 kW a 10 kW	Sistemas ligados à rede eléctrica ou híbridos de média dimensão; Grandes sistemas não ligados à rede, para edifícios isolados.
10 kW a 100 kW	Grandes sistemas ligados à rede: implantação em edifícios ou no solo
100 kW a 1 MW ou mais	Muito grandes sistemas ligados à rede: Centrais fotovoltaicas.

Fonte: PROENÇA, 2007.

Painéis solares fotovoltaicos são projetados e fabricados para operar satisfatoriamente por períodos de 30 anos ou mais. Por isso, podem ser utilizados em ambiente externo, sob sol, chuva e outros agentes climáticos. Assim sendo, sistemas solares fotovoltaicos integrados ao entorno da construção podem ter a dupla função de gerar eletricidade e funcionar como elemento arquitetônico na cobertura de telhados, paredes, fachadas ou janelas (RUTHER, 2004).

Algumas das aplicações da tecnologia fotovoltaica estão exemplificadas nas figuras a seguir.

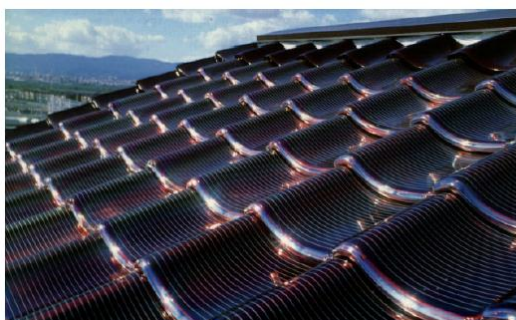


Figura 3.3 – Módulos solares fabricados diretamente sobre a telha de vidro.

Fonte: RUTHER, 2004.

A figura 3.3 exemplifica o uso de módulos solares que substituem telhas convencionais num sistema residencial descentralizado que produz energia elétrica junto ao ponto de consumo e sem ocupar área adicional.

A Energia Solar é também uma tecnologia apropriada para o bombeamento de água em lugares distantes que requerem menos manutenção. A figura 3.4 apresenta um exemplo, que se refere a um sistema flutuante de bombeamento de água para irrigação, instalado no Açude Rio dos Peixes, Município de Capim Grosso – BA (CRESESB, 2000 apud ANEEL, 2002).



Figura 3.4 - Sistema fotovoltaico de bombeamento de água para irrigação.

Fonte: CRESESB, 2000 apud ANEEL, 2002.

A energia solar fotovoltaica oferece uma solução confiável e segura para as necessidades de eletricidade utilizada para iluminação externa evitando a grande extensão de rede elétrica. A figura 3.5 apresenta um exemplo desse tipo de aplicação.



Figura 3.5 - Uso da Energia Solar Fotovoltaica utilizada para iluminação pública.

Fonte: CASTRO, 2002.

Já na figura 3.6, os módulos solares foram integrados à fachada de um edifício, mostrando duas formas diferentes de aplicação. Nas janelas à esquerda os módulos de silício cristalino (c-Si) estão montados em plano inclinado, atuando também como elementos de sombreamento do Sol no verão para o interior do prédio; na fachada vertical à direita os módulos de silício amorfo (a-Si) estão montados com inclinação vertical, substituindo os elementos de revestimento comumente utilizados como mármore e vidros espelhados (RUTHER, 2004).



Figura 3.6 – Exemplo de aplicação de módulos solares em um edifício.

Fonte: RUTHER, 2004.

4 SISTEMAS FOTOVOLTAICOS

A energia do sol é convertida diretamente em energia elétrica pelos painéis fotovoltaicos. Desta forma, a energia gerada é disponibilizada nos terminais dos painéis fotovoltaicos na forma contínua (CC) (IMHOFF, 2007).

A disponibilidade de equipamentos que funcionam a partir de uma fonte CC são bastante restritos no mercado. Assim, os sistemas fotovoltaicos necessitam de um sistema de conversão para transformar de forma eficiente esta energia CC na forma alternada (CA) que é a mais utilizada pelos aparelhos eletroeletrônicos comumente disponibilizados comercialmente (IMHOFF, 2007).

Um sistema fotovoltaico pode ser configurado de diversas maneiras, de acordo com a carga, sistema de armazenamento de energia e os estágios de processamento de energia. A figura 4.1 ilustra um sistema completo de geração fotovoltaica de energia elétrica.

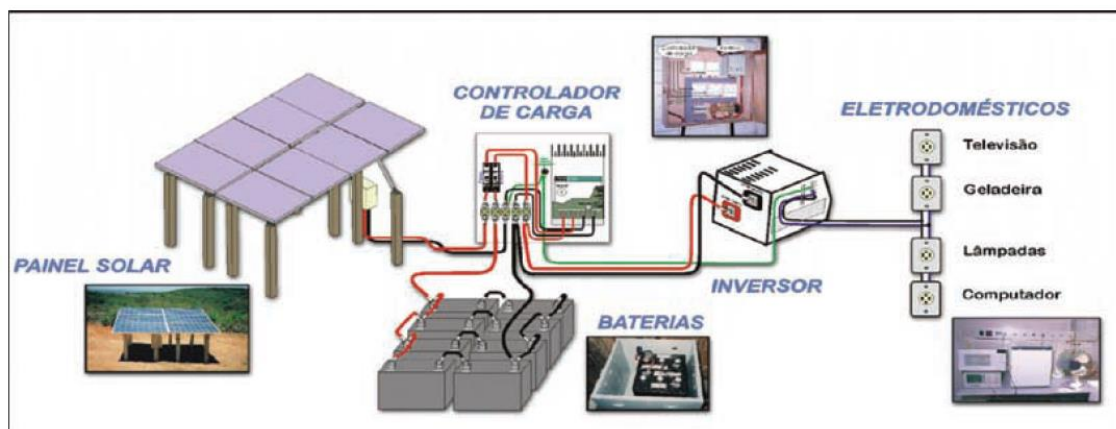


Figura 4.1 - Sistema de geração fotovoltaica de energia elétrica.

Fonte: CRESESB, 2000 apud ANEEL, 2002.

Nos sistemas fotovoltaicos autônomos, a carga é suprida apenas pelos painéis fotovoltaicos. É normalmente empregada em situações em que a extensão da rede elétrica ou o emprego de outra forma de geração de energia se torna muito oneroso (IMHOFF, 2007).

Os principais componentes de um sistema fotovoltaico estão descritos neste capítulo, além da principal função de cada um desses componentes.

4.1 Células Fotovoltaicas

O módulo solar fotovoltaico é a célula básica do sistema gerador de qualquer instalação solar fotovoltaica. A quantidade de módulos conectados em série irá determinar a tensão de operação do sistema em CC e a corrente do gerador solar é definida pela conexão em paralelo de painéis individuais. A potência instalada, normalmente especificada em CC, é dada pela soma da potência nominal dos módulos individuais (RUTHER, 2004).

Segundo Ruther (2004), o mercado de módulos fotovoltaicos vem crescendo consideravelmente nos últimos anos, com novas tecnologias oferecendo alternativas especialmente desenvolvidas para a integração ao entorno construído.

Alguns setores na indústria identificam diferentes “gerações” da tecnologia solar fotovoltaica, onde o silício cristalino corresponderia à primeira geração. Já a segunda geração é considerada aquela baseada em filmes finos inorgânicos (ELY; SWART, 2014).

De acordo com Ely e Swart (2014), a terceira geração é aquela que inclui principalmente tecnologias orgânicas. De maneira geral, a terceira geração deve ser altamente eficiente, possuir baixo custo/watt e utilizar materiais abundantes e de baixa toxicidade. As figuras 4.2 e 4.3 apresentam um diagrama que relaciona a eficiência com o custo dos painéis para as três gerações e as estruturas de cada tipo de geração, respectivamente.

