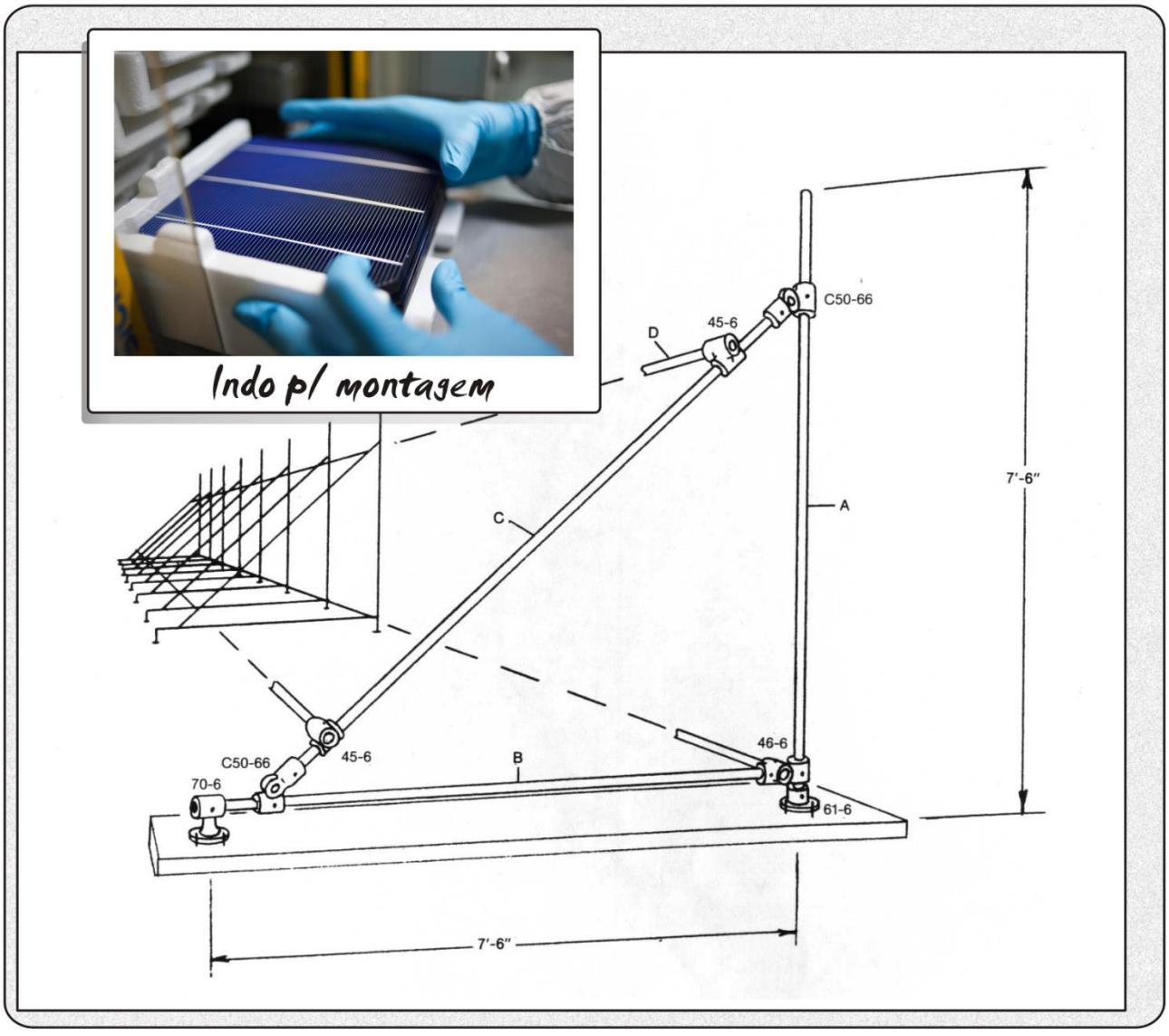
Minicurso de Fabricação de Células Solares e Módulos Fotovoltaicos



Prof. Dr. Francisco das Chagas Marques
(Instituto de Física Gleb Wathagin - IFGW/Unicamp)

Março/2014

© Permitida a reprodução para uso privado, sem fim comercial ou de lucro, desde que citada a fonte.

Apesar deste documento ter sido preparado com os devidos cuidados, as instituições participantes não se responsabilizam pelas informações e análises apresentadas que devem ser creditadas diretamente aos autores do estudo.

Este material foi preparado para o minicurso homônimo oferecido no 4° InovaFV nos dias 11 e 12 de março de 2014, evento organizado pelo Prof. Dr. Gilberto de Martino Jannuzzi (FEM/UNICAMP) e pelo International Energy Initiative (IEI), e no V CBENS no dia 31 de março de 2014. O texto foi revisado e editado por Rodolfo Dourado Maia Gomes (International Energy Initiative).

Edição gráfica: Rodolfo Dourado Maia Gomes (International Energy Initiative)

Capa:

Células solares sendo organizadas para iniciar a etapa de montagem do módulo fotovoltaico. Cortesia de SolarWorld USA / Flickr.com.

“Solar Panel Frame”. Cortesia de Simplified Building Concepts / Flickr.com.

Minicurso de Fabricação de Células Solares e Módulos Fotovoltaicos

Março/2014

Francisco das Chagas Marques é Professor Associado do Instituto de Física Gleb Wataghin - Universidade Estadual de Campinas, Unicamp. Bacharel em Física pela Universidade Federal do Ceará (1981); Mestre em Física pela Unicamp (1984), com a dissertação: “Células solares semicondutor-isolante-semicondutor: SnO2/SiO2/n-Si”. Doutor em Física pela Unicamp (1989), com a tese: “Propriedades estruturais e eletrônicas de ligas amorfas de germânio”. Realizou estágios na Universitá degli Studi di Roma La Sapienza (1987); Pós-Doutorado na Universidade Harvard, USA (1989-1991); professor Livre-Docente pela Unicamp (1996), professor visitante na University of Utah, USA (1998-1999) e no SCIRO em Melbourne, Austrália (10/2010-03/2011). Atua na área de Física da Matéria Condensada, no estudo de propriedades optoeletrônicas, estruturais e termomecânicas de semicondutores amorfos e nanoestruturados para aplicações em dispositivos fotovoltaicos. Desenvolve estudos para a purificação do silício metalúrgico nacional através de rotas metalúrgicas e fabricação de células solares de silício cristalino. Atua no desenvolvimento de células solares de corante e de filmes finos e nanoestruturas para aplicação em células solares, incluindo diferentes técnicas de deposição e de caracterização.

Sumário

1 A ENERGIA FOTOVOLTAICA 1
1.1 Fotovoltaico no mundo 2
1.2 Fotovoltaico no Brasil 7
1.3 Aplicações da energia fotovoltaica 9
1.4 Tecnologias de células solares: primeira, segunda e terceira geração 11
2 O SILÍCIO CRISTALINO 14
2.1 Silício de grau eletrônico e solar 15
2.2 Silício metalúrgico de grau melhorado 19
3 CÉLULAS SOLARES DE SILÍCIO 21
3.1 O efeito fotovoltaico: princípio de conversão da energia solar em energia elétrica 21
3.2 Reflexão e absorção da radiação solar 23
3.3 Caracterização de células solares: eficiência, resistência série e paralela 25
3.4 Geração e recombinação de portadores de carga e outros mecanismos de perda 28
3.5 Eficiência quântica de células solares 28
3.6 Mecanismos de transporte em células solares 29
3.7 Processos de fabricação de células solares de silício 29
4 CÉLULAS SOLARES DE FILMES FINOS (Segunda Geração) 33
4.1 Células solares de a-Si 33
4.2 Células solares de telureto de cádmio (CdTe) 35
4.3 Células CIGS 36
5 CÉLULAS SOLARES DE TERCEIRA GERAÇÃO 38
5.1 Células de corante (Grätzel) 38
5.2 Células solares poliméricas e orgânicas 39
5.3 Células de multijunção 40
5.4 Células inorgânicas, plasmônicas, geradoras de múltiplos éxcitons e outras estruturas 41
5.4.1 Células inorgânicas 42
5.4.2 Células plasmônicas 42
5.4.3 Células com geradores de múltiplos éxcitons 42
5.4.4 Outras estruturas 42
6 MÓDULOS FOTOVOLTAICOS 43
7 SISTEMAS FOTOVOLTAICOS 47
8 REFERÊNCIAS 49

Índice de Figuras

Figura 1: IDH (Índice de Desenvolvimento Humano) em função do consumo anual de energia per capita. O IDH do Brasil em 2013 foi de 0.76. 1

Figura 2: Quadro mostrando os principais problemas das fontes de energia mais usadas atualmente. 1

Figura 3: Incidência de radiação solar no mundo. 2

Figura 4: Evolução de sistemas fotovoltaicos instalados anualmente em todo o mundo entre 2002 e 2012 (MW). 3

Figura 5: Variação de preços da energia fotovoltaica em função da capacidade instalada, comparada com a energia eólica. 3

Figura 6: Capacidade instalada total (MW) em todo o mundo ano a ano (2000-2012) e por região. 4

Figura 7: Capacidade instalada acumulada (MW) e participação (%) dos principais países consumidores de energia fotovoltaica. 4

Figura 8: Evolução temporal normalizada do consumo e produção de sistemas fotovoltaicos em todo o mundo. 5

Figura 9: Previsão de variação de preços de diferentes tecnologias fotovoltaicas e da energia convencional. 5

Figura 10: Previsões da potência instalada em todo o mundo, considerando o próprio mercado (Business-as-Usual) ou com ajuda de incentivos e políticas governamentais (Policy-Driven). 6

Figura 11: Previsões da potência instalada acumulada em todo o mundo, considerando o próprio mercado (Business-as-Usual) ou com ajuda de incentivos e políticas governamentais (Policy-Driven). 6

Figura 12: Novos sistemas de geração de energia elétrica instalados na Europa em 2012. 7

Figura 13: Potencial de oportunidade para investimento e uso da energia fotovoltaica para vários maises do mundo. 8

Figura 14: Centros e universidades brasileiras que realizam pesquisa em células solares de silício. 8

Figura 15: Primeira usina fotovoltaica comercial, de grande porte, conectada à rede, instalado no Brasil na cidade de Tauá, interior do Ceará. 9

Figura 16: Exemplos de aplicação da energia solar fotovoltaica em sistemas isolados. 9

Figura 17: Painéis fotovoltaicos integrados a edificações (BIPV – Build Integrated Photovoltaic). 10

Figura 18: Usina solar fotovoltaica de grande porte. 10

Figura 19: Crescimento da potência instalada de painéis fotovoltaicos. 11

Figura 20: Sistemas conectados à rede instalados nos Estados Unidos, divididos em sistemas ligados à rede, mas instalados sobre tetos de residências, em prédios não residenciais e em usinas fotovoltaicas (utility). 11

Figura 21: Quadro mostrando a relação de eficiência e custo das três gerações de células solares e os principais laboratórios brasileiros envolvidos na pesquisa. 12

Figura 22: Quadro de eficiência em função do tempo, elaborado pelo NREL, para as principais tecnologias de células solares. 13

Figura 23: (a) Principais semicondutores utilizados em células solares comerciais; (b) comparação entre lâminas de silício e filmes finos. 14

Figura 24: Composição do preço final de um módulo fotovoltaico. 15

Figura 25: Reator CVD utilizado para produzir silício de alta pureza adotando o processo Siemens. 16

Figura 26: A técnica Czochralski, que consiste em crescer um tarugo de silício monocristalino a partir de silício líquido. 16

Figura 27: Equipamentos utilizados para crescer tarugos de silício pela técnica Czochralski. 17

Figura 28: Alguns tarugos de silício purificado obtidos pela técnica Czochralski. 17

Figura 29: (a) Serra de fio diamantado para corte de lãminas de silício; (b) laminas de silício de diferentes diâmetros. 18

Figura 30: (a) Cadinho de cerâmica; (b) Reator para fusão e solidificação do silício; (c) Bloco de silício. 18

Figura 31: Uma lâmina de silício policristalino. Observa-se claramente os pequenos monocristais de silício que formam a lâmina. 19

Figura 32: Forno para solidificação unidirecional. 19

Figura 33: "Electron beam" adotado no processo de purificação por desgaseificação a vácuo e fusão zonal. Da esquerda para direita: Prof. Paulo Mei (FEM), Prof. Francisco Marques (IFGW) e Dra. Andresa Côrtes. 20

Figura 34: (a) Banda de valência (preenchido com elétrons), banda proibida (não possui níveis eletrônicos para os elétrons) e banda de condução (vazia) de um semicondutor; (b) Um fóton é absorvido por um elétron da banda de valência e é excitado para a banda de condução; (c) um par elétron-buraco é então gerado pela absorção do fóton da luz incidente. 21

Figura 35: (a) Semicondutor intrínseco, sem dopagem. O nível de Férmi fica no meio; (b) semicondutor dopado com fósforo, tipo-n. O nível de Férmi se desloca para cima; (c) silício dopado com boro, tipo-p. O nível de Férmi se desloca para baixo. (d) Junção p-n, formada pela união entre uma camada de silício dopada tipo-p com outra dopada tipo-n. 22

