

Universidade Federal
do Rio de Janeiro

Escola Politécnica

TECNOLOGIA FOTOVOLTAICA

Amanda Moraes dos Santos

Projeto de Graduação apresentado ao Curso de Engenharia Elétrica da Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Engenheiro.

Orientador: Jorge Luiz do Nascimento, Dr. Eng.

RIO DE JANEIRO

ABRIL DE 2013

TECNOLOGIA FOTOVOLTAICA

Amanda Moraes dos Santos

PROJETO DE GRADUAÇÃO SUBMETIDO AO CORPO DOCENTE DO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA DA ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE ENGENHEIRO ELETRICISTA.

Aprovada por:

Prof. Jorge Luiz do Nascimento, Dr. Eng.

(Orientador)

Prof. Luís Guilherme Barbosa Rolim, Dr.-Ing.

Prof. Robson Francisco da Silva Dias, D.Sc

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

ABRIL DE 2013

Santos, Amanda Moraes dos

Tecnologia Fotovoltaica / Amanda Moraes dos Santos

– Rio de Janeiro: UFRJ/Escola Politécnica, 2013.

IX, 65 p.: il.; 29,7cm.

Orientador: Nascimento, Jorge Luiz do

Projeto de Graduação – UFRJ/ Escola Politécnica/

Curso de Engenharia Elétrica, 2013

Referencias Bibliográficas: p. 64-65.

1. Configurações Básicas e Aplicações. 2. Sistema Fotovoltaico. 3. Tecnologia da Energia Fotovoltaica. 4. Tecnologias em Desenvolvimento. I. Nascimento, Jorge Luiz. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, UFRJ, Engenharia Elétrica. III. Título

Agradecimentos

Em primeiro lugar agradeço a Deus por estar sempre presente em minha vida.

Agradeço ao meu pai e minha mãe pela dedicação que tiveram ao me educar, estando ao meu lado em todos os momentos.

Agradeço as minhas irmãs Alessandra e Aline, pela amizade e companheirismo, de extrema importância na minha formação pessoal.

Agradeço aos meus colegas e amigos por todo incentivo, auxílio etc. Em especial, a Bruna, Davi, Degmar, Everton, Felipe, José Henrique, Severino, Thiago, Vinícius e Vogel. Sem vocês eu não teria conseguido.

Ao Diego Marins, pelo carinho, compreensão e paciência durante toda esta jornada, principalmente durante as semanas de provas, e também por muitas vezes acreditar mais em mim do que eu mesma.

Aos professores do Departamento de Engenharia Elétrica da UFRJ por todos os ensinamentos.

Ao Prof. Jorge, não só por ter aceitado orientar este trabalho, mas pelos conselhos e longas conversas durante toda minha formação acadêmica.

Resumo do Projeto de Graduação apresentado à Escola Politécnica/ UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Engenheiro Eletricista.

TECNOLOGIA FOTOVOLTAICA

Amanda Moraes dos Santos

ABRIL/2013

Orientador: Jorge Luiz do Nascimento, Dr. Eng..

Curso: Engenharia Elétrica

A demanda por energia elétrica vem aumentando progressivamente. Aliado a esse fato, tem-se a crescente ideia de sustentabilidade. São nesses conceitos que surge a necessidade do desenvolvimento de fontes renováveis. A energia fotovoltaica aparece como uma alternativa bastante promissora, por se tratar de uma energia limpa e baseada em um bem inesgotável: a radiação solar.

Este trabalho tem a finalidade de divulgar e incentivar o uso desta energia. Nele é descrita a evolução desta tecnologia em níveis nacional e mundial, sendo feitas considerações econômicas, sociais e tecnológicas.

Serão apresentados os materiais que estão sendo desenvolvidos e comercializados para a fabricação das células fotovoltaicas e os demais componentes de um sistema.

Além disso, são citados os fatores que contribuem para a utilização da energia fotovoltaica, os tipos e processos de obtenção dos materiais empregados para a manufatura dos elementos do sistema.

Palavras chave: energia fotovoltaica, fontes renováveis, células fotovoltaicas

Abstract of Undergraduate Project presented to Escola Politécnica/ UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Engineer.

TECHNOLOGY OF PHOTOVOLTAICS

Amanda Moraes dos Santos

APRIL/2013

Advisor: Jorge Luiz do Nascimento, Dr. Eng.

Course: Electrical Engineering

The demand for electric energy is growing progressively. Besides that, it comes the idea of sustainability. From these concepts the idea of renewable resources development arises. The photovoltaic energy appears as a promising alternative, since it's based upon a clean and infinity energy resource, solar radiation.

The main goal of this paper is to disclose and to motivate the use of this type of energy. In this paper you'll find the evolution of this technology in a national and worldwide level, also taking in consideration the economic, social and technological sides.

It will be presented the materials that are being developed and commercialized for the manufacture of photovoltaic cells and the others components of a photovoltaic system.

Furthermore, the factors that contribute to the use of photovoltaic energy are also quoted, as also the types and procedures for obtaining materials used for the manufacture of system elements.

Keywords: photovoltaic energy, renewable resources, photovoltaic cells.

Índice

CAPÍTULO 1	1
Introdução.....	1
1.1. Justificativa.....	2
1.2. Objetivo	3
1.3. Visão Geral do Texto.....	3
CAPÍTULO 2	4
Configurações Básicas e Aplicações	4
2.1. Introdução.....	4
2.2. Configurações Básicas de um Sistema Fotovoltaico.....	5
2.2.1. Sistemas Autônomos	5
2.2.1.1. Sistemas Híbridos	6
2.2.1.2. Sistemas Isolados.....	7
2.2.2. Sistemas Conectados à Rede Elétrica.....	7
2.3. Panorama Mundial.....	9
2.4. Panorama Nacional.....	11
2.4.1. Estações Fotovoltaicas.....	12
CAPÍTULO 3	16
Sistema Fotovoltaico	16
3.1. Célula Fotovoltaica.....	16
3.1.1. Dopagem do Silício	17
3.1.2. Efeito Fotovoltaico	18
3.2. Módulo Fotovoltaico	19
3.2.1. Características dos Módulos.....	19
3.2.2. Associação em Paralelo	21
3.2.3. Associação em Série.....	22
3.2.4. Associação Mista.....	23
3.3. Baterias	25
3.3.1. Tipos de Baterias Secundárias.....	25
3.3.1.1. Baterias Chumbo-Ácido	25
3.3.1.2. Baterias Níquel-Cádmio	26
3.3.1.3. Baterias de Lítio	27
3.3.2. Características das Baterias Secundárias.....	27

3.3.3. Métodos de Carga.....	28
3.3.3.1. Corrente Constante	28
3.3.3.3. Regulação Automática.....	28
3.4. Reguladores de Carga.....	29
3.4.1. Reguladores Série	29
3.4.2. Reguladores Paralelo	30
3.4.3. Reguladores MPPT.....	30
3.5. Inversores	31
CAPÍTULO 4	33
Tecnologia da Energia Fotovoltaica.....	33
4.1. Introdução.....	33
4.2. Silício Cristalino (c-Si).....	33
4.2.1. Silício Monocristalino (m-Si).....	34
4.2.1.1. Matéria Prima	34
4.2.1.2. Células Fotovoltaicas de m-Si	36
4.2.2. Silício Policristalino (p-Si)	37
4.2.2.1. Matéria Prima	37
4.2.2.2. Células Fotovoltaicas de p-Si	39
4.3. Silício Amorfo (a-Si).....	39
4.3.1. Matéria Prima	39
4.3.2. Células Fotovoltaicas de a-Si	40
4.4. Telureto de Cádmio (CdTe).....	42
4.4.1. Matéria Prima	42
4.4.2. Células Fotovoltaicas de CdTe.....	43
4.5. Disseleneto de Cobre e Índio (CIS).....	45
4.5.1. Matéria Prima	45
4.5.2. Células Fotovoltaicas de CIS.....	46
4.6. Arseneto de Gálio (GaAs)	47
4.6.1. Matéria Prima	47
4.6.2. Células Fotovoltaicas de GaAs.....	47
4.7. Multijunção.....	48
4.7.1. Matéria Prima	48
4.7.2. Células Fotovoltaicas Multijunção	48
4.8. Comparação Entre os Diferentes Tipos de Células Solares	48

CAPÍTULO 5	51
Tecnologias em Desenvolvimento	51
5.1. Inversores	51
5.2. Baterias	56
5.3. Módulos Fotovoltaicos	58
CAPÍTULO 6	62
Conclusão	62
Referências Bibliográficas.....	64

CAPÍTULO 1

Introdução

A energia solar fotovoltaica é a conversão direta da luz do Sol em eletricidade. Tal conversão é realizada essencialmente pelos painéis fotovoltaicos, que são módulos compostos por materiais semicondutores, como o silício cristalino, cujos elétrons interagem com a radiação solar, produzindo uma corrente elétrica.

A interação entre o silício e a luz solar não produz nenhum resíduo, nem vibrações, nem ruídos, fazendo com que a energia elétrica proveniente dos painéis fotovoltaicos seja considerada uma fonte de energia ecológica. Sendo a radiação solar um bem inesgotável, e o silício, o segundo elemento mais encontrado na superfície terrestre, essa tecnologia pode ser considerada uma das mais importantes para o desenvolvimento sustentável.

A tecnologia das células solares tem cerca de 50 anos de desenvolvimentos contínuos, atingindo atualmente, altos níveis de confiabilidade. Em geral, a garantia oferecida pelos fornecedores sobre a capacidade de produção mínima dos módulos é superior a 90% da potência inicial após 10 ou 12 anos e de 80% da potência inicial após 20 anos [1].

Outro aspecto positivo da indústria solar fotovoltaica é a quantidade de empregos gerados por esta. Como exemplo, pode-se destacar os EUA, que em 2011 gerou cerca de 100 mil empregos diretos, a maior parte concentrada em empresas de instalação de sistemas fotovoltaicos. A Figura 1.1 demonstra o índice de emprego gerado por MW instalado para diversos tipos de tecnologias. Pode-se observar que a solar fotovoltaica se encontra como segunda maior geradora, e que levando em conta a mediana obtida através de diversos estudos, o número de empregos é o maior das fontes listadas.

A energia solar fotovoltaica pode ser aplicada tanto em áreas remotas como em edificações integradas à rede convencional de energia elétrica, podendo atender tanto a consumidores domésticos quanto empresariais, governamentais ou agrícolas. As instalações atuais provêm diversas facilidades, tais como:

- Controle da produção pelo operador da rede por telecomando, quando necessário;
- Controle da potência ativa no caso de elevação da frequência;
- Opção de provisão de potência reativa para controle de tensão da rede;
- Opção de seguimento na operação do sistema fotovoltaico mesmo com queda súbita

na tensão na rede.

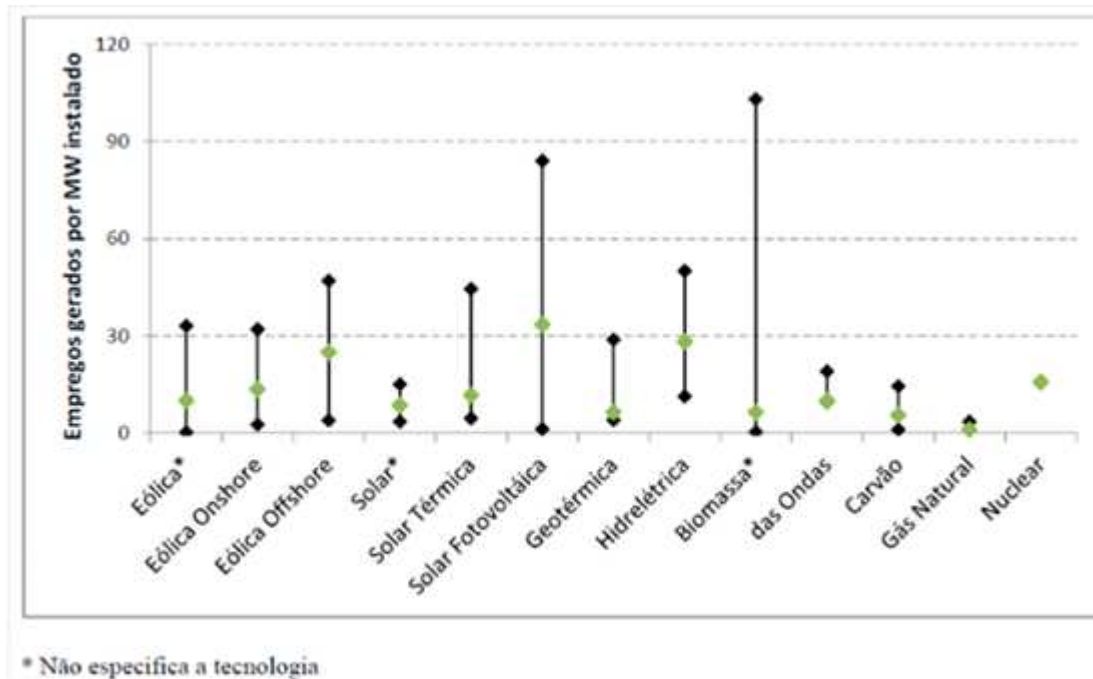


Figura 1.1 - Índice de geração de emprego por MW instalado para diversas fontes e tecnologias. [1]

1.1. Justificativa

Nas últimas décadas, o interesse pelo uso de energia solar cresceu de maneira expressiva. Apesar de o conceito de efeito fotovoltaico datar de meados do século XIX, graças a experimentos realizados por Edmond Becquerel, foi só durante a época da corrida espacial que esta tecnologia pode ser mais bem desenvolvida, porém, ainda limitada pela tecnologia disponível na época.

Foi apenas em 1973, com a crise energética do setor petrolífero que esta tecnologia ganhou o devido reconhecimento. Por questões econômicas, as superpotências aceleraram o processo em busca de fontes alternativas de energia, e a energia solar foi a que mais recebeu investimento. A percepção de que o Sol era uma fonte riquíssima de energia impulsionou o aprimoramento de equipamentos e a eficiência dos mesmos, desde o surgimento da célula fotovoltaica até chegar a toda tecnologia existente atualmente.

Apesar de sua fácil implementação e de seu baixo custo de manutenção, no Brasil, ainda existe um atraso no uso de fontes alternativas de energia em relação a outros países. Dessa forma, a justificativa deste projeto se baseia na necessidade de divulgar e popularizar o

uso de fontes alternativas, em especial, a fotovoltaica, visto que é uma tecnologia em constante evolução e bastante promissora.

1.2. Objetivo

Este estudo tem como objetivo catalogar informações, constituindo uma base de dados para os estudos do LAFAE, auxiliar na divulgação do conhecimento e do estado da arte da tecnologia presente no mercado atualmente, além de incentivar à implantação de sistemas fotovoltaicos.

1.3. Visão Geral do Texto

Além do capítulo 1, que constitui a presente introdução, este trabalho está estruturado em cinco outros capítulos.

No capítulo 2 são apresentadas as configurações básicas de um sistema fotovoltaico e uma breve descrição das mesmas. Também é feito um apanhado geral sobre as aplicações fotovoltaicas em escala mundial e nacional.

O capítulo 3 consiste em descrever os componentes básicos de um sistema fotovoltaico, assim como o princípio de funcionamento da célula, componente essencial do sistema.

No capítulo 4 são apresentadas as principais tecnologias disponíveis no mercado, divididas conforme a matéria-prima da qual são fabricadas as células fotovoltaicas.

No capítulo 5 são apresentadas algumas tecnologias em desenvolvimento, além de alguns equipamentos, como inversores e baterias que já se encontram no mercado. Também é dada a perspectiva dos mesmos para produção nacional.

No capítulo 6 são apresentadas as conclusões obtidas e em seguida, são feitas recomendações para trabalhos futuros.

CAPÍTULO 2

Configurações Básicas e Aplicações

Neste capítulo são apresentadas as configurações básicas de um sistema fotovoltaico e uma breve descrição das mesmas. Em seguida é feito um apanhado geral sobre as aplicações fotovoltaicas no Brasil e no mundo.

2.1. Introdução

A energia solar fotovoltaica se baseia na captação de energia solar e na conversão da mesma em energia elétrica por meio das células fotovoltaicas. Tal conversão recebe o nome de Efeito Fotovoltaico.

O efeito fotovoltaico foi observado pela primeira vez em 1839, pelo físico francês Edmond Becquerel. Consiste no aparecimento de uma diferença de potencial nos extremos de uma estrutura de material semicondutor, produzida pela absorção da luz.

Mais tarde, em 1876, dois inventores norte-americanos, W. G. Adams e R. E. Day utilizaram as propriedades fotocondutoras do selênio para desenvolver o primeiro aparato fotovoltaico, resultado de estudos das estruturas no estado sólido [2]. Apesar da baixa eficiência de conversão (na ordem de 0,5%), células de selênio começaram a ser comercializadas, ainda no século XIX.

No entanto, foi apenas em 1956 que se iniciou a produção industrial das células. A explicação do efeito fotoelétrico por Albert Einstein, em 1905, o advento da mecânica quântica, a teoria das bandas e a física dos semicondutores, assim como as técnicas de purificação e dopagem associadas ao desenvolvimento do transistor de silício foram fundamentais para tornar viável a energia fotovoltaica.

O principal agente impulsionador para o desenvolvimento da tecnologia e do início da produção industrial das fotocélulas foi a “corrida espacial”. A utilização de células fotovoltaicas foi de papel decisivo para os programas espaciais, visto que é considerada o meio mais adequado para fornecer a quantidade de energia necessária para longos períodos de permanência do espaço. Neste período, houve um avanço significativo na tecnologia, onde se aprimorou o processo de fabricação, a eficiência das células e seu peso.

