

HALLYSON EDUARDO OLIVEIRA

Tecnologia Fotovoltaica em filmes finos (películas delgadas)

**LAVRAS
MINAS GERAIS – BRASIL
2008**

HALLYSON EDUARDO OLIVEIRA

**TECNOLOGIA FOTOVOLTAICA EM FILMES FINOS
(PELÍCULAS DELGADAS)**

Monografia apresentada ao Departamento de Engenharia da Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do curso de Pós-graduação “*Lato Sensu*” em Formas Alternativas de Energia, para obtenção de título de especialização.

Orientador
Prof. Carlos Alberto Alvarenga

**LAVRAS
MINAS GERAIS – BRASIL
2008**

HALLYSON EDUARDO OLIVEIRA

**TECNOLOGIA FOTOVOLTAICA EM FILMES FINOS
(PELÍCULAS DELGADAS)**

Monografia apresentada ao Departamento de Engenharia da Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do curso de Pós-graduação “*Lato Sensu*” em Formas Alternativas de Energia, para obtenção de título de especialização.

APROVADA em de de.....

Prof.

Prof.

Prof.

UFLA

**LAVRAS
MINAS GERAIS – BRASIL
2008**

DEDICATÓRIA

Esta monografia é dedicada aos meus pais, Elson e Angélica, pelo apoio e paciência.
Às minhas irmãs, Viviane e Ana Carolina, por sempre acreditarem em meu potencial.

AGRADECIMENTOS

Agradeço especialmente ao meu primo e amigo Eng. Igor Machado Malaquias pela ajuda e empréstimo das referências bibliográficas que se tornaram tão importantes para a confecção e conclusão deste trabalho.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS.....	i
LISTA DE TABELAS.....	ii
RESUMO.....	iii
1 Introdução.....	1
2 Objetivos.....	1
3 A energia solar fotovoltaica.....	2
3.1 Energia do Sol.....	2
3.2 Importância da energia solar.....	2
3.3 Histórico de pesquisa da energia solar.....	3
3.4 Vantagens no uso da energia solar.....	4
4 Tecnologia fotovoltaica.....	4
4.1 Aplicações de sistemas fotovoltaicos.....	4
4.2 Componentes de sistemas fotovoltaicos.....	6
4.3 Materiais semicondutores, efeito fotovoltaico e dopagem.....	7
4.4 Células fotovoltaicas.....	9
4.5 Estruturas construtivas de células fotovoltaicas.....	11
5 Tecnologia fotovoltaica de filmes finos (películas delgadas).....	13
5.1 Introdução.....	13
5.2 Importância das células solares de filmes finos.....	14
5.3 Vantagens e desvantagens das células de filmes finos.....	15
5.4 Células fotovoltaicas de filmes finos (películas delgadas).....	15
5.4.1 Células de Silício amorfo (a-Si).....	16
5.4.1.1 Características do silício amorfo (a-Si).....	16
5.4.1.2 Estrutura da célula de a-Si.....	18
5.4.1.3 Produção da célula de a-Si.....	21
5.4.1.4 Vantagens e desvantagens das células de a-Si.....	23
5.4.2 Células de Telureto de Cádmio (CdTe).....	23
5.4.2.1 Características do Telureto de Cádmio (CdTe).....	24
5.4.2.2 Estrutura típica de uma célula de CdTe.....	25
5.4.2.3 Vantagens e desvantagens da tecnologia CdTe.....	26
5.4.3 Células de Disseleneto de Cobre-Índio (CIS).....	26
5.4.3.1 Características do CIS.....	27
5.4.3.2 Estrutura de uma célula CIS.....	27
5.4.3.3 Vantagens e desvantagens da tecnologia CIS.....	31
5.4.4 Células de Arseneto de Gálio (GaAs).....	31
5.4.4.1 Características do GaAs.....	31

5.4.4.2 Estruturas das Células de GaAs.....	32
5.4.4.3 Vantagens e desvantagens do GaAs.....	34
5.5 Filmes finos no Brasil.....	34
5.6 Mercado de células solares de filmes finos.....	36
5.7 Instalações fotovoltaicas de filmes finos através do mundo.....	37
5.8 Perspectivas da tecnologia de filmes finos.....	38
6 Impactos ambientais causados pelas tecnologias fotovoltaicas.....	40
7 CONCLUSÃO.....	44
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	45

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 – Módulo de a-Si em substrato de vidro.....	17
FIGURA 2 – Estrutura de uma célula de a-Si.....	18
FIGURA 3 – Estrutura muçtijunção p-i-n/p-i-n de uma célula de a-Si.....	19
FIGURA 4 – Estrutura de uma célula de tripla camada de a-Si.....	20
FIGURA 5 – Etapas do processo de produção de células de a-Si.....	21
FIGURA 6 – Módulo de CdTe.....	24
FIGURA 7 – Estrutura simples de uma célula CdTe.....	25
FIGURA 8 – Imagem microscópica de uma célula de CdTe.....	25
FIGURA 9 – Módulo flexível de CIS.....	27
FIGURA 10 – Estrutura típica de uma célula de CIS.....	28
FIGURA 11 – Processo de produção de uma célula CIS.....	29
FIGURA 12 – Estrutura otimizada de uma célula de CIGS.....	30
FIGURA 13 – Imagem microscópica de uma célula de CIGS.....	30
FIGURA 14 – Estrutura de uma célula de GaAs.....	32
FIGURA 15 – Curva $V \times I$ de uma célula de GaAs sob iluminação direta	33
FIGURA 16 – Módulos instalados no prédio do Departamento de Engenharia Mecânica da UFSC	35
FIGURA 17 – Esquema de instalação dos módulos de a-Si do LABSOLAR-UFSC.....	35
FIGURA 18 – Instalação fotovoltaica de filmes finos (CdTe) em Dimbach, Alemanha.....	38
FIGURA 19 – Ciclo de produção, uso e descarte de um módulo fotovoltaico.....	41
FIGURA 20 – Ciclo de produção, uso e descarte do CIS.....	42

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 – Histórico de pesquisas relacionadas à energia solar.....	4
TABELA 2 – Parâmetros de um módulo de dupla junção de a-Si.....	22
TABELA 3 – Eficiência e potência de células de CIGS produzidas por algumas empresas.....	30
TABELA 4 – Plantas solares de filmes finos nos EUA e Alemanha.....	38
TABELA 5 – Eficiência e tempo de vida útil das células de filmes finos.....	43

RESUMO

As tecnologias fotovoltaicas baseadas em filmes finos são uma alternativa dentre as inúmeras possibilidades de geração de energia através da luz solar. Elas se destacam devido aos benefícios fornecidos pela forma como são produzidas e carregam a promessa de maiores eficiências conforme o aumento da maturidade das pesquisas ocorrer. Quatro tipos de tecnologias de filmes finos merecem destaque, são elas: **Silício amorfo a-Si**, **Telureto de Cádmio - CdTe**, **Disseleneto de Cobre e Índio - CIS** e o **Arseneto de Gálio - GaAs**. Células de **silício amorfo (a-Si)** já são pesquisadas há muitos anos e se consolidam com um grande número de vendas no mercado de fotovoltaicos. Muitas de suas vantagens e desvantagens já foram pesquisadas e melhoradas gerando novos e mais eficientes tipos de células solares de a-Si. O desenvolvimento de materiais semicondutores produzidos em laboratório e com características específicas permitiu a produção de novos tipos de células onde o controle dos portadores de carga e das características energéticas é muito maior. O semicondutor **CdTe (Telureto de Cádmio)** se mostra tão promissor que várias instalações geradoras de energia elétrica de grande porte já o utilizam em seus módulos fotovoltaicos. O uso de vários elementos químicos em conjunto também permite este controle maior das características interessantes para aproveitamento da energia solar como é o caso do **CIS – Disseleneto de Cobre e Índio** que também se mostra extremamente promissor permitindo diversos tipos de estruturas de células e novas tecnologias cada vez mais eficientes. Ainda em fase de pesquisa o **Arseneto de Gálio - GaAs** promete quebrar todos os records de eficiência das células fotovoltaicas, porém dificuldades técnicas e o alto custo deste material são fatores limitantes neste momento para a produção em larga escala desta tecnologia. O aproveitamento da energia solar para geração de energia elétrica se consagra a cada dia como uma alternativa real e interessante do ponto de vista energético e ambiental. O entendimento e disseminação dos vários tipos de tecnologias disponíveis para geração de energia são de extrema importância tanto para o meio acadêmico quanto para os meios social e industrial.

1) Introdução

O **Sol** é objeto de adoração pelo homem desde os tempos antigos. Várias culturas atribuíam ao Sol o status de divindade e promoviam festivais e sacrifícios em sua homenagem. Japoneses cultuam o Sol de maneira tão especial que o mesmo se encontra estampado em sua bandeira nacional, astecas promoviam sacrifícios ao Sol para garantir sua prosperidade, na cultura egípcia exemplos de grande adoração ao Deus do Sol podem ser encontrados. Atualmente o Sol tem sido alvo de pesquisas onde o que se busca não são poderes místicos ou símbolos religiosos, mas sim formas de utilização de sua inesgotável energia.

Quase todas as formas de energia (hidrelétrica, eólica, poder das ondas, etc) tem o Sol como a sua fonte primária e dependem dele de forma direta ou indireta em seu processo energético.

A grande preocupação mundial atualmente faz referência ao uso eficiente e consciente das formas de energia já que segundo pesquisas realizadas nas últimas décadas, os níveis de poluição e degradação do planeta estão chegando a níveis alarmantes e irreversíveis. A energia solar por ser silenciosa e não criar poluição atmosférica se mostra muito promissora na sua utilização e muitas pesquisas se encontram em desenvolvimento.

Os maiores obstáculos para o desenvolvimento de tecnologias de fontes renováveis de energia dizem respeito ao desenvolvimento de materiais mais eficientes na conversão de energia e a pesquisa e disseminação de novas tecnologias sobre estas fontes. O maior desafio na utilização de energia solar para conversão direta em energia elétrica é a diminuição do alto custo de produção de seus módulos e equipamentos afins. Suas instalações apesar de não necessitarem de manutenções constantes possuem um custo inicial de construção muito alto.

Apesar dos fatores ainda limitantes, nos últimos anos houve uma diminuição significativa nos custos dos painéis e equipamentos utilizados na conversão de energia solar em energia elétrica, isso se deve à pesquisa de novos materiais, ao grande volume de produção de módulos fotovoltaicos em escala industrial, aos incentivos promovidos pelos governos de vários países e a preocupação ambiental ocorrida nas últimas décadas.

2) Objetivos

Este trabalho tem por finalidade apresentar os conceitos, aspectos construtivos e aplicações das células solares de filmes finos na conversão direta de energia solar em energia elétrica. Células solares de filmes finos são uma grande promessa na redução de custos na captação e conversão de energia solar em eletricidade e devido à falta de publicações e artigos em português fez-se necessário a disseminação destas tecnologias através desta monografia.

Nos primeiros capítulos serão abordadas de forma objetiva e didática algumas considerações gerais sobre as células solares e energia solar de forma a facilitar o entendimento do restante do trabalho. A tecnologia de filmes finos foi inserida de forma a compreender as quatro tecnologias mais

promissoras, as suas características, estrutura das células, vantagens e desvantagens e um panorama geral sobre as tecnologias citando o mercado de fotovoltaicos, instalações ao redor do mundo e perspectivas de desenvolvimento das tecnologias para o futuro.

Durante algum tempo o uso das células de filmes finos ficou restrito a calculadoras portáteis e pequenos equipamentos eletrônicos, mas com o desenvolvimento de novas tecnologias, principalmente na área de engenharia de materiais, foi possível o desenvolvimento de novos tipos de células de filmes finos e sua aplicação em geração de energia em média e grande escala já pode ser encontrado em algumas partes do mundo.

3) A energia solar fotovoltaica

3.1) Energia do Sol

A energia vinda do Sol é extremamente grande, segundo estudos a superfície da Terra recebe, a cada momento, cerca de $1,2 \times 10^{17}$ W de energia solar. Isto significa que em menos de uma hora chega a superfície da Terra energia suficiente para suprir a população humana por um ano. Sabemos também que a energia do Sol assimilada por seres vivos há milhares de anos atrás e hoje transformada em petróleo, carvão, etc, é que assegurou o desenvolvimento econômico e o crescimento industrial de nossa sociedade. Muitas outras fontes de energia dependem do Sol, os ventos são formados pela convecção de grandes massas de ar aquecidas pelo Sol, as ondas do mar, etc.

Para termos uma idéia aproximada do potencial da energia solar, uma área de 700km x 700km no deserto do Saara, coberta com células solares com eficiência de 10%, seria suficiente para suprir o consumo de energia elétrica do mundo inteiro.

3.2) Importância da energia solar

A energia solar possui um vasto campo de aplicações e os equipamentos que convertem energia solar em algum outro tipo de energia são tão numerosos que se faz necessária a publicação e disseminação das tecnologias de forma a promover o entendimento e conhecimento da população em relação à sua utilização.

Coletores solares para aquecimento de água já estão muito difundidos no meio urbano e rural e o seu uso já é uma realidade em todo o mundo. Este processo permite a economia de energia convencional (elétrica, carvão, gás, etc) geralmente muito poluente e que seria utilizada no processo de aquecimento de água para vários fins.

Secadores solares e destiladores solares utilizados na produção de alimentos e obtenção de água são alternativas reais de uso que podem facilitar a vida de comunidades e melhorar o bem estar e conforto das pessoas destas comunidades.

A conversão direta da energia solar em energia elétrica possui sua base nas **células solares**, sendo as mesmas divididas em vários grupos, cada um com suas particularidades, vantagens e desvantagens (entre elas as células de silício cristalino, silício amorfo, CdTe, CIS, e muitas outras tecnologias). O seu uso já é uma realidade há algumas décadas na telefonia, módulos espaciais e mais recentemente na produção de energia elétrica em grande escala.

O Sol, por ser uma fonte praticamente inesgotável de energia, possui um papel não apenas merecedor de atenção do meio científico, mas sim de toda a população e principalmente dos governantes e grandes empresas, pois através desta fonte de energia facilidades podem ser levadas a um grande número de pessoas (principalmente comunidades remotas, o meio rural, etc) e sendo usada de forma consciente a mesma terá um grande impacto social e econômico em nossa sociedade.

3.3) Histórico de pesquisa da energia solar

A história da energia solar para produção de energia elétrica teve seu início há pelo menos 160 anos atrás (Tabela 1), quando **Edmund Becquerel** observou que correntes elétricas surgiam de certos elementos químicos quando estes eram expostos à luz. Um efeito similar foi observado em um sólido (selênio) muitas décadas depois. Porém o entendimento total destes fenômenos só foi conseguido com o surgimento das **teorias quânticas** séculos depois.

A primeira célula solar utilizando **silício** foi desenvolvida em 1954 pelos cientistas **Chapin, Fuller e Pearson** em laboratório e possuía 6% de eficiência. Em 1958 foi lançado ao espaço o primeiro satélite a usar eletricidade produzida através da energia solar, este satélite foi batizado de **Vanguard 1**.

Muito interesse pela energia solar surgiu com o desencadear da crise do petróleo nos anos 70 devido à necessidade de fontes alternativas de energia para a sociedade. A pesquisa espacial com o lançamento de sondas espaciais, satélites, módulos espaciais, fez com que a pesquisa de células solares aumentasse cada vez mais e níveis de produção e pesquisa de novos materiais foram exigidos. Na década de 80 o uso de determinados tipos de células já estava totalmente popularizado na sociedade através do uso em calculadoras, relógios e equipamentos eletrônicos que utilizavam energia solar.