Figura 36: O efeito fotovoltaico. 23

Figura 37: Diferentes estruturas de células solares de silício cristalino. 23

Figura 38: Espectro solar no topo da atmosfera e na superfície terrestre, mostrando as bandas de absorção devidas principalmente ao vapor de água (H_2O). Outras absorções são menos importantes, como devidas ao gás carbônico (CO_2), oxigênio (O_2) e ozônio (O_3). 24

Figura 39: Superfície de silício (100) texturizada quimicamente com NaOH, expondo as pirâmides formadas na superfície e o espetro de reflexão de uma lâmina polida e uma texturizada. 25

Figura 40: Reflexão de superfície de silício polida, texturizada e texturizada com uma camada antirefletora de dióxido de estanho (SnO_2). 25

Figura 41: Curva corrente versus tensão (I x V) característica de uma célula solar (curva laranja). A curva azul mostra a potência fornecida pela célula em função da tensão indicando o ponto de máxima potência (P_{mp}) ... 26

Figura 42: Curva IxV de três células solares com três tipos diferentes de superfície antirefletora. 27

Figura 43: Modelo eletrônico simplificado de uma célula solar. 27

Figura 44: Coeficiente de absorção de alguns semicondutores cristalinos. 28

Figura 45: Eficiência quântica típica em uma célula solar ideal (pontilhado azul) e em uma célula real, mostrando os efeitos da recombinação na face frontal e na face traseira. No eixo da abcissa λ representa o comprimento de onda ("wavelenght" em inglês) da luz incidente e E_g é a banda proibida do semicondutor utilizado. 29

Figura 46: Principais etapas de fabricação de células solares de silício. 30

Figura 47: Forno de difusão utilizado para dopar silício com fósforo no Laboratório de Pesquisas Fotovoltaicas (LPF) do IFGW/Unicamp 31

Figura 48: Evaporadora de metais utilizado para evaporar alumínio, titânio, paládio e prata nos processos de deposição de contatos metálicos em células solares. 31

Figura 49: Diagrama de um sistema de spray químico utilizado para depositar camada antirefletora de dióxido de estanho (SnO_2) 32

Figura 50: (a) Células solares de silício policristalino e (b) monocristalino. 32

Figura 51: Estrutura representativa de uma célula solar de silício amorfo (esq.); (b) Células solar de silício amorfo (dir.). 33

Figura 52: Sistema PECVD utilizado para produção de silício amorfo hidrogenado. 34

Figura 53: Sistema de sputtering industrial para metalização de contatos para células de silício amorfo. 34

Figura 54: Estrutura representativa de uma célula solar de Telureto de Cádmio (CdTe). 35

Figura 55: Célula solar de telureto de cádmio (CdTe) depositada sobre um lamina flexível de metal (esq.). Microscopia eletrônica de varredura (SEM) mostrando o contato superior de metal (no topo da imagem), seguida da camada de CdTe, no centro, e do contato traseiro de metal, embaixo (dir.). 35

Figura 56: Diagrama esquemático de oito métodos diferentes para deposição de telureto de cádmio utilizado em células solares. O substrato está representado pelos retângulos hachurados. A espessura e a taxa de crescimento estão representadas em cada figura. 36

Figura 57: (a) Estrutura representativa de uma célula solar CIGS; (b) Célula solare CIGS em substrato flexível de poliamida. 37

Figura 58: Impressora inkjet sendo utilizada para fabricar células solares de CIGS na Oregon State University. 37

Figura 59: (a) Diagrama esquemático de uma célula solar de corante; (b) Célula solar Grätzel. 38

Figura 60: (a) Diagrama esquemático de uma célula solar polimérica de heterojunção, (b) diagrama de banda equivalente e (c) célula solar utilizando PEDOT:PSS. 40

Figura 61: (a) evaporação térmica em vácuo e (b) deposição por fase de vapor (OVPD), para preparação de células solares orgânicas. 40

Figura 62: (a) Diagrama esquemático de uma célula solar de 3 junções e (b) região do espectro solar onde cada célula atua 41

Figura 63: Soldagem de células solares com radiação infravermelha e uso de contato com índio e prata. 43

Figura 64: Estrutura de um painel fotovoltaico. 44

Figura 65: Colocação do EVA sobre as células conectadas. 44

Figura 66: Laminadora de painéis solares automatizada. 45

Figura 67: Componentes principais de um painel solar. 45

Figura 68: (a) Painel de silício; (b) Painel solar de silício amorfo; (c) Painel solar de CIGS. 46

Figura 69: Característica modular dos painéis fotovoltaicos isolados utilizando baterias. Em (a) um único painel solar e em (b) três painéis são colocados em série para alimentar mais equipamentos 47

Figura 70: Vários painéis podem ser colocados em série, e conectados à rede elétrica convencional através do uso de inversores. 47

Figura 71: (a) pequeno inversor utilizando em pequenas instalações; (b) Grande inversor utilizados em usinas fotovoltaicas 48

Figura 72: (a) Ilustração de uma montagem de um sistema fotovoltaico em residência e integrado à rede elétrica convencional; (b) Montagem do inversor com os painéis solares, a rede e os eletrônicos da residência. 48

1 A ENERGIA FOTOVOLTAICA

A energia é fundamental para o bem estar do ser humano. A Figura 1 mostra que a qualidade de vida (medida pelo IDH, índice de desenvolvimento humano) depende do consumo de energia por habitante. Entretanto, pode-se observar que um pequeno aumento de consumo para a faixa de baixo IDH já é suficiente para mudar significativamente a qualidade de vida de uma população. Em regiões remotas, longe da rede convencional de energia, a energia solar fotovoltaica poderia suprir parte desta lacuna através do uso de iluminação, água potável, eletrodomésticos em geral, acesso a ensino à distância, entre outras contribuições.

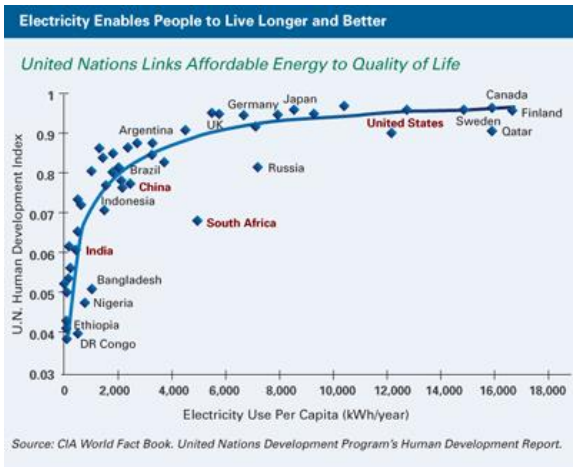


Figura 1: IDH (Índice de Desenvolvimento Humano) em função do consumo anual de energia per capita. O IDH do Brasil em 2013 foi de 0.76.
Fonte: ***http://www.peabodyenergy.com/media/csr2012/public.html#!/s1***

A busca por fontes renováveis e não poluentes se tornou importante nas últimas décadas em função da constatação do aquecimento global provocado pelas atividades do homem. A Figura 2 mostra um quadro indicando os problemas relacionados com várias fontes de energia.

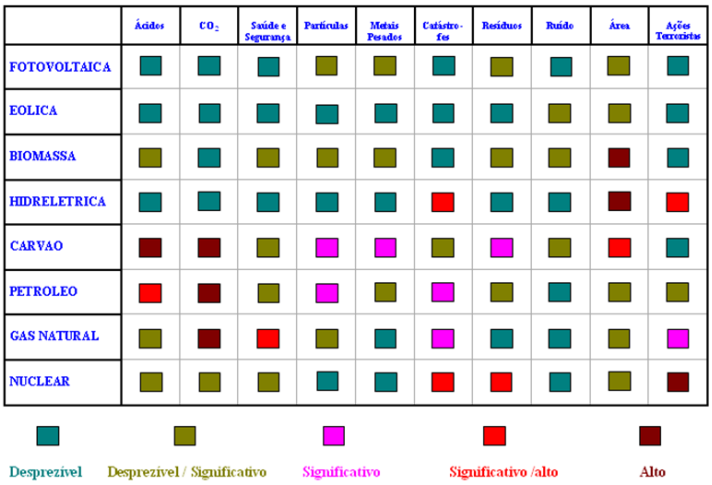


Figura 2: Quadro mostrando os principais problemas das fontes de energia mais usadas atualmente.
Fonte: Não disponível.

Como pode ser observado, as fontes convencionais, como carvão, petróleo, gás natural e nuclear tem sérios problemas relacionados com poluição e catástrofes. Por outro lado, fontes como a solar, eólica e biomassa são consideradas fontes mais limpas. A hidrelétrica também é uma fonte de energia extraordinária, exceto pelos problemas relacionados com a ocupação de grandes áreas e alteração de microssistemas ecológicos, mas pode ser considerada como um excelente sistema de reserva de energia, podendo funcionar como "baterias" para o sistema fotovoltaico, uma vez que a energia fotovoltaica é intermitente, necessitando de armazenamento ou compartilhamento com outras fontes de energia.

1.1 Fotovoltaico no mundo

A crescente demanda mundial por energia, a qual se baseia majoritariamente na queima de combustíveis fósseis, e os problemas oriundos das emissões de gases que provocam o efeito estufa, estão motivando pesquisas para a obtenção de fontes renováveis de energia. Entre estas possibilidades, o uso da energia solar é de grande interesse, pois é inesgotável e mundialmente disponível, podendo ser socializada em todos os países, ricos e pobres (Figura 3).

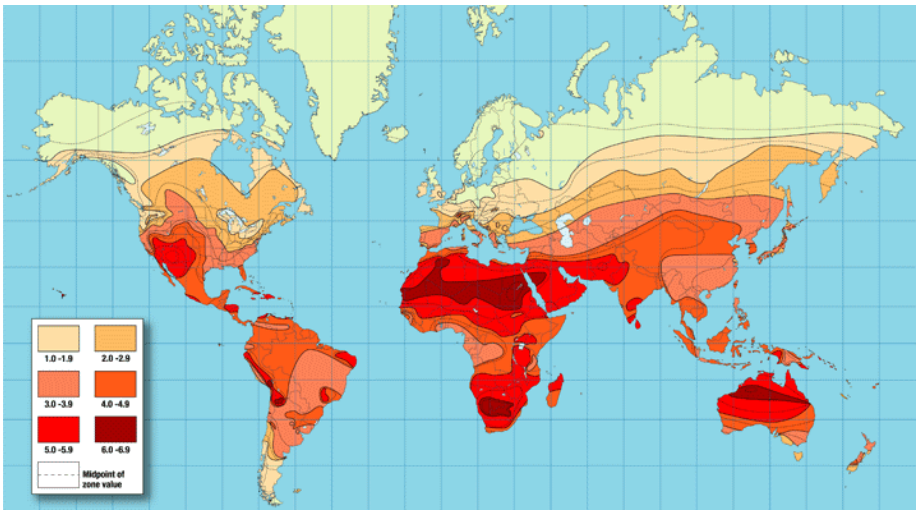


Figura 3: Incidência de radiação solar no mundo.
*Fonte: **http://solarjourneyusa.com/solarysqas.php***

Uma hora de radiação solar sobre a Terra é equivalente a toda a energia consumida no mundo em um ano. Com isto, uma área de 700x700 quilômetros cobertos com células solares de 10% de eficiência seria suficiente para suprir toda a energia consumida no mundo atualmente. Esta área não necessita ser contínua, e pode ser distribuídas em regiões áridas ou desérticas ao redor do mundo, em coberturas de edifícios, residências ou mesmo sobre lagos e oceanos.

Para a geração de energia elétrica a partir da energia solar utilizam-se células solares. Entretanto, os dispositivos baseados nas estruturas convencionais de junção de semicondutores como o silício, são ainda comparativamente caros, de forma que sua utilização em larga escala tem sido limitada. Apesar disto, nos últimos anos a instalação de sistemas fotovoltaicos tem crescido numa taxa de 40% a 50% ao ano (Figura 4). Este crescimento está relacionado com a redução dos preços na fabricação de módulos fotovoltaicos, como mostra a Figura 5.

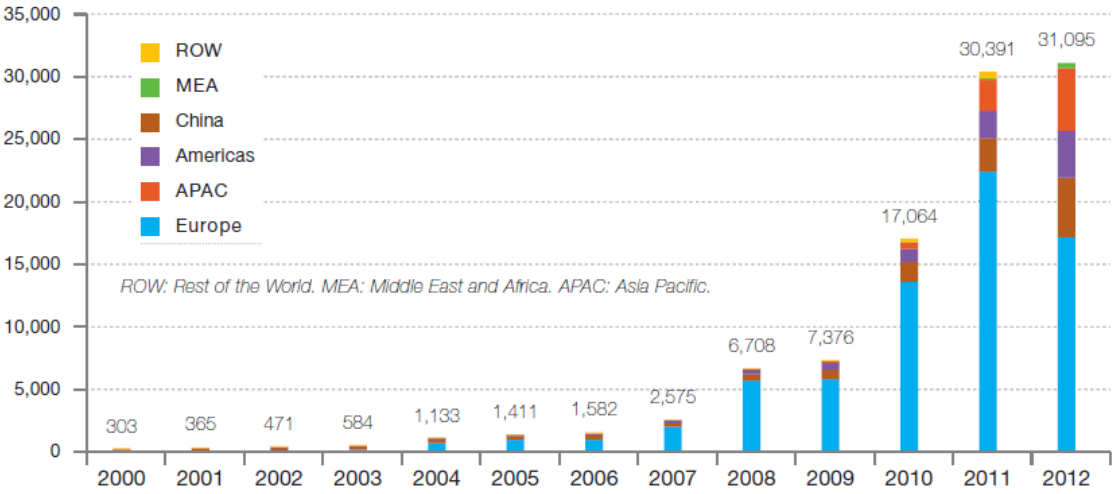


Figura 4: Evolução de sistemas fotovoltaicos instalados anualmente em todo o mundo entre 2002 e 2012 (MW). Fonte: adaptado de ***http://www.epia.org***

A redução no preço da energia fotovoltaica está basicamente relacionada com a redução dos custos de produção devido aos processos adotados na produção em larga escala. A Figura 5 indica que os preços estão reduzindo à medida que a capacidade instalada acumulada vai aumentando, indicando que a paridade será alcançada com a massificação da produção.