Com a crise energética mundial de 1973, a preocupação com novas formas de produção de energia renovou e ampliou o interesse na tecnologia fotovoltaica. Era preciso

reduzir drasticamente o custo de produção das fotocélulas para viabilizar seu uso em aplicações terrestres.

A produção de células fotovoltaicas atingiu grandes marcas no decorrer dos anos, sendo o Silício o material mais utilizado para fabricação das mesmas, seja na forma monocristalino, policristalino e amorfo. Nos estudos apontados por [4], a busca de materiais alternativos é contínua e intensa e concentra-se na área de filmes finos, onde o silício amorfo é abundantemente aplicado. Ainda segundo[4], as células de filmes finos, além de utilizarem menor quantidade de material do que as que apresentam estruturas cristalinas requerem uma menor quantidade de energia no seu processo de fabricação.

2.2. Configurações Básicas de um Sistema Fotovoltaico

Os sistemas solares fotovoltaicos fornecem energia elétrica a uma determinada demanda energética, usando como fonte de energia a radiação solar. Assim, a energia elétrica produzida varia durante o dia e ao longo do ano, de acordo com as flutuações naturais da radiação solar. Por esse motivo, em algumas situações, são necessários sistemas de armazenamento de energia.

Existem duas configurações básicas para os sistemas fotovoltaicos: autônomos ou conectados à rede elétrica. Dentre as diferenças fundamentais entre os dois, destacam-se a orientação dos painéis solares e a existência ou não de um sistema acumulador de energia [5].

2.2.1. Sistemas Autônomos

Os sistemas autônomos constituíram o primeiro campo de operação da tecnologia fotovoltaica. Surgiram como uma solução para o problema da eletrificação de locais remotos, onde não existia fornecimento de energia através das concessionárias por razões técnicas ou econômicas.

Caracterizam-se pela necessidade de um sistema acumulador de energia (normalmente um banco de baterias) onde a energia gerada pelos painéis solares é armazenada e distribuída aos pontos de consumo. Ao contrário dos painéis fotovoltaicos, as baterias necessitam de manutenção e tem vida útil normalmente de quatro a seis vezes menor que a dos painéis [5]. Mas, ainda assim, os elevados custos envolvidos por esse sistema se comparam favoravelmente à extensão da rede elétrica pública para atender pequenas demandas.

São constituídos essencialmente de um conjunto de módulos e baterias associadas a controladores de carga. Durante os dias com elevados valores de radiação solar, os módulos

produzem energia elétrica. A quantidade de energia que não é utilizada pelos usuários é armazenada nas baterias. Durante a noite e nos dias nublados, a energia para o consumo é fornecida pelas baterias. Neste caso, a tensão proporcionada é contínua e os instrumentos usados devem enquadrar-se a esta característica. Se há necessidade de tensão alternada, associa-se ao sistema um inversor, que transforma a tensão contínua em alternada.



Figura 2.1 – Esquema de um sistema fotovoltaico autônomo

Os sistemas autônomos podem ou não apresentar fontes de energia complementares à geração fotovoltaica. São os chamados sistemas híbridos e sistemas isolados, respectivamente.

2.2.1.1. Sistemas Híbridos

Sistemas híbridos são aqueles em que, estando desconectados da rede elétrica, existe mais de uma forma de geração de energia, como por exemplo, grupos de gerador a diesel (Figura 2.2).



Figura 2.2 – Sistema híbrido solar-diesel de Araras, Nova Maromé – RO

São empregados para sistemas de médio e grande porte, e em geral atendem a cargas de corrente alternada. São sistemas complexos e necessitam de um controle capaz de integrar os vários geradores, de forma a otimizar a operação para o usuário.

2.2.1.2. Sistemas Isolados

Sistemas isolados são aqueles cuja configuração é puramente fotovoltaica. São indicados para instalações em locais com condições climáticas extremamente favoráveis. Possuem várias configurações possíveis, entre elas [4]:

- Carga CC sem armazenamento: A energia elétrica é usada no momento da geração por equipamentos que operam em corrente contínua.
- Carga CC com armazenamento: A energia elétrica é usada independente de haver ou não geração fotovoltaica simultânea. A energia elétrica é armazenada em baterias, e é comum o uso de controladores de carga para proteger as baterias de sobrecarga ou descarga profunda.
- Carga CA sem armazenamento: A energia elétrica é usada no momento da geração, porém necessita-se da introdução de um inversor (dispositivo que transforma corrente contínua em corrente alternada) entre o sistema fotovoltaico e o equipamento elétrico.
- Carga CA com armazenamento: A energia elétrica é armazenada em baterias. É necessária a utilização de um inversor, e em geral, de um seguidor do ponto de máxima potência.

2.2.2. Sistemas Conectados à Rede Elétrica

Os sistemas conectados à rede elétrica são aqueles em que a potência gerada pelo arranjo fotovoltaico é entregue à rede elétrica. O funcionamento é simples: sempre que o sistema gerar energia em excesso em relação ao consumo, este excesso é injetado diretamente na rede elétrica pública. Quando o sistema gera menos energia do que a necessária para atender à demanda da residência, então a energia complementar necessária é extraída da rede. A Figura 2.3 representa um esquema de um sistema fotovoltaico que injeta energia elétrica na rede.



Figura 2.3 – Esquema de um sistema fotovoltaico residencial conectado à rede elétrica convencional

Nestes sistemas é indispensável o uso de um inversor, que deve ser escolhido de forma a atender as exigências de qualidade e segurança, e não é necessária a utilização de baterias, pois utiliza a rede elétrica como armazenador de energia.

Em Sistemas Conectados à Rede Elétrica, existem três tipos de conexão quanto à forma de medição da energia. São elas [4]:

- **Medição única do balanço de energia:** Depende da concessionária remunerar a energia entregue pelo produtor fotovoltaico ao mesmo preço que este compra na concessionária. Um único medidor registra a entrada ou saída de energia apresentando, ao final do período, o valor da diferença entre energia consumida e entregue à rede.
- **Medição dupla:** Os medidores operam em sentidos diferentes, registrando separadamente a compra e a venda de energia à rede. A cada instante, apenas um dos medidores está em operação dependendo da diferença instantânea entre a demanda e a potência gerada. Possibilita que valores diferentes possam ser atribuídos a entrada e saída de energia.
- **Medições simultâneas:** A conexão do sistema fotovoltaico à rede é feita independente do painel de serviço local, evitando qualquer interferência do circuito de consumo local com a produção e/ou tarifação da energia gerada. A caixa de junção deve garantir que toda a energia gerada possa fluir, garantindo que caso a rede não esteja apta a receber esta energia, ela será computada e comprada pela concessionária.

As formas de medição devem estar de acordo com a Resolução Normativa nº. 482 [3], estabelecidas de acordo com a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), utilizando

como referência os Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST, as normas técnicas brasileiras e, de forma complementar, as normas internacionais.

2.3. Panorama Mundial

A energia solar fotovoltaica tem atributos que não podem ser comparados com nenhuma outra fonte de energia. Sua produção se dá de forma rápida e pelo fato de sua tecnologia ser desenvolvida a partir de infraestrutura já existente, está constantemente passando por inovações.

Os painéis solares, ainda hoje, contribuem pouco para a produção elétrica mundial devido ao alto custo por Watt que ainda é apresentado. Porém, há constantes inovações na indústria que tem reduzido significativamente o custo por unidade de energia, seja por novos produtos e processo de produção ou pela comercialização e instalação.

As décadas de oitenta e noventa foram marcadas pelo crescimento de investimento em programas de financiamento da energia solar devido à crescente consciência ambiental. Nesse período foi instalada a primeira central solar de grande porte na Califórnia (1982) e aconteceram o lançamento dos programas “telhados solares” na Alemanha (1990) e no Japão (1993).

Iniciou-se a compreensão de que a criação do mercado fotovoltaico não devia basear-se apenas no desenvolvimento tecnológico (aumentando a eficiência das células ou reduzindo seu custo de produção), mas que na realidade, o melhor era investir em uma produção em grande escala, onde quantas mais células fossem fabricadas, menor seria o custo unitário.

Tal fato pode ser comprovado ao analisar o MUSIC FM, um estudo financiado pela União Européia, que mostra que, utilizando a tecnologia atual, uma fábrica de painéis solares com nível de produção na ordem de 500 MW anuais pode levar a uma redução dos custos dos painéis para valores equivalentes com os da energia convencional [6].

A potência mundial instalada subiu de 110 MW em 1993 para 7841 MW em 2007, centralizada principalmente em quatro países: Alemanha, Espanha, Estados Unidos e Japão. A Figura 2.4 mostra a evolução da capacidade de potência instalada, seja ela conectada ou não à rede durante o período de 1992 a 2007.

Com o crescimento, os custos de produção caíram de maneira igualmente expressiva. Os custos de 2006 são cerca de oito vezes menores do que eram em 1975, passaram de US\$ 30/W [7] para US\$3,75/W em 2006 [8].

Em 2007, os sistemas fotovoltaicos conectados à rede foram responsáveis por 94% do total instalado, o que demonstra que a tendência do mercado fotovoltaico é diminuir o uso das aplicações não conectadas à rede.

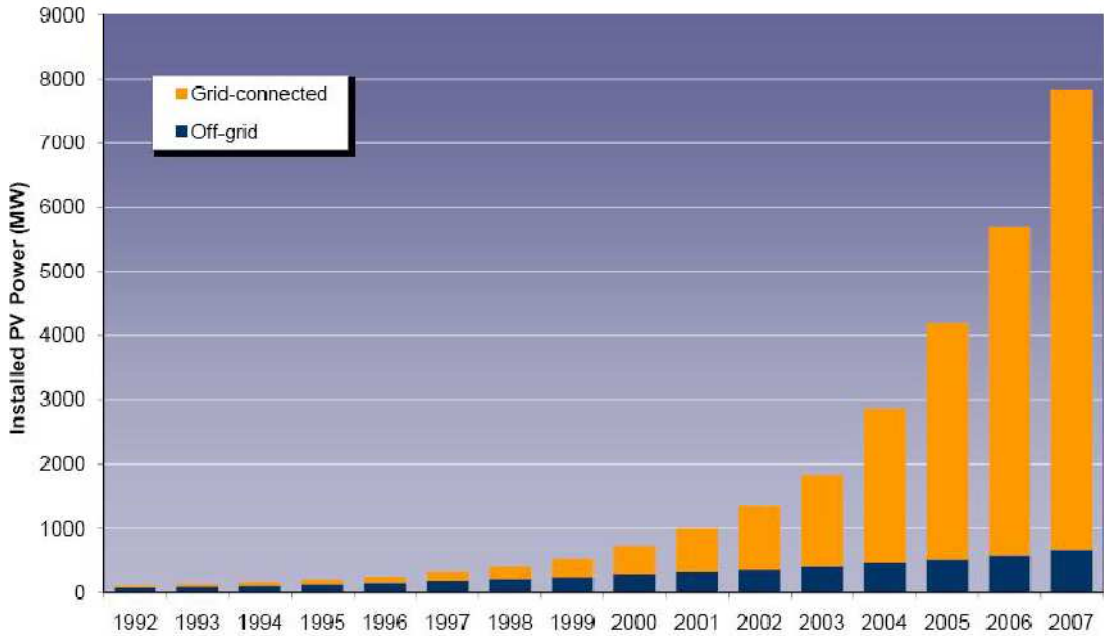


Figura 2.4: Potência acumulada instalada de sistemas fotovoltaicos em países no mundo conectados ou não à rede elétrica. [IEA – PVPS, 2008]

Os quatro países, já citados, que vêm se destacando no mercado fotovoltaico mundial foram responsáveis por cerca de 90% do total da capacidade instalada em 2007, sendo 50% somente na Alemanha como pode ser visto na Figura 2.5.

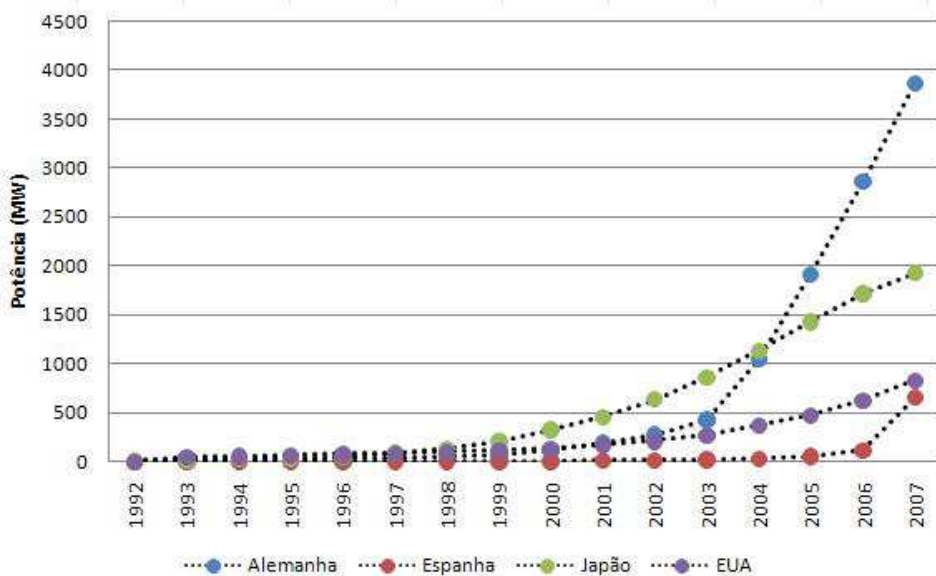


Figura 2.5 - Potência acumulada instalada de sistemas fotovoltaicos na Alemanha, Espanha, Japão e EUA, em MW (1992-2007). [IEA – PVPS, 2008]

2.4. Panorama Nacional

No Brasil, as principais aplicações da tecnologia fotovoltaica são relativas à telecomunicação, à eletrificação rural, aos serviços públicos e ao bombeamento de água. Os sistemas conectados à rede são poucos, apesar de possuir grande potencial de irradiação solar, cerca de duas vezes mais que a Alemanha, que é líder em capacidade instalada de energia fotovoltaica. A Tabela 2.1 mostra o total da capacidade instalada (apenas de sistemas fotovoltaicos conectados à rede) e potencial solar na Alemanha, Espanha e Brasil no ano de 2009 [9].

Tabela 2.1 - Capacidade instalada de sistemas fotovoltaicos e potencial solar na Alemanha, Espanha e Brasil

	Alemanha	Espanha	Brasil
Capacidade Instalada (MW)	3800	451	0,152
Potencial (kWh/m²· ano)	900	1800	1950

As telecomunicações constituem a aplicação mais antiga da tecnologia fotovoltaica do Brasil [10]. Apesar disso, os sistemas mais utilizados no país são para eletrificação rural e bombeamento de água, que atendem cargas elétricas distantes da rede elétrica convencional, normalmente em zonas rurais.

Os sistemas autônomos, dependendo do local a ser atendido, representam uma solução mais economicamente viável quando comparadas aos custos de expansão de rede elétrica convencional.

Em relação à aplicação para bombeamento de água, o Brasil conta com uma expressiva quantidade de sistemas instalados por meio de programas institucionais para o abastecimento de comunidades rurais localizadas em zonas remotas e de baixo poder aquisitivo [11].

Uma forma de incentivar o desenvolvimento da indústria solar no Brasil é investindo em leilões fotovoltaicos. Os leilões de geração de energia são de extrema importância para a sustentabilidade do setor elétrico brasileiro. É a partir deles que se realiza a concessão de novas usinas e se fecham contratos de suprimento para atender à demanda futura das distribuidoras de energia.

Ao definir o preço dos contratos de suprimento e a participação das fontes de energia utilizadas na geração, os leilões influenciam ainda o valor das tarifas pagas pelos consumidores e a qualidade da matriz elétrica do país em termos ambientais.

A Empresa de Pesquisa Energética (EPE) é uma das organizações que vem incentivando esta prática com o intuito de reduzir o custo do MWh, além de tornar a energia fotovoltaica mais competitiva.

Mais de 40 mil sistemas fotovoltaicos autônomos foram instalados com o objetivo de amenizar o problema da falta de acesso à energia elétrica em diversas regiões do Brasil. Concessionárias de energia, instituições de ensino, centros de pesquisa e o governo investiram nesses sistemas e tornaram possível a expansão da capacidade instalada através de iniciativas como o Programa Luz Solar, em Minas Gerais, o Programa Luz do Sol, na região Nordeste, o Programa Luz no Campo, Programa Luz para Todos (Eletrobrás) e o PRODEEM de dimensão nacional.

Há também no País alguns sistemas conectados à rede, embora ainda em número bem reduzido. De 1995 a 2001 foram instalados apenas seis sistemas fotovoltaicos conectados à rede no Brasil, totalizando uma potência instalada de 24,6 kWp [12]. Desse total, aproximadamente 11 kWp são de um único sistema que pertence a CHESF (Companhia Hidroelétrica de São Francisco), considerado o maior do Brasil mas desativado há anos. Segundo [13], de 2002 a 2008 foram instalados no país 120,4 kWp em sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica.

O custo de geração de sistemas conectados à rede ainda é muito elevado no Brasil, se comparado ao custo marginal de expansão do setor elétrico (cerca de seis a sete vezes maior) e às tarifas de eletricidade praticadas aos consumidores (cerca de três a quatro vezes maior).

Na seção 2.4.1 são detalhados alguns desses projetos de sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica em território brasileiro.