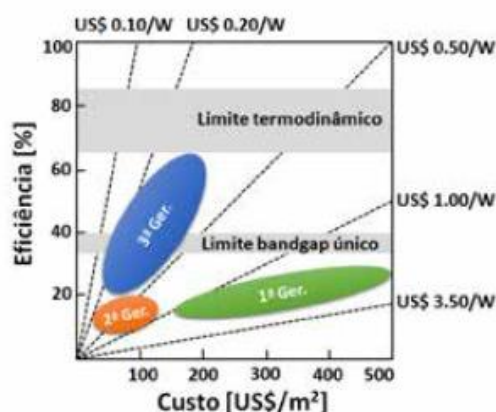


Figura 4.2 - Análise comparativa de custo/eficiência das três gerações de fotovoltaicos.

Fonte: ELY; SWART, 2014.

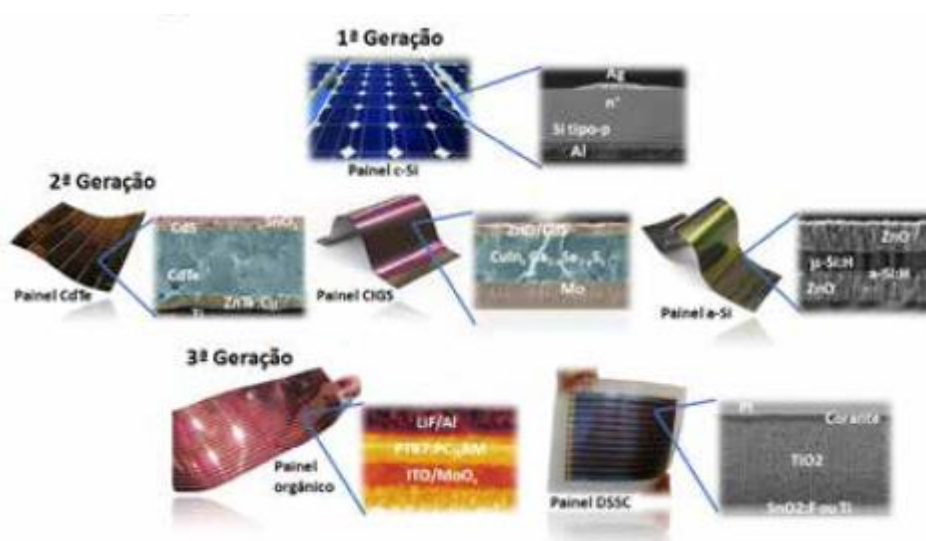


Figura 4.3 - Gerações de fotovoltaicas e estruturas correspondentes.

Fonte: ELY; SWART, 2014.

Ao longo deste capítulo, serão apresentadas as características de cada uma das tecnologias apresentadas acima, além de suas vantagens, desvantagens e eficiências obtidas.

4.1.1 Células de Silício Cristalino (c-Si)

Atualmente, a fabricação de células fotovoltaicas inorgânicas existentes é feita, em sua grande maioria, utilizando o silício (Si), que é o segundo elemento mais abundante no globo terrestre, e que tem sido explorado sob diversas formas: monocristalino, policristalino e amorfo (PRADO, 2008).

De acordo com Ruther (2004), o c-Si é a tecnologia fotovoltaica mais tradicional e que apresenta maior escala a nível comercial, nos dias atuais. Para o autor, o c-Si se consolidou no mercado fotovoltaico por sua robustez e confiabilidade.

As células de Silício Monocristalino são fabricadas a partir do cristal de silício. Estas células são as mais eficientes, e também as mais caras, de todas as células de silício. O monocristal é crescido a partir do silício fundido de alta pureza (Si = 99,99% a 99,9999%) em reatores sob atmosfera controlada e com velocidades de crescimento do cristal extremamente lentas (da ordem de cm/hora), sendo este processo de crescimento do silício conhecido como método Czochralski (FAHRENBRUCH et al, 1983).

Uma vez que as temperaturas envolvidas são da ordem de 1400°C, o consumo de energia neste processo é extremamente intenso. Etapas complementares ao crescimento do monocristal envolvem usinagem do tarugo, corte de lâminas por serras diamantadas, lapidação, ataque químico e polimento destas lâminas, processos estes em que ocorrem consideráveis perdas de material, processos de difusão/dopagem, deposição da máscara de contatos e, finalmente, a interconexão de células em série e em paralelo para a obtenção do painel fotovoltaico (KAZMERSKI, 1999).

Segundo (KAZMERSKI, 1999), as células de silício monocristalino, de área de 4,0 cm² apresentaram eficiência de 24,7% em testes realizados nos laboratórios Sandia, em março de 1999. A figura 4.4 apresenta a ilustração de uma célula de silício monocristalino.

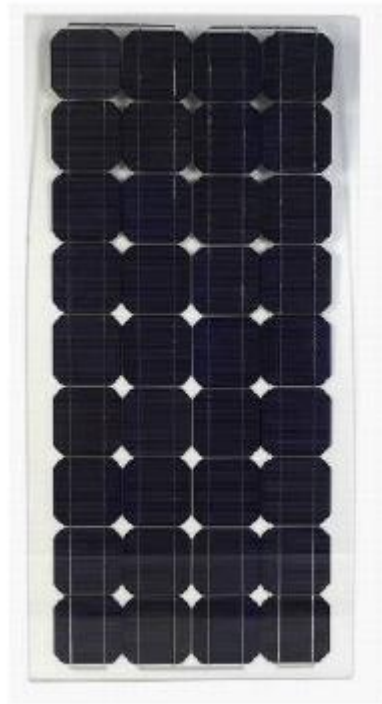


Figura 4.4 - Módulo de silício monocristalino.

Fonte: SANTOS, 2009.

O silício policristalino (p-Si) apresenta menor eficiência de conversão, com a vantagem de um mais baixo custo de produção, já que a perfeição cristalina é menor que no caso do m-Si e o processamento mais simples (KAZMERSKI, 1999).

Estas células podem ser fabricadas a partir do corte de um lingote de fitas ou depositando um filme num substrato, tanto por transporte de vapor como por imersão. Nestes dois últimos casos, apenas o silício policristalino pode ser obtido (PRADO, 2008).

Eficiências em torno de 19,8% têm sido demonstradas para células de áreas de 1,09 cm² em testes realizados nos laboratórios Sandia, em fevereiro de 1998 (KAZMERSKI, 1999). A figura 4.5 apresenta a ilustração de uma célula de silício policristalino.



Figura 4.5 - Módulo de silício policristalino.

Fonte: SANTOS, 2009.

4.1.2 Células de Silício Amorfo Hidrogenado (a-Si)

As células de silício amorfo surgiram em 1983 e são menos eficientes que as células de silício policristalino. No entanto, estas poderão vir a ser competitivas para produção em grande escala. Os processos de produção de silício amorfo ocorrem a temperaturas menores que 300°C, em processos a plasma, o que possibilita que estes filmes finos sejam depositados sobre substratos de baixo custo, como vidro, aço inox e alguns plásticos (GREEN, 2003).

Desta forma, foram desenvolvidos painéis solares hoje disponíveis no mercado que são flexíveis, inquebráveis, mais leves, semi-transparentes, com superfícies curvas, que estão ampliando o mercado fotovoltaico por sua maior versatilidade. Por sua aparência estética mais

atraente, o silício amorfo tem encontrado aplicações arquitetônicas diversas, substituindo materiais de cobertura de telhados e fachadas na construção civil. (GREEN et al., 2012).

Estas células são obtidas por meio da deposição de camadas muito finas de silício sobre superfícies de vidro ou metal e podem ser obtidas com temperaturas menores que 300°C (SABINO, 2007). De acordo com Kazmerski (2006), sua eficiência na conversão de luz solar em eletricidade é de aproximadamente 12,7% em uma área de 1cm² (Sanyo).

A figura 4.6 abaixo apresenta um exemplo de módulo solar fotovoltaico de a-Si flexíveis em substrato de plástico produzida pela Sanyo Solar Industries.



Figura 4.6 - Células de silício amorfo flexíveis em substrato de plástico (Sanyo Solar Industries).

Fonte: RÜTHER, 2004.