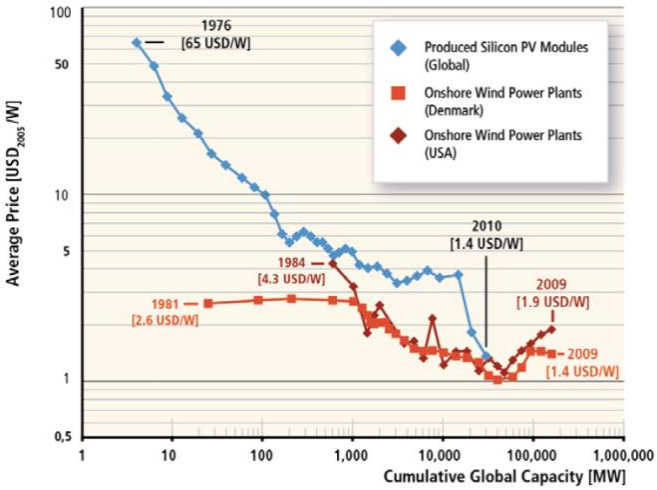


Figura 5: Variação de preços da energia fotovoltaica em função da capacidade instalada, comparada com a energia eólica.
Fonte: ***http://todanz.blogspot.com.br/2011/05/srren-policy-makers-guide.html***.

Em algumas regiões do Brasil, a energia solar fotovoltaica já atingiu a paridade com o sistema convencional doméstico, que é sempre mais caro que o sistema industrial. Desta forma, em alguns locais do Ceará, por exemplo, já é competitivo utilizarmos energia fotovoltaica em residências, por um preço compatível com o fornecido pela rede elétrica local.

Como pode ser verificado na Figura 6, o maior consumidor atual de energia fotovoltaica é a comunidade europeia, basicamente na Alemanha e Itália. Grandes consumidores são também o Japão e a América do Norte.

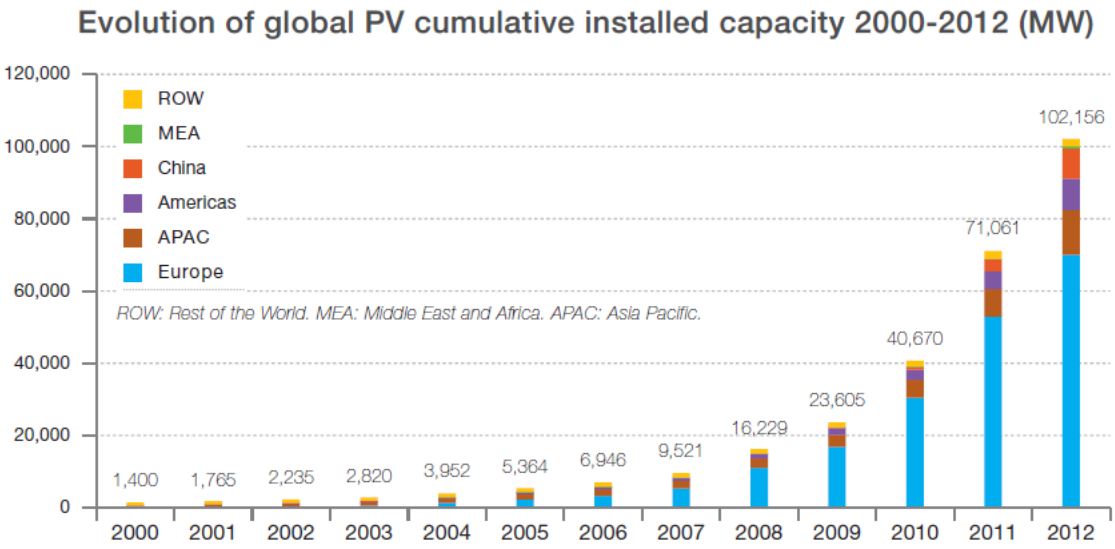


Figura 6: Capacidade instalada total (MW) em todo o mundo ano a ano (2000-2012) e por região.
Fonte: adaptado de: ***http://www.epia.org***

De forma mais detalhada, a Figura 7 mostra a distribuição percentual dos principais países consumidores de energia fotovoltaica, indicando que a Alemanha e Itália juntos correspondem quase à metade da capacidade instalada mundialmente.

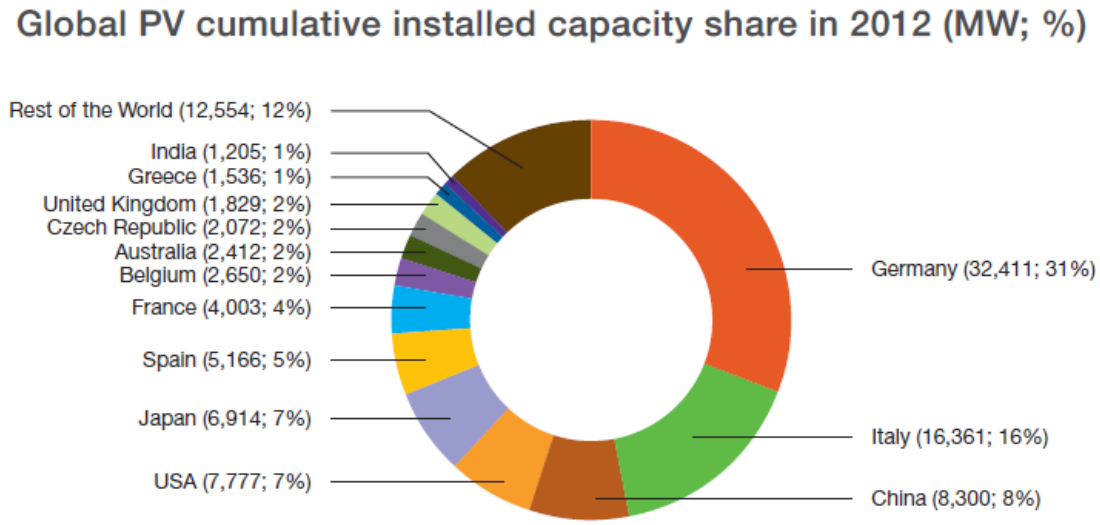


Figura 7: Capacidade instalada acumulada (MW) e participação (%) dos principais países consumidores de energia fotovoltaica.
Fonte: ***http://www.epia.org***

Apesar da Europa ser o maior consumidor de energia fotovoltaica, a China é o maior produtor. A Figura 8 mostra a evolução temporal normalizada do consumo e produção de sistemas fotovoltaicos em todo o mundo. Observa-se que em 2012 a China produziu 60% de toda a energia solar do mundo, mas utilizou apenas cerca de 15%. Por outro lado, a Europa produziu cerca de 15% e consumiu cerca de 55%.

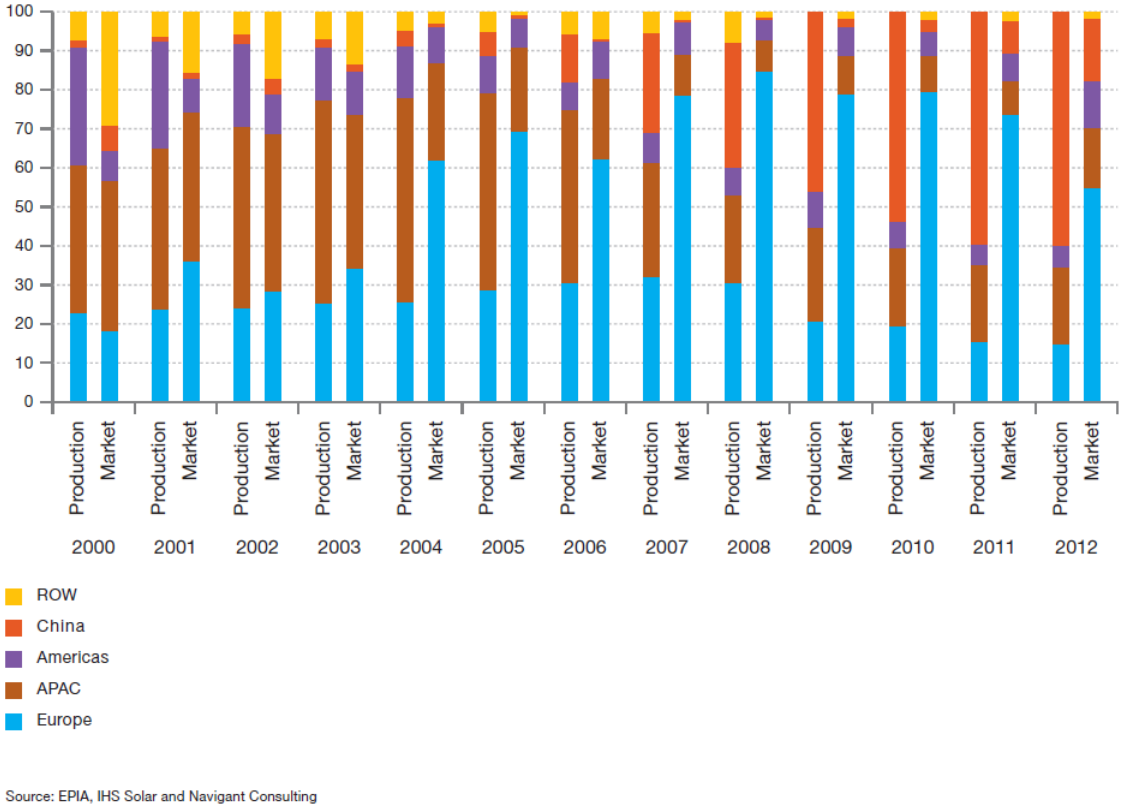


Figura 8: Evolução temporal normalizada do consumo e produção de sistemas fotovoltaicos em todo o mundo. Fonte: ***http://www.epia.org/fileadmin/user_upload/Publications/GMO_2013_-_Final_PDF.pdf***

O preço da energia convencional está aumentando devido ao aumento da demanda e à escassez de fontes baratas de energia não poluente. Por outro lado, o preço da energia fotovoltaica está diminuindo. A Figura 9 mostra uma previsão deste comportamento para os Estados Unidos indicando que em alguns anos a paridade será atingida.

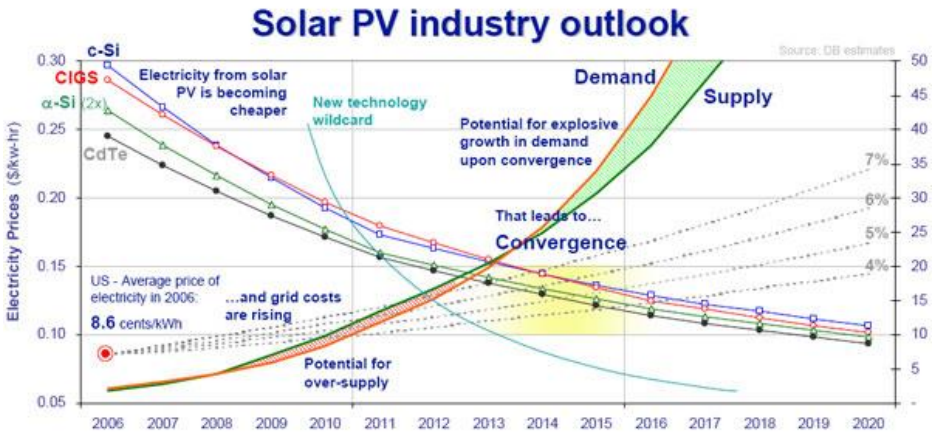


Figura 9: Previsão de variação de preços de diferentes tecnologias fotovoltaicas e da energia convencional. Fonte: **http://www.energyandcapital.com/articles/solar-energy-stocks/542**

As previsões de redução de preço estão também associadas às previsões de aumento da potência instalada, como pode ser vista na Figura 10 feita pela EPIA (***European*** *Photovoltaic* ***Industry Association***) até 2017. A Figura 11 mostra as previsões para a potência instalada acumulada para o mesmo período.