2.4.1. Estações Fotovoltaicas

- Sistema LABSOLAR/UFSC

É a primeira instalação solar fotovoltaica integrada a uma edificação urbana e interligada à rede elétrica pública no Brasil (Figura 2.6). Está em operação desde setembro de 1997, localizada no Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC). Possui potência instalada de 2078 Wp, composta por 68 módulos solares de vidro sem moldura. O sistema é subdividido em quatro subsistemas de aproximadamente 500 Wp cada um, conectados a quatro inversores de 650 W cada.



Figura 2.6 - Sistema fotovoltaico integrado ao envoltório da edificação do Departamento de Engenharia Mecânica da UFSC

- Sistema IEE/ USP

Instalado no Laboratório de Sistemas Fotovoltaicos do Instituto de Eletrotécnica e Energia (IEE) da Universidade de São Paulo (USP) como uma cobertura de parte do estacionamento do IEE.

É conectado à rede elétrica de baixa tensão, possuindo uma potência instalada de 3 kWp, com 60 módulos de 50 Wp cada e 3 inversores com potência de 1 kW. Calcula-se que este sistema produz anualmente 4.265,69 kWh, com uma produção diária média anual de 11,68 kWh/dia.



Figura 2.7 - Sistema fotovoltaico IEE/USP

- Sistema Eficiência Máxima Consultoria

A empresa Eficiência Máxima Consultoria instalou, em 2010, um sistema fotovoltaico residencial, em um condomínio no município de Brumadinho-MG (Figura 2.8), que possui potência nominal de 3,57 kWp.



Figura 2.8 - Módulos fotovoltaicos integrados ao telhado

É constituído de 23 módulos de 155 Wp, instalados no telhado da residência, e um inversor de 4000 W. No ano de 2010, foram gerados, em média, 386 kWh com o sistema em questão.

- Estação Ferroviária Vitória

A Estação Ferroviária Intendente Câmara Estrada de Ferro Vitória a Minas (EFVM), localizada no município de Ipatinga, em Minas Gerais, passou por reformas e possui um sistema de microgeração solar fotovoltaica (Figura 2.9) composto por 32 painéis de 225 W cada. A potência total instalada é de 7,2 kW, gerando aproximadamente 1000 kWh por mês. Além dos painéis, possui um banco de 24 baterias de 220 Ah cada. O Sistema foi implantado pela Vale.



Figura 2.9 – Estação Ferroviária Vitória

- Sistema CEMIG

A CEMIG (Companhia Energética de Minas Gerais) por meio de projetos de Pesquisa e Desenvolvimento implantou alguns sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica. O primeiro deles foi instalado no Laboratório de Sementes Nativas (LSN), em Belo Horizonte, em 2004. O sistema é composto por módulos de silício monocristalino com potência instalada de 3 kWp e inversores de 1,1 kW. A energia média gerada anualmente ultrapassa 250 kWh.

Recentemente, a CEMIG assinou um contrato de financiamento para a implantação de usinas solares nas arenas desportivas. O objetivo principal é instalar usinas fotovoltaicas nas coberturas do Estádio Magalhães Pinto (Mineirão) e do Ginásio Felipe Hanriot Drumon (Mineirinho).

A Usina Solar Fotovoltaica Mineirão terá potência de 1,42 MWp instalada em cerca de 6000 módulos e toda a energia gerada será injetada na rede de distribuição da CEMIG. Já a implantação da Usina Mineirinho terá potência de 1,1 MWp.

- Solar Tauá

Em meados de 2011 entrou em operação a usina fotovoltaica de Tauá (Figura 2.10), localizada na cidade de Tauá, no sertão do Ceará, numa iniciativa individual da empresa MPX. O empreendimento localizado no Ceará tem capacidade instalada de 1 MWp, o suficiente para suprir 1,5 mil residências. O projeto permite a ampliação gradual da capacidade da usina para até 50 MWp. É constituído por cerca de 5000 painéis fotovoltaicos em uma área de aproximadamente 12 mil metros quadrados.



Figura 2.10 – Visão geral da usina fotovoltaica de Tauá

CAPÍTULO 3

Sistema Fotovoltaico

Neste capítulo são apresentados conceitos básicos para o entendimento do funcionamento de geração de energia através de uma célula fotovoltaica e as descrições dos componentes básicos de um sistema fotovoltaico. O sistema pode ser dividido em três partes: arranjo dos módulos, subsistema de condicionamento de potência (regulador de carga e inversor) e baterias.

3.1. Célula Fotovoltaica

O principal elemento de um sistema fotovoltaico é conhecido como módulo. É produzido a partir de um conjunto de células de material semicondutor, cujos elétrons interagem com a radiação solar, produzindo a corrente elétrica necessária para a geração de energia.

O material semicondutor mais utilizado na fabricação de células fotovoltaicas é o silício. Assim como todo material, o silício possui níveis discretos de energia permitidos para os elétrons que compõem seus átomos. Os elétrons mais afastados do núcleo possuem níveis de energia mais altos e, entre os níveis de energia permitidos, existem níveis que não podem conter nenhum elétron. A Figura 3.1 mostra as bandas de energia permitidas em um material semicondutor.

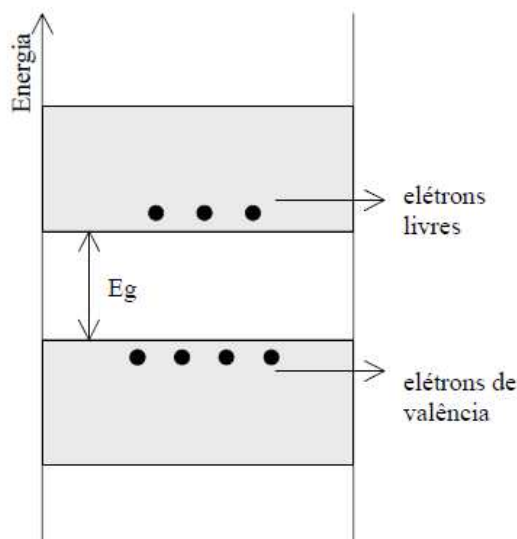


Figura 3.1 – Bandas de energia de um material semicondutor

Na temperatura de 0 K, todos os elétrons dos semicondutores encontram-se na banda de valência, e o material comporta-se como um isolante. Com o aumento da temperatura, alguns elétrons passam para a banda de condução. À temperatura ambiente, esses materiais não são bons condutores e nem bons isolantes, por isso são chamados de materiais semicondutores.

3.1.1. Dopagem do Silício

A condutividade de materiais semicondutores intrínsecos pode ser modificada quando são adicionados a ele, átomos de outro material. Esse processo é conhecido como dopagem. No caso do silício, os materiais mais utilizados como dopante são o fósforo ou arsênio (pentavalentes) ou o boro, gálio ou índio (trivalentes).

Quando um átomo de fósforo é introduzido no silício puro (Figura 3.2), quatro elétrons de valência do fósforo formam ligações covalentes com os átomos de silício, fazendo com que um elétron fique livre. Forma-se assim, uma estrutura chamada semicondutor do tipo-n, por ter a predominância de portadores de carga negativa.



Figura 3.2 – Dopagem do Silício com o Fósforo

Quando a impureza dopante é de átomos trivalentes, como o boro (Figura 3.3), apenas três das ligações covalentes são completadas, deixando uma lacuna para cada impureza introduzida. Tal lacuna pode se recombinar com um elétron, tendo, dessa forma, predominância de portadores de carga positiva. A estrutura é então, chamada de semicondutor do tipo-p.



Figura 3.3 – Dopagem do Silício com o Boro

3.1.2. Efeito Fotovoltaico

O efeito fotovoltaico é um fenômeno que ocorre nas junções de materiais semicondutores, quando os mesmos são expostos a luz.

Unindo semicondutores do tipo-p e do tipo-n, temos a junção pn. Os elétrons livres do lado n se deslocam, preenchendo as lacunas do lado p, isto faz com que haja um acúmulo de elétrons no lado p, tornando-o negativamente carregado e uma redução de elétrons do lado n, que o torna eletricamente positivo. Forma-se, então, uma região onde não se tem cargas livres, originando um campo elétrico permanente que dificulta a passagem de mais elétrons do lado n para o lado p.

O processo entra em equilíbrio quando o campo elétrico forma uma barreira à difusão dos portadores de carga.

Quando a luz penetra na célula fotovoltaica, os fótons que a integram se chocam com os elétrons da estrutura de silício, dando-lhes energia e transformando-os em condutores. Devido ao campo elétrico gerado na união pn, os elétrons são orientados e migram da camada p para a camada n. Este deslocamento de cargas dá origem a uma diferença de potencial ao qual chamamos de *Efeito Fotovoltaico* [15].

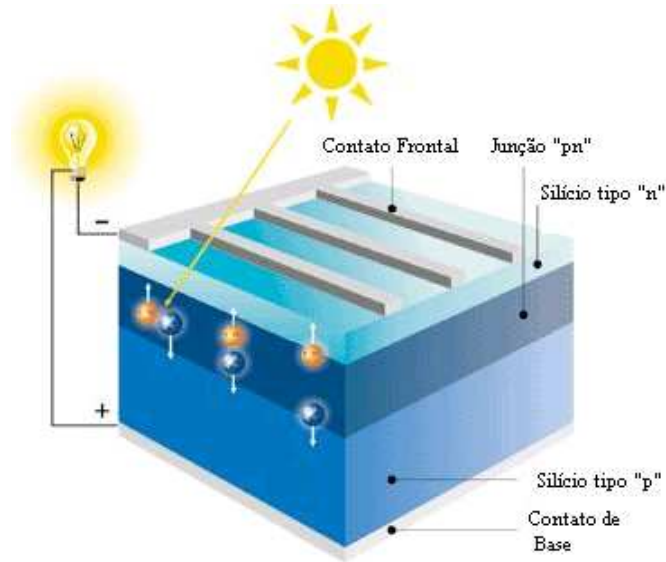


Figura 3.4 – Corte transversal de uma célula fotovoltaica

Se as duas extremidades (p e n) de silício forem conectadas por meio de um condutor externo, gera-se um fluxo de elétrons na conexão: a corrente elétrica. Enquanto a luz incidir na célula, o fluxo de elétrons se manterá. Esta é a base do funcionamento das células fotovoltaicas. A Figura 3.5 representa o efeito fotovoltaico dentro de uma célula.

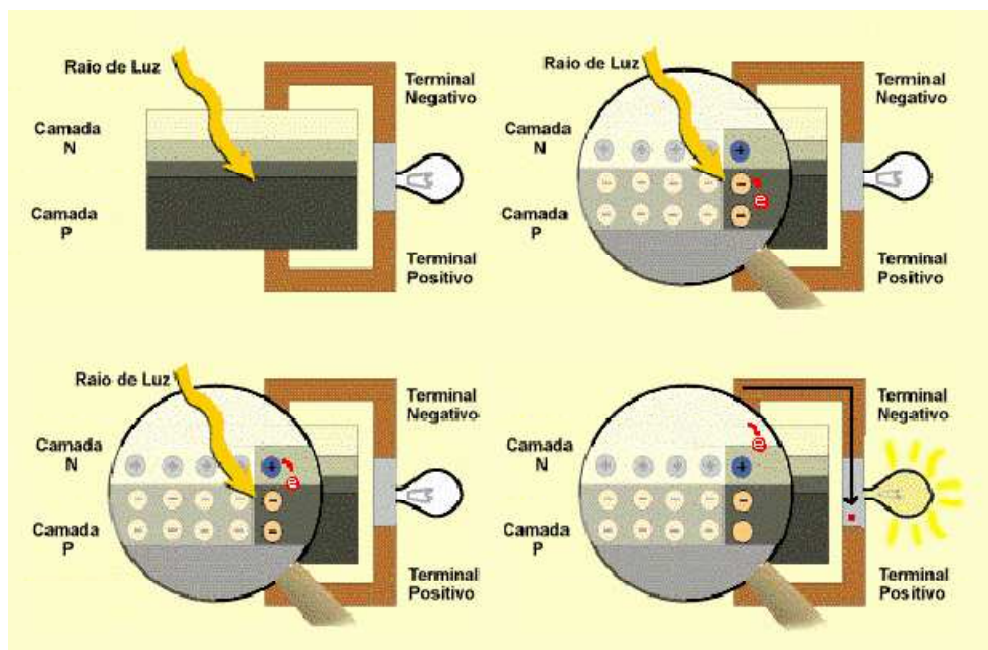


Figura 3.5 – Efeito Fotovoltaico na junção pn

3.2. Módulo Fotovoltaico

O módulo é a unidade básica de um sistema fotovoltaico. Consiste em uma estrutura montada em quadro, geralmente de alumínio e é composto de um conjunto de células fotovoltaicas ligadas eletricamente entre si em paralelo ou em série, cobertas por um encapsulamento que protege as mesmas e suas conexões da ação do tempo e dos eventuais impactos [16].

O agrupamento em módulos é indispensável, visto que, uma célula isolada fornece pouca energia elétrica (cerca de 0,4 V no ponto de máxima potência). A quantidade de células em um módulo e a forma de como elas são organizadas depende do quanto de tensão ou de corrente é necessário. Segundo [14], a quantidade de células fotovoltaicas conectados em série determina a tensão do sistema, e a corrente é definida pela conexão em paralelo dessas células.

3.2.1. Características dos Módulos

Os módulos devem ser projetados para resistir às condições ambientais adversas a que vão estar submetidos. Para garantir a proteção contra a ação de esforços mecânicos, dos agentes atmosféricos e da umidade, as células fotovoltaicas são embebidas numa película de etileno acetato de vinilo (EVA). É um material flexível, translúcido e que não reflete radiação

solar, além de assegurar o isolamento elétrico entre as células. O acabamento é finalizado com aros de alumínio e uma placa de vidro.

A Figura 3.6 representa os componentes e materiais normalmente utilizados na construção dos módulos fotovoltaicos.

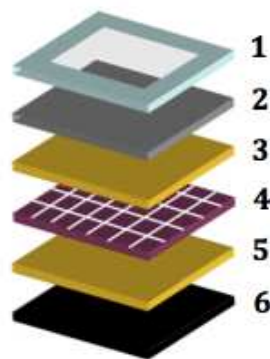


Figura 3.6 – Representação esquemática da estrutura de um módulo fotovoltaico de silício cristalino

A tabela 3.1 descreve as funções referentes a cada componente que integra um módulo fotovoltaico, enumerados na Figura 3.4.

Tabela 3.1 - Descrição das diferentes funções dos componentes que constituem um módulo fotovoltaico

Componentes		Descrição
1	Caixilho	Alumínio anodizado: Confere rigidez mecânica
2	Vidro	Vidro temperado: Permite a entrada de luz solar e protege as células contra impactos mecânicos
3 e 5	Material de encapsulamento	EVA: Película translúcida e não refletora da radiação solar. Garante também o isolamento elétrico entre as células
4	Células fotovoltaicas	Representam o elemento que converte a luz solar em corrente elétrica
6	Isolante elétrico	Protege a parte posterior do módulo e evita também a entrada de água e gases

As principais características elétricas dos módulos fotovoltaicos são [4]:

- Tensão de circuito aberto (V_{oc}): Máxima tensão que um dispositivo pode entregar sob condições determinadas de radiação e temperatura, correspondendo à circulação de corrente e potência nulas.

- Corrente de curto-circuito (I_{oc}): Máxima corrente que um dispositivo pode entregar sob condições determinadas de radiação e temperatura, correspondendo à tensão e potência nulas.
- Curva característica I x V: É a curva do gráfico das medidas de tensão e corrente de um módulo fotovoltaico, quando existe carga conectada a seus terminais. A curva característica está associada com as mudanças de temperatura e intensidade luminosa, como pode ser visto na Figura 3.7
- Ponto de máxima potência: É o ponto da curva I x V onde o produto entre as duas grandezas assume seu maior valor. Neste ponto, a tensão é definida como Tensão de Máxima Potência (V_{mp}) e a corrente é definida como Corrente de Máxima Potência (I_{mp}).

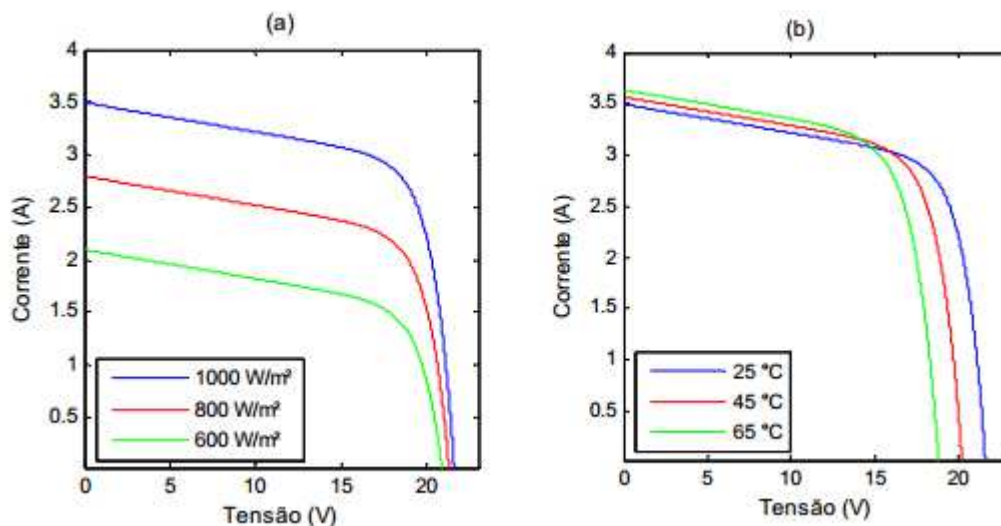


Figura 3.7 - Curvas Características do módulo fotovoltaico: (a) Influência da radiação na curva característica; (b) Influência da temperatura na curva característica.