O a-Si é uma tecnologia que não apresenta redução na potência com o aumento da temperatura de operação. Esse fato é uma grande vantagem sobre todas as outras tecnologias fotovoltaicas, em que o aumento da temperatura ambiente provoca perdas na performance dos módulos fotovoltaicos, (RÜTHER & LIVINGSTONE, 1993; RÜTHER et al., 2003; RÜTHER et al., 2004), benéficos para países de clima quente como o Brasil.

Quando integrado ao envelope da edificação, onde os módulos atingem temperaturas elevadas pela falta de ventilação em sua superfície posterior, a performance do a-Si em termos de energia gerada (kWh) por potência instalada (kWp) tem se mostrado superior à das demais tecnologias em operação no Brasil (RÜTHER, 1999; RÜTHER & DACOREGIO, 2000; RÜTHER et al., 2004).

4.1.3 Células de Telureto de Cádmio (CdTe)

O CdTe é produzido também na forma de filmes finos e é mais recente competidor do silício amorfo e do silício policristalino no mercado fotovoltaico para geração de energia. O CdTe já vem sendo usado há quase uma década para aplicações em calculadoras, mas nas assim chamadas aplicações terrestres, somente agora é que começam a ser comercializados painéis solares de grandes áreas (FALCÃO, 2005).

Estes módulos, normalmente sob a forma de placas de vidro num tom marrom/azul escuro como mostra a figura 4.7, também apresentam um atrativo estético em comparação ao c-Si (RUTHER, 2004). Assim como no caso do silício amorfo, os custos de produção do CdTe são atrativamente baixos para produção em grande escala e esta tecnologia tem ótimas chances de despontar como um sério competidor no mercado fotovoltaico para a geração de energia elétrica (FALCÃO, 2005).



Figura 4.7 - Módulos solares de CdTe em substrato de vidro para aplicações arquitetônicas.

Fonte: RUTHER, 2004.

Falcão (2005) afirma que a relativamente baixa abundância dos elementos envolvidos e sua toxicidade são aspectos que têm de ser considerados, principalmente se esta tecnologia atingir quantidades significativas de produção.

O recorde de eficiência de células individuais de CdTe de área $1,31 \text{ cm}^2$ em laboratório é de 16,5% (WU et al., 2001) e módulos têm apresentado eficiências superiores a 10% (MCCANDLESS et al., 2004).

4.1.4 Células de Disseleneto de Cobre (Gálio) e Índio (CIS e CIGS)

Segundo Ruther (2004), a família dos compostos baseados no disseleneto de cobre e índio (CIS), e disseleneto de cobre, gálio e índio (CIGS) é outro importante competidor no mercado fotovoltaico também em aplicações integradas a edificações, principalmente por seu potencial de atingir eficiências relativamente elevadas.

Células de CIS de pequenas áreas testadas em laboratório apresentaram eficiências em torno de 20% e em painéis com grandes áreas as eficiências chegam em torno de 10% a 13%. Painéis solares de CIS apresentam, como o a-Si e o CdTe, uma ótima aparência estética e no mercado já podem ser encontrados em forma de telhados, revestimentos e janelas (OLIVEIRA, 2008).

Assim como no caso de CdTe, a pouca abundância dos elementos envolvidos e sua toxicidade são aspectos que têm de ser considerados se esta tecnologia atingir quantidades significativas de produção. Células com tecnologia CIS e CdTe se mostraram extremamente promissoras e com o desenvolvimento de novas técnicas de produção e novos materiais ocorrerá a diminuição de preços e limitações impostas por estas tecnologias (OLIVEIRA, 2008). A figura 4.8 apresenta um exemplo de módulo flexível de CIS.



Figura 4.8 - Módulo Flexível de CIS.

Fonte: Oliveira, 2008.

4.1.5 Células de Arseneto de Galio (GaAs)

Células fotovoltaicas de Arseneto de Gálio (GaAs) estão entre as células com maior índice de eficiência já alcançado. Esta tecnologia se encontra em pesquisa desde a década de 80 e sua utilização ainda se restringe a casos especiais como painéis solares de satélites e módulos espaciais devido ao alto custo de produção das células (OLIVEIRA, 2008).

Para Oliveira (2008), uma das grandes vantagens no uso de células de GaAs é a sua grande variedade de opções de uso e configuração das células. Uma célula de GaAs pode conter diversas camadas de diferentes composições de materiais permitindo desta forma um controle extremamente preciso na geração de portadores de cargas e esta propriedade está relacionada ao alto grau de eficiência destas células.

4.1.6 Células Solares de Terceira Geração

As células fotovoltaicas de terceira geração incluem, como já citado, as baseadas em materiais orgânicos (OPV) e aquelas que utilizam pontos quânticos (PQs). Estas células de terceira geração embora ainda careçam de eficiência de conversão exibem grande potencial. Essas células possuem grandes vantagens como processamento de baixo custo sobre grandes áreas, possível semitransparência, flexibilidade mecânica e baixo peso (ELY; SWART, 2014).

No Brasil, o Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia de Sistemas Micro e Nanoeletrônicos (Namitec) desenvolve atividades na área de fotovoltaicos de terceira geração. O grupo tem por objetivo estabelecer uma firme base para o desenvolvimento de células solares impressas, focando em aspectos que têm impedido a sua comercialização e adoção em larga escala (ELY, SWART; 2014).

A figura 4.9 (i) apresenta um exemplo de corte da célula fotovoltaica orgânica, no caso composta por um substrato (vidro ou superfície flexível), um filme condutor transparente (TCO), o material orgânico e um contato metálico traseiro. Já a figura 4.9 (ii) apresenta outra possível configuração para célula orgânica.

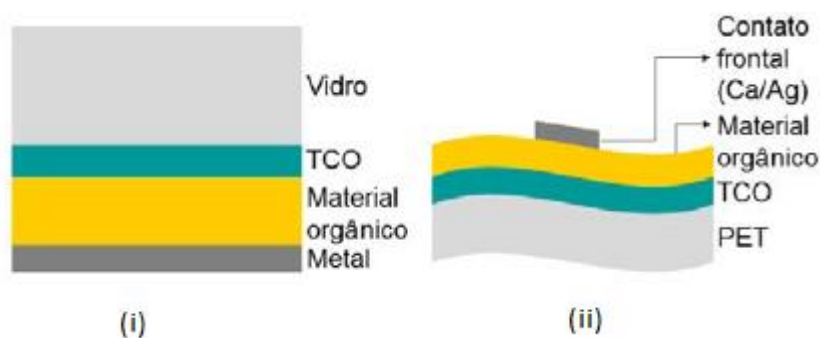


Figura 4.9 - Diagramas de células fotovoltaicas orgânicas: (i) com vidro e (ii) com filme depositado sobre uma superfície de PET flexível.

Fonte: GTES, 2014.

O material orgânico geralmente pode ser depositado por técnica simples, como por exemplo, as denominadas, spray, spin-on ou roll-to-roll. Com material semicondutor orgânico depositado sobre um filme de PET (Politereftalato de eliteno), que é um polímero termoplástico, podem ser processadas células fotovoltaicas com espessuras menor que 2 μm (GTES, 2014).

Embora a eficiência em dispositivos pequenos fabricados em laboratório já tenha atingido valores superiores a 10%, os módulos ainda apresentam baixa eficiência (GTES, 2014).

4.2 Baterias

Em sistemas fotovoltaicos isolados da rede elétrica a utilização de um sistema de armazenamento de energia é imprescindível. Bancos de baterias são então empregados para armazenar a energia produzida e não consumida em períodos de excesso de insolação (IMHOFF, 2007).

Desta forma, a energia é armazenada e pode ser utilizada em outros momentos de demanda, como por exemplo, em dias nublados e durante a noite (GTES, 2014).

O estudo realizado por IMHOFF (2007) apresenta que o banco de baterias, nestes sistemas, acaba se tornando um dos componentes mais caros do sistema. Segundo o autor, o custo

elevado se dá pelo fato das baterias possuírem vida útil muito inferior aos demais componentes do sistema fotovoltaico.