Em 1991 mais de 50 megawatts de módulos solares já estavam em funcionamento e algumas plantas de energia já podiam ser encontradas em vários lugares do mundo. Foi constatado um aumento de 20% ao ano na produção de módulos solares e isso se deve às pesquisas e desenvolvimento de materiais relacionados à energia solar.

A partir do ano 2000 e com a preocupação crescente do fenômeno do aquecimento global, aumento populacional e conseqüente aumento da demanda de energia, a sociedade busca (e necessita) de fontes de energia mais eficientes e mais limpas e através de métodos de produção em larga escala o seu uso vem se tornando uma realidade em nossa sociedade. Neste momento a pesquisa e utilização de energia solar possuem um papel muito importante em nossas vidas, pois a mesma se mostra como uma

alternativa relevante e de uso real para garantir o crescimento e sustentabilidade da sociedade sem agredir o meio ambiente.

TABELA 1 – Histórico de pesquisas relacionadas à energia solar

Histórico das pesquisas importantes para a energia solar	
1836	Becquerel descobre o efeito fotovoltaico
1839	Adams e Day observam o efeito fotovoltaico no selênio
1900	Planck propõe os conceitos sobre a natureza quântica da luz
1930	A teoria quântica dos sólidos é proposta por Wilson
1941	Mott e Schottky desenvolvem a teoria dos diodos (retificadores)
1949	Bardeen, Brattain e Shocley inventam o transistor.
1954	Chapin, Fuller e Pearson anunciam célula solar de silício de 6% de eficiência.
1954	Reynolds desenvolve célula solar baseada em Sulfeto de Cádmio
1958	Primeira célula solar utilizada em satélites (Satélite Vanguard 1)
1960-70	Uso crescente de células solares em equipamentos de consumo (eletrônicos, etc). Desenvolvimento e pesquisa de novos materiais e módulos.
1990- dias atuais	Desenvolvimento de novos materiais e células mais eficientes tanto do ponto de vista energético quanto econômico. Preocupação ambiental.

3.4) Vantagens no uso da energia solar

Segue abaixo uma série de vantagens que tornam a energia solar uma importante alternativa na geração não só de eletricidade, mas também de outras formas de energia (calor, etc):

- Energia gratuita e praticamente inesgotável (nosso Sol possui ainda um período de vida de até 4,5 bilhões de anos);
- Energia limpa (enquanto gera energia não produz resíduos poluidores, gases, etc);
- Produção de energia sem ruídos;
- Tipo de energia acessível a todos e com muitas aplicações (secagem de grãos, destilação e aquecimento de água, geração de calor, energia elétrica, etc);
- Proporciona uso sustentável através do uso de tecnologias simples e baratas (como é o caso do aquecimento de água usando-se materiais reciclados).

4) Tecnologia fotovoltaica

4.1) Aplicações de sistemas fotovoltaicos

Existe uma série de aplicações onde sistemas fotovoltaicos podem ser utilizados, sendo que em muitas vezes, na prática, se mostram as melhores opções para a conversão de energia nos casos a que são aplicados. Muitas vezes estes sistemas são utilizados por oferecerem algumas vantagens sobre outros tipos de formas de energia, como por exemplo: a diminuição (ou muitas vezes a ausência de necessidade) do número de manutenções, não são gerados resíduos ou qualquer poluição,

confiabilidade do sistema, diminuição de custos com combustíveis (não há necessidade de se reabastecer os módulos fotovoltaicos), etc.

Abaixo estão enumeradas algumas aplicações da energia solar sendo que muitas destas aplicações possuem um grande benefício social e científico, pois atendem comunidades remotas (longe dos centros urbanos) ou possibilitam o funcionamento de equipamentos de pesquisa em regiões onde é impossível a sobrevivência do homem (ex.: espaço).

1) Eletrificação rural

- Iluminação e fornecimento de energia em comunidades rurais;
- Bombeamento de água para uso humano ou irrigação;
- Carregamento de baterias em estações;
- Energia “portátil” para grupos nômades;
- Instalação de energia em escolas rurais.

2) Bombeamento e tratamento de água

- Produção de gelo;
- Sistemas de refrigeração;
- Bombeamento de água;
- Sistemas de dessalinização;
- Purificação de água;
- Circulação de água em tanques de peixes.

3) Sistemas de saúde

- Iluminação de clínicas rurais;
- Refrigeração de vacinas em locais remotos;
- Refrigeração de sangue humano em locais remotos;
- Esterilizadores.

4) Comunicação

- Antenas de TV e rádio em locais remotos;
- Centrais remotas de pesquisa;
- Telefonia rural;
- Aquisição e transmissão de dados em locais remotos;

- Pontos remotos de pesquisas meteorológicas.

5) Astronomia e pesquisa espacial

- Fonte de energia elétrica para sondas e satélites estacionários;
- Fonte de energia elétrica para módulos espaciais.

6) Geração de energia em larga escala

- Usinas solares conectadas à rede gerando energia e trabalhando conjuntamente com os diversos tipos de plantas energéticas (hidrelétricas, usinas eólicas, etc).

4.2) Componentes de sistemas fotovoltaicos

A **célula fotovoltaica** é a menor unidade de um gerador fotovoltaico. Nela ocorre todo o processo de conversão de energia da radiação vinda do Sol em energia elétrica. Elas são fabricadas de materiais semicondutores e sozinhas produzem muito pouca energia elétrica.

Um conjunto de células fotovoltaicas forma um **módulo fotovoltaico**. Ele consiste de uma estrutura montada em um quadro de metal sendo que as células fotovoltaicas são dispostas dentro deste quadro e ligadas eletricamente entre si. Um revestimento de material translúcido cobre este quadro com a finalidade de proteger os seus componentes interiores e ainda assim permitir a entrada de luz solar. Geralmente cada módulo solar apresenta de 30 a 36 células fotovoltaicas em seu interior e a tensão produzida chega a 12 V.

Aplicações onde se requer grandes potências necessitam de um número maior de módulos fotovoltaicos. Ao conjunto de módulos fotovoltaicos denomina-se **painel fotovoltaico**. O conjunto de painéis fotovoltaicos é chamado **arranjo** e constitui as grandes instalações geradoras de energia elétrica.

Segue-se abaixo uma série de vantagens que tornam a conversão de energia solar em energia elétrica através de painéis fotovoltaicos uma importante alternativa:

- Autonomia (consumidor é o próprio fornecedor de energia, não dependendo de concessionárias e nem de combustíveis fósseis);
- Proporciona a geração de energia em locais remotos;
- Proporciona a geração distribuída (gera-se energia no próprio local de geração, não necessitando de linhas de transmissão e outras instalações);
- Possui características de modularidade, o que proporciona facilidade na manutenção e expansão do sistema de geração;

- Não possuem peças móveis (como é o caso das turbinas eólicas, o que promove a necessidade de sistemas de controle de velocidade e outros dispositivos que requerem manutenções e alto custo de investimento);
- Não gera ruídos;
- Necessidade de manutenção diminuída;
- Processos de produção e geração de energia mais limpos e de baixos riscos ambientais.

As **baterias** constituem as unidades de armazenamento da energia elétrica produzida durante o dia de forma a atender às necessidades do local de instalação durante os períodos de falta ou variação de luz solar. A energia gerada é armazenada na forma de energia química. As baterias mais utilizadas são as de chumbo-ácido, níquel-cádmio, níquel-ferro, níquel-zinco.

O **controlador de carga** é utilizado para garantir uma maior vida útil das baterias, pois este equipamento protege a bateria contra descargas totais e contra o carregamento excessivo da mesma. Além da função de proteção do conjunto de baterias do sistema fotovoltaico o controlador de carga também garante a interação entre o sistema e o usuário mostrando os parâmetros (tensão, corrente) e outras informações sobre o sistema.

O **inversor de frequência** é o equipamento responsável por converter a corrente contínua gerada pelas células em energia elétrica alternada. Grande parte dos equipamentos presentes em nossas casas utiliza energia alternada e para que o uso da energia convertida pelas células solares seja satisfeito é necessário que a mesma seja convertida em energia alternada. A corrente contínua, de geralmente 12V, é convertida em energia alternada de 127V ou 220V na frequência de 50Hz a 60Hz.

4.3) Materiais semicondutores, efeito fotovoltaico e dopagem

O funcionamento das células solares é baseado na propriedade de alguns materiais, chamados **semicondutores**, em converterem luz do sol em eletricidade. A esta propriedade dá-se o nome de **efeito fotovoltaico**. Ele é a base de todo o estudo sobre células solares e o entendimento de como este efeito ocorre e sobre a física dos semicondutores se faz necessário.

A conversão de energia fotovoltaica em eletricidade só é possível graças à ação de partículas chamadas **fótons** presentes na luz do Sol. Em um dia claro, cerca de $4,4 \times 10^{17}$ fótons atingem um centímetro quadrado da superfície da Terra a cada segundo, porém apenas uma parcela destes fótons possui energia necessária para que o processo de conversão de energia ocorra dentro do **semicondutor**. Este processo começa quando um fóton entra em um **semicondutor** sendo então absorvido e transferindo um elétron de sua **banda de valência** para a sua **banda de condução**. Após este processo aparecerá um buraco na banda de valência, desta forma o processo de absorção de fótons gera pares **elétron-lacuna** que terão excesso de energia em sua **bandgap** (conceituada como um espaço de separação entre a banda de valência e a banda de condução a qual um elétron só poderá

passar de uma banda para outra se possuir energia suficiente). Este é o início de todo o processo de conversão de energia solar em energia elétrica.

Cada semicondutor está restrito a converter apenas uma parte da radiação do espectro solar em energia e também não podemos esquecer que uma parte desta energia produzida pelo fóton absorvido é perdida em calor. Desta forma podemos estimar o quanto de energia solar será efetivamente convertida em energia elétrica.

O maior exemplo de material semicondutor na natureza é o **silício** (25% da crosta terrestre é formada por silício). No nível atômico o cristal de silício é formado pelo que chamamos de **rede cristalina**. Esta rede formada pelos vários átomos de silício possui quatro **elétrons** que se ligam aos átomos de silício vizinhos formando uma rede perfeita, onde não sobram elétrons nesta rede. Ao adicionarmos átomos de cinco elétrons de ligação (como o **fósforo**), em um processo chamado **dopagem**, haverá um elétron em excesso que não poderá ser emparelhado e que ficará “sobrando” (este elétron possui uma fraca ligação com seu átomo de origem). Isto faz que com apenas um pouco de energia térmica este elétron esteja livre, indo para a banda de condução. Diz-se que o fósforo é um dopante doador de elétrons e denomina-se **dopante N** (negativo – excesso de elétrons) ou **impureza N**. Se por outro lado, introduzem-se átomos com apenas três elétrons de ligação, como é o caso do **boro**, haverá uma falta de um elétron para satisfazer as ligações com os átomos de silício da rede. Esta falta de elétrons é denominada **buraco ou lacuna** e ocorre que, com pouco energia térmica, um elétron de um silício vizinho pode passar desta posição, fazendo com que o buraco se desloque. Diz-se, portanto, que o boro aceita elétrons ou é um **dopante P** (positivo - falta de elétrons).

Se, partindo de um silício puro, forem introduzidos átomos de boro em uma metade e de fósforo na outra, será formado o que se chama **junção PN**. O que ocorre nesta junção é que elétrons livres do lado N passam ao lado P onde encontram os buracos que os capturam; isto faz com que ocorra acúmulo de elétrons no lado P, tornando-o negativamente carregado e uma redução de elétrons do lado N, que se torna eletricamente positivo. Estas cargas “aprisionadas” dão origem a um campo elétrico permanente que dificulta a passagem de mais elétrons do lado N para o lado P; este processo alcança um equilíbrio quando o campo elétrico forma uma barreira capaz de barrar os elétrons livres remanescentes no lado N.

Se uma junção PN for exposta a luz solar e seus fótons possuírem energia suficiente para a criação de pares elétron-lacuna, haverá o deslocamento de cargas e desta forma a geração de pequenas correntes elétricas através desta junção. Este deslocamento dá origem a uma diferença de potencial ao qual chamamos de efeito fotovoltaico. Se as duas extremidades desta junção forem conectadas por um fio haverá a circulação de elétrons o que caracteriza uma **corrente elétrica**.

Nos muitos tipos de células solares existentes, diversos tipos de materiais semicondutores são utilizados. O princípio de funcionamento é muito semelhante ao funcionamento do silício citado anteriormente, as diferenças estarão basicamente na configuração das células, camadas de materiais e conseqüentemente em sua eficiência. Células solares representam a unidade conversora de energia

fundamental de um sistema fotovoltaico e possuem muito em comum com alguns dispositivos eletrônicos como diodos, transistores e circuitos integrados.

4.4) Células fotovoltaicas

Células solares dos mais variados tipos de estruturas, materiais e eficiência estão disponíveis no mercado. Células solares com até 30% de eficiência já foram desenvolvidas em laboratório, mas apenas células com até metade desta eficiência podem ser encontradas para venda.

Podemos dividir as células solares em três grupos levando-se em consideração a tecnologia utilizada em sua produção, são elas:

1) **Células convencionais (silício monocristalino e policristalino):** células de **silício monocristalino** são historicamente as mais utilizadas e comercializadas como conversor direto de energia solar em energia elétrica e a sua tecnologia de fabricação já está bastante desenvolvida e difundida. A fabricação deste tipo de célula começa com a extração do cristal de **dióxido de silício**. Este material é desoxidado em grandes fornos, purificado e solidificado. Este processo faz com que o silício atinja um grau de pureza de cerca de 98% a 99%. Para que este silício seja utilizado em células solares outros processos de fabricação são empregados até que a pureza chegue a níveis de 99,9999%. O processo mais utilizado para se chegar a níveis de pureza tão altos é o processo **Czochralski** no qual o silício é fundido juntamente com uma pequena quantidade de **dopante** (como boro) de modo a se formar um material do **tipo P** (positivo). Com uma parcela de cristal (obtido da fusão do silício e do dopante) devidamente orientado e sob controle rigoroso de temperatura, extrai-se do material fundido um grande cilindro de silício levemente dopado. Este cilindro é então fatiado. Após corte e limpeza de impurezas nas fatias são introduzidas impurezas do **tipo N** de forma a se obter junções. Este processo é feito através da difusão controlada onde as fatias de silício são expostas a vapor de fósforo em um forno de temperatura variando entre 800°C a 1000°C. Dentre as células fotovoltaicas que utilizam silício como material base, as monocristalinas são, em geral, as que apresentam as maiores eficiências. As fotocélulas comerciais obtidas com o processo descrito acima atingem uma eficiência de até 15% podendo chegar em 18% em laboratório.