3.2.2. Associação em Paralelo

Ao conectar as células em paralelo, somam-se as correntes de cada módulo e a tensão do módulo é exatamente a tensão da célula. A conexão (Figura 3.8) consiste em ligar os terminais positivos juntos e os terminais negativos também juntos. É indicada, por exemplo, em sistemas autônomos, quando se pretende obter correntes mais elevadas e manter o nível da tensão estipulada do módulo.

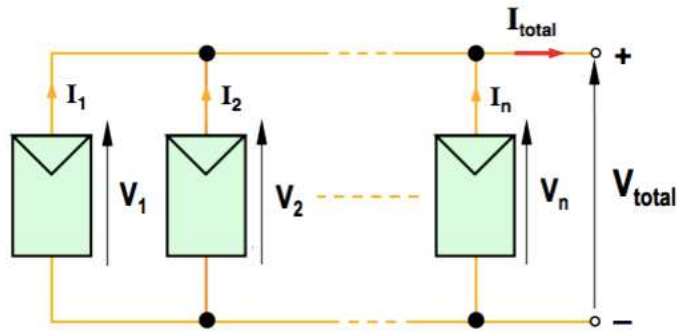


Figura 3.8 – Conjunto de células fotovoltaicas agrupadas em paralelo

É importante ressaltar que na associação de módulos fotovoltaicos devem ser utilizados módulos com a mesma especificação, de forma a minimizar as perdas de potência no sistema. Tomando tal fato como base, podemos escrever:

$$I_1 = I_2 = \dots = I_n = I \rightarrow I_{Total} = I_1 + I_2 + \dots + I_n = n \cdot I$$

$$V_{Total} = V = V_1 = V_2 = \dots = V_n$$

A Figura 3.9 corresponde à representação gráfica da curva característica I x V referente à associação em paralelo de três módulos fotovoltaicos (*Shell SM 100-12*) em condições *STC*.

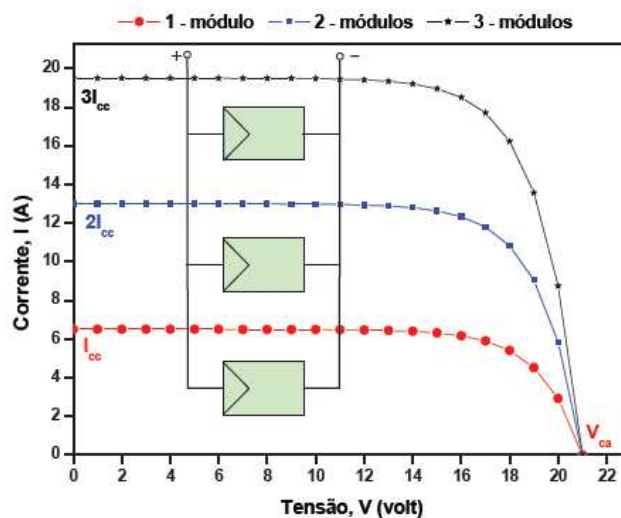


Figura 3.9 - Representação das curvas I xV referentes à associação em paralelo de três módulos fotovoltaicos

3.2.3. Associação em Série

Ao conectar as células em série, somam-se as tensões de cada módulo e a corrente não é afetada. A conexão (Figura 3.10) é feita de um terminal positivo de um módulo a um terminal negativo de outro. É indicada quando se deseja obter tensões elevadas, mantendo a corrente estipulada do módulo.

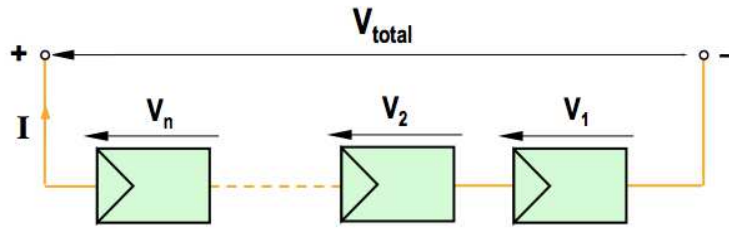


Figura 3.10 – Conjunto de células fotovoltaicas agrupadas em série

De acordo com a Figura 3.10, pode-se escrever:

$$V_1 = V_2 = \dots = V_n = V \rightarrow V_{Total} = V_1 + V_2 + \dots + V_n = n \cdot V$$

$$I_1 = I_2 = \dots = I_n = I$$

A Figura 3.11 corresponde à representação gráfica da curva característica I x V referente à associação em série de três módulos fotovoltaicos (*Shell SM 100-12*) em condições *STC*.

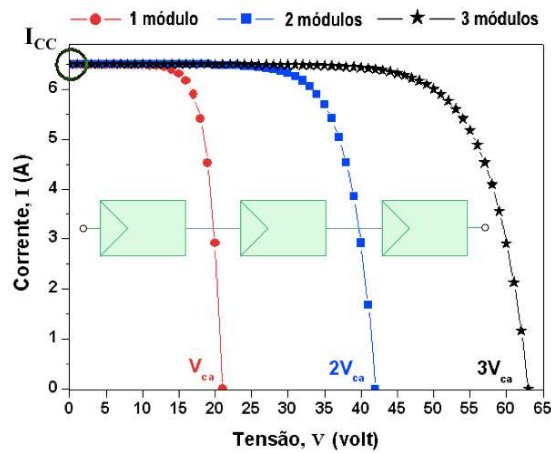


Figura 3.11 - Representação das curvas I x V referentes à associação em série de três módulos fotovoltaicos

3.2.4. Associação Mista

Nos sistemas fotovoltaicos, em especial àqueles conectados à rede elétrica, é comum realizar a associação de várias fileiras (módulos conectados em série) ligadas em paralelo. A Figura 3.12 representa uma associação mista de $n \times m$ módulos fotovoltaicos, onde n é o número de módulos associados em paralelo e m , o número de módulos associados em série.

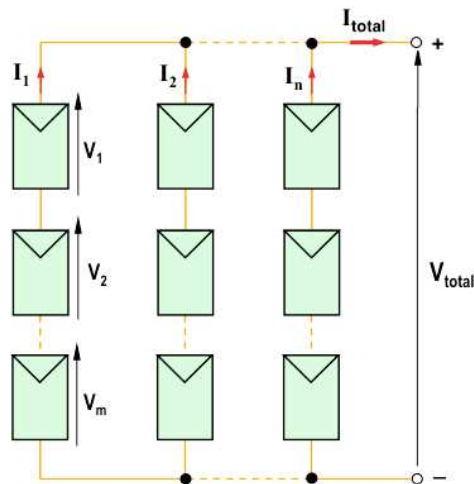


Figura 3.12 – Conjunto de células fotovoltaicas com associação mista

Na associação mista, consegue-se obter valores elevados tanto de corrente quanto de tensão. Se o sistema é composto por módulos de igual especificação, a corrente I que atravessa cada fileira é igual. Assim:

$$I_1 = I_2 = \dots = I_n$$

A queda de tensão V que ocorre em cada módulo que integra uma determinada fileira também é igual. Deste modo pode-se escrever a relação seguinte:

$$V = V_1 = V_2 = \dots = V_m$$

Logo, a corrente total e a tensão total podem ser descritas por:

$$I = I_1 + I_2 + \dots + I_n \rightarrow I_{Total} = n \cdot I$$

$$V = V_1 + V_2 + \dots + V_n \rightarrow V_{Total} = m \cdot V$$

A Figura 3.13 é a representação gráfica da curva característica $I \times V$ referente à associação mista de três módulos fotovoltaicos (*Shell SM 100-12*) em condições *STC*.

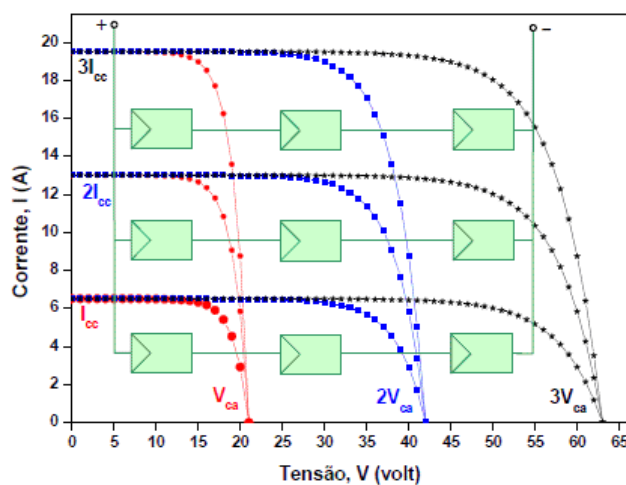


Figura 3.13 - Representação das curvas $I \times V$ referentes à associação mista de três módulos

3.3. Baterias

As baterias são responsáveis pelo armazenamento de energia nos sistemas fotovoltaicos. Elas acumulam a energia que é produzida durante as horas de luminosidade para poder ser utilizada quando os painéis não são capazes de produzir quantidade suficiente de energia, ou seja, no período da noite ou em dias de mau tempo.

A forma mais simples em que se apresenta uma bateria é uma única célula, chamada “célula eletroquímica”. Também pode haver baterias compostas por um arranjo elétrico de diversas células. Existem dois tipos principais de células:

- Células Primárias: Utilizadas nas chamadas baterias não-recarregáveis, são indicadas como fontes de energia de baixa potência, como relógios de pulso e alguns aparelhos portáteis. Quando se descarregam por completo, terminam sua vida útil;
- Células Secundárias: Utilizadas nas baterias recarregáveis, são indicadas para aplicações por longos períodos, como em sistemas fotovoltaicos. Com o auxílio de uma fonte de tensão ou corrente, podem ser reutilizadas mesmo após ter sido completamente descarregadas. São conhecidas como acumuladores ou baterias de armazenamento.

3.3.1. Tipos de Baterias Secundárias

Entre os diversos tipos de baterias secundárias, em sistemas fotovoltaicos, destacam-se as de chumbo ácido e as de níquel-cádmio. Também há algumas aplicações utilizando baterias de lítio.

3.3.1.1. Baterias Chumbo-Ácido

São as mais utilizadas em sistemas fotovoltaicos devido ao seu baixo custo e nível de desempenho. Nesse tipo de baterias os eletrodos são constituídos por placas de chumbo imersas num eletrólito ácido, em geral, o ácido sulfúrico [17].

Em geral, baterias chumbo-ácido devem ser carregadas com correntes baixas, o que conduz a um tempo de carga elevado. Por serem muito sensíveis a sobrecarga, deve-se evitar a ocorrência das mesmas durante o processo de carga. Além disso, podem ter a recarga comprometida caso sofra descarga total.

Esse tipo de bateria é sensível a variações de temperatura: altas temperaturas aumentam a capacidade e diminuem o tempo de vida útil; baixas temperaturas diminuem a capacidade.

Podem ser separadas em dois grupos:

- Baterias chumbo-ácido ventiladas ou abertas (VLA): O eletrólito dessas baterias encontra-se no estado líquido, em solução aquosa. Necessita de reposição periódica do nível de água, já que durante o funcionamento acontece a eletrólise da água, fazendo com o que o oxigênio e o hidrogênio sejam libertados no estado gasoso;
- Baterias chumbo-ácido reguladas por válvula (VLRA): Apesar de serem seladas, possuem válvulas que permitem a saída de gases quando a pressão no interior da bateria não está adequada. Dessa forma, permitem a recombinação dos gases, reduzindo as perdas de água, não precisando assim, de manutenção periódica. Por outro lado, nessas baterias é excessiva a sobrecarga e a perda de eletrólito.

3.3.1.2. Baterias Níquel-Cádmio

São baterias constituídas basicamente por um anodo de hidróxido de níquel, um catodo de cádmio e um eletrólito alcalino, tipicamente hidróxido de potássio [17]. As reações de oxidação-redução ocorrem apenas entre os eletrodos, o que anula a ocorrência de sulfatação (formação de cristais de sulfato de chumbo nas placas das células, que reduz permanentemente a capacidade das mesmas).

Quando comparadas às baterias chumbo-ácido são atrativas devido ao seu maior tempo de vida útil, necessidade de pouca manutenção e maior resistência a variações de temperatura e sobrecarga.

Como desvantagens, apresentam custo mais elevado e a existência do chamado *efeito de memória*, que consiste na obrigação de descarregar totalmente a bateria para que não a vicie. Isso acontece porque ao ser usado, este tipo de bateria perde capacidade de armazenamento de energia. Por exemplo, se uma bateria é descarregada até 20 por cento de armazenamento de energia e é carregada, fica registrado como necessário carregar os restantes 80 por cento. Em ocasiões posteriores, serão carregados estes mesmos 80 por cento, mesmo que a bateria esteja completamente descarregada. A repetição contínua deste ciclo faz com que a bateria perca a capacidade de armazenamento.

3.3.1.3. Baterias de Lítio

As baterias de lítio têm anodos de lítio metálico. Armazenam o triplo de energia de uma bateria níquel-cádmio e não apresentam efeito memória.

Podem fornecer correntes extremamente altas e podem descarregar muito rapidamente se forem colocadas em curto-circuito. Embora elas sejam muito úteis em aplicações onde altas correntes sejam requeridas, uma rápida descarga de uma bateria de lítio pode resultar em sobreaquecimento, ruptura e até explosão. As baterias comerciais geralmente incorporam proteções contra sobrecorrentes e proteções térmicas para evitar essas explosões.

As baterias de lítio ainda são pouco utilizadas no setor fotovoltaico devido ao seu alto custo e por serem muito sensíveis a altas temperaturas.

3.3.2. Características das Baterias Secundárias

Quando se deseja dimensionar um sistema utilizando baterias é necessário analisar suas características com o objetivo de selecionar a mais adequada para atender as especificações do sistema. As principais características que devem ser analisadas são:

- Capacidade: É normalmente expressa em ampère-hora (Ah) e representa o valor teórico de corrente que a bateria é capaz de fornecer durante uma hora de funcionamento a 25°C;
- Tempo de descarga: É o tempo que corresponde à duração do processo de descarga da bateria;
- Energia Específica: Quantidade total de energia que uma bateria pode fornecer por unidade de massa para uma dada taxa de descarga;
- Densidade Energética: Quantidade de energia que uma bateria é capaz de fornecer por unidade de volume, para uma taxa de descarga;
- Ciclos de vida útil: Representa o número de vezes que uma bateria pode realizar a sequência carga-descarga até uma determinada profundidade de descarga;
- Taxa de auto-descarga: Valor da corrente, durante o processo de descarga da bateria, normalizada pela capacidade nominal da bateria;

- Profundidade de descarga: Também conhecido como DOD (*Depth of Discharge*). Indica, em percentagem da capacidade nominal da bateria, quanto de carga é retirada desta num ciclo típico de funcionamento. No caso de baterias chumbo-ácido, quanto maior for a profundidade de descarga, menor é o número de ciclos de vida útil.

3.3.3. Métodos de Carga

Existem diversas maneiras de carregar baterias secundárias, que variam quanto à simplicidade de implementação, princípio de funcionamento e até quanto à eficácia. O melhor método deve ser escolhido de acordo com o tipo de bateria utilizada.

3.3.3.1. Corrente Constante

É o método de mais fácil implementação, conduzindo a circuitos de cargas simples e de baixo custo.

A dificuldade de utilização se dá na escolha do nível de corrente. Se por um lado a utilização de correntes elevadas é prejudicial quando se pretende carregar baterias sensíveis à sobrecarga, como é o caso das baterias chumbo-ácido, por outro lado, a utilização de correntes baixas conduz a tempos de carga elevados que podem ser inviáveis, por exemplo, no caso de sistemas fotovoltaicos com ciclo de descarga diário.

Este método só é indicado para baterias pouco sensíveis a sobrecarga como as níquel-cádmio, uma vez que suportam também a utilização de correntes elevadas na sua carga.

3.3.3.2. Tensão Constante

Neste método, a tensão permanece constante, mas a corrente de carga é elevada no início do processo e vai diminuindo até valores muito baixos. Por esse motivo a finalização da carga é lenta.

O valor da tensão a ser aplicada, deve ser escolhido de forma cuidadosa, pois elevadas tensões pode levar à sobrecarga no final do processo, desencadeando um processo de aquecimento em cascata que leva à destruição da bateria.

3.3.3.3. Regulação Automática

É o mais utilizado atualmente, permitindo a redução do tempo de carga e da ocorrência de sobrecarga. Consiste na modificação de um dos métodos citados anteriormente ou numa combinação dos dois métodos em diferentes etapas do processo de carga.

3.4. Reguladores de Carga

Os reguladores (ou controladores) de carga têm a função de assegurar o correto funcionamento das baterias utilizadas nos sistemas de armazenamento de energia. Monitorando o estado da carga das baterias, e assim, controlando a tensão durante o processo de carga, os reguladores evitam que ocorram situações de sobrecarga. Durante a descarga, tem a função de desligar as cargas sempre que a profundidade máxima de descarga for atingida.

Os controladores de carga são tipicamente baseados na eletrônica de potência, e podem assumir diferentes configurações. Os principais tipos são os reguladores em série e em paralelo. Recebem essa classificação de acordo com a maneira como desconectam os módulos fotovoltaicos das baterias quando estas atingem a plena carga.

3.4.1. Reguladores Série

São constituídos basicamente por interruptores eletrônicos e um dispositivo de controle capaz de efetuar a gestão do processo de carga e descarga das baterias através da análise dos valores de tensão.