Embora existam diferentes tipos de acumuladores eletroquímicos, a bateria de Chumbo-ácido (Pb-ácido) ainda é a tecnologia mais empregada. Baterias de Níquel-Cádmio (Ni-Cd), Níquel-hidreto metálico (NiMH) e de íon de Lítio (Li-ion), ainda que apresentem vantagens como maior eficiência, maior vida útil e maior profundidade de descarga, ainda não são economicamente viáveis na maioria dos sistemas fotovoltaicos (GTES, 2014).

Alves (2008) afirma que, para um sistema fotovoltaico satisfatório, vários fatores devem ser considerados para determinar a capacidade e quantidade de baterias, nos quais podem ser citados:

- Reserva de carga da bateria: o tempo em que a bateria, isoladamente, deve suportar a exigência de carga é estabelecido pelas necessidades de projeto do sistema.
- Determinação da carga: as exigências da aplicação determinam a quantidade de corrente a ser fornecida pela bateria num intervalo de tempo. A corrente de pico e a janela de tensão operacional são determinadas pela característica da carga.
- Capacidade da bateria e determinação da taxa funcional-hora: a capacidade da bateria e sua taxa funcional-hora de descarga são determinadas pela aplicação específica da carga, dias de reserva da bateria e as características da bateria.
- Determinação do número de células ligadas em série da bateria: os limites de tensão do sistema (janela de tensão) determinam o número de células em série.
- Determinação da capacidade da célula e do tamanho da bateria: uma vez encontrada a capacidade e números de células, a seleção final da célula pode ser feita e o tamanho da bateria pode ser calculado.
- Características da bateria: o desempenho do sistema, vida útil, manutenção e custo são influenciados pelo tipo de bateria selecionada para aplicações fotovoltaicas.

Na figura 4.10 podem ser visualizados alguns exemplos de acumuladores de carga.



Figura 4.10 - Exemplos de baterias para uso em sistemas fotovoltaicos.

Fonte: ABELLA, 2005.

É importante salientar que, em alguns casos os sistemas fotovoltaicos são utilizados de forma interligada à rede elétrica pública. Nesses casos, o sistema de acumulação torna-se desnecessário, já que a própria rede elétrica funciona como acumulador (RUTHER, 2004).

4.3 Controladores de Carga

Os controladores de carga são componentes eletrônicos incluídos na maioria dos Sistemas Fotovoltaicos com os objetivos básicos de facilitar a máxima transferência de energia do arranjo fotovoltaico para a bateria ou banco de baterias e protegê-las contra cargas e descargas excessivas, aumentando, conseqüentemente, a sua vida útil (ALVES, 2008).

Os controladores possuem a função de desconectar o arranjo de painéis fotovoltaicos quando a bateria atinge carga plena e interromper o fornecimento de energia à carga quando o estado de carga da bateria atingir um limite crítico, determinado pelo fabricante (CRESESB, 2004).

Estes devem ser projetados considerando-se as especificidades dos diversos tipos de bateria, uma vez que um controlador projetado para uma bateria de Chumbo ácido pode não operar eficientemente em uma bateria de Níquel-Cádmio, por exemplo (GTES, 2014).

Na figura 4.11 é possível visualizar um exemplo de um controlador de carga de três funções: controle de carregamento, controle de carga e controle de derivação.



Figura 4.11 - Controlador Solar de três funções.

Fonte: Kyocera Solar©.

4.4 Inversores

Os painéis fotovoltaicos geram energia na forma CC, ou seja, corrente contínua. Entretanto, a maioria dos equipamentos eletrônicos comercialmente encontrados necessita de energia na forma CA (corrente alternada). Desta forma, torna-se necessário a utilização de inversores entre a carga e o sistema fotovoltaico para adequar a energia gerada pelos painéis à forma comercial (tensões de 110VCA ou 220VCA, na frequência de 60Hz) (IMHOFF, 2007).

Os inversores, como qualquer outro componente de um sistema fotovoltaico, devem dissipar o mínimo de potência, produzir uma tensão com baixo teor de harmônicos e em sincronismo com a rede elétrica, quando o sistema estiver conectado à rede elétrica (CRESESB, 2004).

Na figura 4.12 está representado um exemplo de inversor solar da Solar Energy do Brasil.



Figura 4.12 - Inversor solar fotovoltaico da Solar Energy do Brasil.

Fonte: Solar Energy©.

4.5 Sistemas de Posicionamento

Os rastreadores solares desempenham a tarefa de colocar os painéis solares com a sua superfície sempre em posição perpendicular aos raios de Sol incidentes. Desta maneira, as mudanças na posição do Sol em relação à Terra durante o dia e com respeito às estações do ano são compensadas com o reposicionamento do módulo, permitindo que mais energia seja coletada e transformada em eletricidade dentro de um determinado intervalo de tempo (MARINESCU, 2006).

Segundo Chun-Sheng et al. (2008), a utilização de sistemas fotovoltaicos com rastreamento solar é uma ótima solução para aumento na eficiência e redução nos custos.

Ainda de acordo com Chun-Sheng, as pesquisas demonstram que sistemas que rastreiam o movimento do Sol e trabalham em um único eixo podem aumentar em mais de 20% a produção de eletricidade, enquanto que sistemas de rastreamento em dois eixos podem aumentar em mais de 40% a produção de eletricidade.

Um diagrama cinemático de um sistema de rastreamento desenvolvido por Chojnacki e Teneta (2004) está apresentado na figura 4.13.

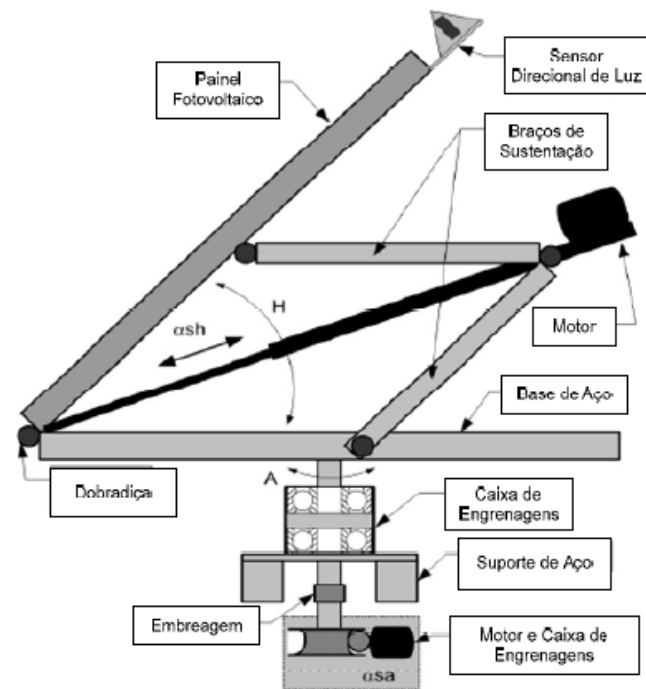


Figura 4.13 - Diagrama cinemático do Sistema de Rastreamento.

Fonte: Chojnacki e Teneta, 2004.

5 ENERGIA SOLAR EM HABITAÇÕES

5.1 Geração Distribuída

Ruther (2004) apresenta que a geração distribuída é uma das grandes vantagens da tecnologia fotovoltaica, isso porque esta tecnologia pode ser instalada junto à própria edificação e junto ao ponto de consumo, ao contrário da energia hidráulica que necessita de uma área muito grande para geração, e que geralmente se localiza longe dos pontos de consumo.

A opção pelos sistemas de geração distribuída faz com que os sistemas fotovoltaicos apresentem alguns benefícios para as concessionárias. Isso pela adição de energia à rede, redução das perdas em transmissão e, principalmente, pela postergação dos custos de expansão, já que o sistema fotovoltaico pode estar instalado e dar suporte de capacidade a um alimentador considerado crítico para o sistema (JARDIM, 2007).

5.2 Generalidades

Salamoni (2004), afirma que os setores de áreas residenciais possuem grande área disponível para instalação de painéis fotovoltaicos, sendo capaz de gerar energia além do seu consumo. Por não possuir curva de demanda com pico durante o dia, a geração fotovoltaica não contribui para alívio de sobrecarga da rede. Mas pela quantidade de área disponível, este setor deveria ser aproveitado como uma mini usina, aliviando a sobrecarga em setores adjacentes.