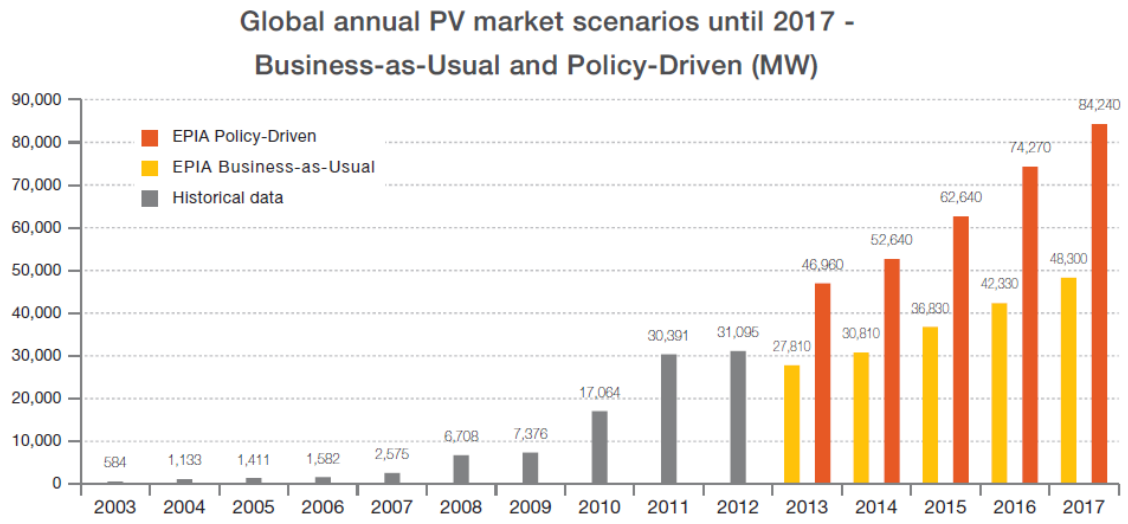


Figura 10: Previsões da potência instalada em todo o mundo, considerando o próprio mercado (Business-as-Usual) ou com ajuda de incentivos e políticas governamentais (Policy-Driven).
Fonte: adaptado de ***http://www.epia.org/fileadmin/user_upload/Publications/GMO_2013_-_Final_PDF.pdf***

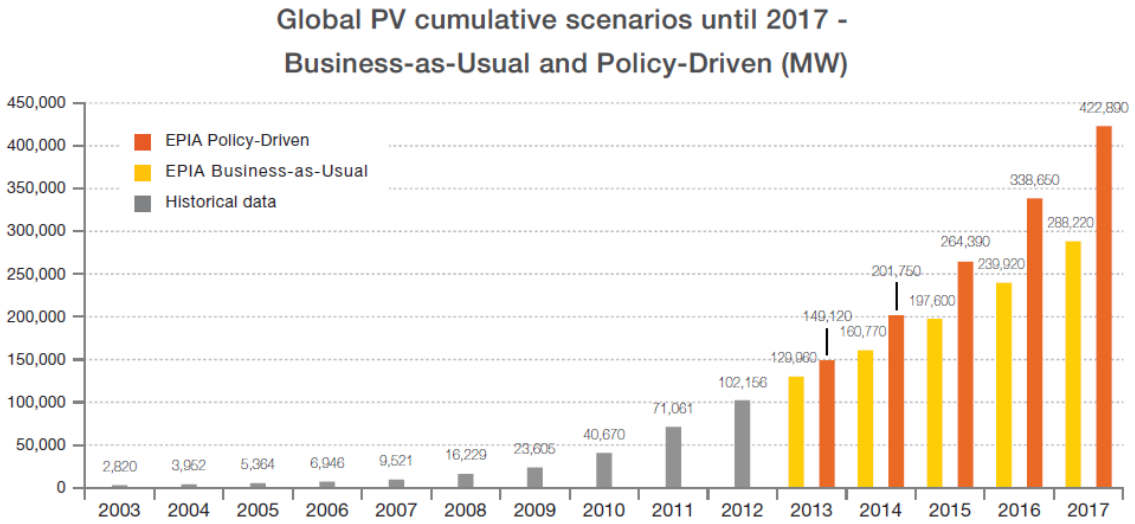


Figura 11: Previsões da potência instalada acumulada em todo o mundo, considerando o próprio mercado (Business-as-Usual) ou com ajuda de incentivos e políticas governamentais (Policy-Driven).
Fonte: adaptado de ***http://www.epia.org/fileadmin/user_upload/Publications/GMO_2013_-_Final_PDF.pdf***

A Figura 12 mostra que atualmente as novas instalações de sistemas de energia elétrica estão mudando muito. Na Europa cerca de 45% dos novos sistemas instalados utilizam a energia fotovoltaica.

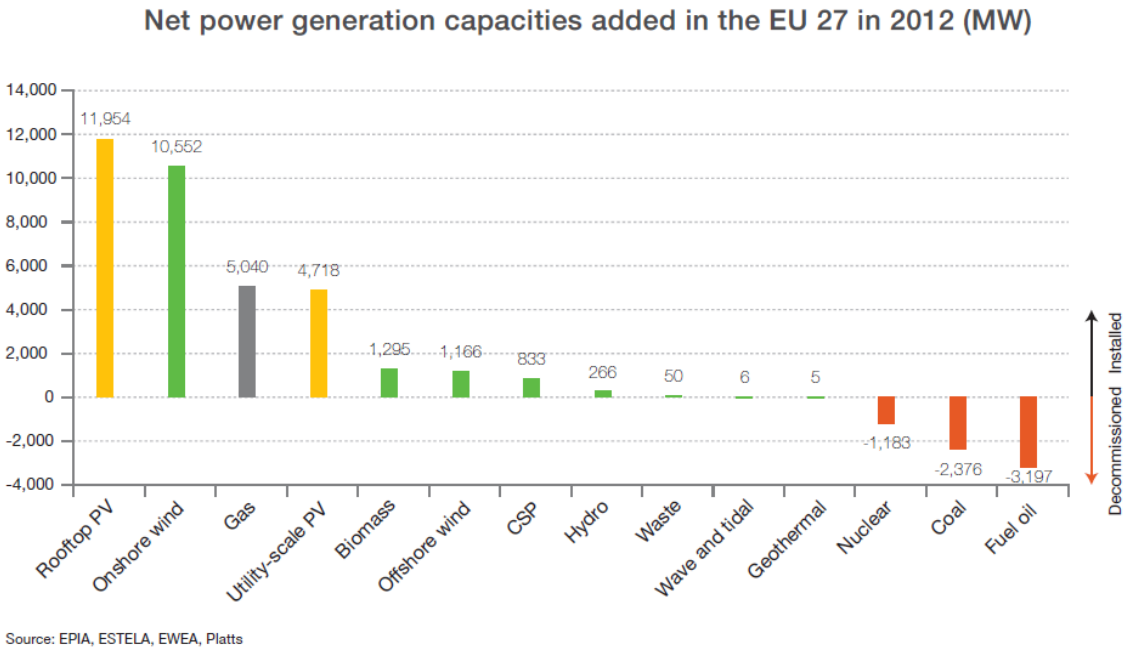


Figura 12: Novos sistemas de geração de energia elétrica instalados na Europa em 2012.
Fonte: ***http://www.epia.org/fileadmin/user_upload/Publications/GMO_2013_-_Final_PDF.pdf***

1.2 Fotovoltaico no Brasil

Apesar de o Brasil possuir um grande potencial fotovoltaico (Figura 3), utilizamos pouca desta energia, com um potencial instalado de apenas cerca de 20 MW, que sequer aparece no gráfico da Figura 7. Entretanto, a radiação solar no Brasil é bem superior ao da Europa, sendo o dobro da radiação da Alemanha, por exemplo, que possui o maior potencial instalado de energia fotovoltaica do mundo.

Por outro lado, a Figura 13 mostra um gráfico baseado na atratividade de mercado, que depende de vários fatores, indicando que o Brasil tem um alto potencial de oportunidades em fotovoltaico.

O pouco uso de energia fotovoltaica no Brasil não se deve apenas à nossa dependência tecnológica. Apesar de estarmos defasados em relação à tecnologia já desenvolvida em outros países, existem vários laboratórios que realizam pesquisas em materiais para aplicações fotovoltaicas, células e painéis fotovoltaicos além de aplicações diversas. Em relação ao silício cristalino, a Figura 14 mostra os principais centros de pesquisa nesta área.

Na década de 80 vários estudos foram realizados em alguns laboratórios, principalmente na USP e Unicamp. Uma célula solar desenvolvida em parceria entre a USP e o INPE, por exemplo, foi instalada em um satélite artificial.

No momento não existe nenhuma indústria brasileira que fabrica células solares de silício cristalino. Entretanto, na década de 80, existia uma fábrica, a Heliodinâmica, que crescia lâminas de silício por Czochralski, fabricava células solares e sistemas fotovoltaicos completos. Vários de seus painéis foram utilizados em torres de transmissão da extinta Embratel.

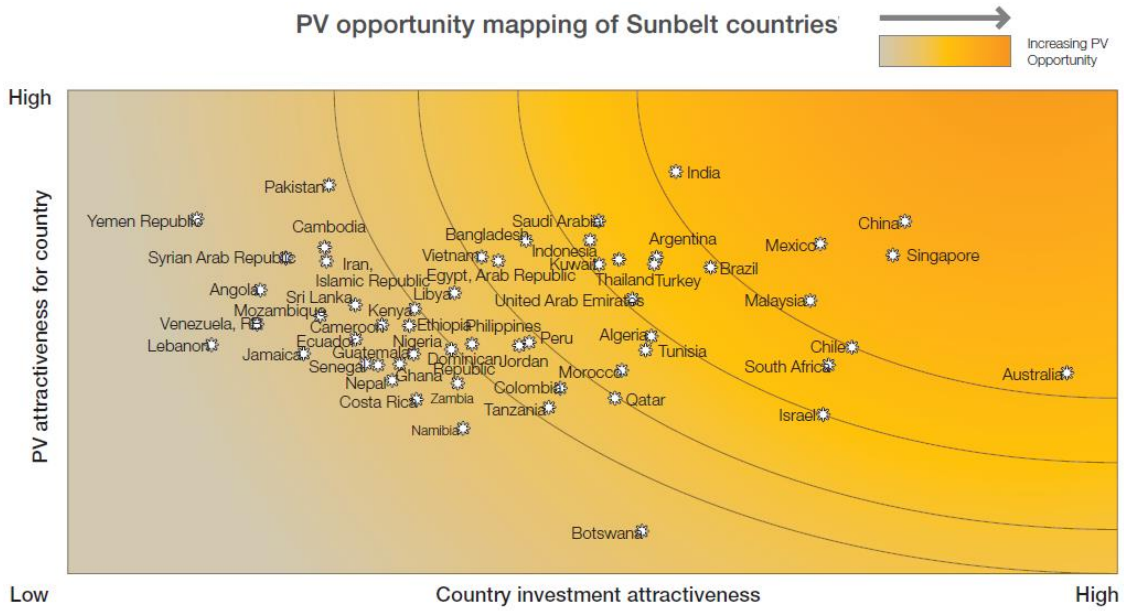


Figura 13: Potencial de oportunidade para investimento e uso da energia fotovoltaica para vários maises do mundo.
*Fonte: EPIA. Unlocking the Sunbelt potential of Photovoltaics, 2010 (**http://www.epia.org/news/publications/**).*

Figura 14: Centros e universidades brasileiras que realizam pesquisa em células solares de silício.
Fonte: elaboração própria.

Existem vários exemplos de uso de energia fotovoltaica no Brasil, mas o potencial instalado ainda é muito incipiente para torná-la uma fonte importante na matriz energética brasileira. Entretanto, nos últimos anos o panorama tem sido alterado. A primeira usina fotovoltaica foi instalada na cidade de Tauá-CE, com potência de 1 MW e planos para expansão para 50 MW em médio prazo (Figura 15). A segunda usina, com 1,1 MW, foi instalada em Campinas em 2013 como um dos projetos de P&D Estratégico regulados pela ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica) selecionados pela Chamada 13 (“Arranjos Técnicos e Comercias para a Inserção da

Geração Solar Fotovoltaica na Matriz Energética Brasileira"), com um total de 24,6 MW em projetos. Após o leilão em Pernambuco (em dezembro de 2013), alguns projetos foram vencedores e vão instalar 123 MW até 2015, cerca de seis vezes maior do que o atual potencial fotovoltaico instalado no Brasil.

Figura 15: Primeira usina fotovoltaica comercial, de grande porte, conectada à rede, instalado no Brasil na cidade de Tauá, interior do Ceará.
Fonte: Não disponível.

Atualmente, a DYA Solar (empresa do grupo Tecnometal), instalada às margens da rodovia D. Pedro I, em Campinas, (SP) iniciou a produção de painéis fotovoltaicos, com capacidade para 20MW/ano, e tem planos para verticalizar toda sua produção.

1.3 Aplicações da energia fotovoltaica

A energia fotovoltaica é uma fonte sem igual quando se trata de aplicações em lugares remotos, longe da rede elétrica, como em pequenas vilas, telefones em rodovias, iluminação pública, ou quando o objeto de uso é móvel como em satélites, pequenos barcos e veículos de lazer (Figura 16).