As células de **silício policristalino** são mais baratas que as de silício monocristalino por exigirem um processo de preparação menos rigoroso. A eficiência, no entanto, cai um pouco em comparação às células de silício monocristalino. O processo de purificação do silício utilizado é similar ao processo do Si monocristalino, porém bem menos rigoroso. Este tipo de célula pode ser preparada pelo corte de um lingote, de fitas ou deposição em um substrato, tanto por transporte de vapor como por imersão. Nestes dois últimos casos apenas o silício policristalino pode ser obtido. 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. Abaixo temos um resumo das principais características das **células convencionais de silício**:

a) c-Si (Silício cristalino)

O c-Si é a tecnologia fotovoltaica mais tradicional, a mais difundida e consolidada no mercado devido à sua robustez e confiabilidade de funcionamento. O custo de produção de painéis solares é bastante elevado e a possibilidade de reduzir estes gastos já foi esgotada. São utilizadas lâminas cristalinas relativamente espessas (**espessuras de 300-400µm**) para a montagem de painéis fotovoltaicos de c-Si, o que representa uma limitação em termos de redução de custos de produção. O c-Si segue sendo, no entanto, o líder dentre as tecnologias fotovoltaicas para aplicações terrestres.

O recorde de eficiência de células de c-Si em laboratório é atualmente de 24%, bastante próximo do máximo rendimento teórico. Os melhores painéis disponíveis no mercado têm eficiência ao redor de 15%.

b) m-Si (Silício monocristalino)

Uma tecnologia baseada no c-Si é silício monocristalino. No caso de células fotovoltaicas de **silício monocristalino** (m-Si), o monocristal é “crescido” a partir de um banho de silício fundido de alta pureza (Si = 99,99% a 99,9999%) em reatores sob atmosfera controlada e com velocidades de crescimento do cristal extremamente lentas (da ordem de cm/h). Sendo que as temperaturas envolvidas são da ordem de 1400°C, o consumo de energia neste processo é extremamente intenso. Etapas complementares ao crescimento do monocristal envolvem usinagem do tarugo, corte de lâminas por serras diamantadas, lapidação, ataque químico e polimento destas lâminas, processos de difusão/dopagem, deposição da máscara condutora da eletricidade e finalmente a interconexão de células em série para a obtenção do painel fotovoltaico. Todos estes processos tornam o custo de produção muito elevado.

c) p-Si (Silício policristalino)

Outra tecnologia baseada no c-Si é o **p-Si**. O **silício policristalino** (p-Si) apresenta menor eficiência de conversão, tendo também um menor custo de produção, já que a perfeição cristalina é menor que no caso do c-Si e o processamento muito mais simples. O material de partida para a sua produção é o mesmo do m-Si, que é fundido e posteriormente solidificado direcionalmente, o que resulta em um cristal com grande quantidade de grãos ou cristais, no contorno dos quais se concentram os defeitos que tornam este material menos eficiente do que o m-Si em termos de conversão fotovoltaica.

2) Células de filmes finos: são células construídas tendo como base o silício amorfo (ou a-Si, ou ainda a-Si:H – silício amorfo hidrogenado) e outros elementos semicondutores, tais como Arseneto de

Gálio (GaAs), CIS - Dissulfeto de Cobre e Índio ou Telureto de Cádmio (CdTe). Em capítulos posteriores iremos abordar com maior ênfase as informações sobre estas tecnologias.

3) **Outras tecnologias:** são células baseadas na tecnologia **Ribbon** compostas por longas e finas fitas de silício cristalino, a **Artificial Leaf** baseadas em Dióxido de titânio e corantes fotoexcitáveis, a tecnologia **Spheral** que utiliza pequenas esferas de Silício dopadas e dispostas sobre folhas finas de alumínio. Estas tecnologias estão sendo estudadas e muitas ainda são apenas uma realidade em laboratório.

4.5) Estruturas construtivas de células fotovoltaicas

Para o entendimento do assunto central desta monografia se faz necessário o conhecimento dos vários tipos de arranjos construtivos das células fotovoltaicas. Segundo a literatura, estes arranjos podem ser divididos em:

- 1) Estrutura homojunção
- 2) Estrutura heterojunção
- 3) Estrutura de pino
- 4) Estrutura Multijunção

1) Estrutura homojunção

Células a base de silício cristalino (c-Si) utilizam este tipo de configuração. Esta estrutura utiliza apenas **um tipo de material** e a formação da junção PN ocorre pela dopagem de pastilhas deste mesmo material. A junção PN é dopada de forma que ocorra a máxima absorção de energia luminosa e, além disso, alguns aspectos devem ser levados em consideração tais como a espessura da superfície da junção PN, a quantidade e distribuição de átomos dopantes nos materiais dos tipos P e N, além da pureza e a cristalinidade do silício.

2) Estrutura heterojunção

Células deste tipo são formadas pela união de **dois materiais semicondutores diferentes** (como exemplo temos as células a base de CIS – Disseleneto de Cobre índio – onde a junção é formada pelos materiais semicondutores Sulfato de Cádmio (CdS) e o Disseleneto de Cobre-índio (CuInSe₂).

Estruturas deste tipo estão presentes nas células de filmes finos oferecendo a vantagem de produzir grande absorção de energia luminosa, pois a camada superior (confeccionada com material de **bandgap** elevado), permite que uma parcela da luz incidente alcance a camada superior (feita de

material com **bandgap** de baixo valor), absorvendo desta forma a energia luminosa incidente. Esta energia luminosa incidente permite a geração de elétrons e lacunas próxima à junção evitando que estes se recombinem.

Como vantagem das estruturas de heterojunção sobre as estruturas de homojunção temos que apenas um material deve ser dopado e não os dois como na homojunção o que diminui custos com produção de materiais dopados.

3) Estrutura de pino

Estas estruturas são formadas por três camadas onde cada uma possui uma condição específica para os portadores de carga. A primeira camada é do **tipo P**, a segunda de um material **intrínseco** e a terceira camada de material **tipo N**. Quando sob a ação da radiação solar, nesta estrutura há a formação de elétrons e lacunas livres no material intrínseco e estes são separados pelo campo elétrico gerado entre as camadas de materiais tipos P e N, criando então uma diferença de potencial na estrutura.

Um exemplo de utilização desta estrutura está em algumas células de silício amorfo (a-Si), onde a camada superior de material P possui uma estrutura muito fina e translúcida permitindo a passagem de luz incidente até a camada intermediária (intrínseco). Este intrínseco é mais espesso e a terceira camada (tipo N) também é tão fina quanto a primeira. Devido à estrutura atômica do silício amorfo (que não faz ligações covalentes), este possui alta capacidade de condução de corrente elétrica, proporcionando um índice baixo de diferença de potencial. A corrente elétrica só surge devido aos portadores de carga gerados sob a influência do campo elétrico gerado no material intrínseco.

Células de filmes finos a base de Telureto de Cádmio (CdTe) dotadas de estrutura de pino possuem a seguinte configuração: na camada superior temos o sulfato de cádmio, temos o CdTe intrínseco e a camada inferior o Telureto de zinco (ZnTe).

4) Estrutura Multijunção

Através desta estrutura há a possibilidade de se conseguir um elevado índice de conversão energética da radiação solar incidente em energia elétrica.

Sua estrutura é construída de tal forma que **várias camadas** de células sobrepostas e com **bandgap** de índices diferentes são dispostas de forma decrescente. O material com maior valor de **bandpag** é disposto no topo desta estrutura e absorve parte dos fótons de alta energia da radiação incidente, a segunda camada absorve fótons de menor energia e assim sucessivamente até a última célula.

5) Tecnologia fotovoltaica de filmes finos (películas delgadas)

5.1) Introdução

Dentre as muitas tecnologias já disponíveis e as em fase de pesquisa e desenvolvimento na área de células solares, podemos destacar um grupo específico de células chamado **células fotovoltaicas de filmes finos** (ou do inglês **Thin-film cells**). Esta tecnologia promete a diminuição do custo das células enquanto se garante a confiabilidade e durabilidade das mesmas. Utilizando-se uma **quantidade menor de material, diminuindo-se o consumo de energia** durante a produção das células e **reduzindo-se a complexidade dos processos** pode-se garantir a produção de células de filmes finos em larga escala a um preço competitivo e acessível.

Estas células se diferenciam das de outras tecnologias pela espessura das lâminas de material semicondutor utilizado em suas estruturas (geralmente na faixa de **1µm** contra 300 a 400 µm das células de c-Si).

Como veremos detalhadamente nesta segunda parte da monografia a tecnologia em filmes finos possui a promessa de reduzir os custos dos módulos fotovoltaicos através do uso de materiais de baixo custo e da redução da quantidade de energia utilizada em sua produção. Em adição, módulos integralmente conectados podem ser produzidos em série, reduzindo desta forma o custo das células individuais e suas interconexões (conexões série e paralelo das células). Dentre um grande número de possibilidades em produção de células de filmes finos, algumas tecnologias se destacam e são uma realidade tecnológica presente como opção na geração de energia elétrica a partir da energia solar. São elas:

- Tecnologia de células de silício amorfo (**a-Si**)
- Tecnologia de células Telureto de Cádmio (**CdTe**)
- Tecnologia de células de Disseleneto de Cobre e Índio (**CIS**)
- Tecnologia de células de Arseneto de Gálio (**GaAs**)

Algumas dessas tecnologias, principalmente a de silício amorfo, já estão em estágio comercial de produção e já possuem produtos disponíveis e já instalados, porém ainda é necessário algum tempo para se atingir a maturidade de produção e funcionamento das células. Entretanto, há esperança que destas pesquisas surja uma tecnologia confiável e de baixo custo que permitirá uma grande expansão no uso da energia solar para geração de eletricidade em um futuro próximo.

O critério para a viabilidade do comércio de células de filmes finos ainda é o baseado em condições econômicas, já que células de filmes finos utilizam materiais de difícil produção em suas estruturas e devido ao fato da luz solar conter relativamente pouca energia, se comparada a outras fontes energéticas. Painéis fotovoltaicos têm de ter um baixo custo para poder produzir energia elétrica a preços competitivos.

Mesmo com o a desvantagem da raridade de muitos materiais utilizados na produção de células de filmes finos existe a redução dos custos com módulos solares, pois os módulos, assim como as células, também poderão ser produzidos em grandes volumes a um custo baixo devido a sistemática e padronização dos meios de produção destes módulos.

Um requisito para a produção de uma célula solar é a diminuição dos danos ao meio ambiente em seus processos produtivos. Estes danos devem ser diminuídos (ou eliminados) desde a extração dos minerais que serão utilizados nas células, em seu refinamento, produção e até na utilização das mesmas. A energia gasta na produção de módulos fotovoltaicos deve ser diminuída de tal forma que o retorno desta energia através do funcionamento dos módulos aconteça em um espaço de tempo o mais curto possível.

A tecnologia de filmes finos, sendo menos eficiente e também por estar ainda na infância de seu desenvolvimento, tem no momento um rendimento em torno de 8~10% para painéis solares comerciais (que podem ser encontrados a preços competitivos e acessíveis), o que significa que se necessita de aproximadamente o dobro da área em painéis solares de filmes finos para obter a mesma energia fornecida pelos painéis de c-Si. Apesar de que painéis solares de filmes finos têm hoje preço menor por Wp que os de c-Si, a área ocupada para uma determinada potência instalada deve ser levada em consideração na análise econômica de forma a se optar pela tecnologia fotovoltaica mais viável para determinada aplicação.

5.2) Importância das células solares de filmes finos

A partir da década de 70 o silício amorfo foi utilizado pela primeira vez em células solares e imediatamente sua utilização se mostrou ideal na aplicação em calculadoras, relógios e pequenos produtos eletrônicos. Nos anos 80 o silício amorfo hidrogenado (a-Si:H) era considerado como a mais promissora tecnologia fotovoltaica em filmes finos onde a sua produção e comercialização seria economicamente viável.

Filmes finos para aplicações fotovoltaicas estão sendo desenvolvidos para a geração de potência elétrica por apresentarem baixos custos de produção decorrentes das quantidades diminutas de material envolvido, das pequenas quantidades de energia envolvidas em sua produção, do elevado grau de automação dos processos de produção e seu baixo custo de capital.

Um fator importante e interessante na aplicação de células solares de filmes finos é à sua incorporação aos projetos arquitetônicos, pois pela sua flexibilidade, leveza e transparência os mesmos podem ser diretamente instalados sobre telhados, fachadas, coberturas, etc.

Devido a estas características a tecnologia de filmes finos se mostra como uma alternativa interessante para geração de energia elétrica.

5.3) Vantagens e desvantagens das células de filmes finos

Segue-se abaixo uma série de vantagens e desvantagens desta tecnologia quando comparada às células convencionais de silício:

Vantagens

- Diminuição dos **custos de produção** (padronização adquirida com a produção em larga escala);
- Diminuição do **consumo de energia** durante a produção das células;
- Materiais semicondutores com espessura em torno de 1 μ m (daí o nome filmes finos) o que possibilita uso de quantidades pequenas de materiais por módulo;
- Pode-se utilizar **substratos de baixo custo** (aço, plástico, etc) para a deposição dos filmes finos (o que diminui custos e possibilita a reciclagem/reaproveitamento dos materiais utilizados nos painéis);
- Painéis podem ser facilmente **incorporados aos projetos arquitetônicos** devido às suas características de durabilidade, flexibilidade, leveza e transparência (podem ser usados em fachadas, telhados, etc);
- Painéis com aparência **estética** mais atraente;
- Incluem-se todas as outras vantagens citadas na primeira parte deste trabalho.

Desvantagens

- Raridade de alguns materiais utilizados na produção das células fotovoltaicas;
- Pouca disseminação das tecnologias;
- Baixa eficiência se comparada a outras tecnologias (necessidade de uma maior área de módulos para produção de mesma quantidade de energia elétrica quando comparada a outros tipos de tecnologias fotovoltaicas);
- Diminuição da eficiência ao longo de um curto período de tempo para alguns tipos de tecnologias (Efeito **Staebler-Wronski**).

5.4) Células fotovoltaicas de filmes finos

A tecnologia em filmes finos possui a promessa de reduzir os custos do módulo através de materiais de baixo custo e reduzir a quantidade de energia utilizada em sua produção. Como já foi dito, a redução dos custos com módulos solares é de vital importância para a popularização das tecnologias fotovoltaicas e as tecnologias de filmes finos proporcionam este benefício.

A estabilidade das células de filmes finos gerou por muito tempo dúvidas e uma falta de aceitação da tecnologia por parte da comunidade científica e das empresas. A estabilidade das células de filmes finos depende do material semicondutor utilizado na célula, das interconexões entre as células na formação do módulo e do material de encapsulamento do mesmo. Pesquisas realizadas há alguns anos vêm tentando contornar esta situação através do uso de estruturas multijunção e encapsulamento mais efetivo. Muitos fatores de degradação de eficiência das células, quando as mesmas são expostas a condições severas de temperatura e umidade ainda não são totalmente compreendidos sendo estes os maiores desafios em se aumentar a aceitação da tecnologia de filmes finos.

Entre um grande número de possibilidades em produção de células de filmes finos, algumas poucas são candidatas para a produção comercial em um futuro próximo. O critério de escolha para a viabilidade comercial é sempre baseado em condições econômicas.

As principais tecnologias de filmes finos utilizam materiais diferentes em sua construção física e cada uma possui as suas características. As quatro tecnologias que serão abordadas neste capítulo são as que já estão em uso ou estão sendo pesquisadas. Estas quatro tecnologias, segundo pesquisas, se mostraram muito promissoras devido à diminuição de gastos com materiais e maior facilidade de produção em larga escala devido a processos mais simples. As pesquisas com células de filmes finos continuam em um ritmo cada vez maior e dentro de poucos anos o comércio de células deste tipo se mostrará viável e mais acessível ao consumidor.