A arquitetura residencial geralmente possui as melhores aplicações para sistemas fotovoltaicos integrados às edificações. Isto por que apresentam grande área de telhado e por situarem-se próximas umas às outras, todas com mesmo porte, com menor sombreamento de sua cobertura (JONES et al., 2000).

Indicações para a inserção da tecnologia fotovoltaica em áreas urbanas são encontradas no relatório anual da IEA sobre Programas Fotovoltaicos (IEA, 2007). Este apresenta algumas diretrizes para a propagação da tecnologia fotovoltaica em áreas urbanas, onde são abordadas as questões relativas à aplicação da tecnologia fotovoltaica, indicando quais são as ações fundamentais.

Entre os agentes indicados para ter participação ativa para que haja um melhor desenvolvimento desta iniciativa estão: o setor da construção civil, os consumidores e prováveis mini geradores, o governo e as agências reguladoras, o setor financeiro e os órgãos financiadores, a indústria da tecnologia fotovoltaica, o setor elétrico e as concessionárias, e o setor educacional (IEA, 2007).

Na busca pela geração distribuída e produção mais próxima aos pontos de consumo, o uso de sistemas fotovoltaicos juntos às edificações torna-se bastante interessante.

Segundo Ruther (2004), os módulos fotovoltaicos são fabricados para serem utilizados por muito tempo e em ambientes externos, sob diversas condições climáticas; assim, são apropriados para integração à envoltória da edificação. Deste modo têm dupla função por gerar eletricidade e também por servir como elemento arquitetônico.

Entre os benefícios da integração de painéis fotovoltaicos em edificações estão a viabilidade de integração na edificação, durante a construção ou mesmo em edificações já em uso; o fornecimento de energia diretamente no local de uso, sem perdas de transmissão e distribuição; a operação silenciosa; a baixa manutenção, já que não possuem partes móveis e são projetados para permanecer sob condições climáticas diversas, e; a disponibilidade de uma fonte inesgotável de energia limpa e gratuita (JONES et al., 2000).

As formas de integração dos módulos fotovoltaicos nas edificações podem ser as mais diversas, incluindo a cobertura e fachadas, conforme a figura 5.1. Estas formas variadas devem ser definidas pelos projetistas buscando o melhor desempenho de geração, ou de outras necessidades diversas da edificação (THOMAS e GRAINER, 1999).

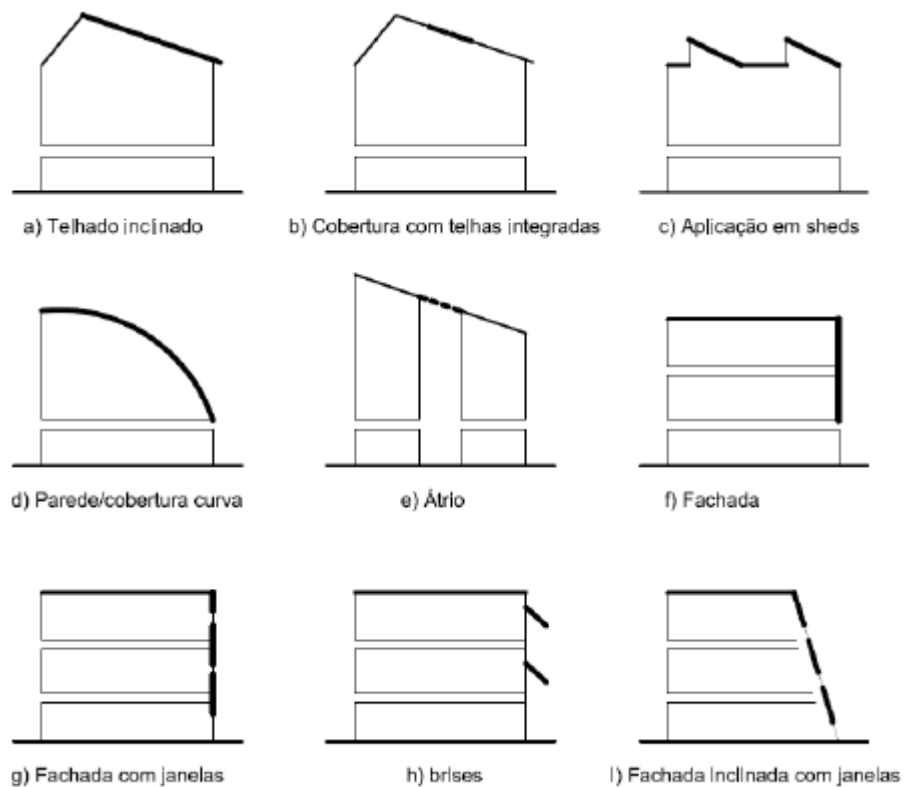


Figura 5.1 - Tipos de edifícios solares.

Fonte: THOMAS e GRANIER (1999).

A figura 5.2 apresenta um diagrama esquemático de um sistema solar fotovoltaico integrado ao telhado de uma residência urbana e interligado à rede elétrica convencional. O relógio medidor 1 (kWh 1) mede a energia gerada pelo sistema solar fotovoltaico; o relógio medidor 2 (kWh 2) mede a energia gerada pelo sistema solar que é exportada para a rede elétrica; o relógio medidor 3 (kWh 3) mede a energia importada da rede elétrica (RUTHER, 2004).

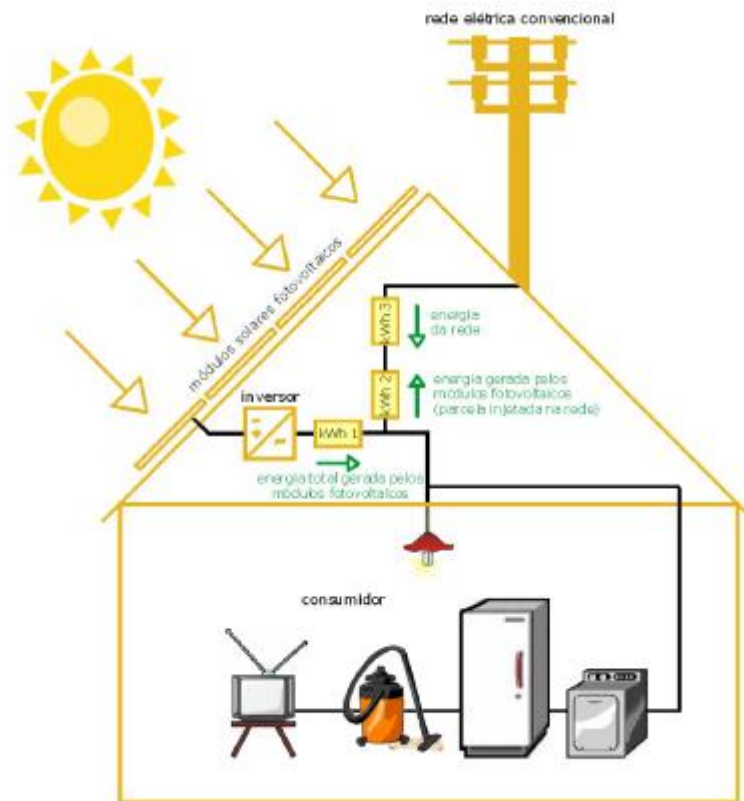


Figura 5.2 - Diagrama esquemático de um sistema solar fotovoltaico integrado ao telhado de uma residência urbana e interligado à rede elétrica convencional.

Fonte: RUTHER, 2004.

6 A RESIDÊNCIA COMO UM SISTEMA

A análise da questão da autonomia energética de uma edificação não pode se ater exclusivamente a um cálculo de viabilidade econômica. Porém, deve adotar como uma premissa básica, a relação que a edificação mantém com o entorno imediato, com a cidade e com as fontes de insumos.

De acordo com Christofolletti (1999), um sistema é por definição um conjunto estruturado de objetos e/ou atributos. Esses objetos e atributos consistem de componentes ou variáveis que exibem relações discerníveis um com os outros e operam conjuntamente com um todo complexo, de acordo com determinado padrão.