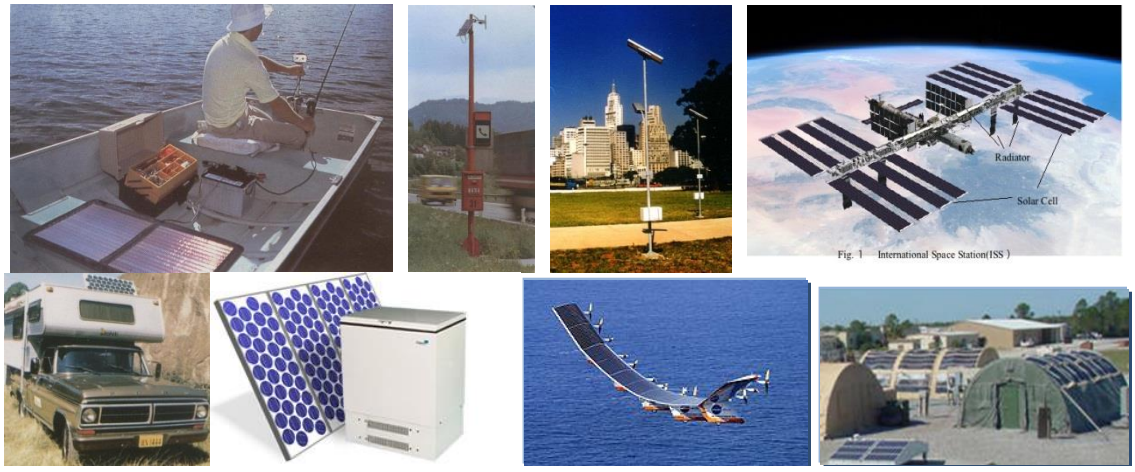


Figura 16: Exemplos de aplicação da energia solar fotovoltaica em sistemas isolados.
Fonte: não disponível.

Com a redução do preço dos módulos fotovoltaicos, tem sido mais frequente o uso de sistemas conectados à rede, quer em grandes usinas fotovoltaicas, quer em residências ou edifícios comerciais. Seu uso em edifícios tem trazido um desafio, que é o de tornar a instalação de sistemas fotovoltaicos algo com alguma beleza estética e de elemento construtivo (telhado, brise, clarabóia, por exemplo), integrados à estrutura dos edifícios (BIPV – *Building-Integrated Photovoltaics*), uma vez que os painéis necessitam cobrir uma grande área para suprir energia suficiente para uma residência. Assim, pesquisas têm sido desenvolidas para a fabricação de sistema e instalações com estas características, como ilustrado na Figura 17.

Figura 17: Painéis fotovoltaicos integrados a edificações (BIPV – Build Integrated Photovoltaic).
Fonte: Não disponível.

A aplicação de sistemas fotovoltaicos de maior impacto, em relação à potência total instalada, são as de centrais de geração de energia fotovoltaica integrados à rede. Neste caso, encontram-se centrais de mais de 100 MW de potência (Figura 18). Estas instalações estão se espalhando em todo o mundo, mas com destaque para a comunidade européia e o Japão. Entretanto, sistema instalados em telhados residenciais e outras edifícios (ver Figura 17) estão se tornando muito importante devido à vantagem na redução de perdas por transmissão e distribuição.

Figura 18: Usina solar fotovoltaica de grande porte.
*Fonte: **http://piximus.net/others/solarpark-lieberose-a-solar-power-plant-in-germany***

A Figura 19 mostra que o principal aumento na instalação de sistemas fotovoltaicos refere-se a sistemas conectados à rede, e não aos sistemas isolados, que eram as principais aplicações até a virada do século. Entre os sistemas conectados à

rede, podemos dividir em: residenciais, não-residenciais e fornecedores de energia. A Figura 20 mostra que este último vem crescendo fortemente nos últimos anos, significando que muitas centrais fotovoltaicas estão sendo instaladas em todo o mundo.

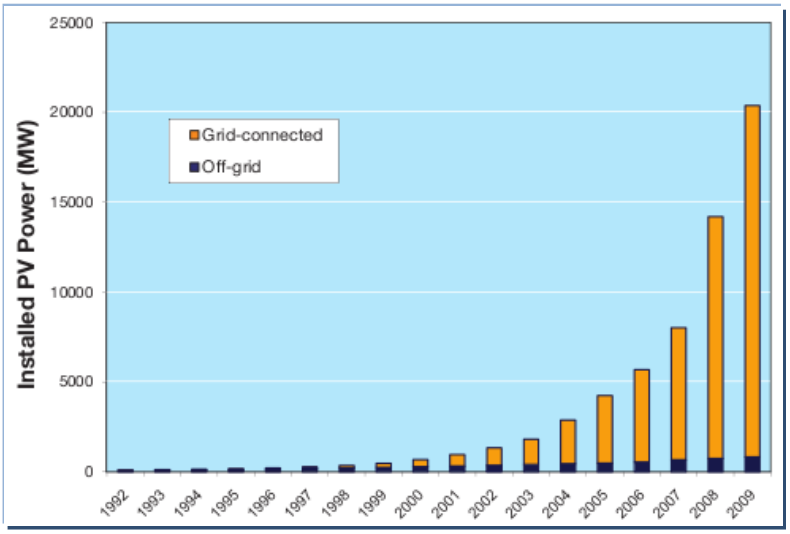


Figura 19: Crescimento da potência instalada de painéis fotovoltaicos. Fonte: IEA Photovoltaic Power Systems Programme - ***http://www.see.murdoch.edu.au/resources/info/Applic/Gridconnect/***

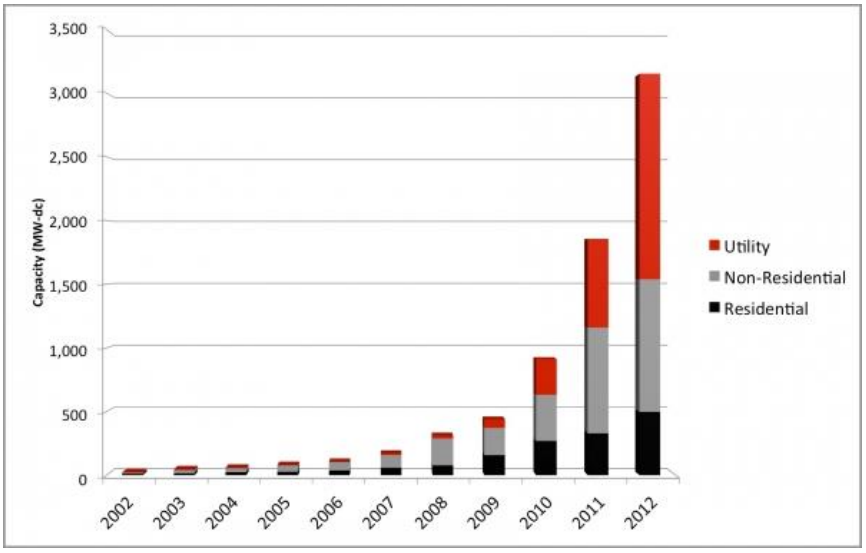


Figura 20: Sistemas conectados à rede instalados nos Estados Unidos, divididos em sistemas ligados à rede, mas instalados sobre tetos de residências, em prédios não residenciais e em usinas fotovoltaicas (utility). Fonte: ***http://www.pv-tech.org/editors_blog/purpa_blends_net_metering_potential_with_community_solar***

1.4 Tecnologias de células solares: primeira, segunda e terceira geração

As primeiras células solares comerciais foram fabricadas em semicondutores cristalinos, ou policristalinos, como o silício (Si) e o Arseneto de Gálio (GaAs). Estas células são consideradas de primeira geração. São baseadas em junções p-n ou heterojunções. A máxima eficiência teórica possível é de 31%, de acordo com o modelo de Schokley-Queisser [1].

Logo foram desenvolvidas células solares em materiais amorfos, como silício amorfo hidrogenado (a-Si:H), o telureto de cádmio (CdTe) e cobre-índio-gálio-selênio

(CIS), entre outras. Estas células tem uma característica importante que é o fato de serem flexíveis, pois os semicondutores utilizados possuem poucos micra ($1\mu=10^{-6}$m) de espessura. São células de filmes finos e chamadas células de segunda geração.

Células de primeira e segunda geração são limitadas em termos de máxima eficiência teórica possível. Novos princípios de funcionamento de células solares foram desenvolvidos, como o uso de materiais com geração de múltiplos pares elétrons-buracos; multijunções, células solares de portadores quentes, entre outros, que em princípio poderiam ter eficiência muito superior às de primeira e segunda geração, chegando a eficiências teóricas acima de 70%. São as chamadas células de terceira geração.

Mais recentemente, surgiram células solares de compostos orgânicos (células solares orgânicas) e células solares de corante (*dye-sensitized* ou células Gratzel), que utilizam nanomateriais nas suas estruturas e são também chamadas células de terceira geração.

A Figura 21 mostra um quadro abordando estas três gerações propostas por M. Green [4], e alguns laboratórios no Brasil que trabalham nestas áreas. Veremos os princípios de funcionamento destas células na seção 5.

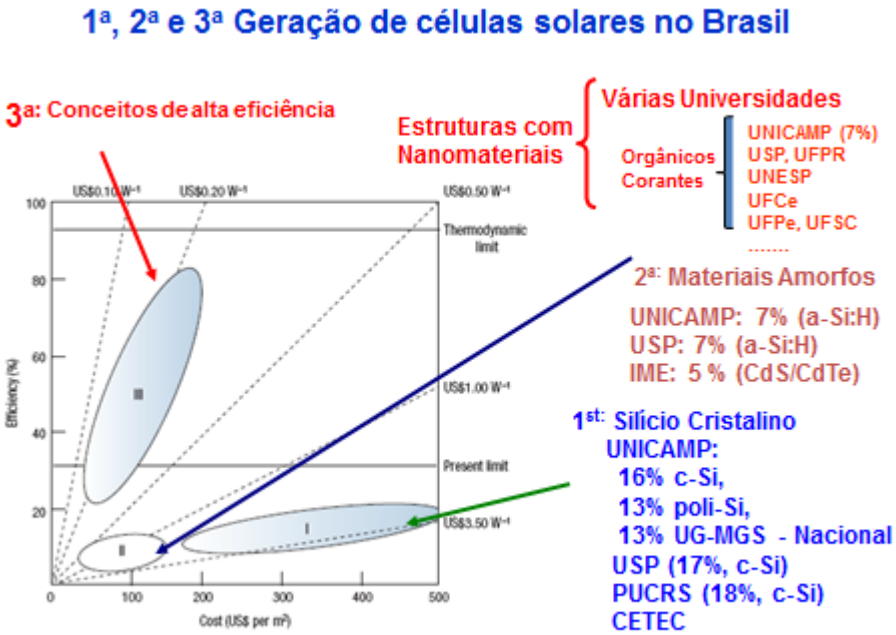


Figura 21: Quadro mostrando a relação de eficiência e custo das três gerações de células solares e os principais laboratórios brasileiros envolvidos na pesquisa.
Fonte: adaptado de ***http://photonicswiki.org/images/4/42/Cost-efficiency_pv.jpg***.

A Figura 22 mostra a evolução da eficiência de células solares de diferentes gerações e estruturas em função do tempo. Este quadro vem sendo sempre atualizado pelo NREL (*National Research Energy Laboratory*, Colorado-USA). Ele mostra que a máxima eficiência obtida até hoje é de 25% utilizando células de primeira geração (silício monocristalino), 20% com células de segunda geração (CIGS) e 45% em células solares de terceira geração (utilizando multijunções).