5.4.1) Células de silício amorfo (a-Si)

5.4.1.1) Características do a: Si

As células de **silício amorfo (a-Si ou a-Si:H)** diferem das de silício cristalino no que diz respeito a posição de sua estrutura eletrônica, seus átomos não estão localizados de maneira muito precisa (gerando ângulos diferentes entre cada átomo). **Amorfo** significa “falta de estrutura” ou “falta de ordem”. Esta aleatoriedade no arranjo estrutural nos elementos semicondutores gera um poderoso impacto nas propriedades eletrônicas do material criando no material um **gap** de energia em torno de 1,75 eV (**direct-gap**). Uma vez que se mostrou possível a produção de materiais N e P através do a-Si (através da incorporação de hidrogênio em sua estrutura para a diminuição de densidade de estados no **bandgap** e posteriormente a adição de dopantes como fósforo e boro) o seu uso na conversão de energia solar se mostrou viável.



Figura 1 – Módulo de a-Si em substrato de vidro (Fonte: www.sanyo.co.jp)

Os filmes finos (Figura 1) de a-Si possuem espessura de cerca de $1\mu\text{m}$ e geralmente são utilizadas diversas camadas deste material nas células solares. Módulos solares deste material possuem eficiência em torno de 5% a 8%, sendo que em laboratório foram obtidos resultados de eficiência das células de até 14%. Uma característica muito interessante do a-Si é que mesmo sobre iluminação artificial consegue-se bons índices de conversão de energia (devido à absorção da radiação se dar na faixa de radiação visível). Até 90% da energia solar incidente em uma célula de a-Si pode ser absorvida.

Células de a-Si sofrem uma degradação de sua eficiência no primeiro ano de operação (efeito **Staebler-Wronski**) o que acarreta uma perda de eficiência da ordem de 15% a 20%. Em termos práticos, esta diminuição de rendimento é assumida pelos fabricantes, que já na especificação do painel inclui a margem de degradação. Desta forma, logo que adquirido, um painel solar de a-Si apresenta uma performance superior à especificada para o produto. Após aproximadamente um ano em operação é que a performance estabiliza nos níveis de garantia do produto.

O processo de produção de a-Si ocorre a temperaturas baixas ($<300^\circ\text{C}$) em processos a plasma, o que possibilita que filmes finos produzidos com este material sejam depositados sobre **substratos de baixo custo** (vidro, aço inox, plásticos, etc). Com esta vantagem na produção de células solares de a-Si, conseguiu-se painéis solares flexíveis, leves, inquebráveis e semitransparentes, o que permite uma maior quantidade de utilizações desta tecnologia. Fachadas, telhados e janelas de várias construções ao redor do mundo utilizam células de a-Si incorporadas ao seu projeto arquitetônico o que garante ambientes ecologicamente corretos e com boas características estéticas.

5.4.1.2) Estrutura da célula de a-Si

A estrutura simples de uma célula fotovoltaica de a-Si é mostrada na Figura 2 abaixo.

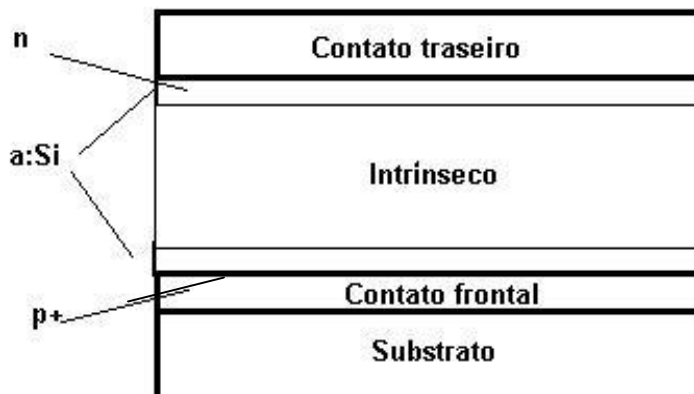


Figura 2 – Estrutura de uma célula de a-Si (estrutura simples) (Fonte: MARKVART, pág 60)

O material condutor transparente (**contato frontal**) geralmente utilizado é algum tipo de óxido do tipo P. Esta camada de óxido gera uma junção com a camada p+ de a-Si formando uma baixa resistência ao fluxo de elétrons.

Um semiconductor chamado **intrínseco** é usado na célula para gerar um forte campo elétrico na mesma, este campo elétrico possui a propriedade de melhorar o transporte de cargas entre as junções. Este intrínseco possui a quantidade correta de elétrons para preencher a banda de valência sendo que sua banda de condução permanece vazia, além disto é no intrínseco que ocorre a região com maior fotoregeneração na célula solar. Se utilizássemos apenas materiais P e N nesta célula e não tivéssemos o intrínseco, teríamos um sistema com eficiência muito baixa.

Partindo-se da tecnologia de silício amorfo é possível produzir **células multijunção**. Estas células são constituídas de diversas camadas de materiais e permitem a diminuição do efeito **Staebler-Wronski**, na qual a eficiência da célula diminui com o tempo.

A absorção da luz nas células multijunção acontece de forma diferente das de única junção, pois a luz é dividida entre diversas camadas (junções) da célula.

A estrutura multijunção mais simples com células de a-Si é a configuração **p-i-n/p-i-n** (Figura 3). A espessura total desta célula é de 1 μ m, sendo a primeira camada (frontal) com 0,3 μ m e a segunda camada com 0,7 μ m (com esta configuração é possível criar correntes iguais em cada camada da célula). Estruturas multijunção já são produzidas comercialmente e se mostraram mais estáveis que outras estruturas.

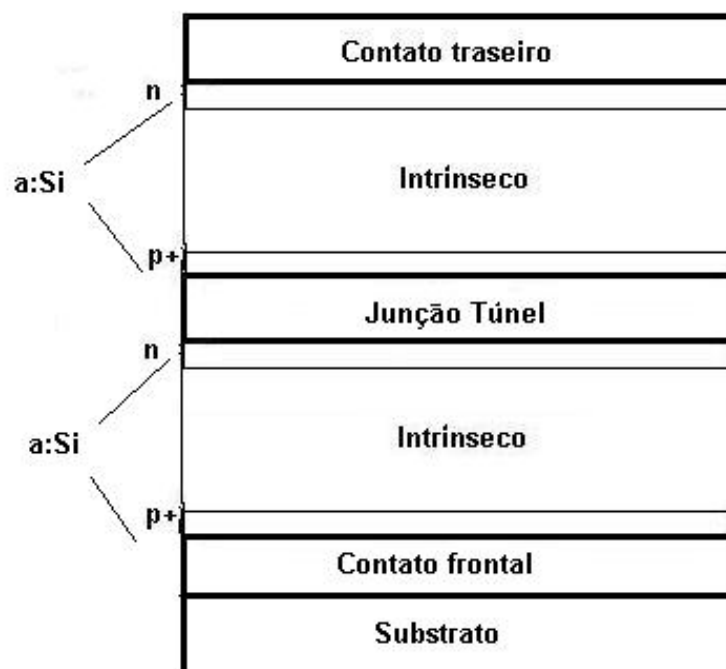


Figura 3 - Estrutura multicamada p-i-n/p-i-n de uma célula a-Si (Fonte: MARKVART, pág 62)

Um outro tipo de estrutura que se mostrou mais estável e eficiente que as outras estruturas convencionais de a-Si é a célula **de tripla camada de a-Si (triple-stack a-Si cell)**. Nesta célula utiliza-se três camadas de a-Si com diferentes misturas de elementos, entre eles o carbono e o germânio (Figura 4). Células deste tipo possuem uma eficiência de 13,3% (células de uma única junção possuem eficiência de 12%).

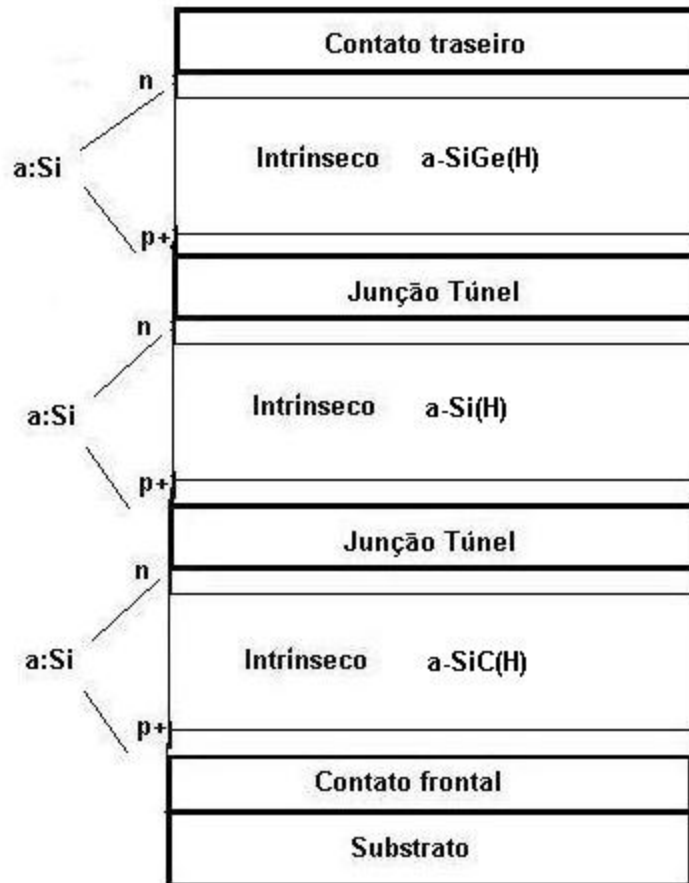


Figura 4 – Estrutura de uma célula de tripla camada de a-Si (Fonte: MARKVART, pág 63)

A principal dificuldade técnica limitante e que gera aumento de custos na produção de células multijunção é a formação da junção “túnel” entre as camadas N da primeira parte da célula e a camada P da última parte da célula. Os processos de produção de células deste tipo são mais caros e consomem mais energia durante o processo de fabricação devido a um maior número de etapas de produção.

5.4.1.3) Produção da célula de a-Si

O esquema abaixo (Figura 5) mostra de forma simplificada a produção de módulos de silício amorfo.

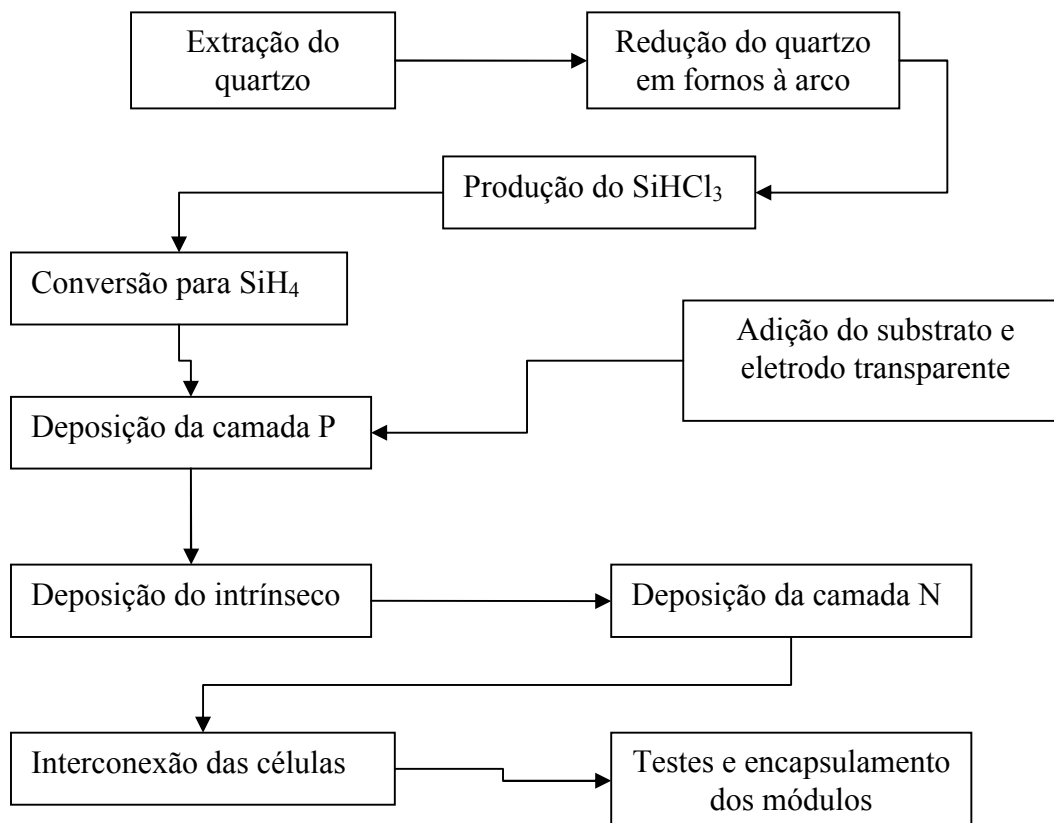


Figura 5 – Etapas do processo de produção de células de a-Si

Sendo determinada a estrutura otimizada das células de filmes finos, o processo de manufatura das mesmas pode ser definido. Começa-se o processo utilizando-se uma **placa de vidro** (ou outro substrato de baixo custo) sendo que este deverá ser um substrato resistente à longa exposição às mudanças climáticas. Logo após, uma camada de **óxido transparente e condutor** (geralmente ZnO) é depositada neste substrato, depois é depositada uma **camada P de a-Si** suficientemente fina para absorver a luz. Uma **camada N de intrínseco de a-Si** é colocada e logo depois uma **fina camada N de a-Si** (o intrínseco possui características N diferentes desta camada N). Na parte traseira da célula é inserida uma camada metálica condutora. Esta camada metálica condutora forma um contato ôhmico com a camada N de a-Si e por ser altamente reflexiva faz com que toda a luz não absorvida pela célula seja refletida de volta passando uma segunda vez pelo intrínseco. Para este caso a prata seria um ótimo material reflexivo e poderia ser utilizado como camada metálica condutora, mas por razões econômicas é utilizado o alumínio.

Como a qualidade do a-Si foi melhorada através dos anos 70, se tornou aparente que a absorção da luz pelo intrínseco traria algumas deficiências adicionais à célula, aumentando a densidade dos estados dos materiais quando atingidos pela luz solar e reduzindo a eficiência das células. Este efeito chamado **Staebler-Wronski** depende da intensidade da luz a qual a célula é exposta, a duração da exposição e da espessura da camada i (intrínseco) da célula.

Exposição a luzes artificiais, como nas calculadoras com células solares, tem pouco efeito na eficiência das células, mas luz solar branca reduz a eficiência consideravelmente num período de meses. Esta instabilidade gera conseqüências sérias na viabilidade comercial dos módulos de a-Si. O **efeito Staebler-Wronski** depende da espessura da camada i sendo que o mesmo pode ser diminuído utilizando-se estruturas com múltiplas seções, nas quais a absorção da luz é dividida igualmente entre várias (2 ou 3) camadas i. A mais simples destas estruturas é justamente a do tipo p-i-n/p-i-n (a-Si) apresentada anteriormente (Figura 3). Células deste tipo de estrutura já se encontram em fase de produção comercial e são significativamente mais estáveis do que as do tipo de apenas uma junção.