No esquema da figura abaixo, pode-se visualizar um exemplo de uma modelagem sistêmica de uma Edificação Autossustentável.

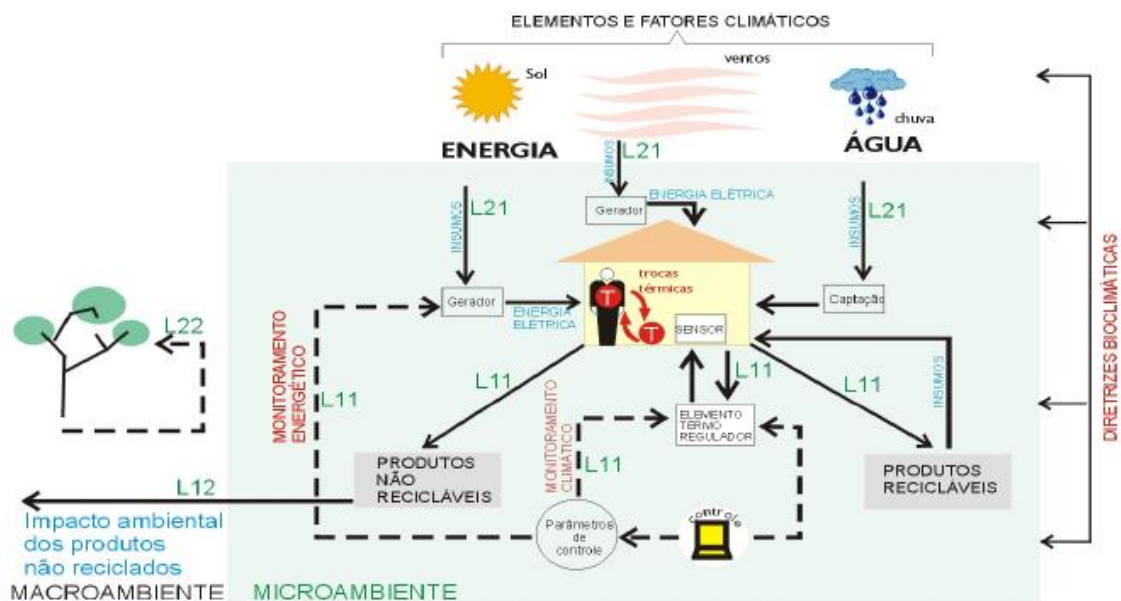


Figura 6.1 - Modelagem sistêmica de uma edificação autossustentável.

Fonte: Yeang, 1999.

Capra (1996) afirma que a percepção sustentável reconhece a interdependência de todos os fenômenos e o fato de que, enquanto indivíduos e sociedades, estão todos encaixados nos processos cíclicos da natureza e somos dependentes desses processos.

6.1 Insumos e sistemas autônomos

A energia divide com a água a primazia na escala de importância dos insumos requeridos de um sistema residencial e é um insumo que é aproveitado na íntegra e não gera produtos ou resíduos.

Segundo Viggiano (2002), o conceito básico da eficiência energética é a obtenção de um benefício máximo com o dispêndio do mínimo de energia. De acordo com esta diretriz, um sistema autônomo de energia deve ser extremamente eficiente em termos energéticos.

Os insumos (água, energia, materiais combustíveis, gases, luz) são os elementos necessários à alimentação dos sistemas e os produtos (águas servidas, lixo, gases) são os elementos que sobram dos processos e necessitam ser tratados para retornarem ao sistema ou eliminados de alguma maneira na forma de resíduos (VIGGIANO, 2002). O grau de autonomia de um sistema é determinado pelos insumos e pelos vínculos de independência de modo que:

$$IT = I_{ex} + I_{in} + I_{re} \quad [\text{equação 1}]$$

Onde:

IT = Quantidade total de insumos;

I_{ex} = Insumos externos;

I_{in} = Insumos internos;

I_{re} = Insumos reciclados.

6.2 Dimensionamento

Viggiano (2002) cita que o dimensionamento é a aplicação prática do estudo do desempenho e de suas variantes.

No dimensionamento de um sistema autônomo de energia são analisados os geradores que são os fornecedores do insumo energético, os condutores que transmitem a energia (fios e cabos), os controladores de carga que regulam a voltagem do gerador e o estado de carga das baterias, os acumuladores (baterias) que armazenam a energia gerada para o aproveitamento futuro e os

inversores transformam a corrente contínua gerada em corrente alternada própria a utilização na maioria dos equipamentos eletrodomésticos.

6.3 A Residência Autossustentável

Em linhas gerais, uma residência autônoma, ou autossustentável é uma unidade residencial capaz de gerar ou coletar do micro-ambiente seus insumos, reciclar seus produtos e gerenciar de maneira eficiente suas funções cotidianas e o impacto diário no macro-ambiente (VIGGIANO, 2002). A figura a seguir explicita a relação dos insumos, produtos e resíduos dos mecanismos de transação de edificação autônoma.

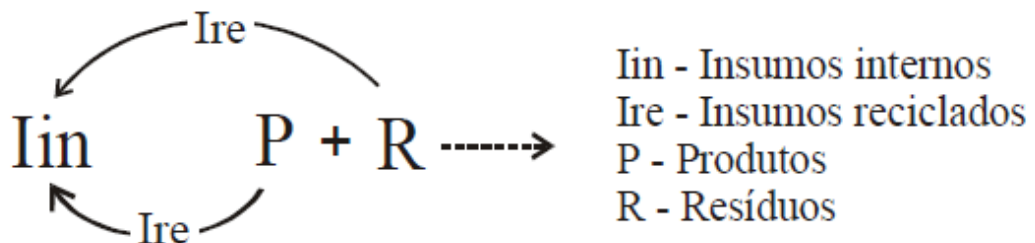


Figura 6.2 - Relação de produtos, insumos e resíduos.

Fonte: VIGGIANO, 2002.

É importante ressaltar que na condição extrema de autonomia, até os resíduos finais podem ser revertidos como insumos.

6.4 Controle e Monitoramento

Uma residência autossustentável deve também contar com um sistema de monitoramento que é capaz de avaliar os parâmetros de consumo diário, produção diária do gerador solar, estado de carga das baterias, desempenho do sistema em relação ao projeto e desvio do desempenho. Como resposta à avaliação dos parâmetros, deve ser capaz de produzir as ações de alarme do sobreconsumo, alarme da situação crítica e bloqueio de circuitos (VIGGIANO, 2002).

O autor expõe em seu estudo que sobreconsumo é o consumo acima do parâmetro previsto para determinada situação. Para o autor, um estudo dos riscos do sobreconsumo avalia a

situação de fartura que é quando a produção excede o consumo diário, sobrando carga para a reposição do banco de baterias, a situação de normalidade, na qual a produção é suficiente para produzir o abastecimento normal, a situação de alerta em que a produção é ligeiramente inferior ao consumo diário, provocando um decréscimo acumulativo do estoque do banco de baterias e a situação crítica em que há um grande decréscimo da carga do banco de baterias que coloca em risco o atendimento ao sistema, requerendo uma ação imediata através do bloqueio de circuitos.

7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Devido à necessidade de ampliação da matriz energética brasileira, foi realizado um estudo acerca das fontes de energia elétrica utilizadas no país. Desta forma, foi proposto também um estudo da implantação de sistemas fotovoltaicos em residências autossustentáveis.

Durante o estudo, pode-se verificar que o Brasil é um país com alta incidência de radiação solar, e por isso, torna-se interessante o aumento do investimento em tecnologias solares, seja para obtenção de energia térmica ou energia elétrica.

Infelizmente, os custos de implantação dos sistemas fotovoltaicos ainda são um obstáculo para a propagação do uso da tecnologia no país. Esse elevado custo deve-se principalmente ao alto custo dos módulos fotovoltaicos. Desta forma, torna-se interessante o incentivo à pesquisa de diferentes materiais e tecnologias para o desenvolvimento de células solares.

As edificações autossustentáveis são uma excelente forma de aproveitamento de energia solar, água e até mesmo materiais descartáveis. Nesses casos, o uso da automação residencial torna-se essencial para um melhor aproveitamento dos recursos e para a autonomia da residência. O crescente desenvolvimento de projetos sustentáveis contribui para melhorias no meio ambiente reforçam o conceito de sustentabilidade do país.