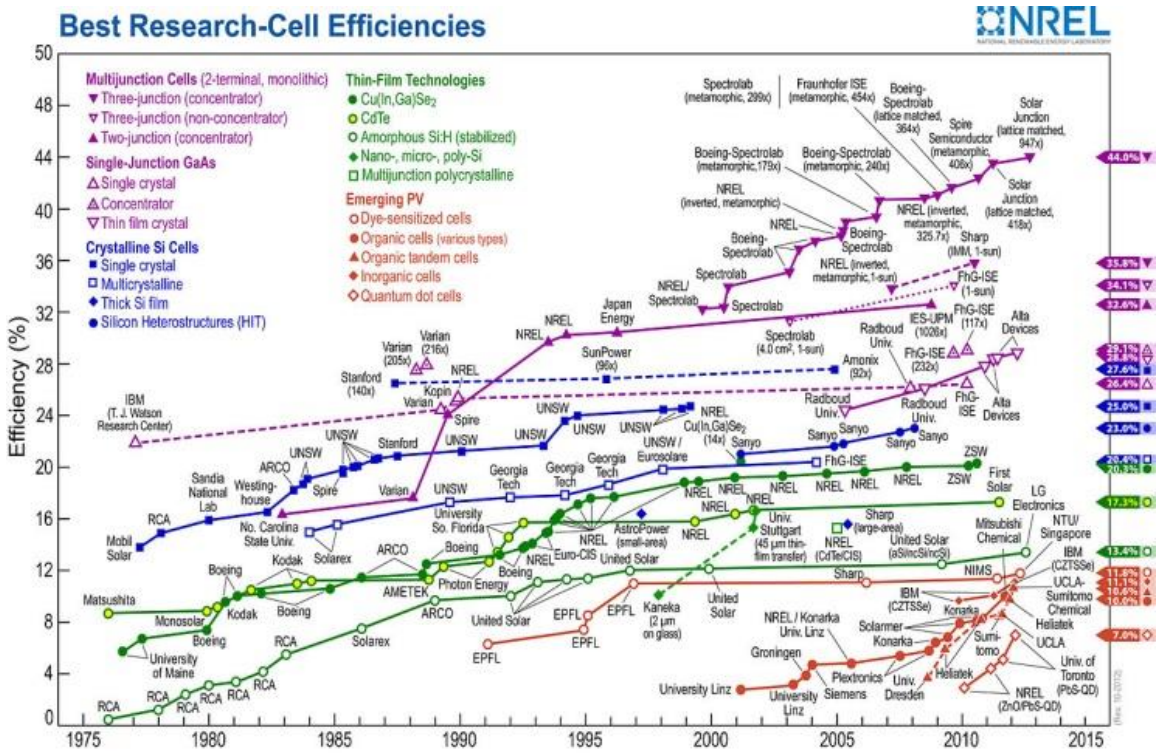
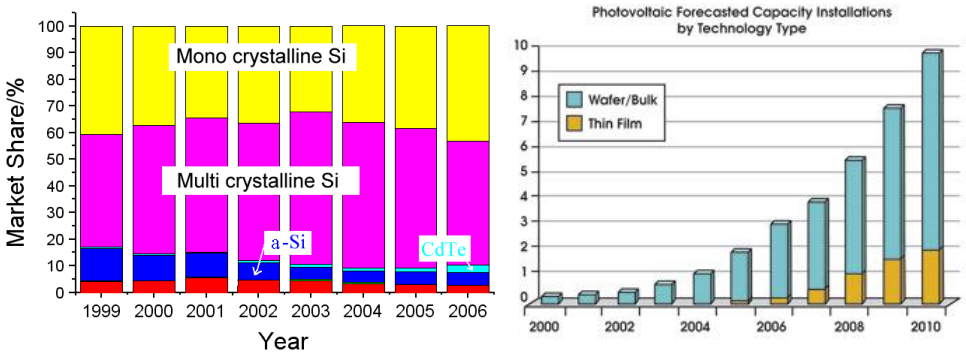


Figura 22: Quadro de eficiência em função do tempo, elaborado pelo NREL, para as principais tecnologias de células solares.

Fonte: ***http://energyinformative.org/nrel-efficiency-record-two-junction-solar-cell***

2 O SILÍCIO CRISTALINO

A Figura 23 mostra que cerca de 90% dos painéis solares utilizam silício cristalino. Apesar de vários estudos estarem sendo realizados em diferentes materiais, a contribuição de outras tecnologias ainda é pequena. Entre estas outras tecnologias incluem-se o silício amorfo (a-Si), Telureto de cádmio (CdTe) e ligas de Cobre-Índio-Gálio-Selênio (CIGS).



(a) (b)

Figura 23: (a) Principais semicondutores utilizados em células solares comerciais; (b) comparação entre lâminas de silício e filmes finos.
Fonte: (a) ***http://www.tf.uni-kiel.de/matwis/amat/semitech_en/kap_8/illustr/market_share.gif****; (b)* ***http://www.photonics.com/Article.aspx?AID=29849***

O material contribui com uma importante fração no preço final de um módulo fotovoltaico (Figura 24). O silício utilizado nas células solares representa mais de um terço do custo do módulo fotovoltaico. Por esta razão, tem sido muito grande o esforço para reduzir o custo do silício.

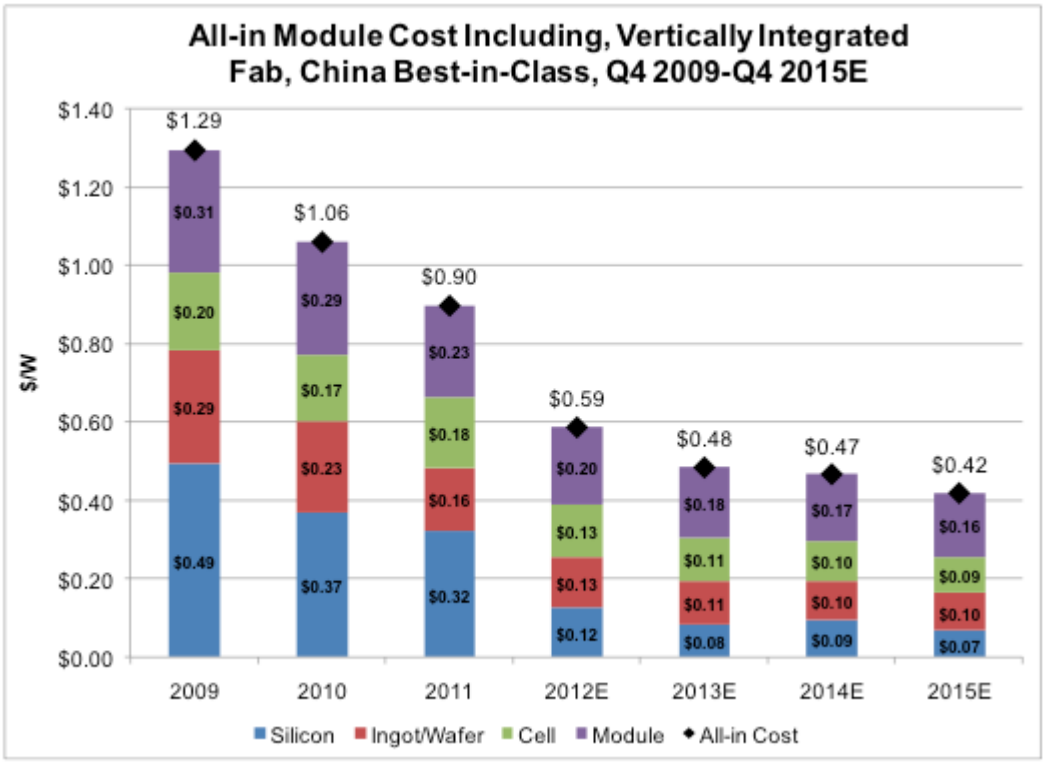


Figura 24: Composição do preço final de um módulo fotovoltaico.
Fonte: ***http://www.greentechmedia.com/articles/read/top-chinese-manufacturers-will-produce-solar-panels-for-42-cents-a-wat***

2.1 Silício de grau eletrônico e solar

O silício utilizado em células solar e outros dispositivos eletrônicos é obtido a partir do quartzo, através de uma reação com carbono em altas temperaturas, conhecida como reação carbotérmica:

$$SiO_2 \text{ (quartzo)} + 2C \text{ (carvão)} \longrightarrow Si\text{(sólido)} + 2CO \text{ (gás)}$$

O silício obtido por esta reação tem pureza muito baixa (~98-99%), inadequado para aplicações solares e eletrônicas, que requerem pureza mais elevadas, como adiante será abordado. A técnica mais conhecida e difundida para se obter silício de alta pureza utiliza o processo Siemens. Nesta técnica o silício metalúrgico é primeiramente convertido em triclorosiliano ($HSiCl_3$), obtido por destilação fracionada após reação do silício metalúrgico com ácido clorídrico (HCl). O triclorosilano obtido desta maneira é altamente puro e é utilizado em um reator CVD (*Chemical Vapor Deposition*) (Figura 25) como matéria prima para se obter silício cristalino de acordo com a reação:

$$HSiCl_3 + H_2 \xrightarrow{(900\ ^\circ C)} Si + 3HCl$$

Figura 25: Reator CVD utilizado para produzir silício de alta pureza adotando o processo Siemens.
Fonte: ***http://us.aving.net/news/view.php?mn_name=exhi&articleId=193192&sp_num=355***

Como resultado, o silício obtido após estas etapas é altamente puro, podendo chegar a "9 noves" de pureza (99,9999999%). Para a maioria das aplicações eletrônicas "7" noves de pureza são suficientes, enquanto outras aplicações, como microprocessadores para computador, requerem pureza maior. Em células solares podemos utilizar pureza de 99,9999 % ("seis noves"), o chamado silício grau solar.

O silício obtido pelo processo Siemens é policristalino e seu formato não permite seu uso em aplicações eletrônicas. Para esta finalidade é necessário fundi-lo e recristalizá-lo para deixá-lo no formato adequado. O processo mais comum utiliza a técnica Czochralski (Figura 26 e Figura 27) para se obter um material monocristalino.

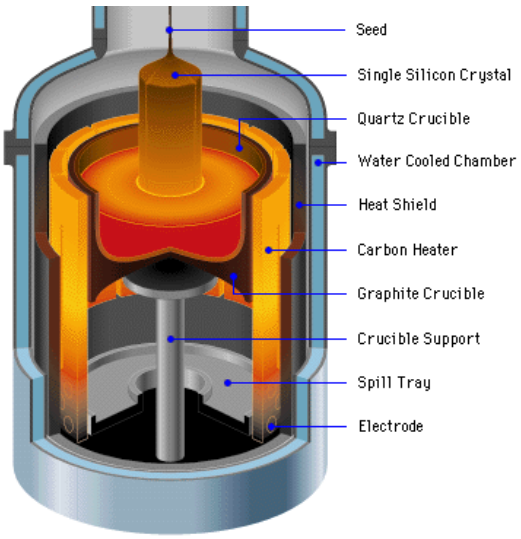
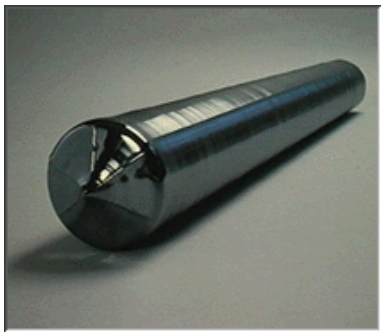


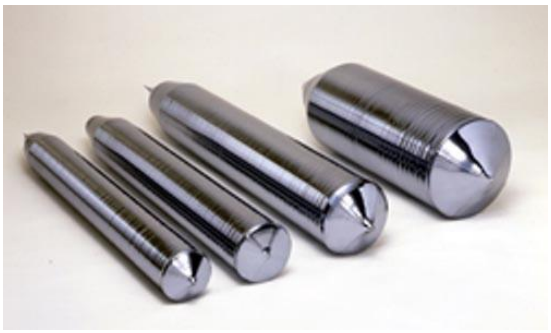
Figura 26: A técnica Czochralski, que consiste em crescer um tarugo de silício monocristalino a partir de silício líquido.
Fonte: ***http://people.seas.harvard.edu/~jones/es154/lectures/lecture_2/materials/materials.html***

Figura 27: Equipamentos utilizados para crescer tarugos de silício pela técnica Czochralski.
Fonte: ***http://www.xaot.com/sdp/173803/4/cp-4304063/0/Crystal_Growing_Furnace.html***

A Figura 28 mostra alguns tarugos de silício monocristalino obtidos pela técnica Czochralski. O silício obtido por esta técnica é altamente puro e utilizado na indústria eletrônica. Entretanto, a parte superior e inferior dos tarugos não têm a mesma pureza da parte central e, por esta razão, eles são utilizados na indústria fotovoltaica, que não necessita de uma pureza tão elevada quanto a utilizada em dispositivos eletrônicos, como mencionado acima.



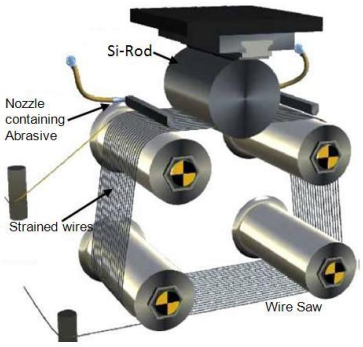
(a)



(b)

Figura 28: Alguns tarugos de silício purificado obtidos pela técnica Czochralski.
Fonte: (a) ***http://www.pveducation.org/pvcdrom/pn-junction/introduction****; (b)*
http://www.hiwtc.com/photo/products/27/00/93/9349.jpg

Os tarugos de silício são cortados com serras diamantadas (Figura 29a), de onde se obtém lâminas de silício de diferentes espessuras (Figura 29b), tipicamente da ordem de 200-500 µm. O diâmetro depende das condições de preparação da técnica Czochralski.



(a)

(b)

Figura 29: (a) Serra de fio diamantado para corte de lâminas de silício; (b) laminas de silício de diferentes diâmetros.
Fonte: (a) ***https://www.powerguru.org/neutron-transmutation-doping-silicon-rods/****; (b)* ***http://www.primewafers.com/Product_Si.html***

Outras técnicas para preparação de lâminas de silício para células solares adotam métodos mais baratos. Nestas técnicas, o silício obtido do processo Siemens é transformado em blocos de silício policristalino utilizando diferentes procedimentos. A Figura 30 mostra um reator utilizado para a obtenção de um bloco de silício policristalino. O polisilício obtido do processo Siemens é colocado em um cadinho, um recipiente de quartzo ou cerâmica, como mostra a Figura 30a, e liquefeito em um reator (Figura 30b). Após a fusão ele é deixado resfriar, sob controle, e removido do cadinho (Figura 30c).

(a)

(b)

(c)

Figura 30: (a) Cadinho de cerâmica; (b) Reator para fusão e solidificação do silício; (c) Bloco de silício.
Fonte: (a) ***http://www.fusedsilicacrucible.com/****; (b)* ***http://pveducation.org/pvcdrom/manufacturing/growing-ingots****; (c)* ***http://pveducation.org/pvcdrom/manufacturing/growing-ingots***

O bloco de silício é então cortado em lâminas com cerca de 200-500 micra de espessura e dimensões que podem atingir 15x15 cm (Figura 31).