Como pode ser observado na Figura 3.14, nos reguladores série, uma chave logo após os painéis fotovoltaicos permite desconectar o sistema quando as baterias estão plenamente carregadas e desligar as cargas das baterias quando, durante o processo de descarga, é atingida a profundidade máxima de descarga [18].

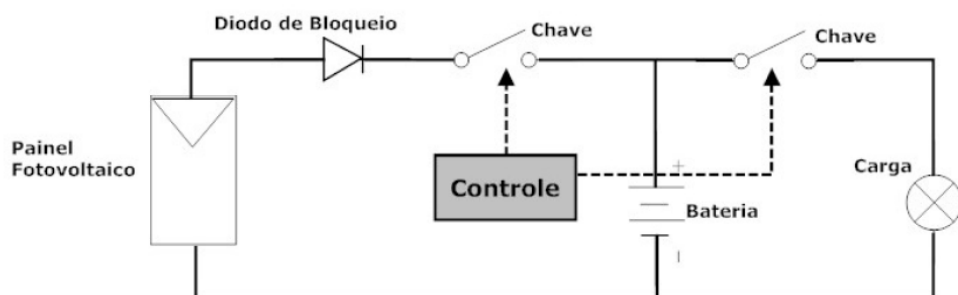


Figura 3.14 – Circuito básico de um controlador de carga série

O diodo é necessário para bloquear a corrente reversa da bateria para o curto-circuito gerado, tanto em situações de sobrecarga quanto no período da noite.

3.4.2. Reguladores Paralelo

Possui a constituição semelhante à dos reguladores tipo série, mas com a diferença de um dos interruptores eletrônicos ser colocado em paralelo com o módulo fotovoltaico. Além disso, necessita de um diodo conectado em série entre o elemento de chaveamento e a bateria.

Os reguladores tipo paralelo possuem uma chave na entrada dos geradores fotovoltaicos, assim quando a tensão na bateria atinge sua tensão máxima, os painéis são curto-circuitados, como mostrado na Figura 3.15. Esse método consome menos energia e é mais eficiente com as baterias, sendo o mais utilizado. No período noturno, o módulo é mantido curto-circuitado para evitar que o mesmo funcione como carga

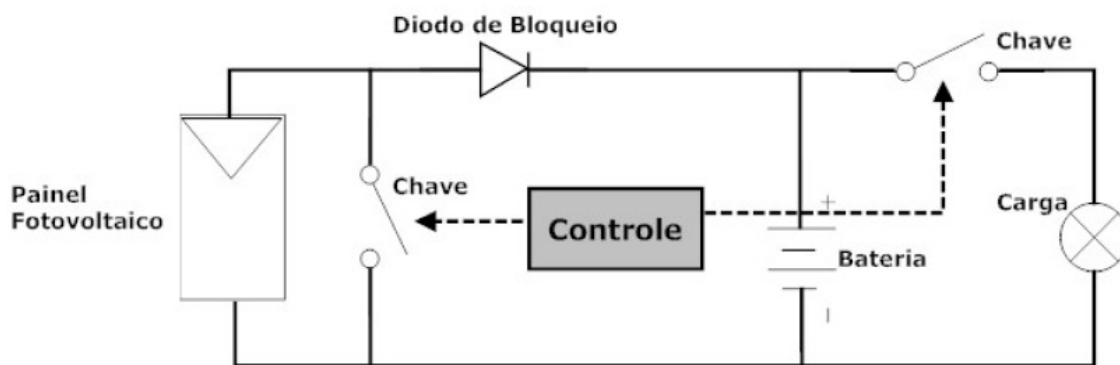


Figura 3.15 – Circuito básico de um controlador de carga paralelo

Assim como nos reguladores série, o diodo é necessário para bloquear a corrente reversa da bateria para o curto-circuito gerado.

3.4.3. Reguladores MPPT

Ao longo do dia um arranjo fotovoltaico está submetido a diferentes níveis de radiação solar e temperatura, o que resulta em várias curvas características $I \times V$, fazendo com o que o ponto de máxima potência se desloque durante o dia. A função de um regulador MPPT (Maximum Power Point Tracker) é pesquisar o ponto em que a potência é máxima e garantir que o sistema opere em torno deste.

Neste tipo de regulador, um conversor CC-CC é conectado logo na saída dos painéis fotovoltaicos, e através de um sistema de rastreamento, é determinado o ponto ótimo de operação, sendo a saída do conversor ajustada para a tensão de carga da bateria, como mostrado na Figura 3.16.

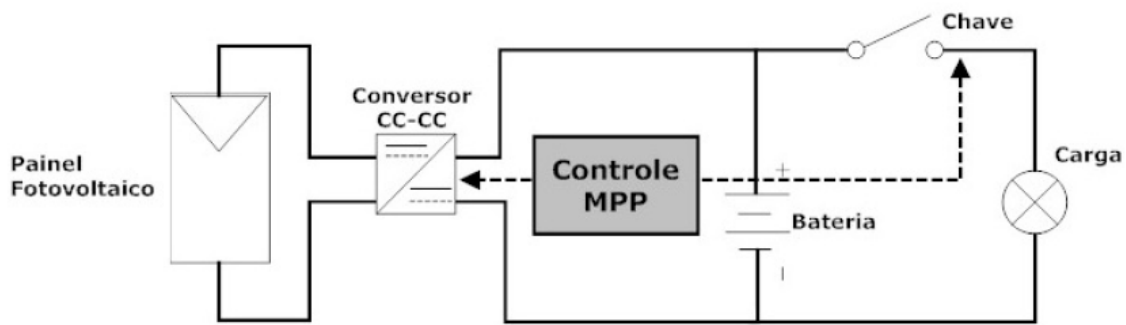


Figura 3.16 – Funcionamento de um regulador MPPT

Devido a sua maior complexidade, esses reguladores são bem mais caros e, também devido às perdas do conversor CC-CC, normalmente são adotados apenas para os sistemas com potência instalada superior a 500 W.

3.5. Inversores

Inversores, também conhecidos como conversores CC/CA, são dispositivos responsáveis por converter o sinal elétrico em corrente contínua do gerador fotovoltaico em um sinal elétrico em corrente alternada e ajustá-lo para a frequência e o nível de tensão da rede a que está conectado.

Este dispositivo eletrônico é composto por interruptores semicondutores de potência. A Figura 3.17 mostra a topologia básica de um inversor trifásico, fonte de tensão, composto por chaves IGBT que permitem o controle dos instantes de início de condução e corte através de sinais eletrônicos aplicados em seus terminais de gatilho.

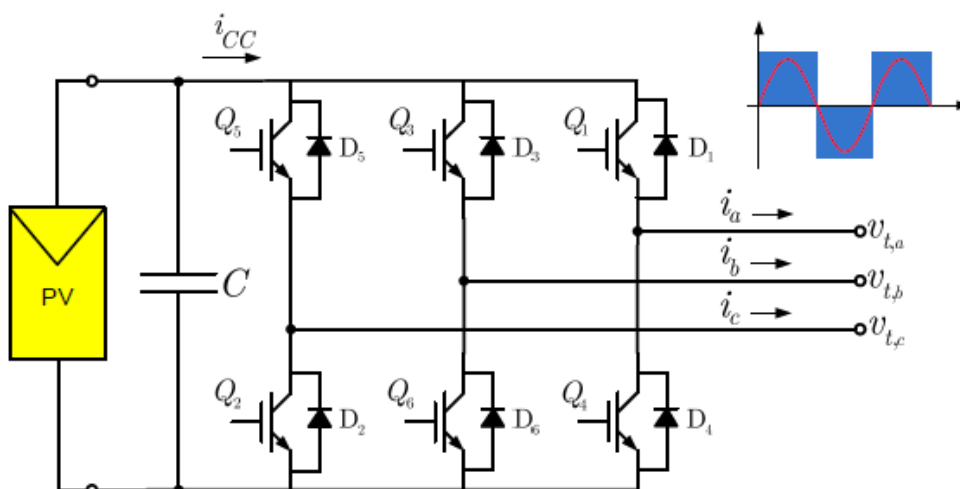


Figura 3.17 - Topologia básica de um conversor CC-CA trifásico com uma célula solar fotovoltaica conectada em seus terminais CC.

Como características gerais, um inversor deve dissipar o mínimo de potência, evitando as perdas e deve produzir uma tensão com baixo teor de harmônicos e em sincronismo com a rede elétrica, se o sistema fotovoltaico estiver interligado à rede [4].

Os inversores mais complexos são do tipo PWM (Pulse-Width-Modulated) e possuem um chaveamento com larguras de pulso variáveis, o que permite uma tensão de saída bastante próxima de uma senoide, com um baixo nível de harmônicos. Nos modelos mais simples, como os de onda quadrada ou retangular, os pulsos possuem sempre a mesma largura.

A conexão de sistemas fotovoltaicos à rede elétrica dá origem aos chamados sistemas de distribuição ativos, que faz com que o fluxo de potência se torne bidirecional. Assim, apesar de ter um aumento na oferta de energia, as instabilidades no sistema elétrico também aumentam consideravelmente. Dessa maneira, os algoritmos de controle empregados aos inversores são de extrema importância na operação correta do sistema fotovoltaico.

Outra importante função dos inversores é em relação à operação de sistemas de geração dispersos e a possibilidade de ocorrência de ilhamentos não intencionais. Um ilhamento acontece quando parte de um sistema elétrico de abastecimento de energia, que contém cargas e sistemas de geração, é isolada do restante do sistema após a detecção de um defeito na rede elétrica básica, e ainda assim, continua operando.

Um ilhamento pode causar diversos problemas relacionados ao religamento e a segurança. Mesmo que o sistema de geração seja capaz de alimentar parte do sistema, sem interferir na qualidade da energia oferecida, ele tem que ter sua operação cessada. Assim, algoritmos anti-ilhamento são de extrema importância para a operação segura do sistema fotovoltaico e devem ser incorporados ao sistema de controle do inversor.

CAPÍTULO 4

Tecnologia da Energia Fotovoltaica

Neste capítulo são apresentadas as principais tecnologias disponíveis no mercado, divididas conforme a matéria-prima da qual são fabricadas as células fotovoltaicas.

4.1. Introdução

O Silício, seja na sua forma monocristalina (m-Si) ou na forma policristalina (p-Si), ainda hoje é a matéria-prima mais utilizada para a produção das células, porém, outros elementos podem ser empregados para o mesmo fim.

4.2. Silício Cristalino (c-Si)

Dois características fizeram com que o Silício se consolidasse no mercado fotovoltaico internacional: sua robustez e confiabilidade. Apesar do custo de produção desses painéis solares ainda ser elevado, o c-Si continua sendo o mais empregado em tecnologias fotovoltaicas para aplicações terrestres, abrangendo cerca de 90% do mercado de células fotoelétricas.

O silício apresenta-se na natureza sob a forma de dióxido de silício SiO_2 , o constituinte principal do quartzo mineral muito abundante na areia e no granito.



Figura 4.1 - Materiais onde existe silício: (a) feldspato; (b) granito; (c) areia; (d) argila; (e) quartzo.

A seguir, são apresentados em detalhes, os dois tipos existentes desse tipo de célula.

4.2.1. Silício Monocristalino (m-Si)

4.2.1.1. Matéria Prima

A obtenção do silício monocristalino começa com a extração do cristal de dióxido de silício. Este processo atinge um grau de pureza entre 98 e 99%, o que é razoavelmente eficiente sob o ponto de vista energético. Porém, para funcionar como célula fotovoltaica, o silício necessita de outros dispositivos semicondutores de forma a elevar seu grau de pureza, tornar a estrutura do material monocristalina (Figura 4.2) e diminuir a densidade de defeitos na rede.

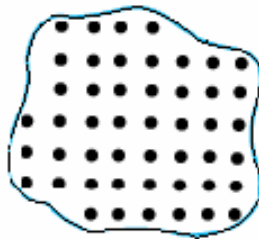


Figura 4.2 - Característica dos cristais da estrutura monocristalina

O processo mais utilizado para atingir as qualificações desejadas é o *processo Czochralski*, que consiste em fundir o silício com uma pequena quantidade de dopante, normalmente o boro, que é do tipo p. O processo é realizado em um recipiente, como o da Figura 4.3. Derrete-se um cristal já com alta pureza em um recipiente de quartzo. Em seguida, um pequeno pedaço de cristal monocristalino, denominado “semente”, é inserido no líquido e, muito lentamente, inicia-se a cristalização ao redor da semente. Ao retirar a peça aos poucos da mistura, um cristal maior haverá se formado ao redor daquele que foi previamente inserido.

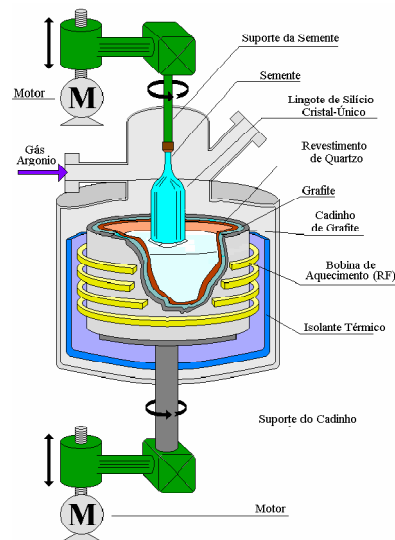


Figura 4.3 - Ilustração do Método Czochralski

O silício fundido possui elevado grau de pureza (entre 99,99% a 99,9999%). Com um fragmento do cristal devidamente orientado e sob rígido controle de temperatura, extrai-se do material fundido um grande cilindro (lingote) de silício monocristalino levemente dopado, que é cortado em fatias finas (*wafers*), de aproximadamente 300 µm, como pode ser visto na Figura 4.4. A Tabela 4.1 resume o processo de obtenção da estrutura monocristalina.



Figura 4.4 - Lingotes e wafers de silício cristalino

Tabela 4.1 - Resumo das etapas de purificação do Silício

Etapa	Reação	Processo
Redução do quartzo em p-Si grau metalúrgico	$\text{SiO}_2 + 2\text{C} \rightarrow \text{Si} + 2\text{CO}$	Aquecimento em forno de arco elétrico mantido a 1700 °C. O produto desta redução é o Silício líquido que se solidifica em estrutura policristalina.
Conversão do Silício grau metalúrgico em composto de SiHCl_3	$\text{Si} + 3\text{HCl}_{(\text{gás})} \rightarrow \text{SiHCl}_3_{(\text{gás})} + \text{H}_{2(\text{gás})}$	Tritura-se o Silício grau metalúrgico sólido e faz-se com que ele reaja com ácido clorídrico, com auxílio de um catalisador, para acelerar a reação
Purificação do SiHCl_3		Destilação fracionada, no nível de grau eletrônico de pureza
Conversão do SiHCl_3 purificado a p-Si sólido	$\text{SiHCl}_3_{(\text{gás})} + \text{H}_{2(\text{gás})} \rightarrow \text{Si}_{(\text{sólido})} + 3\text{HCl}_{(\text{gás})}$	Deposição química em fase vapor. O vapor de SiHCl_3 é injetado com gás H_2 na câmara de um reator, contendo uma barra de Si aquecido a aproximadamente 1000 °C.
Obtenção do p-Si grau solar		
Obtenção do c-Si grau eletrônico		Processo Czochralski (CZ)

Após o corte e limpeza de impurezas das fatias, devem-se introduzir impurezas do tipo n de forma a obter a junção. Este processo é feito através da difusão controlada onde as fatias de silício são expostas a vapor de fósforo em um forno onde a temperatura varia entre 800 a 1000° C.

A Figura 4.5 mostra fotos das etapas dos processos de fabricação do silício cristalino.

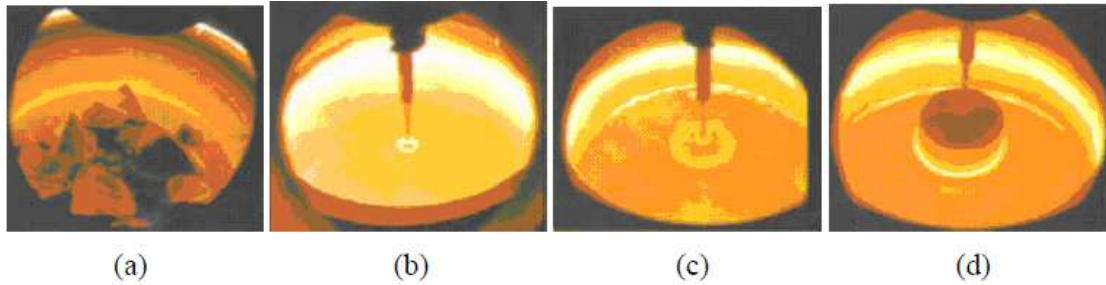


Figura 4.5 - Fotos do processo de fabricação do Silício Cristalino. (a) Cadinho com matéria prima. (b) Imersão da semente para orientação do cristal. (c) Repuxamento do lingote de cristal. (d) Formação do Cristal de Silício

4.2.1.2. Células Fotovoltaicas de m-Si

As células de silício monocristalino (Figura 4.6) são as com maiores eficiências em aplicações comerciais e também a mais antiga tecnologia fotovoltaica.



Figura 4.6–Célula de Silício Monocristalino

Dentre as células fotovoltaicas que utilizam o silício como material base, as monocristalinas são, em geral, as que apresentam as maiores eficiências. O recorde de eficiência para células de m-Si individuais em laboratório é atualmente de 24%, bastante próximo do máximo rendimento teórico. Os melhores painéis disponíveis no mercado, porém, têm eficiência ao redor de 15% (diferenças entre a eficiência da melhor célula de laboratório e painéis comerciais incluem perdas de interconexão entre células no painel, área ativa do painel e rendimento do processo produtivo).