A literatura relacionada ao tema proposto no trabalho ainda é um pouco escassa, e por isso conclui-se que os objetivos foram satisfeitos, dentro das possibilidades. Conclui-se também que ações governamentais de incentivo à utilização de fontes renováveis podem ajudar a divulgação da tecnologia fotovoltaica. Desta forma, o apoio à pesquisa e fornecimento de materiais para estudo e informações em universidades podem ajudar a expansão do uso da energia solar no país.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABELLA, M. A. **Sistemas Fotovoltaicos**. 2005. 59f. Dissertação (Mestrado em Energias Renováveis e Mercado Energético). Escola de Organização Industrial, Madrid, 2005.

ALVES, A. F. **Desenvolvimento de um sistema de posicionamento automático para Painéis Fotovoltaicos**. 2008. 168f. Tese (Doutorado em Agronomia). Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2005.

ANEEL. Agência Nacional de Energia Elétrica. **Atlas de Energia Elétrica do Brasil**. 2002. Disponível em: < http://www.aneel.gov.br/arquivos/pdf/livro_atlas.pdf >. Acesso em: 10 dez. 2016.

ANEEL. Agência Nacional de Energia Elétrica. **ANEEL amplia possibilidades para micro e minigeração distribuída**. 2015. Disponível em: < http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/noticias/Output_Noticias.cfm?Identidade=8955&id_area=90 >. Acesso em: 10 dez. 2016.

A. P. C. GUIMARÃES, C. M. RIBEIRO, L. E. G. BASTOS, L. G. C. VALENTE, P. C. SILVA AND R. X. OLIVEIRA. **Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos**. CEPTEL – CRESESB, Rio de Janeiro. 2004.

BRONZATTI, F. L.; NETO, A. I. Matrizes Energéticas no Brasil: Cenário 2010-2030. In: ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO, XXVIII, 2008, Rio de Janeiro. **Anais eletrônicos...** Rio de Janeiro: ABEPRO, 2008. Disponível em: <http://www.abepro.org.br/biblioteca/enegep2008_TN_STO_077_541_11890.pdf>. Acesso em: 17 jan. 2016.

CAPRA, F. **A Teia da Vida**, Cultrix, São Paulo, 1996.

CASTRO, R. M. G. **Energias Renováveis e Produção Descentralizada: Introdução à Energia Fotovoltaica**. 0 ed. Lisboa: DEEC/Seção de Energia. 2002. 51p.

CHOJNACKI, J.; TENETA, J. Control Algorithms for a Remote Sun-Tracking Photovoltaic System. In: **19th European Photovoltaic Solar Energy Conference**. Paris, França, pp. 2219- 2222. Junho 2004.

CHUN-SHENG, W.; YI-BO, W.; SI-YANG, L.; YAN-CHANG, P.; HONG-HUA, X. Study on Automatic Sun-tracking Technology in PV Generation. In: **Proceedings of the 3rd International Conference on Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies, 2008**. DRPT 2008. Nanjing, China. Pag. 2586-2591. doi: 10.1109/DPRT.2008.4523847.

CRESESB. Energia solar: Princípios e aplicações. Rio de Janeiro, 2006. Disponível em: <http://www.cresesb.cepel.br/index.php?link=/tutorial/tutorial_solar.htm>. Acesso em 15 Jan. 2016.

CRESESB – Centro de Referência para a Energia Solar e Eólica Sérgio de Salvo Brito. **Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos**. Rio de Janeiro: Centro de Pesquisas em Energia Elétrica – CEPEL, novembro, 1999.

CRESESB – Centro de Referência para a Energia Solar e Eólica Sérgio de Salvo Brito. 2000. Disponível em: <<http://www.cresesb.cepel.br/cresesb.htm>>.

CHRISTOFOLETTI, A. **Modelagem de Sistemas Ambientais**. E. Blucher, São Paulo, 1999.

DOROCHE, M. R.; ANSCHAU C. T. Oferta de Energia Elétrica no Brasil. ISSN 2358 – 9221. Chapecó, SC, v. 2, n. 1. 2015. Disponível em: <<http://www.uceff.edu.br/revista/index.php/revista/article/download/45/42+&cd=1&hl=en&ct=clnk&gl=br>>. Acesso em: 16 jan. 2016.

EPE – Empresa de Pesquisa Energética (Brasil). Balanço Energético Nacional 2014: Ano base 2013/ Empresa de Pesquisa Energética – Rio de Janeiro: EPE, 2014. 54p. 29. Disponível em: <https://ben.epe.gov.br/downloads/S%C3%ADntese%20do%20Relat%C3%B3rio%20Final_2014_Web.pdf>. Acesso em: 16 jan. 2016.

ELY, F.; SWART, J. W. Energia solar fotovoltaica de terceira geração. O Setor Elétrico: pp. 138 – 139. IEEE, 2014.

FALCÃO, V. D. **Fabricação de células solares de CdS/CdTe**. 2005. 120f. Dissertação (Mestrado em Ciência dos Materiais). Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, 2005.

FAHRENBRUCH, M. B., BUBE, R. H. **Fundamentals o solar cels**. New York, Academic Press, 1983.

FORTH, B.; TOBIN, T. Right power, right price [enterprise energy management systems]. Computer Applications in Power, vol. 15, 2002, pp 22 – 27.

GOLDEMBERG, J.; LUCON O. Energia e meio ambiente no Brasil. Rev. **Estudos Avançados**. V. 21, n; 59. – São Paulo, Jan/Abr. 2007. Disponível em: < <http://www.revistas.usp.br/eav/article/view/10203/11796> >. Acesso em: 15 jan. 2016.

GREEN, M. A. Crystalline and thin-film silicon solar cells: state of the art and future potential. Solar Energy 74, p. 181-192, 2003.

GREEN, M. A., EMERY K., HISHIKAWA Y., WARTA W., DUNLOP, E. D. Solar cell efficiency tables (version 39). Prog. Photovolt: Res. Appl. 20, p. 12-20, 2012.

GTES. GTES – Grupo de Trabalho de Energia Solar. **Manual de Engenharia para sistemas fotovoltaicos**. Rio de Janeiro: CEPEL – CRESESB, 2014. 530p.

IEA. **PVPS Annual Report**. International Energy Agency, 2007.

IMHOFF, J. **Desenvolvimento de conversores estáticos para Sistemas Fotovoltaicos Autônomos**. 2007. 146f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica). Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2007.

INMET – LABSOLAR. Instituto Nacional de Meteorologia – Laboratório de Energia Solar EMC/UFSC. **Atlas de Irradiação Solar do Brasil**. Brasília, 1998.

INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA – LABORATÓRIO DE ENERGIA SOLAR EMC/UFSC (INMET – LABSOLAR). **Atlas de Irradiação Solar do Brasil**. Brasília, 1998.

JARDIM, C. D. S. **A Inserção no Contexto Brasileiro de Sistemas Solares Fotovoltaicos Interligados à Rede Elétrica, quando analisados através do Fator Efetivo de Capacidade de Carga (FECC), enfocando a redução do pico de demanda diurno em centros urbanos**. PPGEC, UFSC, Florianópolis, 2007.

JONES, D. L.; HATTERSLEY, L.; AGER, R.; KOYAMA, A. **Photovoltaics in buildings - BIPV projects**: Department of trade and industry. Londres, 2000.

KAZMERSKI, L. L. Photovoltaic devices: a 2000 overview. *Journal of Crystal Growth* 197, 1999. 733-742.

KAZMERSKI, L. L., Solar photovoltaics R&D at the tipping point: A 2005 technology overview, *Journal of Electron Spectroscopy and Related Phenomena* 150, 105-135, 2006.

KYOCERA SOLAR. **Datasheet: TriStar Controlador Solar de três funções**. Disponível em: <<http://www.kyocerasolar.com.br/pdf/TriStar-Datasheet-Portuguese.pdf>>. Acesso em: 25 fev. 2016.