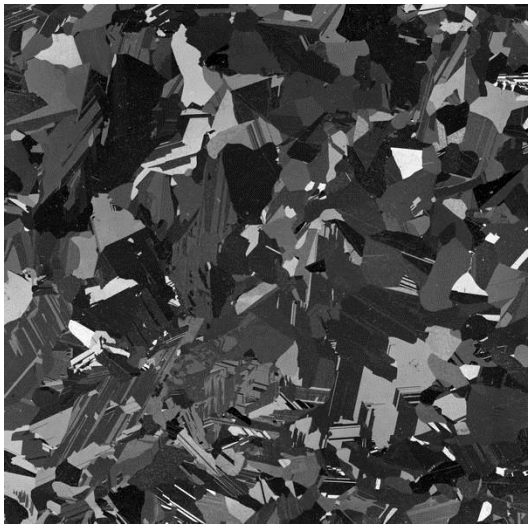


Figura 31: Uma lâmina de silício policristalino. Observa-se claramente os pequenos monocristais de silício que formam a lâmina.
Fonte: ***http://pveducation.org***

2.2 Silício metalúrgico de grau melhorado

Para tornar o silício mais barato, estudam-se outras técnicas de purificação do silício adotando-se rotas metalúrgicas. Na Unicamp, o Laboratório de Pesquisa Fotovoltaicas do Instituto de Física (IFGW) juntamente com o Laboratório de Fusão de Feixe de Elétrons da Faculdade de Engenharia Mecânica (FEM) desenvolvem processos de purificação de silício metalúrgico adotando-se rotas metalúrgicas, como solidificação unidirecional (Figura 32), fusão zonal, degaseificação a vácuo (Figura 33) e Czochralski.

Figura 32: Forno para solidificação unidirecional.
Fonte: FEM/Unicamp

Figura 33: "Electron beam" adotado no processo de purificação por desgaseificação a vácuo e fusão zonal. Da esquerda para direita: Prof. Paulo Mei (FEM), Prof. Francisco Marques (IFGW) e Dra. Andresa Côrtes. Fonte: FEM/Unicamp.

3 CÉLULAS SOLARES DE SILÍCIO

Células de primeira geração são caracterizadas por serem as primeiras células desenvolvidas e que utilizam semicondutores cristalinos (monocristalino ou policristalino). Veremos adiante como estas células funcionam.

3.1 O efeito fotovoltaico: princípio de conversão da energia solar em energia elétrica

O efeito fotovoltaico corresponde à conversão de luz (fótons) diretamente em energia elétrica. A primeira observação desse efeito é comumente creditada ao físico francês Alexandre-Edmond Becquerel em 1839, aos 19 anos, e a fabricação da primeira célula solar ao norte-americano Charles Fritts em 1883[1], cuja eficiência de conversão era menor que 1%.

Para se obter o efeito fotovoltaico utilizamos semicondutores como o silício (Si), o Arseneto de Gálio (GaAs) entre muitos outros. Estes materiais possuem uma banda proibida de energia (Figura 34a) entre a chamada banda de valência (que fica ocupada com elétrons) e a banda de condução (que fica vazia).

A banda proibida é uma região de energia que não pode ser ocupada por elétrons. Um fóton com energia igual (ou superior) à banda proibida pode ser absorvido por um elétron da banda de valência e excitado para a banda de condução (Figura 34b). Estes elétrons, que estão presos aos átomos do semicondutor, mudam de nível energético dentro do semicondutor e ficam livres para se moverem. Ao ficarem livres, deixam um átomo com um elétron a menos, ou seja, um íon, com uma vacância (comumente chamado de buraco) que era ocupado pelo elétron (Figura 34c), formando o que se costuma chamar de par elétron-buraco. Esta vacância pode se mover através do semicondutor e se comporta como se fosse uma carga positiva.

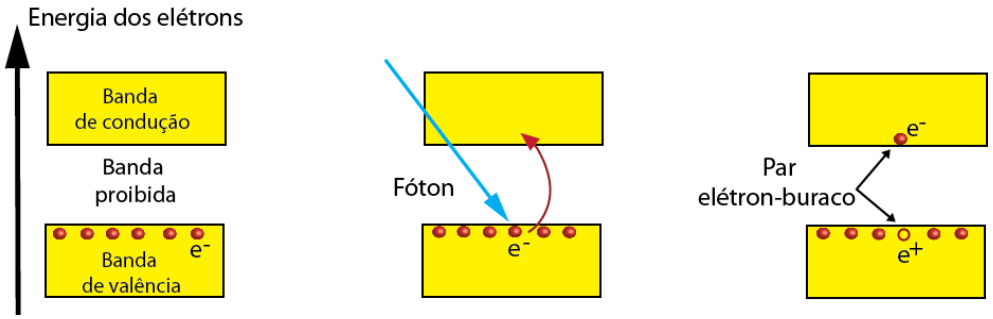


Figura 34: (a) Banda de valência (preenchido com elétrons), banda proibida (não possui níveis eletrônicos para os elétrons) e banda de condução (vazia) de um semicondutor; (b) Um fóton é absorvido por um elétron da banda de valência e é excitado para a banda de condução; (c) um par elétron-buraco é então gerado pela absorção do fóton da luz incidente.
Fonte: Elaboração própria.

Como o silício puro é pouco condutor (diz-se que é intrínseco), o material precisa ser dopado para aumentar a condutividade e deslocar o chamado "nível de Fermi", que representa aproximadamente o nível eletrônico ocupado, por elétrons, mais elevado no caso de um metal. Em um semicondutor, o nível de Fermi fica no centro da

[1] Para saber mais, visite http://www.aps.org/publications/apsnews/200904/physicshistory.cfm

banda proibida (Figura 35a). Se doparmos o silício com átomos de fósforo (Figura 35b), este introduz elétrons em um nível eletrônico próximo da banda de condução, deslocando o nível de Fermi no mesmo sentido. Desta forma, os elétrons podem ser facilmente excitados para a banda de condução. Neste caso dizemos que o silício fica dopado tipo-n, porque o dopante introduzido aumenta a quantidade de elétrons (portadores negativos) na banda de condução. Por outro lado, se doparmos o silício com átomos de boro, (Figura 35c), este introduz níveis eletrônicos próximo da banda de valência, deslocando o nível de Fermi no mesmo sentido. Da mesma forma, os elétrons podem facilmente serem excitados da banda de valência para estes níveis introduzidos pelo boro. Neste caso, dizemos que o silício fica dopado tipo-p, porque o dopante introduzido aumenta a quantidade de buracos (portadores positivos - átomos com um elétron a menos) na chamada banda de valência.

Quando unimos silício tipo-n com silício tipo-p, a chamada junção p-n, o nível de Férmi dos dois materiais se igualam e gera uma barreira de potencial entre eles (Figura 35d). Esta barreira de potencial, como é chamada, é fundamental para o funcionamento de uma célula solar. Observa-se que para um elétron sair da banda de condução do lado n para a banda de condução do lado p, é necessária uma energia adicional, por isso chamamos de barreira de potencial. Este tipo de junção é semelhante à adotada também em diodos e em muitos outros dispositivos eletrônicos. Uma apresentação mais aprofundada deste assunto está fora dos objetivos deste texto, mas pode ser encontrado em vários livros (2-4)

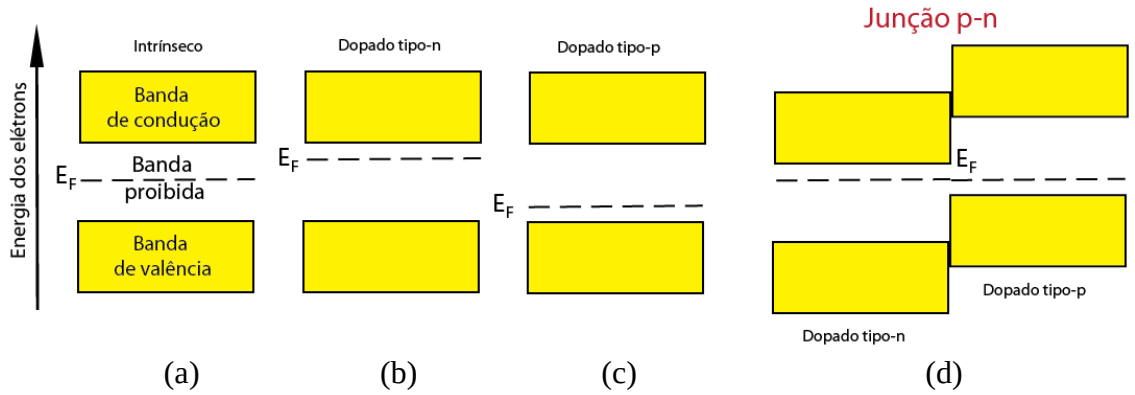


Figura 35: (a) Semicondutor intrínseco, sem dopagem. O nível de Férmi fica no meio; (b) semicondutor dopado com fósforo, tipo-n. O nível de Férmi se desloca para cima; (c) silício dopado com boro, tipo-p. O nível de Férmi se desloca para baixo. (d) Junção p-n, formada pela união entre uma camada de silício dopada tipo-p com outra dopada tipo-n.
Fonte: Elaboração própria.

O efeito fotovoltaico corresponde à conversão de luz (fótons) diretamente em energia elétrica. A Figura 36 ilustra este fenômeno.

A luz incidente sobre a célula solar (Figura 36a) é absorvida internamente por elétrons e geram pares elétron-buracos (Figura 36b). Os elétrons são separados dos buracos pela barreira de potencial, transportando-os para lados opostos da célula (Figura 36c). Se conectarmos uma carga entre os dois lados da célula (Figura 36d), elétrons fluirão de um lado para o outro, gerando uma corrente elétrica, que é o efeito fotovoltaico.

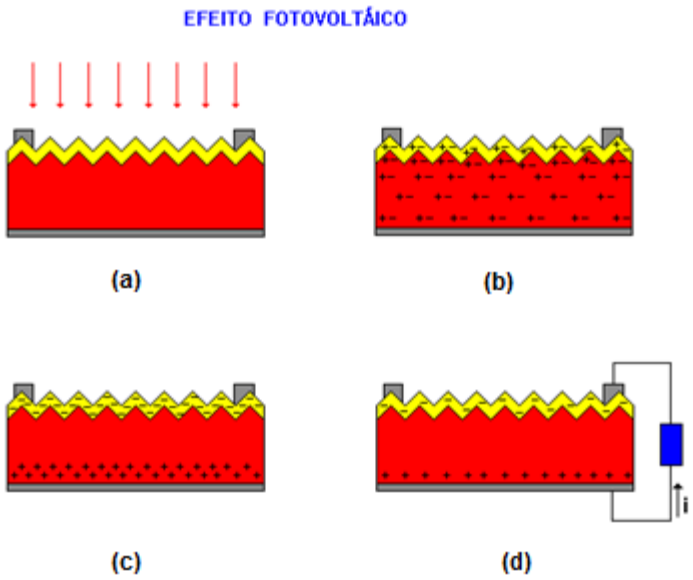


Figura 36: O efeito fotovoltaico.
Fonte: Elaboração própria.

A conversão da luz em energia elétrica ocorre em um tempo muito pequeno e os pares elétrons-buracos gerados podem se recombinar em tempos muito inferiores a um segundo. Assim, a energia gerada deve ser aproveitada ou armazenada imediatamente, caso contrário será perdida.

Existem várias estruturas para a criação da barreira de potencial e para um melhor aproveitamento da energia gerada. A Figura 37 ilustra três tipos diferentes de células solares. A célula da Figura 37c corresponde àquela que possui a maior eficiência (25%), fabricada apenas em laboratório, pois sua fabricação é cara e não teria competitividade no mercado.

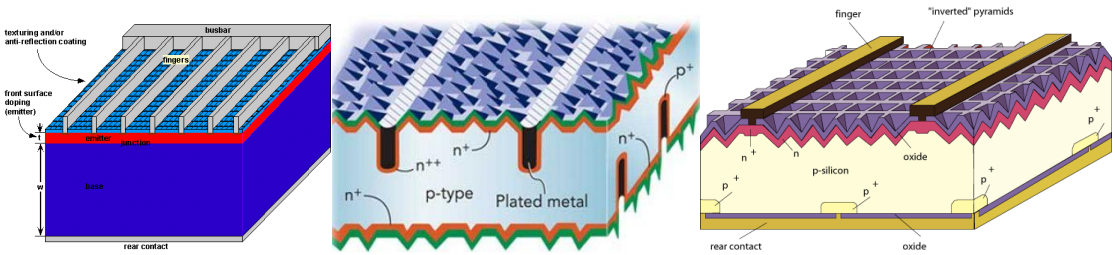


Figura 37: Diferentes estruturas de células solares de silício cristalino.