Abaixo (Tabela 2) temos um bom exemplo dos parâmetros de um módulo de a-Si do tipo p-i-n/p-i-n bem como sua degradação de eficiência ao longo do tempo. O módulo possui nome **HelioGrid 40 e 45** e é fabricado pela **HelioGrid** (www.heliogrid.com). Segundo o fabricante, este módulo possui alta durabilidade devido às técnicas de encapsulamento e o efeito **Staebler-Wronski** é muito pequeno devido à estrutura de dupla junção.

TABELA 2 – Parâmetros de um módulo de dupla junção de a-Si

Parâmetros de um módulo de a-Si de dupla junção em condições padrão de teste*	
Potência	P _m = 45W ± 10%
Tensão de operação	V _m = 44,8V ± 10%
Corrente de operação	I _m = 0,9A ± 10%
Tensão de circuito aberto	V _{oc} = 62,2v ± 10%
Corrente de curto-circuito	I _{sc} = 1,16A ± 10%
Coefficientes de temperatura	V _{oc} & V _m = -0,28% / °C
	I _{sc} & I _m = +0,09% / °C
	P _m = -0,19% / °C
Tensão máxima no sistema	V = 1000V ou 600V
Garantias	Garantia de 5 anos
	Degradação para 90 % após 10 anos
	Degradação para 80% após 20 anos
Dimensões (mm)	1245 x 635 x 6,5
Superfície total (m²)	0,79
Superfície ativa total (m²)	0,75
Peso (kg)	13,5

*Irradiação de 1000W/ m², 25°C

Fonte : HelioGrid (www.heliogrid.com)

Um outro bom exemplo de uso da tecnologia a-Si pode ser citado levando-se em consideração as inúmeras fábricas inauguradas para produção de módulos. Na cidade de Jena, Alemanha, a empresa **SCHOTT Solar** inaugurou uma fábrica de módulos de a-Si com capacidade de produção de 33MW por ano. Por dia são fabricados cerca de 1000 módulos fotovoltaicos de a-Si (com até 130x110 cm)

gerando 180 empregos e constituindo um investimento de 75 milhões de euros. Até 2010 a **SCHOTT Solar** planeja estender sua produção para 100MW por ano na fábrica de Jena. Com a inauguração de mais 3 fábricas de módulos a-Si (República Tcheca, Bavária e EUA) o objetivo é alcançar 450 MW por ano de produção até 2010.

5.4.1.4) Vantagens e desvantagens das células de a-Si

Como vantagens e desvantagens específicas desta tecnologia pode-se citar:

Vantagens:

- Baixo custo dos materiais empregados na fabricação da célula (substratos principalmente);
- Células leves e flexíveis;
- Tecnologia amadurecida e difundida;
- Características estéticas possibilitam diversidade de usos da tecnologia.

Desvantagens:

- Efeito **Staebler-Wronski** (degradação da eficiência);
- Degradação de eficiência quando em situações severas de clima, temperatura, etc, ainda não totalmente compreendidas;
- Lenta taxa de deposição dos materiais no substrato durante a fabricação da célula;
- Baixa eficiência se comparada a outras tecnologias.

5.4.2) Células de Telureto de Cádmio (CdTe)

Dentre as células de filmes finos que apresentaram maior progresso nos últimos anos pode-se citar as células de CdTe (**Telureto de Cádmio**). Abaixo temos um módulo de CdTe (Figura 6). Este progresso se mostrou tão promissor que uma instalação geradora de energia elétrica (1400kWp) feita somente de módulos de CdTe pode ser encontrada em Dimbach, Alemanha. Muitos outros sistemas variando entre 400Wp e 1400kWp podem ser encontrados na Alemanha e EUA. Este progresso se deve à pesquisa intensa de novos materiais, novas tecnologias de produção e disseminação da tecnologia pelo mundo ocorrida nos últimos anos.



Figura 6 – Módulo de CdTe (Fonte: National Renewable Energy Laboratory (NREL) (www.nrel.gov))

5.4.2.1) Características do Telureto de Cádmio

O Telureto de Cádmio (**CdTe**) é um dos materiais policristalinos mais promissores para aplicação em células fotovoltaicas de filmes finos devido ao seu elevado valor de coeficiente de absorção ($\alpha = 10^4 \text{ cm}^{-1}$) e ao valor de sua **bandgap** (1,5 eV) muito próximo do máximo de eficiência da conversão solar.

O **Sulfeto de Cádmio** (CdS) é o material tipo N utilizado na junção com o CdTe. Após a deposição, o CdTe se torna um semiconductor de alta resistividade e alta concentração de defeitos em sua estrutura. Estas características foram responsáveis pela baixa eficiência das primeiras células de CdS/CdTe. Na tentativa de solucionar estes inconvenientes, foi desenvolvido no início dos anos 80, um **tratamento térmico** realizado após a deposição do CdTe, que reduziria a densidade dos defeitos. A partir de então, estudos relacionados a este tratamento, o qual ocorre na presença de ar e uma solução de Cloreto de Cádmio (CdCl_2), vêm sendo desenvolvidos. Os principais efeitos notados na presença de CdCl_2 são alto crescimento dos grãos, redução na densidade de defeitos no interior da banda proibida e densificação do filme. O motivo pelo qual o tratamento é realizado em ar é que se pode, durante o processo, converter a característica do filme de N para P, pela incorporação do oxigênio. Estas melhorias nas propriedades físicas do CdTe têm sido responsáveis por um grande aumento na eficiência da célula. A diferença maior das células de CdTe para as de silício é que sua conversão de energia possui justamente esta maior eficiência. Atualmente, células e módulos comerciais de CdTe possuem 16,5% e 10,2% de eficiência respectivamente.

5.4.2.2) Estrutura típica de uma célula de CdTe

Para células solares de filmes finos de CdTe a estrutura típica é: **vidro/SnO₂/CdS/CdTe/contatos** (Figuras 7 e 8). Neste tipo de célula, a maior eficiência já conseguida em laboratório foi de 16,5% (**National Renewable Energy Laboratory (NREL)**). Em casos particulares o SnO₂ (contato frontal) pode ser substituído pelo Cd₂SnO₄ (substituição que se mostrou muito promissora). Células de CdTe de eficiência 13,5% foram produzidas utilizando-se contatos traseiros semitransparentes.



Figura 7 – Estrutura simples de uma célula de CdTe (Fonte: MARKVART, pág 68)

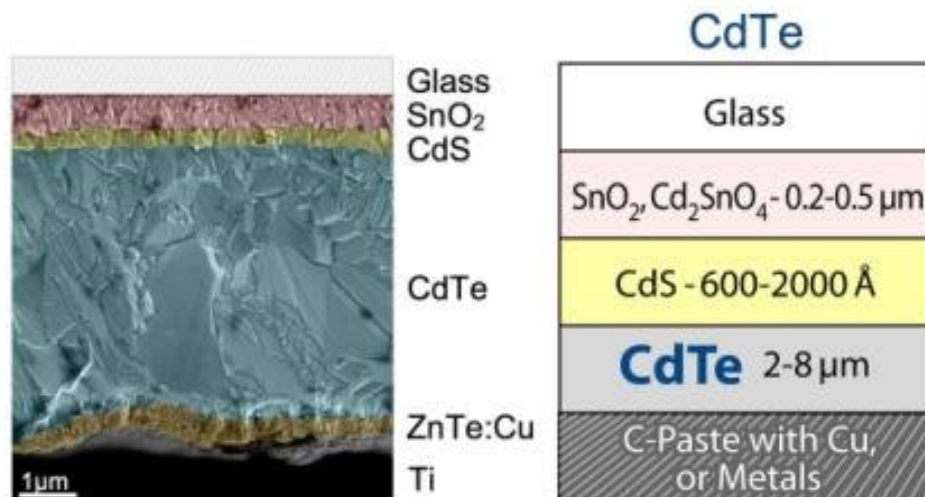


Figura 8 – Imagem microscópica de uma célula de CdTe (Fonte: National Renewable Energy Laboratory (NREL) (www.nrel.gov))

Estas células geralmente são produzidas através da deposição a vácuo a altas temperaturas (>500°C). Outros métodos possíveis utilizam “eletrodeposição” dos materiais no substrato, o que se mostrou mais eficiente após pesquisas sobre o método.

As pesquisas para a melhoria da performance e eficiência das células de CdTe incluem a uniformidade dos filmes de CdTe, a absorção da luz pelas camadas de CdTe, a difusão do Sulfeto de Cádmio no CdTe devido à junção entre os dois materiais, tratamento térmico do CdCl₂ e a dopagem com cobre (Cu) nos contatos traseiros da célula.

Progressos e implementações nestes materiais das células permitirão eficiências maiores no processo de conversão de energia. Como exemplo de um grande progresso nos módulos de CdTe pode-se citar o aumento de potência em um módulo de CdTe de 60x120 cm de 50 a 55 Wp para 55 a 65 Wp (aumento substancial de potência com apenas um aumento de 10% na área efetiva do módulo).

5.4.2.3) Vantagens e desvantagens da tecnologia CdTe

Como vantagens e desvantagens específicas desta tecnologia pode-se citar:

Vantagens:

- Características do material bem próximas do ideal para utilização em energia solar;
- Tecnologia extremamente promissora em um futuro próximo devido às características já apresentadas;
- Módulos flexíveis e com boas características estéticas.

Desvantagens:

- Métodos de produção caros e investimento inicial alto;
- Materiais utilizados na célula são de alto custo, tóxicos e raros na natureza;
- Degradação de eficiência quando em situações severas de clima, temperatura, etc, ainda não totalmente compreendidas (observada degradação de 10% após um ano e meio de testes de campo);
- Tecnologia pouco difundida e em fase de amadurecimento.

5.4.3) Células de Disseleneto de Cobre e Índio (CIS)

Nos últimos anos o interesse mundial pela tecnologia fotovoltaica em módulos de CIS cresceu devido à sua inserção no mercado de fotovoltaicos, pela sua produção por mais de doze entidades e pela suas potencialidades. A **Shell Solar Industries** (SSI) lançou em 2005 módulos solares de CIS de 80Wp (nomeados **Eclipse**) para diversas aplicações. A **Global Solar Energy** (GSE) fabricou em 2005 células solares comerciais com eficiência de 10,2% e potência de 88,9Wp. A maior eficiência já alcançada em um módulo solar comercial de CIS foi conseguida pela **Würth Solar** na Alemanha, esta

célula possui 13% de eficiência e uma potência de 84,6Wp. Abaixo temos um módulo de CIS do tipo flexível (Figura 9).

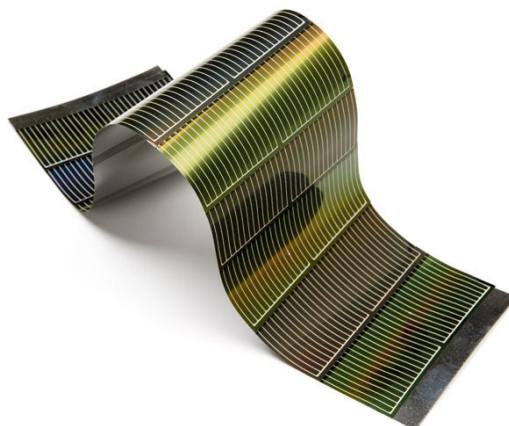


Figura 9 – Módulo flexível de CIS (Fonte: Global Solar)

5.4.3.1) Características do Disseleneto de Cobre e Índio (CIS)

O **Disseleneto de Cobre e Índio** é formado pelos elementos químicos **Cobre** (Cu), **Índio** (In) e **Selênio** (Se). O nome dado à tecnologia CIS compreende as primeiras letras destes elementos. Estes elementos naturais são quimicamente muito estáveis e através do seu uso em conjunto pode-se conseguir um composto com propriedades semicondutoras que possui grande capacidade de absorção da radiação solar.

Os compostos à base de Disseleneto de Cobre e Índio (**CuInSe₂**, ou simplesmente **CIS**) possuem várias características que os tornam muito promissores, entre eles pode-se citar as elevadas taxas de eficiência. Células de CIS de pequenas áreas testadas em laboratório apresentaram eficiências em torno de 20% e em painéis com grandes áreas as eficiências chegam em torno de 10% a 13%.

Painéis solares de CIS apresentam, como o a-Si e o CdTe, uma ótima aparência estética e no mercado já podem ser encontrados em forma de telhados, revestimentos, janelas, etc.

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

5.4.3.2) Estrutura de uma célula de CIS

A estrutura mais simples de célula de CIS está esquematizada na Figura 10 abaixo. Nessa estrutura é usada uma camada muito fina de CdS juntamente com uma camada de material condutor (geralmente óxido de zinco).

A outra estrutura típica, porém mais elaborada, de uma célula de CIS é a configuração **MgF₂/ZnO/CdS/CIS/Mo/vidro**. Como substrato para este tipo de célula pode-se usar além do vidro, alguns polímeros, folhas metálicas, etc. O recorde de eficiência em laboratório para células de CIS desta configuração é de 19,5% (utilizando-se uma variação de CIS e CIGS). O CIS e o ZnO podem ser depositados no substrato através do método de deposição a vapor, o CdS pode ser também depositado através da deposição de vapor ou também pode ser depositado através de deposição por banho químico (**CBD – Chemical-Bath Deposition**).

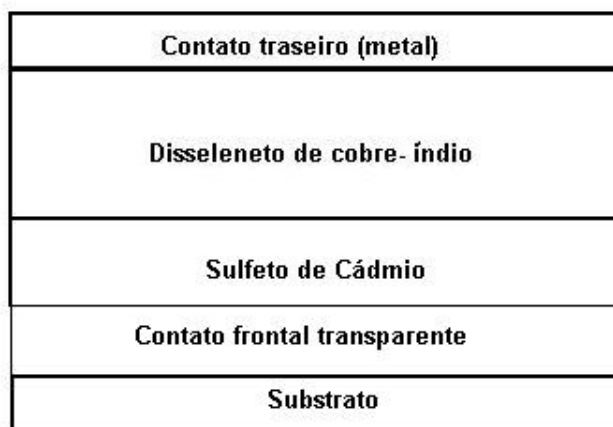


Figura 10 – Estrutura típica de uma célula de CIS (Fonte: MARKVART, pág 66)

O modo de produção de uma célula de CIS (Figura 11) é descrito a seguir: **uma placa de vidro de 2 a 4mm de espessura** é revestida em uma das superfícies por uma camada de 0,5µm de espessura com o elemento químico **Molibidênio** (Mo), este Molibidênio possui o objetivo de criar uma camada protetora na célula e também atuar como contato elétrico traseiro (sendo um referencial positivo). Posteriormente, num ambiente à vácuo e em temperatura de 500°C, os elementos **Cu, In e Se** são vaporizados sobre a superfície revestida com Molibidênio criando-se uma película com espessura de 2µm. Este processo é chamado **Sputtering**. Uma camada de **Sulfato de Cádmio** (CdS) de 0,05µm de espessura é adicionada ao material, propiciando a função anti-reflexiva à célula. Finalmente uma **camada transparente de ZnO** (Óxido de Zinco) de 1µm de espessura é depositada sobre os elementos vaporizados, aumentando a transparência e formando o contato elétrico superior (referencial negativo) da célula fotovoltaica.