A Figura 4.7 mostra células solares de m-Si além de uma amostra do silício metalúrgico e de silício purificado.



Figura 4.7 - Na mão do pesquisador uma amostra de silício metalúrgico, ainda impuro. Sobre a mesa, uma lâmina de silício purificado e as células solares fabricadas com ele [18]

4.2.2. Silício Policristalino (p-Si)

4.2.2.1. Matéria Prima

As técnicas de fabricação são basicamente as mesmas do m-Si (vide Tabela 4.2). A diferença é que ao invés de formar um único grande cristal a partir do silício fundido, o material é solidificado em forma de um bloco composto de muitos pequenos cristais (Figura 4.8). A partir deste bloco são obtidas fatias e fabricadas as células. Podem ser preparadas pelo corte de um lingote, de fitas ou depositando um filme num substrato, tanto por transporte de vapor como por imersão.

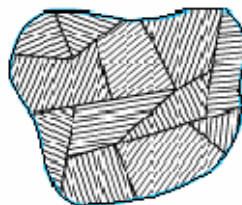


Figura 4.8- Característica dos cristais de estrutura policristalina

Tabela 4.2 - Resumo das etapas de purificação do p-Si

Etapa	Processo
1	Redução do quartzo em Silício grau metalúrgico
2	Conversão do Silício grau metalúrgico em composto de SiHCl_3
3	Purificação do SiHCl_3 por processo de destilação fracionada, a nível de pureza grau eletrônico.
4	Conversão do SiHCl_3 em p-Si por processo de deposição química em fase vapor

As Figuras 4.9 e 4.10 mostram etapas da fabricação do silício policristalino.

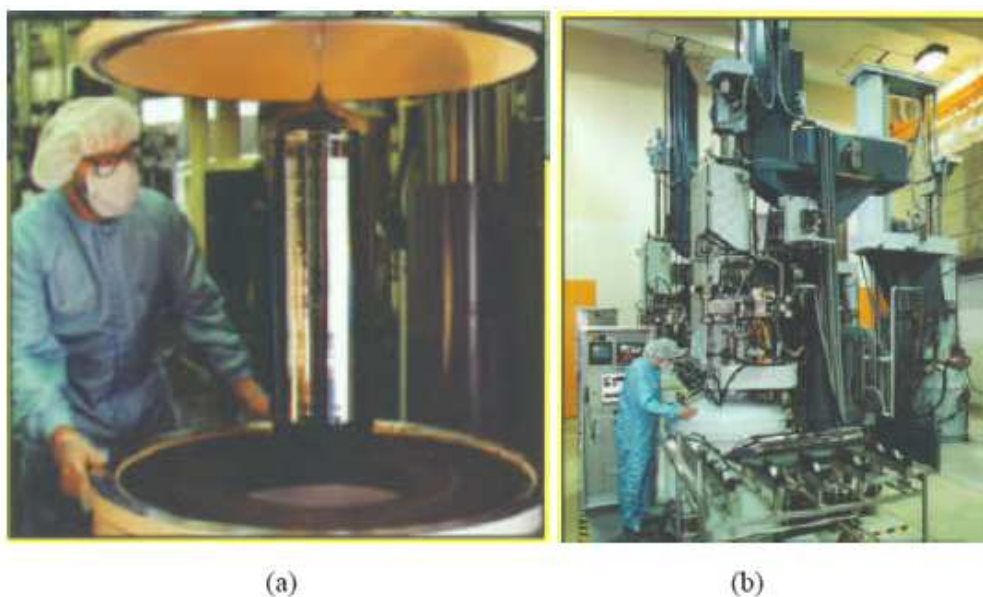


Figura 4.9 - Foto do (a) lingote de silício e (b) maquinário de obtenção do mesmo



Figura 4.10 – (a) Blocos de silício policristalino fundidos; (b) Varetas de silício policristalino serrado

4.2.2.2. Células Fotovoltaicas de p-Si

As células de silício policristalino (Figura 4.11) possuem menor custo de produção e apresentam mais baixa eficiência de conversão que as células de m-Si, já que o processo de preparação das células é menos rigoroso, e conseqüentemente a perfeição cristalina é menor.



Figura 4.11–Célula de Silício Policristalino

Cada técnica produz cristais com características específicas, incluindo tamanho, morfologia e concentração de impurezas. Ao longo dos anos, o processo de fabricação tem alcançado eficiência máxima de 12,5% em escalas industriais.

4.3. Silício Amorfo (a-Si)

4.3.1. Matéria Prima

O silício amorfo foi a primeira tecnologia fotovoltaica em filmes finos. Sua utilização tem mostrado grandes vantagens nas propriedades elétricas e no processo de fabricação. A palavra “amorfo” significa falta de estrutura, ou seja, os átomos da estrutura do Silício Amorfo apresenta um alto grau de desordem. A Figura 4.12 mostra o modelo da estrutura do a-Si.

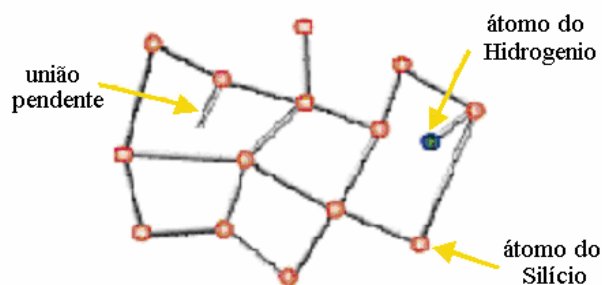


Figura 4.12 - Modelo da estrutura do Silício Amorfo

É produzido em fornos de ambiente a vácuo, sob a ação do campo elétrico criado pela alta frequência, onde este é purificado e recebe de forma controlada a introdução de impurezas de elementos necessários (Boro, Fósforo, etc.). Sua estrutura contém um grande número de defeitos, não tomando forma cristalina, pois seus átomos não fazem ligações covalentes. A alteração de sua estrutura cristalina pela dopagem de átomos nas ligações falhas permite a circulação de portadores de carga através do material, tornando-o aplicável à utilização em dispositivos eletroeletrônicos.

4.3.2. Células Fotovoltaicas de a-Si

A produção de células de silício amorfo (Figura 4.13) ocorre a temperaturas relativamente baixas, consumindo pouca energia durante o processo. Além disso, a estrutura de películas delgadas possibilita que o silício seja depositado sobre substratos de baixo custo, como vidro e aço inox, aumentando a versatilidade dos painéis solares, que com essa tecnologia podem ser mais flexíveis, mais leves, semitransparentes, com superfícies curvas, mais resistentes, etc.



Figura 4.13–Célula de Silício Amorfo

Por sua aparência estética mais atraente, o a-Si tem encontrado aplicações arquitetônicas diversas, substituindo materiais de cobertura de telhados (Figura 4.14) e fachadas na construção civil.

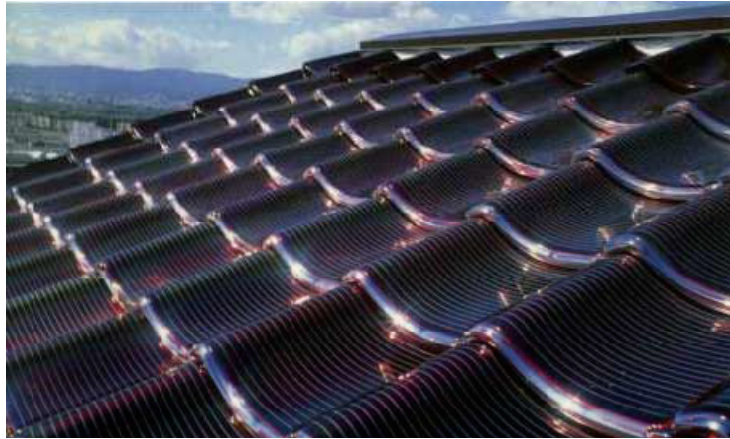


Figura 4.14 – Painéis solares fotovoltaicos fabricados diretamente sobre telhas de vidro curvas

Comparativamente, a cadeia produtiva da célula com filme fino envolve um menor número de etapas e linhas de produção, o que explica o seu custo reduzido. De forma geral, o processo permite que todas as operações sejam realizadas em uma única planta. A Figura 4.15 seguinte compara os processos.

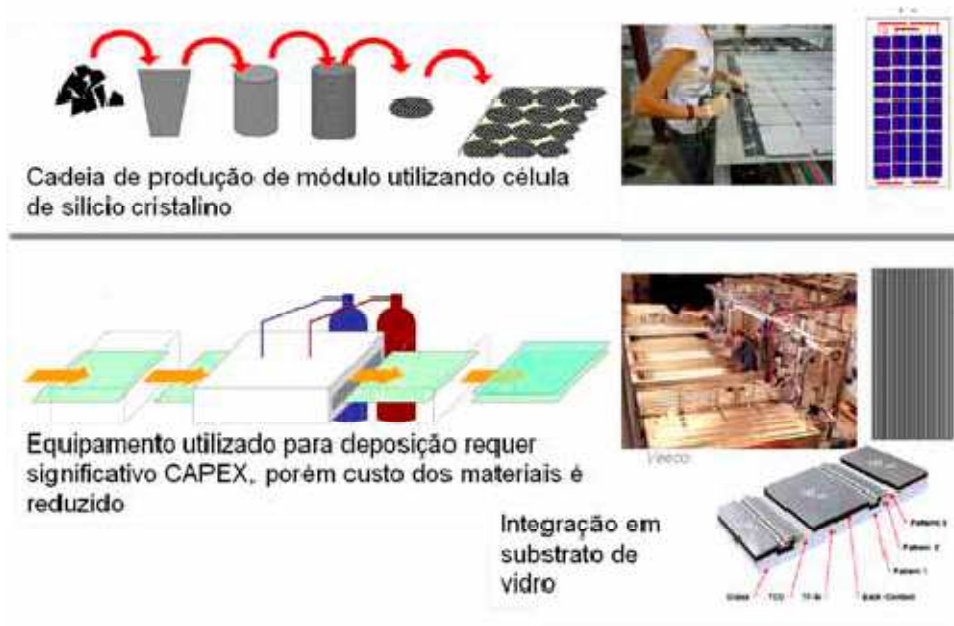


Fig. 4.15 - Diferenças nos processo de fabricação de módulos utilizando silício cristalino (na parte superior) e filme fino, com deposição em substrato de vidro (parte inferior)

Porém, mesmo apresentando um custo reduzido na produção, o uso de silício amorfo apresenta duas desvantagens. A primeira é a baixa eficiência de conversão comparada às células de silício cristalino. O recorde de eficiência em células de a-Si em laboratório é inferior a 15%, e os melhores painéis comerciais estão entre 8 e 9%.

A segunda desvantagem é que as células são afetadas por um processo de degradação logo nos primeiros meses de operação, reduzindo sua eficiência em 15 a 20%, é o chamado

efeito Staebler-Wronski. No entanto, esta diminuição no rendimento é assumida pelo fabricante, que inclui a margem de degradação na especificação do painel. Desta forma, logo que adquirido, um painel solar de a-Si apresenta um desempenho superior ao especificado. Após aproximadamente um ano em operação é que a performance estabiliza nos níveis da garantia do produto.

A Figura 4.16 mostra fotos do interior de uma importante fábrica produtora de a-Si.



Figura 4.16– Fotos do interior da fábrica *China Guangdong PVD Metallizer Co*, produtora de silício amorfo

4.4. Telureto de Cádmio (CdTe)

4.4.1. Matéria Prima

A denominação Telureto de Cádmio é devido à composição do elemento base, o Telúrio, com outros elementos (metal, hidrogênio ou íons similares) que no presente caso, é composto com o Cádmio. O Telúrio é um elemento encontrado na forma nativa de telureto e ainda combinado com alguns metais constituindo alguns minérios como o altaita, pedzita, tetradimita, etc. O telúrio é um elemento semimetal (metalóide, semicondutor do tipo p), frágil, facilmente pulverizado e relativamente raro. Quando na forma cristalina, apresenta uma coloração branco-prateado e quando na forma pura, um brilho metálico. Compostos a base de Telúrio são considerados tóxicos e devem ser manuseados com cuidado, pois quando expostos à atmosfera, provocam ao ser humano o sintoma de secura na boca e se intoxicação mais elevada, dor de cabeça, vertigens e sonolência.

O Cádmio (Cd) é um elemento obtido como subproduto da obtenção do Zinco (Zn), separado desse pela precipitação com sulfetos ou mediante destilação. Geralmente o Zinco e o

Cádmio estão nos minerais na forma de sulfetos que queimados originam uma mistura de óxidos e sulfatos. É um elemento escasso e encontrado de forma natural na crosta terrestre. É um metal pesado que produz efeitos tóxicos nos organismos vivos, mesmo em concentrações muito pequenas. Tem características de ser metal macio com um brilho branco acinzentado e bom condutor de calor e eletricidade.



Figura 4.17 – Foto do material Telureto de Cádmio

4.4.2. Células Fotovoltaicas de CdTe

O Telureto de Cádmio (Figura 4.18) também utiliza a tecnologia em filmes finos, e é considerado o mais recente competidor do c-Si e a-Si no mercado fotovoltaico, abrangendo cerca de 1,1%. Vem sendo empregado em painéis solares de grandes áreas há pouco mais de uma década.



Figura 4.18 – Módulo de CdTe

Apresentam um aspecto visual com tonalidade de cor marrom / azul escuro e eficiência de conversão energética com índices maiores que o apresentado pelo Silício Amorfo. Possui elevado índice de absorção à radiação solar, o que o torna ideal às condições de conversão da energia luminosa em energia elétrica.

Assim como o a-Si, apresenta aparência estética mais atrativa que o c-Si e possui custos de produção relativamente baixos. A desvantagem dessa tecnologia está justamente nos elementos envolvidos, pois os níveis de toxicidade e sua baixa abundância são aspectos que devem ser considerados se esta tecnologia atingir quantidades significativas de produção.

As células fotovoltaicas a base de CdTe são formadas pela junção de diferentes materiais (junção pn). Com base nas camadas de Telureto de Cádmio – CdTe (tipo p) e de Sulfureto de Cádmio - CdS (tipo n) é feita a construção da célula. Os elementos utilizados são:

- Vidro: Lâmina de vidro comum, resistente mecanicamente, transparente e barato;
- Óxido condutor transparente: Geralmente Óxido de Estanho (SnO_2) ou Óxido de Estanho e Índio (ITO). Age como contato dianteiro do dispositivo e como camada anti-reflexiva sobre a área de absorção à radiação;
- Sulfato de Cádmio: Material policristalino do tipo n. Também age como camada anti-reflexiva;
- Telureto de Cádmio: Material policristalino do tipo p, com elevado coeficiente de absorção à radiação solar;
- Contato traseiro: Geralmente de Ouro (Au) ou Alumínio (Al). Vem acompanhado de uma camada de Telureto de Zinco (ZnTe).

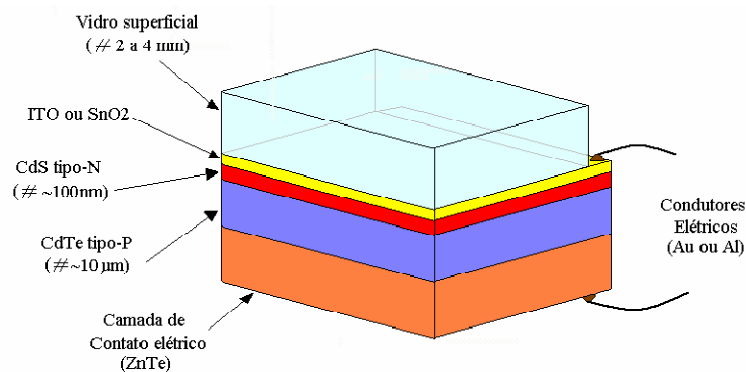


Figura 4.19 - Modelo ilustrativo de construção de uma Célula Fotovoltaica de CdTe

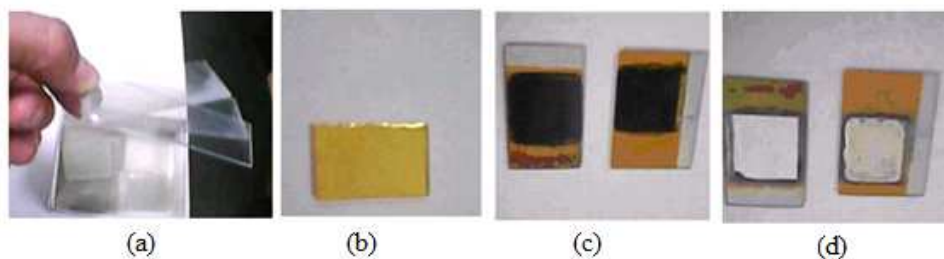


Figura 4.20 – (a) Três filmes de SnO₂ depositados sobre vidro; (b) Filme fino CdS puro depositado sobre vidro; (c) Célula solar CdS/CdTe sem contato elétrico; (d) Célula solar CdS/CdTe com contato elétrico.

O recorde de eficiência em células de CdTe em laboratório está em torno de 16%, e há painéis comerciais que apresentam eficiência entre 7 e 9%.

4. 5. Disseleneto de Cobre e Índio (CIS)

4.5.1. Matéria Prima

O Disseleneto de Cobre e Índio é um material composto predominantemente pelos elementos químicos Cobre (Cu), Índio (I) e Selênio (Se). Seu símbolo químico é CuInSe₂. A forma abreviada CIS compreende as primeiras letras de seus elementos componentes C-Cobre, I-Índio e S-Selênio. Em consequência a estrutura cristalina formada, esse material pertence à família das calcopirites (sulfeto de cobre e ferro, cristalizado no sistema tetragonal). Estes compostos naturais são quimicamente muito estáveis e variando-se as proporções desses elementos, obtêm-se propriedades semicondutoras, que absorvem intensamente a radiação solar.