MARENGO, J. A et al. **Mudanças climáticas e recursos hídricos**. Disponível em: <<http://www.abc.org.br/IMG/pdf/doc-818.pdf>>. Acesso em: 16 jan. 2016.

MARINESCU, D.; MARINESCU, C. Control Optimizing Algorithm for Soft Sun-Trackers. In: **IEEE International Conference on Automation, Quality and Testing, Robotics, 2006**. Volume 1, pp. 54 – 57. Maio, 2006.

MARTINS, D. C. Conversores Estáticos de Potência Utilizados no Processamento da Energia Solar Fotovoltaica. Conferência Internacional de Aplicações Industriais. vol 2, 2000, pp. 67-77.

MCCANDLESS, B.E., DOBSON, K. D. Processing options for CdTe thin film solar cells. *Solar Energy* 77, 2004. 839-856.

MIRANDA, G. J. Be prepared!. *IEEE Industry Applications Magazine*, 2003, pp. 12 – 20.

MONTOYA, M. A. et al. As relações intersetoriais do setor energético no crescimento da economia brasileira: uma abordagem insumo-produto. **NEREUS**. São Paulo – SP. TD Nereus 12. 2013. Disponível em: <http://www.usp.br/nereus/wp-content/uploads/TD_Nereus_12_2013b.pdf>. Acesso em: 15 jan. 2016.

NASA – National Aeronautics and Space Administration. **Cosmicopia**. Disponível em: <http://helios.gsfc.nasa.gov/qa_sun.html>. Acesso em: jan. 2016.

NASA – National Aeronautics and Space Administration. **Imagine the Universe!**. Disponível em: <http://imagine.gsfc.nasa.gov/qa_sun.html>. Acesso em: jan. 2016.

OLIVEIRA FILHO, K. S.; SARAIVA, M. F. O. **Astronomia e Astrofísica**. 2ª. Ed. São Paulo, Brasil: Editora Livraria da Física, 2004.

OLIVEIRA, H. E. **Tecnologia Fotovoltaica em filmes finos (películas delgadas)**. 2008. 46f. Monografia (Pós-graduação em Formas Alternativas de Energia). Universidade Federal de Lavras, Lavras, Minas Gerais, 2008.

OLIVEIRA, S.H.F. & ZILLES, R. **Grid-connected photovoltaic systems: The Brazilian experience and the performance of an installation**. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, Vol. 9. 2001.

ONS. **Operador Nacional do Sistema Elétrico**. Disponível em: < <http://http://www.ons.org.br/>>. Acesso em: 17 jan. 2016.

PERLIN, J. The History of Solar Energy – Photovoltaics. In: PERLIN, J. **From Space to Earth: The Story of Solar Electricity**. Michigan: Edwards Brothers, 1999. ISBN 0-937948-14-4. Disponível em: <http://www.californiasolarcenter.org/history_pv.html>. Acesso em: 20 jan. 2016.

PRADO, D. A. **Fabricação e Caracterização de uma célula solar a partir do polímero Poli (N-Vinilcarbazol) PVK dopado com Perclorato de Lítio**. 2008. 74f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica). Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008.

PROENÇA, E. D. R. B. **A Energia Solar Fotovoltaica em Portugal**. 2007. 88f. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Gestão Industrial). Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa, Portugal, 2007.

ROSA, L. P. A falta de Energia Elétrica e a Sobra de Gás. Disponível em: <<http://www.planeta.coppe.ufrj.br/artigo.php?artigo=345>>. Acesso em: 12 dez. 2016.

RÜTHER, R. & LIVINGSTONE, J. **Amorphous and Crystalline Silicon Solar Modules: Choice of Technologies**. Anais da Conferência Solar '93. Australian and New Zealand Solar Energy Society. Perth, Australia, 1993.

RÜTHER, R. **Demonstrating the Superior Performance of Thin-Film Amorphous Silicon for Building-Integrated Photovoltaic Systems in Warm Climates**. ISES 1999 Solar World Congress - International Solar Energy Society. Jerusalem, Israel, 1999.

RÜTHER, R. & DACOREGIO, M.M. **Performance assessment of a 2kWp grid-connected, building-integrated, amorphous silicon photovoltaic installation in Brazil**. Progress in Photovoltaics: Research and Applications. Vol. 8. 2000.

RÜTHER, R. **Grid-connected PV systems in Brazil can push PV to mass production**. 17th European Photovoltaic Solar Energy Conference, Munique, Alemanha. 2001.

RÜTHER, R.; TAMIZH-MANI, G.; DEL CUETO, J.; MONTENEGRO, A.A. & VON ROEDERN, B. **Performance test of amorphous silicon modules in different climates: higher minimum operating temperatures lead to higher performance levels**. 3rd World Conference on Photovoltaic Energy Conversion. Osaka, Japão, 2003.

RÜTHER, R.; BEYER, H.G.; MONTENEGRO, A.A.; DACOREGIO, M.M. & KNOB, P. **Performance results of the first grid-connected, thin-film PV installation in Brazil: high**

performance ratios over six years of continuous operation. 19th European Photovoltaic Solar Energy Conference. Paris, França, 2004.

RUTHER, R. **Edifícios Solares Fotovoltaicos: O Potencial da Geração Solar Fotovoltaica Integrada a Edificações Urbanas e Interligadas à Rede Elétrica Pública no Brasil.** 1 ed. Florianópolis: LABSOLAR, 2004. 113 p.

SABINO, M. E. L. **Desenvolvimento de filmes finos de óxidos condutores e transparentes de ZnO para aplicação em células solares.** 2007. 142f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais). UFOP – CETEC – UEMG, Belo Horizonte, Minas Gerais, 2007.

SALAMONI, I. T. **Metodologia para cálculo de geração fotovoltaica em áreas urbanas aplicada a Florianópolis e Belo Horizonte.** PPGEC, UFSC, Florianópolis, 2004.

SANTOS, I. P. **Integração de Painéis Solares Fotovoltaicos em Edificações Residenciais e sua contribuição em um alimentador de energia de zona urbana mista.** 2009. 126f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2009.

SOLAR ENERGY. **Datasheet: Inversor Solar Série SE-TL.** Disponível em: <<http://solarenergy.com.br/wp-content/uploads/2014/12/manual-do-inversor.pdf>>. Acesso em: 03 mar. 2016.

THOMAS, R.; GRAINER, T. **Photovoltaic in buildings - a design guide:** Department of trade and industry. Londres, 1999.

TOLMASQUIM; GUERREIRO; GORINI. **Matriz Energética Brasileira: Uma prospectiva.** 2007. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/nec/n79/03.pdf>>. Acesso em: 14 mar. 2014.

TRENBERTH, K. E.; FASULLO, J. T.; KIEHL, J. **Earth's global energy budget.** *Bulletin of the American Meteorological Society.* Março, 2009. Disponível em: <<http://journals.ametsoc.org/doi/pdf/10.1175/2008BAMS2634.1>>. Acesso em: 18 jan. 2016.

VICHI, F.M.; MANSOR, M. T. C. Energia, meio ambiente e economia: o Brasil no contexto mundial. **Química Nova**, São Paulo, Vol. 32, N. 3, 757-767, 2009. Disponível em: < <http://www.scielo.br/pdf/qn/v32n3/a19v32n3.pdf> >. Acesso em: 16 jan. 2016.

VIGGIANO, M. H. S. **Autonomia energética em residências unifamiliares: A experiência do projeto casa autônoma**. ENTAC, Foz do Iguaçu, Paraná. 2002.

WU, X., DHERE, R.G., ALBIN, D.S., GESSERT, T.A., DEHART, C., KEANE, J.C., DUDA, A., COUTTS, T.J., ASHER, S., LEVI, D.H., MOUTINHO, H.R., YAN, Y., MORIARTY, T., JOHNSTON, S., EMERY, K., SHELDON, P. High-Efficiency CTO/ZTO/CdS/CdTe Polycrystalline Thin-Film Solar Cells. NREL/CP-520- 31025, 2001.

YEANG, K. **Proyectar com la Natureza**. Gustavo Gilli, Espanha, 1999.