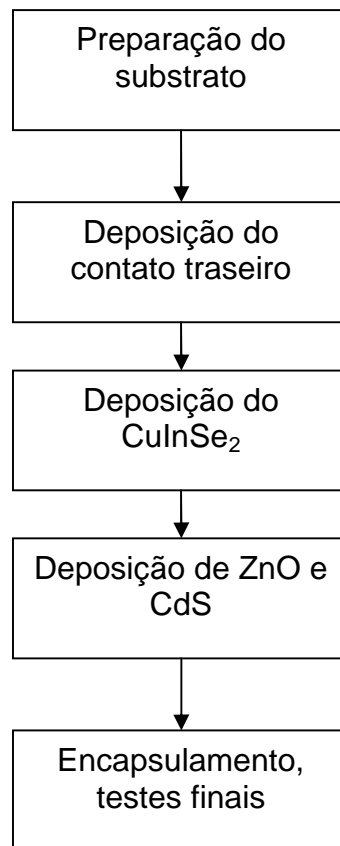


Figura 11 – Processo de produção de uma célula de CIS (Fonte: MARKVART, pág 66)

A incorporação do gálio na célula de CIS produz um tipo específico de célula chamada **CIGS** (**Cobre-Índio-Gálio-Selênio**) cuja estrutura pode ser vista nas Figuras 12 e 13 abaixo. Com esta incorporação do gálio há o aumento do **bandgap** no composto, se o **bandgap** aumenta a tensão de circuito aberto aumenta, diminuindo desta forma o número de células por módulo. O **bandgap** ideal para esta tecnologia se encontra na faixa de 1 eV a 1,7eV.

O processo de produção da CIGS começa com a deposição do **Mo** no substrato de vidro. O molibdênio possui a propriedade de otimizar a adesão, melhorar a resistência e promover a difusão do **Na** (Sódio) através da camada de CIGS. O sódio aumenta a quantidade dos portadores de carga na célula. A concentração ideal de sódio na célula é de 0,1%. A camada **CdS** é inserida por banho químico (**CBD – Chemical Bath Deposition**), seguida pela deposição do **intrínseco** e da camada **ZnO** (aplicado pela técnica de deposição a vapor químico).

Para o CIS, a tensão na potência máxima da célula é usualmente de 300-350mV. Na CIGS com apenas de 10% a 20% de gálio incorporado à célula este valor aumenta para 450-500mV (quase o mesmo valor que em células de silício cristalino). Além dos **processos de evaporação** desenvolvidos para a deposição dos materiais semicondutores nas células de CIS, para a tecnologia CIGS foram desenvolvidos mais dois métodos de deposição de semicondutores: o **método de deposição à vácuo** através do qual a deposição ocorre através de um processo conhecido como “**selenização**” e através de um outro método conhecido como **Nanoparticle paints** (ou **inks**). CIGS possui um **bandgap** de cerca de 1,1 eV.

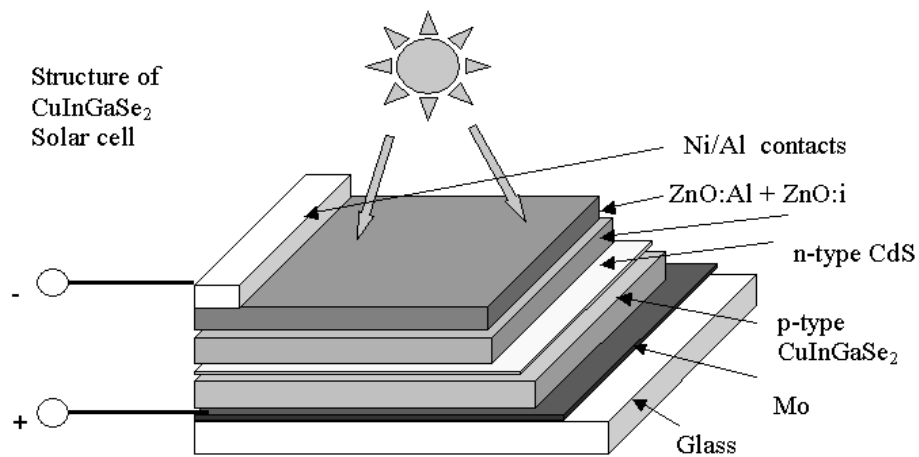


Figura 12 – Estrutura otimizada de uma célula de CIGS (Fonte: National Renewable Energy Laboratory (NREL) (www.nrel.gov))

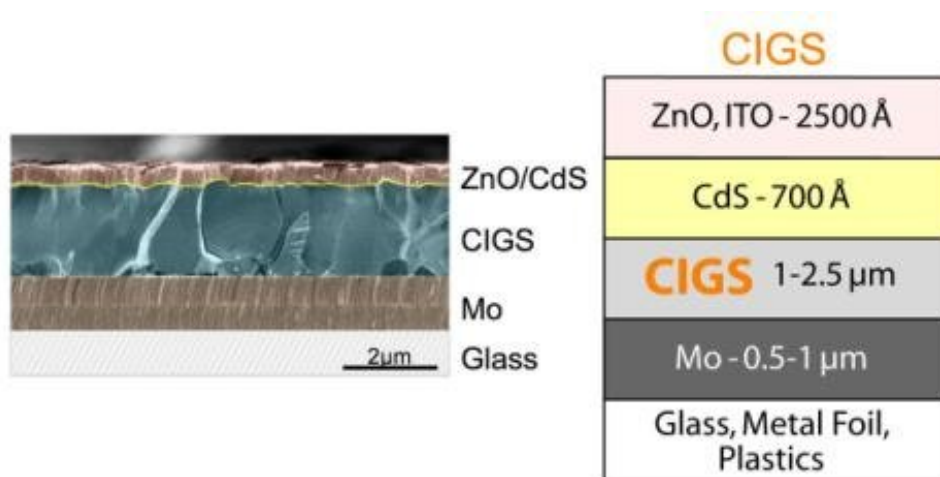


Figura 13 – Imagem microscópica de uma célula de CIGS (Fonte: National Renewable Energy Laboratory (NREL) (www.nrel.gov))

Abaixo (Tabela 3) temos uma relação da eficiência e potência da célula de CIGS já em fase comercial alcançada por algumas empresas:

TABELA 3 – Eficiência e potência de células de CIGS produzidas por algumas empresas

Empresa	Potência (W)	Eficiência (%)
Global Solar	88,9	10,2
Würth Solar	84,6	13
Showa Shell	44,15	12,8

Fonte: National Renewable Energy Laboratory (NREL) (www.nrel.gov)

5.4.3.3) Vantagens e desvantagens da tecnologia CIS

Como vantagens e desvantagens específicas desta tecnologia pode-se citar:

Vantagens:

- Alta eficiência das células (19,2% em laboratório) e alta eficiência de módulos (13,4%);
- Módulos flexíveis e com boas características estéticas;
- Alta vida útil dos painéis;
- Tecnologia promissora em um futuro próximo devido às características dos materiais empregados.

Desvantagens:

- Raridade e toxicidade dos materiais utilizados na célula;
- Métodos de produção complexos;
- Degradação de eficiência quando em situações severas de clima, temperatura, etc, ainda não totalmente compreendida;
- Alto custo dos processos de produção.

5.4.4) Células de Arseneto de Gálio (GaAs)

Células fotovoltaicas de **Arseneto de Gálio** (GaAs) estão entre as células com maior índice de eficiência já alcançado. Esta tecnologia se encontra em pesquisa desde a década de 80 e sua utilização ainda se restringe a casos especiais como painéis solares de satélites e módulos espaciais devido ao alto custo de produção das células. A tecnologia fotovoltaica de filmes de Arseneto de Gálio também é conhecida como **Filmes finos Monocristalinos de Arseneto de Gálio**.

5.4.4.1) Características do Arseneto de Gálio (GaAs)

O **Arseneto de Gálio** (GaAs) é um elemento composto de propriedades semicondutoras e é constituído da combinação dos elementos **Gálio** (Ga) e **Arsênio** (As). O composto gerado é um elemento tóxico e possui diversas propriedades importantes quando utilizado na geração de energia elétrica através da energia solar. Estas propriedades tornam as células fotovoltaicas produzidas com esta tecnologia extremamente eficientes e promissoras. Abaixo estão relacionadas algumas destas propriedades:

- GaAs possui um **bandgap** muito próximo do ideal (1,43eV);

- GaAs não possui grande sensibilidade ao calor (não perdendo suas características condutivas em ambientes com alta temperatura);
- GaAs pode ser incorporado a diversos elementos (fósforo, índio, etc) de forma a se conseguir elementos compostos com características especiais e melhoria do controle da quantidade de portadores de carga próximos às junções;
- Elevado grau de absorção a radiação solar.

5.4.4.2) Estruturas das células de Arseneto de Gálio (GaAs)

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

As células de GaAs são produzidas utilizando-se duas técnicas que se mostraram extremamente eficientes: a **MBE (Molecular Beam Epitaxy)** e a **MOCVD (Metal-organic Chemical Vapour Deposition)**. Na técnica **MOCVD**, um substrato previamente aquecido é exposto a moléculas orgânicas de gálio e arsênio em forma de gás, as quais reagem em altas temperaturas e se aderem ao substrato. A técnica **MBE** é considerada como o melhor método para crescimento dos cristais de GaAs e produção das células, através dela é possível produzir camadas de intrínseco de diferentes espessuras. Nas duas técnicas a produção do cristal resulta em um alto grau de cristalinidade e conseqüentemente gera células com maior eficiência na conversão de energia.

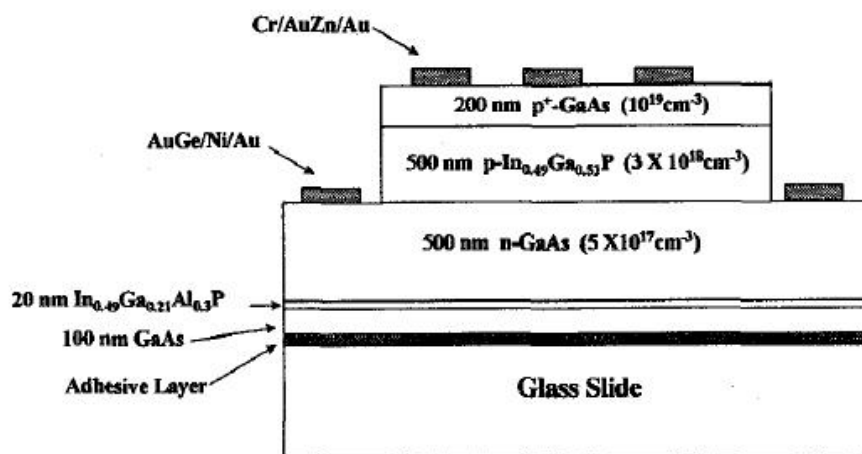


Figura 14 – Estrutura de uma célula de GaAs (Fonte: Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade da Califórnia, EUA)

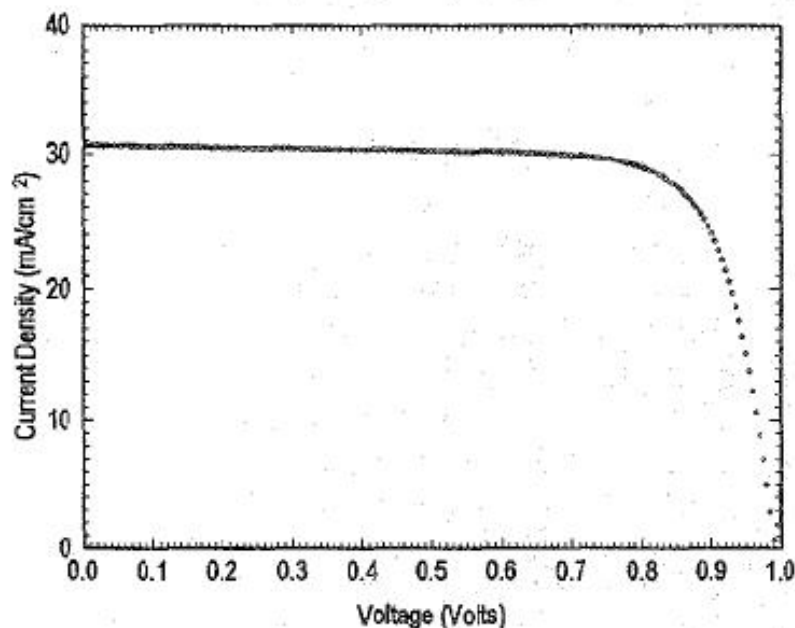


Figura 15 – Curva **VxI** de uma célula de GaAs sob iluminação direta (Fonte: Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade da Califórnia, EUA)

A Figura 14 mostra um tipo de estrutura de célula de GaAs pesquisada pelo Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade da Califórnia, EUA. Esta célula é produzida segundo um outro tipo de técnica denominada **ELO – Epitaxial Liftoff**. Esta técnica permite a deposição do GaAs de forma eficiente em substratos de vidro. Segundo o gráfico acima (Figura 15), com iluminação direta os valores de V_{oc} e densidade de corrente são de 0,995V e 30,7 mA/cm², respectivamente. Segundo os pesquisadores, estes valores foram alcançados devido à configuração escolhida para montagem da célula na qual os contatos ativos não obstruem a luz incidente para as camadas internas da célula.

Uma grande limitação para o sucesso da tecnologia de GaAs é o alto custo de produção do Arseneto de Gálio, já que este elemento é do tipo composto e necessitando de processos químicos complexos para sua produção. Como opções para diminuição do custo de produção temos a possibilidade de reciclagem da GaAs e aumento da eficiência das células para compensação do alto custo.

Células de GaAs de junção simples possuem uma restrição não permitindo um maior índice de eficiência, esta restrição é devido a junção simples absorver apenas uma pequena parcela do espectro de luz solar. Este efeito é diminuído utilizando-se células multijunção que com o uso de mais camadas de GaAs e outros materiais a eficiência da célula pode chegar até a 35% (em laboratório). Células de GaAs multijunção são utilizadas geralmente com concentradores de luz solar o que também aumenta a eficiência destas células.

Esta tecnologia ainda se encontra em fase de pesquisa e desenvolvimento. Devido a suas células ainda não estarem totalmente padronizadas não existe um único tipo de estrutura da célula. Um tipo de estrutura que vem se mostrando muito promissora é a estrutura do tipo p/i/n de GaAs (Figura 14), nesta célula existe a combinação de diferentes tipos de materiais em camadas, entre eles estão o

germânio, níquel, ouro que são responsáveis pelos contatos ôhmicos entre as camadas. Esta variedade de elementos na célula resulta em alto custo de produção de células desta tecnologia.

5.4.4.3) Vantagens e desvantagens do GaAs

Como vantagens e desvantagens específicas desta tecnologia pode-se citar:

Vantagens

- Alta eficiência das células;
- Flexibilidade de confecção das estruturas das células (possibilidade de células multijunção);
- Propriedades do GaAs próximas do ideal para utilização na conversão de energia;
- Baixas perdas de energia devido à temperatura.

Desvantagens

- Alto custo de produção dos módulos devido à complexidade da estrutura;
- Alto custo e raridade dos materiais utilizados nas células;
- Toxicidade do GaAs;

5.5) Filmes finos no Brasil

Devido às características da matriz energética brasileira (predominância de geração de energia elétrica através das hidrelétricas), o uso de células solares se mostra muito tímido em nosso país. Instalações de energia solar para conversão em energia elétrica são encontradas de forma isolada e geralmente pertencem a particulares, universidades ou empresas. Nosso país possui um grande potencial no uso de energia solar (não só para conversão de energia solar em energia elétrica, mas também para aquecimento de água, secagem de grãos, etc) e apenas com investimentos, disseminação de tecnologias e vontade política o uso da energia solar será uma realidade para a nação.