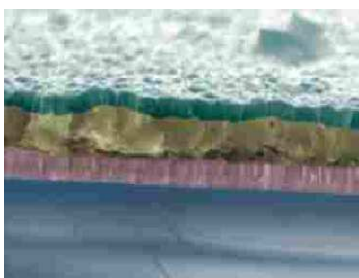


Figura 4.21 - Foto das Camadas de uma Célula Fotovoltaica de CIS

O material é preparado em etapas subsequentes conforme segue: Uma placa de vidro de 2 a 4 mm de espessura é revestida numa das superfícies por uma fina camada de 0,5 m de espessura com o elemento químico Molibdênio (Mo), com o objetivo de camada protetora e também como contato elétrico traseiro (referencial positivo).

Posteriormente, num ambiente a vácuo e em temperatura de 500°C, os elementos Cobre, Índio e Selênio (CuInSe_2) são vaporizados de forma conjunta sobre a superfície revestida com molibdênio, adicionando a este uma película de 2,0 μm de espessura. Este processo é denominado de *Sputtering*. Uma camada de Sulfato de Cádmio (CdS) de 0,05 μm de espessura é adicionada ao material, propiciando a função anti-reflexiva ao material.

Finalmente, uma camada transparente de Óxido de Zinco (ZnO) de 1 μm de espessura é depositada sobre os elementos vaporizados, aumentando a transparência e formando o contato elétrico superior (referencial negativo) da célula fotovoltaica.

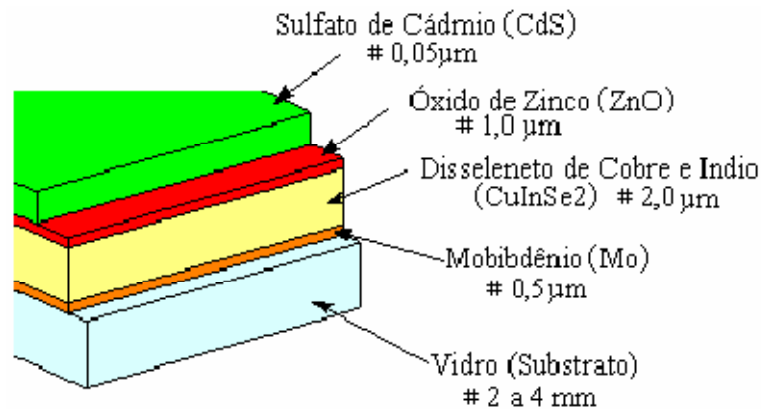


Figura 4.22 - Estrutura de uma célula fotovoltaica CIS

4.5.2. Células Fotovoltaicas de CIS

Células fotovoltaicas baseadas no disseleneto de cobre e índio apresentam eficiência em ambiente laboratorial de até 18%. Em painéis comerciais, a eficiência máxima atingida está entre 9 e 10% .



Figura 4.23 - Célula fotovoltaica manufaturada a base de CIS

Por seu alto potencial de conversão energética, as células de CIS são candidatas a fortes competidoras no mercado fotovoltaico futuramente. Como inconveniente, assim como as células de CdTe , temos a questão da toxicidade dos elementos componentes e da não abundância dos mesmos.

4.6. Arseneto de Gálio (GaAs)

4.6.1. Matéria Prima

O Arseneto de Gálio (GaAs) é um semicondutor composto pela mistura dos elementos: Gálio (Ga) e Arsênio (As). O Gálio (Ga) por sua vez é um subproduto da fusão do Alumínio (Al) com o Zinco (Zn), sendo mais raro que o Ouro (Au). O Arsênio (As) é um material venenoso e não é raro na natureza.

As características que envolvem esse elemento são:

- *Bandgap* na faixa de 1,43 eV;
- Elevado grau de absorção à radiação solar, permitindo que uma camada de apenas alguns microns apresente um elevado grau de rendimento (células a base de silício cristalino necessitam de uma espessura de 100 microns ou mais);
- Ligas metálicas feitas com o GaAs, como o Alumínio (Al), ou Antimônio (Sb), ou o Índio (In) permitem uma alta flexibilidade no desenvolvimento do projeto de células fotovoltaicas, compondo-a por várias camadas e espessuras, pelo controle preciso da quantidade de portadores de carga (elétrons – lacunas) próximos à área de campo elétrico da junção.

4.6.2. Células Fotovoltaicas de GaAs

Elementos fotovoltaicos a base de arseneto de gálio possuem um alto índice de eficiência de conversão energética, alcançando a faixa de 25 a 30% em laboratório. Atualmente é a tecnologia empregada mais eficiente.

Destacam-se no mercado fotovoltaico por sua baixíssima sensibilidade ao calor e por não alterar suas características de condutividade com a elevação da temperatura. Porém, seu custo de fabricação é extremamente alto.



Figura 4.24 - Célula fotovoltaica de Arseneto de Gálio

4.7. Multijunção

4.7.1. Matéria Prima

As células multijunções são superposições de Fosfeto de Gálio e Índio, Arseneto de Gálio e Índio e Germânio. São constituídas de cerca de 30 camadas elementares de ligas semicondutoras, que devem todas apresentar uma alta qualidade cristalina.

Convertem diferentes regiões do espectro solar, visando uma otimização do rendimento.

4.7.2. Células Fotovoltaicas Multijunção

A maior eficiência conseguida nesse tipo de célula alcançou 37,6%. Para o modo fotovoltaico no seu conjunto, um rendimento de 28,5% foi atingido em condições reais. Há uma perspectiva para que rendimentos de 45% para as células e de 35% seja alcançados nos próximos anos.

A Figura 4.25 mostra uma célula fotovoltaica multijunção desenvolvida pelo Instituto Fraunhofer, na Alemanha.

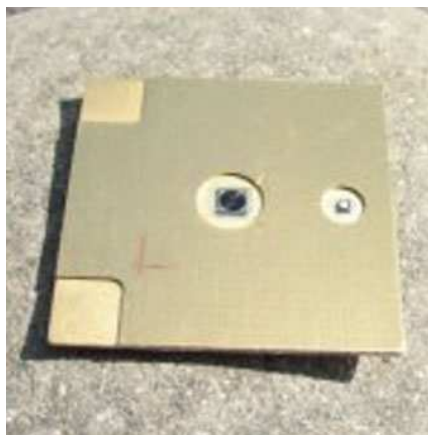


Figura 4.25 - Célula Fotovoltaica Multijunção. [Instituto Fraunhofer (Alemanha)]

4.8. Comparação Entre os Diferentes Tipos de Células Solares

Para os sistemas solares fotovoltaicos com ligação à rede elétrica geralmente são utilizadas as células solares de silício monocristalino ou policristalino. Apesar da menor eficiência do silício policristalino, o mesmo apresenta grande vantagem econômica.

Os módulos de silício amorfo são utilizados, basicamente, em pequenas aplicações. Recentemente, testes referentes à sua estabilidade e ao seu comportamento vêm sendo realizados para que o silício amorfo possa ter maiores aplicações em grandes sistemas.

A eficiência das células é variada, dependendo da estrutura e do material utilizado em sua construção. A Tabela 4.3 relaciona os tipos de células com suas respectivas tecnologia de fabricação e custos, onde se convencionou que + + + + indica alto custo, e + baixo custo relativo.

Tabela 4.3 – Tecnologia das Células Solares

Material	Custo	Tecnologia
Silício monocristalino (m-Si)	+++	Substrato cristalino
Silício policristalino (p-Si)	++	Filme fino
Silício amorfo (a-Si)	+	Filme fino
Arseneto de Gálio (GaAs)	++++	Cristalino
Telureto de Cádmio (CdTe)	++	Filme fino

A maioria dos grandes fabricantes de células fotovoltaicas já abandonou o desenvolvimento de células com base no silício e está investindo nas células com os novos materiais já citados. Os materiais mais promissores são o Disseleneto de Cobre e Índio e o Telureto de Cádmio. Na Tabela 4.4 são apresentados os valores de eficiência para alguns tipos de células fotovoltaicas.

Tabela 4.4 – Eficiência da célula solar de diversos materiais

Material da célula solar	Eficiência da célula		
	Laboratório	Produção	Produção em série
Silício Monocristalino	24%	19%	16%
Silício Policristalino	19%	15%	13%
Silício Amorfo	15%	10%	8%
Disseleneto de Cobre e Índio	18%	14%	10%
Telureto de Cádmio	16%	10%	9%

Com base nos dados de custo dos materiais e processos de manufatura das células/módulos fotovoltaicos, e de sua eficiência funcional de conversão energética, podemos determinar um fator que representará a relação Custo x Benefício de utilização da tecnologia. A tabela 4.5 seguir ilustra a obtenção desse fator.

Tabela 4.5: Relação entre os fatores de Custo e Eficiência Energética

Material	Custo (\$/Wp)	Índice de Eficiência (%)	Fator de relação (Custo x Eficiência)
Silício Monocristalino	0,55	19	2,89
Silício Policristalino	0,55	15	3,67
Silício Amorfo	0,12	10	1,2
Telureto de Cádmio	0,05	10	0,5
Disseleneto de Cobre e Índio	0,04	14	0,28

CAPÍTULO 5

Tecnologias em Desenvolvimento

Neste capítulo são apresentadas algumas tecnologias em desenvolvimento, além de alguns equipamentos, como inversores e baterias que já se encontram no mercado. Também é dada a perspectiva dos mesmos para produção nacional.

5.1. Inversores

Os empresários nacionais deste segmento enfrentam problemas quanto à necessidade de produzir equipamentos que sejam competitivos com os produtos asiáticos. O mais usual no setor é o desenvolvimento de projetos localmente e o envio dos mesmos para a manufatura em plantas localizadas em regiões onde é possível otimizar a estrutura de custo, predominantemente em países asiáticos, principalmente na China. Há então, a necessidade de importar o produto final.

Ainda assim, existem fabricantes nacionais que conseguem produzir um número significativo de equipamentos, com capacidade para atuação no mercado global, reforçando o fato de que este é um segmento onde existe elevado potencial para o desenvolvimento da produção nacional.

Ao contrário da produção de células, onde as questões tecnológicas ainda estão em aberto, embora em acelerado desenvolvimento, a produção de inversores depende quase que exclusivamente de um ambiente de custos favorável que permita os empresários locais atingirem preços competitivos [1].

Externamente, um inversor tem uma estrutura bem simples, como uma caixa metálica, porém, internamente possui diversos componentes. Um modelo moderno deve lidar com um grande número de cargas, desde uma simples lâmpada até a partida de um motor. A seguir, alguns exemplos de inversores utilizados atualmente.

A Figura 5.1 mostra um inversor desenvolvido pela SMA que pode alcançar um rendimento de até 96%. Possui o sistema de refrigeração de duas câmaras “OptiCool”, que possibilita o uso sem prejuízo da potência até 40 °C de temperatura ambiente.



Figura 5.1 – Inversor de rede desenvolvido pela SMA

Destaques:

- O melhor rendimento entre os inversores transformadores na classe de desempenho até 4 KW
- OptiCool®
- Para montagens exteriores e interiores
- Invólucros ergonômicos com 4 pegas
- Faixa de temperatura alargada - 25°C até +60°C
- SMA grid guard®
- Proteção contra sobretensão através de varistores vigiados termicamente.
- Ligação aos lados CA e CC através de conectores
- Diagnóstico e comunicação por rede ou rádio, assim como por cabo (RS232 ou RS485)
- Electronic Solar Switch ESS: Disjuntor de potência CC integrado conforme DIN VDE 0100-712

	SB 4000TL-20	SB 5000TL-20
Potência AC nom./máx. (W)	4000 / 4000	4600 / 5000
Tensão de entrada máx. CC (V)	550	550
Intervalo de tensão CC MPP (V)	125 - 500	125 - 500
Potência de entrada máx. CC (A)	2 x 15	2 x 15
Consumo próprio (noite) (W)	< 0,2	< 0,2
Grau de rendimento europeu (%)	96	96
Modo de protecção	IP54	IP54
Temperatura do ambiente (°C)	-25...+60	-25...+60
Dimensões L x C x A (mm)	470 x 445 x 180	470 x 445 x 180
Peso (kg)	25	25
Garantia do fabricante (anos)	5	5

Figura 5.2 – Especificações do inversor de rede desenvolvido pela SMA

A Figura 5.3 mostra outro inversor desenvolvido pela SMA. É um modelo econômico, com elevado coeficiente de rendimento.



Figura 5.3 – Inversor de rede desenvolvido pela SMA

Destaques:

- Maior grau de rendimento, ultrapassando 98%;
- OptiCool®
- SMA grid guard 2: Disruptor automático conforme DIN VD 0126-1-1
- Electronic Solar Switch ESS: Disjuntor de potência CC integrado conforme DIN VDE0100-712

	SMC 6000TL	SMC 7000TL	SMC 8000TL
Potência AC nom./máx. (W)	6000	7000	8000
Tensão de entrada máx. CC (V)	700	700	700
Intervalo de tensão CC MPP (V)	335 - 700	335 - 700	335 - 700
Potência de entrada máx. CC (A)	19	22	25
Consumo próprio (noite) (W)	0,1 - 0,25	0,1 - 0,25	0,1 - 0,25
Grau de rendimento europeu (%)	97,7	97,7	97,7
Modo de protecção	IP65	IP65	IP65
Temperatura do ambiente (°C)	-25...+60	-25...+60	-25...+60
Dimensões L x C x A (mm)	613 x 468 x 242	613 x 468 x 242	613 x 468 x 242
Peso (kg)	31	32	33
Garantia do fabricante (anos)	5	5	5

Figura 5.4 – Especificações do inversor de rede desenvolvido pela SMA

A Figura 5.5 mostra a foto de um inversor desenvolvido pela KACO, empresa especialista em inversores sem transformador. Até potências de 8 kW, os inversores Powador funcionam completamente com arrefecimento silencioso e passivo por convecção. A maior parte do calor gerado é dissipada através do radiador instalado no lado de trás do aparelho. O resto é dissipado através da superfície em alumínio da caixa.



Figura 5.5 – Inversor de rede desenvolvido pela KACO

Dados eléctricos	2500xl
Entrada	
Potência FV geradora máx.	3 200 W
Gama de tensões MPP	350 V ... 600 V
Tensão em vazio	800 V
Corrente de entrada máx.	8,6 A
Quantidade de vias	3
Quantidade de controladores MPP	1
Protecção contra pólos invertidos	LED de sinalização de curto-circuito
Protecção contra sobretensões	integrado
Saída	
Potência nominal	2 600 W
Potência máx.	2 850 W
Tensão de alimentação	196 V ... 264 V
Desconexão de segurança	até 0,2 seg, se $V_{AC} > 264$ V
Corrente nominal	11,3 A
Corrente máx.	12,4 A
Frequência nominal	50 Hz
cos phi	≈ 1
Quantidade de fases de alimentação	1
Coefficiente de distorção à potência nominal	< 3%

Figura 5.6 – Especificações do inversor de rede desenvolvido pela KACO

A Figura 5.7 mostra um inversor com tecnologia de última geração para sistemas fotovoltaicos trifásicos conectados à rede, fabricado no Brasil pela WEG. Com eficiência de até 98%, pode ser usado em instalações de 8 a 1000 kW.



Figura 5.7 – Inversor de rede desenvolvido pela WEG

SIW700

Modelos	SIW700 T008	SIW700 T010	SIW700 T012	SIW700 T016	SIW700 T023	SIW700 T026	SIW700 T045	SIW700 T055	SIW700 T062	SIW700 T068	SIW700 T148	SIW700 T165	SIW700 T188	SIW700 T215	SIW700 T250
Entrada (CC)															
Potência nominal (kW)	8	10	12	16	23	26	45,7	55,2	62,8	68,5	148,6	165,7	188,6	215,0	250,0
Máxima tensão de entrada (V)	800														
Faixa de tensão de máxima potência (V)	360 ... 700														
Máxima corrente de entrada (A)	20	25	30	40	53	60	105	125	145	160	340	380	430	490	600
Eficiência do MPPT	> 99,8%														
Número de entradas CC	Solicitado pelo cliente														
Saída (CA)															
Tensão de saída 3φ	220V														
Frequência CA nominal	60 Hz														
Corrente de saída (Arms)	22	27	33	44	61	68	120	145	165	180	390	435	495	565	656
Distorção harm. total da corrente de saída ¹⁾	< 3%														
Máxima eficiência do inversor ²⁾	97,8%														
Informações gerais															
Temperatura ambiente	-10 °C ... +40 °C														
Grau de proteção	IP42 (opcional: IP54 ou IP54 ao tempo)														
Umidade relativa do ar	5 – 90% sem condensação														

Figura 5.8 – Especificações do inversor de rede desenvolvido pela WEG

A Figura 5.9 mostra um gráfico representando a eficiência do equipamento. O inversor em questão foi especialmente desenvolvido para operar durante situações limites, proporcionando excelente eficiência desde potências baixas até a potência nominal.