A **Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC)** há alguns anos vem realizando pesquisas pioneiras com painéis fotovoltaicos de filmes finos no Brasil. A pesquisa tem por objetivo demonstrar as potencialidades e investigar a sazonalidade na performance de painéis solares de filmes finos de a-Si em clima tropical. Nas dependências do **LABSOLAR do Departamento de Engenharia Mecânica da UFSC** (Figura 16) foram instalados 68 painéis fotovoltaicos de a-Si com um total de potência de 2kWp. Foram utilizados 54 painéis opacos e 14 painéis semitransparentes de a-Si:H de junção dupla, com uma potência nominal de 2078Wp (Figura 17). Esta instalação possui um total de 40 m² e apresenta uma inclinação de 27° estando orientada para o Norte geográfico.

A utilização de painéis solares do tipo opaco e semitransparente visa chamar a atenção às características arquitetônicas de ambos. Para o auxílio das pesquisas e entendimento das condições de funcionamento foram instalados instrumentos para medição da radiação solar.

Ao longo das pesquisas o sistema se mostrou confiável e as potencialidades já citadas neste trabalho foram verificadas.



Figura 16 – Módulos instalados no prédio do Departamento de Engenharia Mecânica da UFSC (Fonte: LABSOLAR - UFSC)

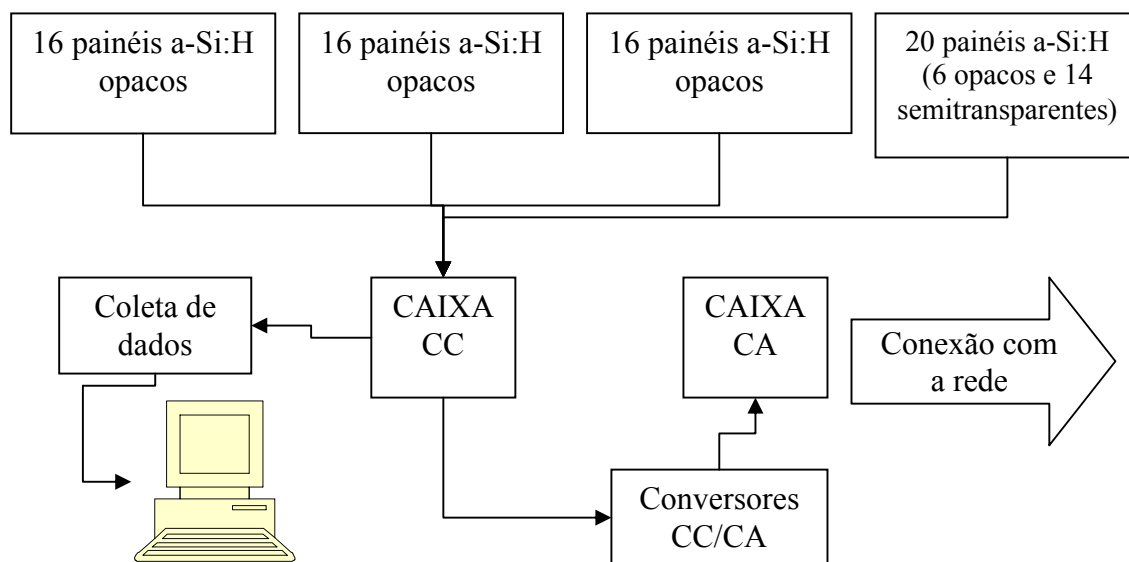


Figura 17 – Esquema de instalação dos módulos de a-Si do LABSOLAR (Fonte: LABSOLAR-UFSC)

5.6) Mercado de células solares de filmes finos

No ano de 2005 verificou-se um aumento significativo do valor das ações de empresas relacionadas ao setor de energias renováveis. As ações de empresas de energia solar subiram cerca de 135% neste mesmo ano devido à necessidade de se desenvolver alternativas aos combustíveis fósseis que apresentavam (e ainda apresentam) preços cada vez mais altos e devido à preocupação ambiental.

O crescimento das vendas de produtos de filmes finos nos EUA praticamente dobrou entre 2004 e 2005. Foi estimado que a capacidade de produção de células de filmes finos teve um crescimento de 120MWp para 435MWp em 2007. Módulos solares de filmes finos já competem com os módulos de silício monocristalino no mercado de painéis solares e mesmo com a sua baixa eficiência, diversos tipos de produtos já podem ser encontrados à venda (como telhados de módulos solares, sistemas portáteis de geração de energia de até 20KWp, etc).

Grande parte do aumento nas ações de empresas de energia solar se deve ao surgimento e melhoria de diversos tipos de formas de se converter energia solar em elétrica, dentre elas as células solares de filmes finos tiveram um grande impulso nos últimos anos devido a serem muito promissoras e possuírem algumas vantagens se comparadas às células convencionais.

Em 2006 verificou-se também um aumento contínuo do mercado de painéis fotovoltaicos de filmes finos, chegando-se a este ser chamado pelos pesquisadores de “o ano da energia solar”. Empresas de diversas partes do mundo (principalmente EUA, alguns países da Europa e China) apresentaram grande crescimento em suas vendas e será necessário mais investimento em diversos setores para se garantir crescimentos maiores.

Segundo analistas, 2007 foi um ano marcante para indústria de energias renováveis, pois foi o início da transição das tecnologias de silício cristalino para a tecnologia de filmes finos. Como já mencionado, existem quatro tipos principais de células de filmes finos e um grande número de variações e possibilidades de construções das mesmas. Relembrando estas tecnologias temos: silício amorfo (a-Si), Telureto de Cádmio (CdTe), CIS (e sua variação CIGS) e Arseneto de Gálio (GaAs). O silício amorfo possui uma maior parcela do mercado de filmes finos (64%) em dados de 2005, isto se deve à sua pesquisa e produção estarem sendo desenvolvidas há muitos anos (praticamente desde a década de 70). O Telureto de Cádmio possui cerca de 26% do mercado de filmes finos sendo que se verificou um aumento significativo em 2006 no comércio e pesquisa desta tecnologia. A tecnologia CIS, que possui um grande potencial para o futuro, possui apenas 10% do mercado (ainda em fase de melhorias e pesquisa assim como o Arseneto de Gálio).

O aumento no mercado de filmes finos pode ser explicado pelo ocorrido no começo do ano 2003. O enorme crescimento da indústria eletrônica e fotovoltaica levou à escassez de materiais básicos para a produção de componentes e módulos, o que determinou à busca por alternativas mais baratas de produção e materiais. Segundo o **Financial Times**, o preço do silício policristalino de U\$30 aumentou para U\$72 em 2003, sendo que algumas empresas negociavam o silício a U\$300 a tonelada. Verificou-se a partir deste ocorrido que o mercado de materiais semicondutores possui fornecimentos

de curta duração e são instáveis, o que limita o crescimento do mercado de fotovoltaicos devido à escassez direta de materiais e eleva os preços das tecnologias.

Uma segunda limitação foi a falta de disponibilidade de equipamentos para a produção de módulos, o que elevou à procura por empresas de alta tecnologia responsáveis pela produção e manutenção de equipamentos capazes de fabricar células e módulos solares de forma contínua. Nos últimos dois anos observa-se um aumento considerável na produção de silício e outros materiais semicondutores juntamente com a oferta de equipamentos de produção o que possibilitou o avanço, melhorias e popularização de muitas tecnologias hoje disponíveis ao público.

Abaixo podemos encontrar uma série de empresas responsáveis pela produção e pesquisa de células de filmes finos e/ou materiais relacionados a esta tecnologia e com capital aberto ao mercado de ações:

- **Ascent Solar Technologies, Inc.** – presente na **NASDAQ** – Produz: Disseleneto de Cobre/Índio/Gálio (CIG)
- **First Solar, Inc.** – presente na **NASDAQ** – Produz: Telureto de Cádmio (CdTe)
- **Daystar Technologies, Inc.** – presente na **NASDAQ** – Produz: Disseleneto de Cobre/Índio/Gálio/Selênio (CIGS)
- **Power Film, Inc.** – Produz: silício amorfo (a-Si)
- **Global Solar** – Produz: Disseleneto de Cobre/Índio/Gálio/Selênio (CIGS)
- **Shell Solar** - Produz: Disseleneto de Cobre/Índio/Gálio/Selênio (CIGS)
- **Würth Solar** – Produz: Disseleneto de Cobre/Índio/Gálio/Selênio (CIGS)

5.7) Instalações fotovoltaicas de filmes finos através do mundo

Muitas plantas solares de painéis de filmes finos já foram instaladas em alguns lugares do mundo, principalmente nos EUA e Alemanha (Tabela 4). Muitas das plantas já geram energia elétrica e demonstram a sua capacidade, além de servir como fonte de dados para a melhoria das tecnologias empregadas. Abaixo uma tabela com as principais instalações que utilizam filmes finos nos EUA e Alemanha.

Segundo a Tabela 4 podemos notar uma predominância das instalações na Alemanha, o que fortalece a preocupação deste país com a questão ambiental e à necessidade de se diminuir a dependência dos combustíveis fósseis (principalmente carvão mineral para termoelétricas) para geração de energia (Figura 18).

Tabela 4 – Plantas solares de filmes finos nos EUA e Alemanha

Localização	Tecnologia usada	Potência (kW)	Data de funcionamento
Dimbach, Alemanha	CdTe	1400	2004-2005
Reussenkoge, Alemanha	CdTe	1040	2005
Fellber, Alemanha	CdTe	800	2005
Sinzheim, Alemanha	CdTe	800	2005-2006
Tapfheim, Alemanha	CdTe	778	2005
Springerville, EUA	CdTe	500	2001-2003
Florsheim, Alemanha	CdTe	440	2005
Camarillo, EUA	CIS	245	2003

Fonte: National Renewable Energy Laboratory (NREL) (www.nrel.gov)



Figura 18– Instalação fotovoltaica de filmes finos (CdTe) em Dimbach, Alemanha (Fonte: National Renewable Energy Laboratory (NREL) (www.nrel.gov))

5.8) Perspectivas da tecnologia fotovoltaica de filmes finos

A cada ano novas tecnologias de filmes finos saem dos laboratórios para as fábricas. O desenvolvimento destas tecnologias, a produção, o custo-eficiência e as tendências de mercado determinam qual tecnologia será a mais popular e promissora para o futuro. Inicialmente é natural que sejam questionadas as vantagens e desvantagens de cada tecnologia e através destas colocações decidir qual será a mais promissora. Entre as células que utilizam filmes finos cada uma possui suas vantagens para ser a líder no mercado de fotovoltaicos, podemos nos perguntar qual delas será a líder: o **a-Si** que já possui a maior porcentagem do mercado de fotovoltaicos de filmes finos, **CIS** que recebeu maior atenção da mídia e das empresas nos últimos anos, **CIGS** e **GaAs** que possuem grande eficiência, algum outro tipo de tecnologia ainda em pesquisa como as **Micromorphous Silicon Cells** (células de

silício microamórfico) ou ainda algum tipo de variação ou melhoria das tecnologias já conhecidas? Mas independente da tecnologia que se mostrar a mais promissora sempre existirá a necessidade de maiores pesquisas e melhorias das tecnologias existentes, de forma a garantir maiores níveis de eficiência das células solares a um custo menor.

Um grande número de companhias e pesquisadores estão a procura de formas otimizadas de células de filmes finos. Devido ao grande número de pesquisadores, novas formas otimizadas das tecnologias estão surgindo, entre elas a tecnologia **CSG – Crystalline Silicon on Glass** (Silício cristalino em vidro) em desenvolvimento pela empresa alemã **CSG Solar AG** em Thalheim, Alemanha. Nesta tecnologia o silício é produzido através do gás silano no qual uma fina camada de silício é depositada em um substrato de vidro. Após esta deposição os contatos elétricos são inseridos através de técnicas a laser e impressão de tinta condutora aplicada diretamente no módulo fotovoltaico. Segundo o fabricante os módulos apresentam degradação de sua eficiência para 90% após 12 anos e para 80% após 25 anos. Na fase inicial de desenvolvimento desta tecnologia a eficiência dos módulos encontra-se na faixa de 7% a 7,5% sendo que para o ano de 2010 é esperada uma eficiência de 9,5%.

Uma outra tecnologia baseada nos princípios das células de filmes finos é a tecnologia **Micromorphous Solar Cells** (Células solares microamórficas) desenvolvida pela Universidade de Neuchâtel, na Suíça. Nesta tecnologia há a combinação de silício amorfo e silício microcristalino. Estes dois tipos de silício absorvem diferentes tipos de espectro da luz e através desta característica maiores eficiências são alcançadas. Nesta estrutura devido à incorporação do silício microcristalino a degradação na eficiência gerada pelo silício amorfo é menor. A eficiência alcançada nesta tecnologia está em torno de 11% sendo que a tecnologia ainda está em fase de desenvolvimento e maiores índices podem ser alcançados.

A empresa **Ersol Solar Energy** construiu recentemente uma indústria em Erfurt na Alemanha para a produção de módulos de a-Si. Neste processo industrial, novos métodos de produção estão sendo utilizados, entre eles está a deposição de vapor químico através de plasma (**Plasma enhanced chemical vapour deposition - PECVD**) e os contatos traseiros são inseridos através de métodos a laser. Através destes novos métodos de produção a qualidade dos módulos e suas características foram melhoradas.

Muitas companhias estão desenvolvendo novas tecnologias baseadas na tecnologia **CIS**. Como exemplo temos a célula de **CIGSSe (cobre, índio, gálio, sulfeto e selênio)** desenvolvida pela **Aleo Solar** da Alemanha. Segundo o fabricante, os módulos se encontram em fase final de desenvolvimento e dentro de pouco tempo estarão sendo vendidos. Com uma eficiência de 15% esta nova tecnologia será a mais eficiente dentre todas as células solares de filmes finos vendidas no mercado. O preço por watt destas células será o mesmo que o preço conseguido pelos módulos de **wafers** de silício. Uma outra peculiaridade desta tecnologia é a boa resposta a luz fraca, como por exemplo, a luz presente em um dia nublado e às baixas perdas devido a altas temperaturas. Estas vantagens só foram conseguidas nesta tecnologia devido a incorporação dos cinco elementos da célula

CIGSSe, cada um destes elementos possui uma resposta diferente ao espectro da luz. Porém, devido ao grande número de processos produtivos e sua complexidade o custo destas células ainda é muito alto.

Uma tecnologia muito promissora para os próximos anos é a tecnologia baseada no **Telureto de Cádmio**, já citada em outros capítulos. A empresa **Antec Solar Energy** (Frankfurt, Alemanha) vende em pequena escala módulos desta tecnologia e planeja construir uma fábrica destes módulos e aumentar a oferta dos mesmos. O grande desafio do Telureto de Cádmio é a garantia que ao se manusear e operar estes módulos não ocorra contaminação das pessoas e do meio ambiente, pois o Cádmio é um material extremamente tóxico (para cada kilowatt produzido 100 gramas de cádmio são utilizados nos módulos). Esta tecnologia ainda está em desenvolvimento e já há estudos com o objetivo de se reduzir os possíveis acidentes com o cádmio.