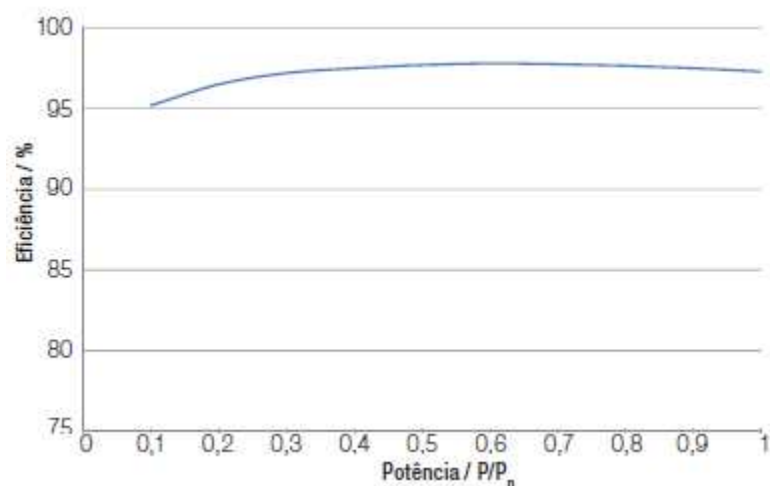


Figura 5.9 – Eficiência obtida pelo inversor desenvolvido pela WEG

5.2. Baterias

A produção nacional de baterias não é direcionada exclusivamente para o setor fotovoltaico. Dessa maneira, mesmo sendo suficiente para atender às demandas do setor, algumas especificidades não conseguem ser atendidas satisfatoriamente. Como exemplo, podemos destacar o fato de que as baterias utilizadas atualmente apresentam redução do tempo de vida útil quando o equipamento é exposto a temperaturas elevadas. Além disso, o impacto ambiental produzido pela utilização de chumbo nas baterias é frequentemente questionado.

Algumas empresas estão focadas no desenvolvimento de produtos que solucionem as dificuldades enfrentadas. Novas tecnologias estão sendo pesquisadas com o intuito de aumentar a vida útil do banco de baterias, garantindo uma manutenção das condições de operação do equipamento mesmo sob temperaturas elevadas, além da busca de insumos menos agressivos ao meio ambiente [1].

Entretanto, enquanto as novas tecnologias ainda não estão disponíveis no mercado, são utilizados produtos adaptados para aplicações em sistemas fotovoltaicos. Alguns exemplos de baterias em uso atualmente podem ser vistos a seguir.

A Figura 5.10 é uma bateria solar DETA, possui elevada capacidade de carregamento contínuo, longa durabilidade, pouca manutenção e pequena taxa de auto-descarga.



	12 V Solar 70 Ah	12 V Solar 105 Ah	12 V Solar 140 Ah	12 V Solar 250 Ah
Capacidade 100 h (Ah) C100	70	105	140	250
Dimensões L x C x A (mm)	246 x 175 x 190	353 x 175 x 190	348 x 175 x 284	518 x 276 x 242
Peso total (kg)	17	25	33	61

Figura 5.10 – Bateria solar DETA

A Figura 5.11 é uma bateria com tecnologia *dryfit*, do fabricante *Exide Technologies*, que têm extrema durabilidade, além de poupar custos nos processos de manutenção.



	Dryfit Solar 130 Ah	Dryfit Solar 230 Ah	Dryfit Solar Block 130 Ah	Dryfit Solar Block 185 Ah
Capacidade 100 h (Ah) C100	130	230	130	185
Dimensões L x C x A (mm)	284 x 267 x 208	518 x 291 x 216	513 x 223 x 195	518 x 291 x 216
Peso total (kg)	37	70	48	64

Figura 5.11 – Bateria solar com tecnologia dryfit

A Figura 5.12 mostra uma bateria do fabricante HOPPECKE com uma tecnologia que diminui a sulfatação do equipamento.



	OPzS 300 Ah	OPzS 490 Ah	OPzS 1000 Ah	OPzS 2500 Ah
C10*/1,80 V (Ah)	300	520	1010	2540
C5*/1,77 V (Ah)	262	446	872	2185
C3*/1,75 V (Ah)	225	378	753	1908
C1*/1,67 V (Ah)	161	273	541	1326
Peso (kg)	24,3	36,1	74,6	193
Peso con electrolito (kg)	7,2	10,9	21,1	68
Dimensões L x C x A (mm)	420 x 208 x 147	535 x 208 x 168	710 x 235 x 215	815 x 490 x 215
*	*C1: capacidade de descarga em 1 hora; C3: capacidade de descarga em 3 horas; C5: capacidade de descarga em 5 horas; C10: capacidade de descarga em 10 horas			

Figura 5.12 – Bateria solar HOPPECKE

5.3. Módulos Fotovoltaicos

O Brasil é um dos líderes mundiais na produção de silício de grau metalúrgico. Embora envolva um processo com alto nível tecnológico, o silício metalúrgico possui baixo valor agregado (cerca de 100 vezes menor) quando comparado ao silício de grau solar.

Atualmente não existe a purificação de silício no Brasil em nível comercial, apenas em nível laboratorial, desenvolvido por algumas empresas e grupos acadêmicos, que passam por desafios técnicos como o controle de impurezas. Entretanto, o mercado fotovoltaico nacional está otimista quanto ao desenvolvimento de células no país com tecnologias que permitam atingir um nível de competitividade global.

A Figura 5.13 mostra um laboratório localizado na Universidade Estadual de Campinas onde é realizado o processo de purificação. A Unicamp é apoiada pelo grupo empresarial RIMA (sexto lugar na produção mundial de silício grau metalúrgico) [18].



Figura 5.13 – (a) Professor Francisco Marques ao lado do forno para difusão do fósforo, no Instituto de Física Gleb Wataghin (IFGW); (b) Professores Paulo Mei, Francisco Marques e a pesquisadora Andressa Côrtes, autora da tese, em um laboratório da Faculdade de Engenharia Mecânica (FEM). [18]

Além da Unicamp, outras universidades estão realizando estudos no setor fotovoltaico. A Faculdade de Física da Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul (PUCRS) possui diversos laboratórios destinados ao desenvolvimento de dispositivos fotovoltaicos, todos localizados no Núcleo de Tecnologia em Energia Solar (NT-Solar).

A Universidade Federal de Pernambuco (UFPE) age por meio do Grupo FAE (Grupo de Pesquisas em Fontes Alternativas de Energia) e tem atuado intensamente em pesquisa e desenvolvimento, formação de recursos humanos e prestação de serviços na área. Tem como foco projetar, construir e testar componentes e sistemas solares fotovoltaicos, além de realizar o estudo do desempenho instantâneo e em longo prazo destes sistemas através de modelagem computacional. A Figura 5.14 mostra uma visão geral da área de testes utilizada pelo Grupo FAE.



Figura 5.14 - Visão geral da área de testes do Grupo FAE

Em nível mundial, a tecnologia das células fotovoltaicas está em constante desenvolvimento. Um dos caminhos que tem sido explorado é o crescimento de silício cristalino diretamente na forma de fita e não de lingotes. Lembrando que o processo clássico de fabricação consiste em crescer um cristal de silício na forma de lingote que é cortado em fatias muito finas, onde é depois processada a célula solar, pode-se reduzir significativamente

os custos se o cristal de silício for crescido diretamente na forma de uma fita, já com a espessura desejada.

Outra abordagem é o desenvolvimento de células solares de materiais eletrônicos orgânicos, como polímeros semicondutores. São as chamadas *soft cells*, que tem grande potencial para aplicações solares pelo baixo custo de fabricação.

Existem também as células sensibilizadas por corante (dye-sensitized cells – DSC). A eficiência e a vida útil das DSC são inferiores à das células solares convencionais, porém o baixo custo de produção e o rápido desenvolvimento em um curto espaço de tempo tornam esta tecnologia bastante promissora.

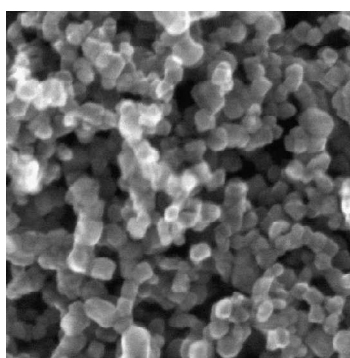


Figura 5.15 – Imagem microscópica do material utilizado na fabricação das DSC – TiO₂

As DSC podem ser fabricadas utilizando-se técnicas de impressão convencionais em substratos flexíveis, o que representa uma oportunidade de alternativa mais econômica para células solares dentro dos próximos anos. Entretanto, progressos significativos na eficiência, estabilidade e vida útil das células serão necessários para permitir uma utilização em larga escala de DSC, tanto em aplicações conectadas à rede como em sistemas isolados. Empresas do porte da Sony estão investindo nesta tecnologia visando à sua produção em massa.

A tecnologia mais recente, ainda em estudo, são células solares ultrafinas (Figura 5.16), que podem custar até 90% menos que as células atuais. Está sendo desenvolvida por pesquisadores noruegueses e é 20 vezes mais fino que um painel tradicional [19].



Figura 5.16 – Célula ultrafina [19]

A idéia principal dessa tecnologia é usar microgotas de Uglestad, esferas plásticas muito pequenas, todas do mesmo tamanho, para fabricar estruturas na parte de trás das células solares, utilizando cerca de vinte vezes menos silício purificado na célula, o que diminui o preço dos painéis. Quanto mais finas forem as células, mais fácil será extrair a energia elétrica.

A dificuldade que os cientistas estão enfrentando está no fato de quanto mais finas as células, maior é a porção da luz do Sol que vai passar direto, sem gerar eletricidade. Os dois pesquisadores estão desenvolvendo uma técnica para fazer com que a luz fique mais tempo na célula.

A técnica consiste em fabricar superfícies nano estruturadas na parte posterior da célula para conter a luz que atravessou o silício sem produzir corrente. Aumentando a espessura aparente em 25 vezes, força-se a luz a ir para cima e para baixo diversas vezes.

Ao lado de cada microgota de Uglestad são feitos micro recortes assimétricos, como pode ser visto na Figura 5.17, criando um padrão, que faz com que “a luz ande de lado”, mantendo-a mais tempo na célula.

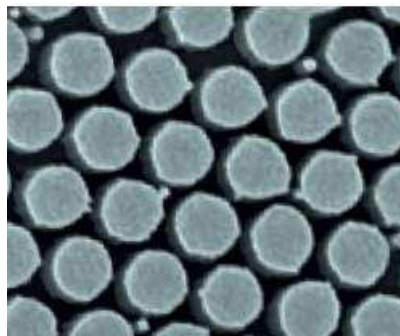


Figura 5.17 – Cortes assimétricos ao lado de cada microgota de Uglestad [19]

CAPÍTULO 6

Conclusão

No presente trabalho foram apresentadas informações sobre a tecnologia fotovoltaica, abordando aspectos técnicos, operacionais e de fabricação dos principais componentes dos sistemas de geração fotovoltaica. Foram apresentadas as diversas configurações possíveis dos sistemas fotovoltaicos e uma breve descrição dos cenários mundial e nacional de suas aplicações.

Foi dado destaque especial aos módulos e painéis, sendo apresentada uma descrição ampla e detalhada dos aspectos construtivos, do efeito fotovoltaico, dos circuitos de instalações e do funcionamento destes equipamentos. Da mesma forma, foram apresentados os vários tipos de baterias, suas características construtivas e operacionais. Em menores detalhes discorreu-se também sobre reguladores (série, paralelo e MPPT) e inversores.

No Capítulo 4 foram descritas tecnologias de fabricação e aspecto das matérias primas utilizadas nos painéis. E finalmente, no Capítulo 5, foi apresentado o que vem sendo desenvolvido e pesquisado neste campo da fabricação de painéis fotovoltaicos.

A maior dificuldade encontrada durante a elaboração deste trabalho foi o reduzido número de referências relacionadas a determinados assuntos, como a fabricação das células fotovoltaicas menos usuais.

Algumas conclusões em relação aos aspectos técnicos podem ser feitas, baseado no que foi apresentado. Como exemplo, pode-se citar que sistemas híbridos são utilizados em instalações de médio e grande porte, enquanto que sistemas isolados só são recomendáveis para locais com condições extremamente favoráveis.

Com relação aos componentes secundários, foi visto que, dentre os diversos tipos de baterias existentes, as que são mais utilizadas em sistemas fotovoltaicos são as de chumbo-ácido devido ao seu baixo custo. Os reguladores mais indicados, em geral são os MPPT, porém devido ao seu alto custo não são usuais em sistemas de pequeno porte.

O principal objetivo, que era pesquisar, catalogar informações e auxiliar na divulgação do conhecimento e do estado da arte da tecnologia fotovoltaica presente no mercado, além de incentivar o uso de sistemas fotovoltaicos, parece ter sido cumprido.

Espera-se ter contribuído para aumentar a disseminação de fontes alternativas de energia, em especial a energia fotovoltaica.

Sugere-se dar continuidade a esta pesquisa buscando mais informações sobre novas tecnologias das células fotovoltaicas.

Outro assunto correlato que pode ser estudado com maior aprofundamento é o desenvolvimento de toda a escala de produção dos módulos fotovoltaicos no Brasil. Já foi visto que os custos de importação são extremamente altos e de certa forma, desnecessários, visto que o país possui toda a base necessária para tal.

É fundamental mostrar que incluir o setor fotovoltaico na política nacional é imprescindível, já que o setor está em forte expansão no mercado mundial, o consumo de energia elétrica aumenta progressivamente e a energia fotovoltaica representa uma forma ecológica de atender a essa demanda.

Além de promover o equilíbrio ambiental e auxiliar na geração de empregos e na inclusão social, visto que com a sua utilização é possível fazer com que a energia elétrica chegue a áreas remotas, a energia solar possui alto grau de confiabilidade. Entretanto, ainda hoje é considerada uma energia cara quando comparada a outras fontes de energia, mesmo com todo avanço tecnológico apresentado ao longo deste trabalho. O incentivo e investimento à pesquisa e inovação são de extrema importância neste setor. Quanto maior a eficiência conseguida através de uma célula fotovoltaica, e quanto maior for o desenvolvimento na produção em grande escala das mesmas, menores serão os custos. A inclusão deve ser realizada tanto pelo poder público, por meio dos diversos ministérios envolvidos no planejamento energético, quanto pelos agentes privados responsáveis pelo processo produtivo.

Tudo isso mostra a absoluta necessidade de divulgar cada vez mais a tecnologia fotovoltaica, colocada em revista neste trabalho.

Referências Bibliográficas

- [1] Associação Brasileira da Indústria Elétrica e Eletrônica (ABINEE). Propostas para Inserção da Energia Solar Fotovoltaica na Matriz Elétrica Brasileira. 2012
- [2] Adams, W.G; Day, R.E., The action of light on selenium, Proceedings of the Royal Society, A25, 113.1877
- [3] Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL). Resolução Normativa nº. 482, 2012.
- [4] CEPEL/CRESESB. Manual de engenharia para sistemas fotovoltaicos. Rio de Janeiro: CRESESB, 2004.
- [5] Rüther, R. Panorama Atual da Utilização da Energia Solar Fotovoltaica e o Trabalho do Labsolar nesta Área. 1. ed. Florianópolis: UFSC/LABSOLAR, 1999.
- [6] Zhao, J.; Wang, A., Green, M. A.; Ferrazza, F. Novel 19.8% efficient honeycomb textured multicrystalline and 24.4% monocrystalline silicon solar cell. Applied Physics Letter, 1998.
- [7] Tolmasquim, M. T. Fontes Renováveis de Energia no Brasil. Rio de Janeiro. Interciência: CENERGIA, 2003.
- [8] IEA. International Energy Agency. PVPS Annual Report 2006, 2006 - Trends in Photovoltaic Applications.
- [9] Varella, F. K. O. M. Estimativa do Índice de Nacionalização dos Sistemas Fotovoltaicos no Brasil. Universidade Estadual de Campinas – UNICAMP, 2009. (Tese de Doutorado)
- [10] Fraindenraich, N. Tecnologia Solar no Brasil. Os próximos 20 anos. Sustentabilidade na geração e uso de energia no Brasil: os próximos vinte anos. Campinas, SP: UNICAMP, 2002. (Tese de Doutorado)

- [11] Fredrizzi, M. C. Sistemas Fotovoltaicos de Abastecimento de Água para Uso Comunitário: Lições Aprendidas e Procedimentos para Potencializar sua Difusão. Universidade de São Paulo. Instituto de Eletrotécnica e Energia, 2003.
- [12] Oliveira, S.H.F; Zilles, R. Geração Distribuída de Eletricidade: Inserção de Edificações Fotovoltaicas Conectadas à Rede no Estado de São Paulo. Universidade de São Paulo. Instituto de Eletrotécnica e Energia, 2002.
- [13] Zilles, R. Geração Distribuída com Sistemas Fotovoltaicos. 1ª Reunião do Grupo de Trabalho GT-GDSF, 15 dezembro 2008.
- [14] Rüther, R. Edifícios solares fotovoltaicos: o potencial da geração de energia fotovoltaica integrada a edificações urbanas e interligada à rede elétrica pública no Brasil. 1. ed. Florianópolis: UFSC/LABSOLAR, 2004.
- [15] Energia Solar Fotovoltaica – Guia prático. Solarterra, 2011.
- [16] <http://www.solenerg.com.br/files/Modulo-Fotovoltaico-Solenerg.pdf>. Acesso em 15 jan. 2013.
- [17] A.Vicent, Colin. Modern Batteries- An Introduction to Electrochemical Power Sources.2 edição, ISBN, 1997.
- [18]<http://www.unicamp.br/unicamp/ju/530/grupo-purifica-silicio-para-fabricacao-de-celulas-solares>. Acesso em 10 jan. 2013.
- [19] <http://www.inovacaotecnologica.com.br/noticias/noticia.php?artigo=celulas-solares-ultrafinas>. Acesso em 14 fev. 2013.