Ainda há muito que se discutir e pesquisar quando o assunto é células solares de filmes finos. Não há consenso entre os pesquisadores sobre qual tecnologia será a principal em um futuro não muito distante e muitos pesquisadores ainda vêm a tecnologia de filmes finos com certa reserva. Alguns empecilhos técnicos tornam os filmes finos uma alternativa que necessita ser muito mais analisada e debatida pelos meios industrial e acadêmico, como por exemplo: a raridade das substâncias utilizadas nas células, a complexidade dos processos de produção destas substâncias e dos módulos solares, a escassez destes materiais quando ocorrer o crescimento da procura por sistemas fotovoltaicos de filmes finos e a degradação na eficiência das células.

Nos próximos anos haverá um grande crescimento na procura de fotovoltaicos devido ao atual panorama ambiental de nosso planeta e com o incentivo dos governos e indústrias as limitações não só da energia solar, mas das fontes alternativas de energia, serão superadas e novas tecnologias surgirão para garantir um desenvolvimento econômico e social cada vez maior em nossa sociedade enquanto se diminui a agressão ao meio ambiente.

6) Impactos ambientais causados pelas tecnologias fotovoltaicas

Módulos solares convencionais utilizam células feitas de **wafers** de silício, com 0,3mm de espessura e com área de aproximadamente 10x10cm. Entre os processos de produção de células e módulos solares, diversos métodos são utilizados, entre eles os métodos **Czochralski**, deposição eletroquímica, banhos químicos, etc. Como exemplo, abaixo (Figura 19) temos o ciclo de produção de um painel solar de silício, desde a mineração dos materiais até a fase de reciclagem dos componentes do sistema.

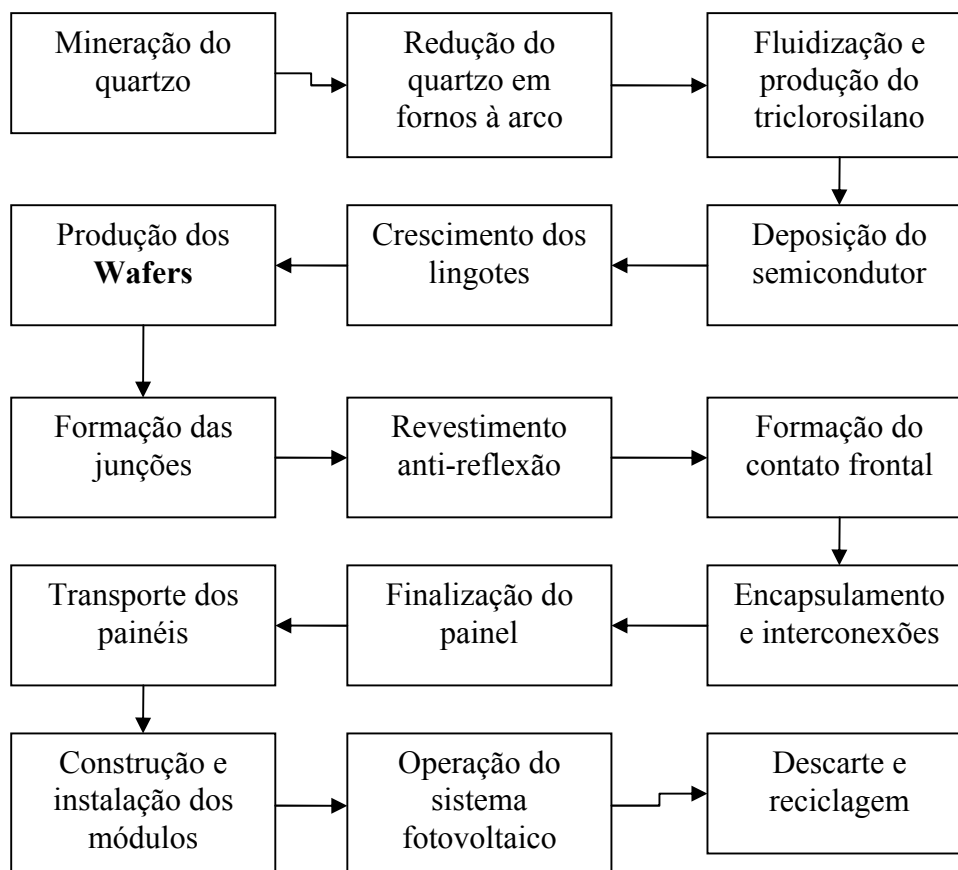


Figura 19 – Ciclo de produção, uso e descarte de um módulo fotovoltaico (Fonte: MARKVART, pág 171)

Cada um dos passos apresentados na Figura 19 possui suas características, métodos de produção, necessidades energéticas diferentes e cada processo oferece seu risco potencial ao meio ambiente. Operações de mineração causam riscos ambientais graves, acarretam em modificação de toda uma área geográfica e causam impactos irreversíveis ao meio ambiente. Fornos à arco utilizados no processo de redução do silício consomem grandes quantidades de eletricidade e combustíveis fósseis que durante sua queima geram grandes quantidades de gases e poluição. No processo de laminação do silício, além do pó de sílica causador da doença conhecida como **silicose** (responsável pelo afastamento e aposentadoria por invalidez de diversos trabalhadores), há a necessidade de grandes quantidades de energia em seu processo de produção. A purificação e dopagem do silício consomem grandes quantidades de materiais químicos tóxicos que, além de causar doenças graves aos seres vivos, se descartados de forma incorreta no meio ambiente causam graves danos à natureza.

Os processos citados no parágrafo anterior fazem menção apenas ao silício utilizado nos módulos solares, devemos lembrar que outros componentes do sistema fotovoltaico utilizam o vidro, o alumínio, diversos tipos de polímeros, fios e contatos de cobre e cada um desses elementos possui seu processo produtivo, seus impactos ambientais e sua demanda energética.

Os impactos ambientais das células de filmes finos são similares aos impactos já citados nos dispositivos convencionais. Muitos materiais utilizados nestas tecnologias utilizam materiais

extremamente tóxicos. O cádmio, selênio e outros materiais oferecem riscos muitas vezes negligenciados em projetos como no caso de eventuais incêndios de módulos o que poderá acarretar em uma fumaça carregada de elementos químicos que podem causar diversos tipos de doenças e danos ao meio ambiente. A raridade dos elementos utilizados em células de filmes finos acarreta em processos de produção cada vez mais complexos e ainda gerando necessidades energéticas maiores.

Células de CIS e CdTe, se descartadas de forma incorreta, podem se tornar uma ameaça ao meio ambiente, pois grandes concentrações de cádmio e selênio podem infiltrar na camadas de água subterrânea (lençol freático) e torná-la imprópria para consumo. Na Figura 20 abaixo está apresentado o ciclo de produção de células de CIS. Cada uma destas etapas possui as suas características e impactos ao meio ambiente.

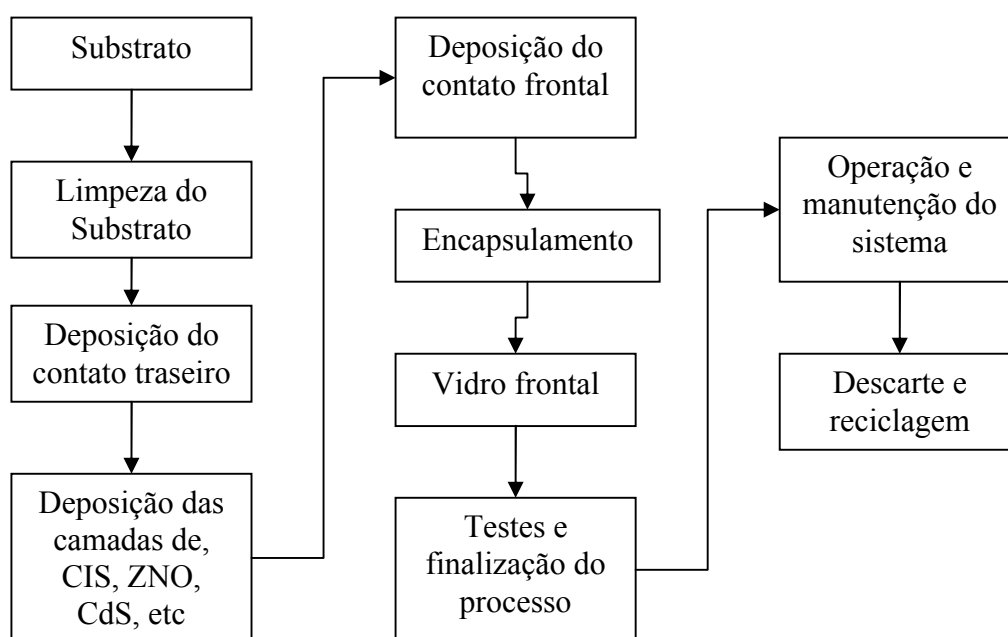


Figura 20 – Ciclo de produção, uso e descarte do CIS (MARKVART pág 174)

Como alternativas para se diminuir os impactos ambientais causados pela produção e descarte de células e painéis fotovoltaicos, algumas medidas podem ser tomadas, entre elas:

- Reciclagem de substratos (alumínio, vidro, etc);
- Aproveitamento e reciclagem de elementos químicos (cádmio, selênio, telúrio, etc.);
- Processos de produção mais eficientes e controlados;
- Pesquisa de materiais menos tóxicos aos seres vivos e ao meio ambiente;
- Políticas públicas com melhor regulamentação e métodos de descarte de materiais mais eficientes;
- Desenvolvimento de medidas de segurança em casos extremos (incêndios, descarte ilegal, etc) de forma a minimizar impactos.

Sistemas fotovoltaicos não produzem ameaça alguma ao meio ambiente durante o seu funcionamento e suas potenciais ameaças surgem durante a produção e descarte dos sistemas ao fim do seu tempo útil de funcionamento. A seguir (Tabela 5) temos o tempo de vida útil das células solares de filmes finos.

TABELA 5 - Eficiência e tempo de vida útil das células de filmes finos

Tecnologia	Eficiência (%)	Tempo de vida (anos)
Filmes finos de a-Si	10-13	20-30
Filmes finos de CIS, CdTe	10-15	20-30
Futuras multijunções (2020)	30	30

Devemos lembrar que a produção de quaisquer tipos de módulos fotovoltaicos requer grandes quantidades de energia elétrica, energia esta que provém de usinas hidrelétricas, termelétricas ou nucleares causadoras de grandes impactos ao meio ambiente. Apenas quando é fechado o ciclo de produção-uso-descarte vemos o quanto o meio ambiente é afetado.

Apenas com políticas ambientais, desenvolvimento sustentável, conscientização, pesquisa e ações eficientes o impacto causado pelo uso de qualquer tipo de energia, seja ela alternativa ou convencional, será amenizado.

7) Conclusão

Células solares de filmes finos apresentam estabilidade, eficiência e potência comparáveis a outros tipos de tecnologias fotovoltaicas. Além destas características, uma série de vantagens torna as células de filmes finos grandes concorrentes à liderança do mercado de fotovoltaicos. A flexibilidade em seu uso, permitindo a incorporação da tecnologia em fachadas, janelas e telhados acarreta em uma maior aceitação dos fotovoltaicos na sociedade.

Células de **silício amorfo (a-Si)**, antes vistas pelos pesquisadores com certa cautela devido à degradação em sua eficiência tiveram esta desvantagem solucionada com o desenvolvimento de estruturas de várias camadas. O uso desta tecnologia já é uma realidade há vários anos e o número de módulos produzidos por empresas aumenta consideravelmente a cada ano.

O **Telureto de Cádmio (CdTe)** apresenta características muito próximas do ideal para conversão de energia solar em elétrica. Dentre as tecnologias de filmes finos, a CdTe possui um custo relativamente baixo devido ao uso de pequenas quantidades de material semicondutor empregadas em suas células e eficiência dentro da média das outras tecnologias. Algumas plantas solares para produção de energia elétrica que utilizam módulos de CdTe já funcionam de forma satisfatória em vários lugares do mundo devido às melhorias conseguidas através dos últimos anos.

As células de **Disseleneto de Cobre e Índio (CIS)** prometem índices recordes de eficiência entre as tecnologias disponíveis no mercado de fotovoltaicos. Várias plantas solares para geração de energia construídas através do mundo confirmam as potencialidades desta tecnologia. Com a incorporação de outros elementos à célula de CIS é possível se criar estruturas multijunção mais eficientes e com maior possibilidade de controle dos parâmetros destas células solares. Os fatores limitantes para se aumentar as vendas e produção desta tecnologia encontram-se na complexidade e custo dos processos produtivos das células fotovoltaicas. Várias empresas pesquisam métodos de produção mais baratos e eficientes e em questão de alguns anos os custos serão diminuídos de forma considerável.

A tecnologia do **Arseneto de Gálio (GaAs)** ainda possui alto custo de produção e ainda não existe uma padronização de sua estrutura, porém é esperado que um índice recorde de eficiência seja alcançado. As pesquisas realizadas com esta tecnologia aumentaram muito nos últimos anos e o grande desafio é a diminuição dos custos dos materiais empregados nestas células.

Módulos solares produzidos utilizando-se filmes finos possuem uma série de vantagens e desvantagens que devem ser analisadas em cada projeto do sistema fotovoltaico ao qual são aplicados. Algumas desvantagens como o alto custo das células, toxicidade dos elementos químicos utilizados e degradação da eficiência podem ser solucionadas empregando-se medidas mais rigorosas de controle, produção e uso destas células.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALVARENGA, Carlos Alberto. **Energia Solar**. Lavras: UFLA / FAEPE, 2001. 123p.: il. – Curso de Pós-graduação: “Lato Sensu” (especialização) a Distância – Formas Alternativas de Energia.

CARLSSON, Thomas, BRINKMAN, Andy. **Identification of degradation mechanisms in field-tested CdTe modules**. Progress in Photovoltaics 14, Finlândia, 2006. 213-224p.

GHENSEV, Almir. **Materiais e processos de fabricação de células fotovoltaicas**. UFLA - Universidade Federal de Lavras, Lavras. 2006. 154p.

LEE, X. Y et al. **Thin film GaAs solar cells on glass substrates by epitaxial liftoff**. University of California, EUA. 1996.

MARKVART, Tomas. **Solar Electricity**. 1ª ed. University of Southampton - UK, Ed. do autor, 1994. 226p.

MONTENEGRO, Alexandre A. **Fontes não-convencionais de energia : as tecnologias solar, eólica e de biomassa**. [Florianópolis]: SEBRAE, 1998. 160p.

NOUFI, Rommel, ZWEIBEL, Ken. **High-efficiency CdTe and CIGS thin-film solar cells: highlights and challenges**. National Renewable Energy Laboratory (NREL), USA. 2006.

OSBORN, Donald E.. **Overview of amorphous silicon (a-Si) photovoltaic installations at Smud**. ASES Solar, Austin, EUA. 2003.

ROCHA, Luiz Carlos de Assis. **Como elaborar trabalhos acadêmicos**. 4ª ed. Rev. Belo Horizonte: Ed. do autor, 2004.

RUZINSKY, M., SÁLU, V. **Characterisation of selected GaAs thin film photovoltaic structure for concentrators**. Slovak University of Technology, 2000.

VON ROEDEN, Bolko, S. ULLAL, Harin, ZWEIBEL, Ken. **Polycrystalline Thin-film photovoltaics: from the laboratory to solar fields**. National Renewable Energy Laboratory (NREL), USA. 2006.

Internet:

www.crecesb.cepel.br

www.heliogrid.com

www.labsolar.ufsc.br

www.lepten.ufsc.br

www.nrel.gov

www.sanyo.co.jp

www.siemenssolar.com