Fonte: (a) ***http://pveducation.org/pvcdrom/design/solar-cell-parameters;*** *(b) M.A. Green, "Silicon Solar Cells: Advanced Principles & Practice," UNSW Press, 1995, Ch. 11; (c)* ***http://pveducation.org/pvcdrom/manufacturing/high-efficiency***

3.2 Reflexão e absorção da radiação solar

A Figura 38 mostra o espectro de radiação solar no topo da atmosfera e na superfície da Terra. No topo da atmosfera, a radiação é denominada de AM0 (Air Mass 0) e tem uma potência de 134 mW/cm^2. No nível do mar, com sol a pino, 90°, a radiação é denominada de AM1 (Air Mass 1) e tem uma potência de 100 mW/cm^2. O

espectro na superfície da Terra é alterado devido à absorção de parte da radiação (ou energia) pelo vapor de água na atmosfera. A radiação solar que incide sobre um painel fotovoltaico diretamente, sem espalhamento, é chamada de radiação direta, enquanto a radiação espalhada por nuvens, vegetação, edifícios, etc. é chamada de radiação difusa.

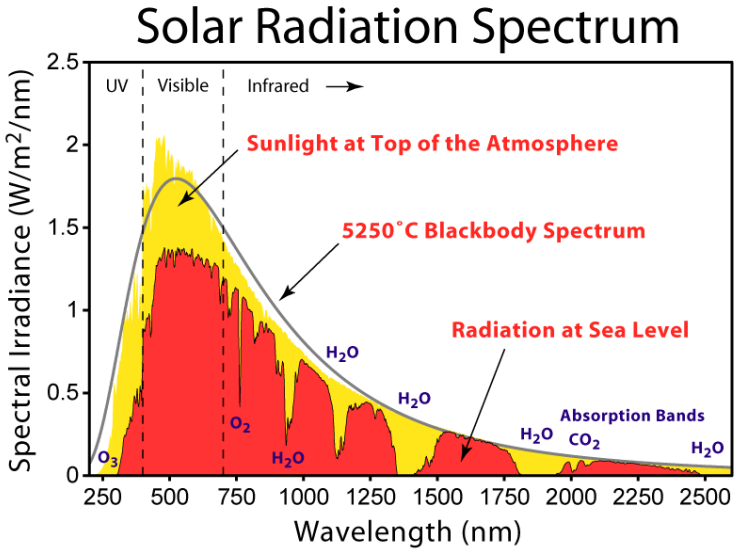


Figura 38: Espectro solar no topo da atmosfera e na superfície terrestre, mostrando as bandas de absorção devidas principalmente ao vapor de água (H_2O). Outras absorções são menos importantes, como devidas ao gás carbônico (CO_2), oxigênio (O_2) e ozônio (O_3).
Fonte: ***http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Solar_Spectrum.png***

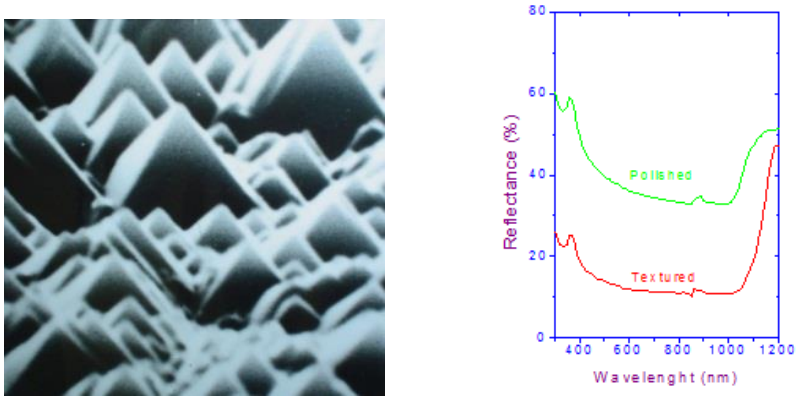
Devido às características da radiação solar, que, além de ser composta de radiação direta e difusa, é distribuída em um amplo espectro de comprimento de onda, o aproveitamento da energia associada a cada comprimento de onda requer estruturas especiais adicionadas à barreira de potencial. Como pode ser observado nos exemplos da Figura 37, é comum que a superfície frontal, ou ambas (frontal e traseira), sejam texturizadas. Esta estrutura é utilizada para reduzir a reflexão da radiação incidente nas células solares (Figura 39).

A texturização é feita quimicamente e expõem pirâmides na superfície da célula. Para isto é necessário o uso de lâminas cristalinas cujos átomos da superfície estejam ordenados de forma a permitir uma reação anisotrópica. Isto acontece para a orientação cristalina identificada, em cristalografia, como <100>. As pirâmides criadas fazem com que a luz refletida de uma face tenha mais uma chance de ser absorvida ao incidirem na outra face da pirâmide vizinha, reduzindo a reflexão, como mostra a Figura 39b, que mostra a reflexão de uma lâmina de silício polida e uma texturizada na faixa de energia de interesse para uma célula solar de silício. Esta redução de reflexão aumenta a quantidade de luz absorvida, e, consequentemente, a corrente e finalmente a eficiência total da célula solar.

Além da texturização, que é largamente utilizada na indústria, são também utilizadas camadas antirefletoras com ou sem texturização. A Figura 40 mostra a redução na reflexão comparando-se uma lâmina de silício polida com uma texturizada e outra texturizada associada com uma camada antirefletora. Observa-se que desta maneira é possível reduzir significativamente a reflexão em células solares de silício.

Outro fator a ser considerado em relação à reflexão é o fato de que na construção do painel fotovoltaico as células solares são cobertas por uma folha de vidro que altera também o padrão de reflexão. Na escolha do vidro, é importante utilizar um que tenha baixo índice de refração. Os mais utilizados têm um índice de refração em torno de 1,45, o que promove uma reflexão de cerca de 8% da luz incidente. Vidros

com índice de refração maior refletem mais. Por outro lado é difícil se obter vidro com índice de refração inferiores a 1,45.



(a) (b)

Figura 39: Superfície de silício (100) texturizada quimicamente com NaOH, expondo as pirâmides formadas na superfície e o espetro de reflexão de uma lâmina polida e uma texturizada.
Fonte: IFGW/unicamp)

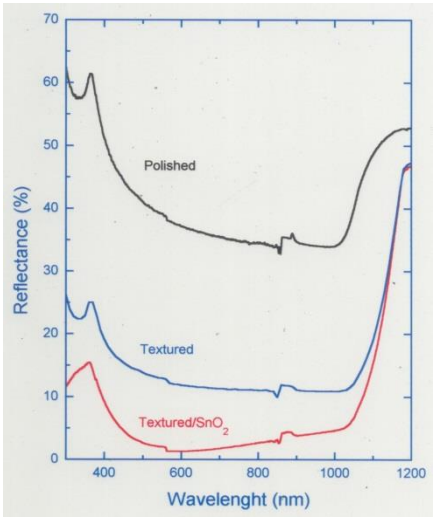


Figura 40: Reflexão de superfície de silício polida, texturizada e texturizada com uma camada antirefletora de dióxido de estanho (SnO_2).
Fonte: IFGW/Unicamp

3.3 Caracterização de células solares: eficiência, resistência série e paralela

Para se caracterizar uma célula solar, os principais parâmetros são obtidos através de uma curva de corrente versus tensão, as chamadas curvas I x V (ou IV), também chamadas de curva característica. A Figura 41 mostra um exemplo de uma curva I x V de uma célula iluminada com luz solar. Para permitir comparações entre diferentes células ou módulos, suas caracterizações são realizadas seguindo um padrão de condições de operação, como, por exemplo, uma radiação incidente de 100 W/cm^2 (1000 W/m^2), AM1,5 e temperatura de 25°C. Assim, os principais parâmetros característicos de uma célula solar variam conforme as condições de operação (radiação incidente e temperatura, por exemplo).

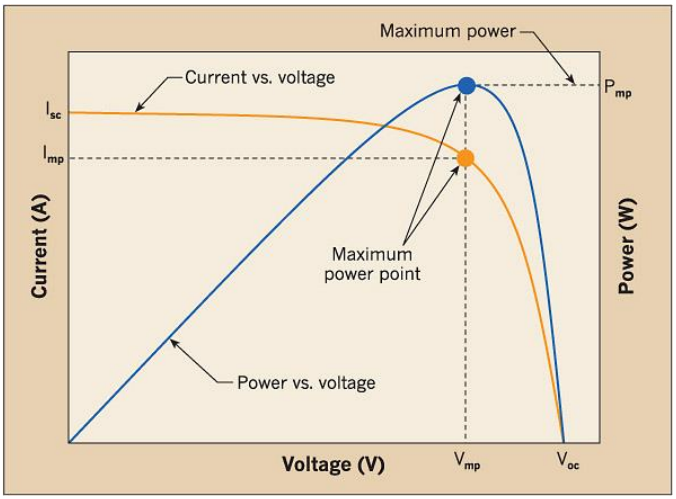


Figura 41: Curva corrente versus tensão (I x V) característica de uma célula solar (curva laranja). A curva azul mostra a potência fornecida pela célula em função da tensão indicando o ponto de máxima potência (P_{mp})
Fonte: ***http://ecmweb.com/green-building/calculating-current-ratings-photovoltaic-modules***

No cálculo da eficiência, η, P_{inc} representa a potência incidente e os demais termos estão indicados na figura acima e listados abaixo.

Os principais parâmetros que podem ser obtidos a partir de curvas I x V são:

a) Corrente de curto circuito = I_{sc} ("short-circuit current"): corrente máxima que pode ser obtida quando a carga é nula (sem resistência de carga), ou seja, quando os terminais de saída são ligados um ao outro (curto-circuito).
b) Tensão de circuito aberto = V_{oc} ("open-circuit voltage"): tensão máxima que pode ser obtida quando a carga é infinitamente grande, ou seja, quando o circuito está aberto.
c) Corrente máxima = I_{mp} (para o qual a potência será máxima, "maximum power")
d) Tensão máxima = V_{mp} (para o qual a potência será máxima, "maximum power")
e) Fator de preenchimento = FF = I_{mp} x V_{mp}/I_{sc} x V_{oc} ("fill factor")
f) Eficiência da célula = FFxI_{sc} V_{oc}/ P_{inc}, onde P_{inc} representa a potência incidente.
g) Ponto de máxima potência ("Maximum Power Point"): ponto da curva de corrente versus tensão ou da curva de potência versus tensão onde a célula solar fornece a máxima potência.

A título de exemplo de que esses parâmetros são relacionados às condições de operação, quando a radiação incidente sobre uma célula é reduzida, a corrente de curto-circuito e a tensão de circuito aberto diminuem. O inverso também ocorre quando a radiação incidente aumenta, resultando em I_{SC} e V_{OC} maiores.

Outros parâmetros são também obtidos a partir de curvas I x V, como a resistência série e paralela e o fator de idealidade, que aparece na equação de condução de corrente nas células solares, indicado pela letra "n" na equação (1) (item 3.6). Maiores informações sobre estes e outros parâmetros podem ser obtidos em livros especializadas [2,3].

A Figura 41 acima mostra o formato de curva I x V de uma boa célula solar. Entretanto, uma variada gama de formatos podem ser obtidos, dependendo da

qualidade da célula e do tipo de problema. Através da forma da curva é possível se realizar simulações e identificar a natureza do problema encontrado, o que ajuda a melhorar o processo de fabricação da célula.

A Figura 42 ilustra o caso de um estudo realizado com diferentes superfícies antirefletoras, onde se observa o aumento da corrente de curto-circuito por unidade de área devido à redução da reflexão da célula solar com diferentes estruturas antirefletoras. Isso mostra uma das soluções adotadas para melhorar a performance das células solares por melhor aproveitar a radiação incidente, ou seja, reduzir as perdas dessa radiação por reflexão.

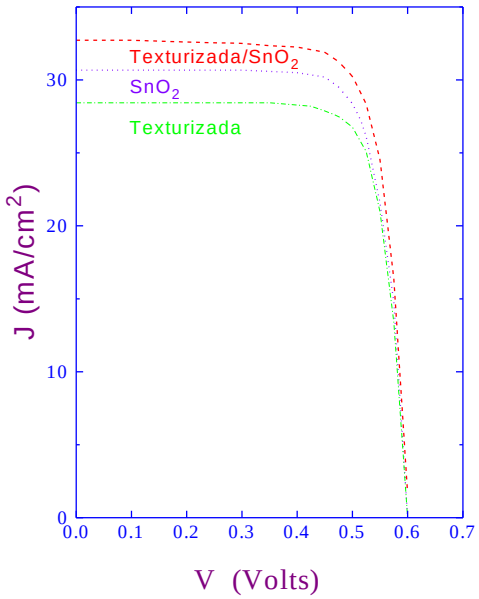


Figura 42: Curva IxV de três células solares com três tipos diferentes de superfície antirefletora.
Fonte: IFGW/Unicamp

A Figura 43 mostra um modelo aproximado de um diagrama elétrico representativo de uma célula solar de silício, que pode ser imaginada como sendo formada por um gerador de corrente ideal, em paralelo com um diodo (uma célula solar é um diodo), em paralelo com uma resistência (resistência paralela, R_{sh}) e em série com uma resistência (resistência série, R_s). O desejável é que a R_{sh} seja a maior possível para que a corrente não seja perdida através de caminhos dentro da célula, mas que vá para o circuito externo. Por outro lado, deseja-se que R_s seja a menor possível para reduzir a perda de tensão na célula, transferindo tudo para o circuito externo.

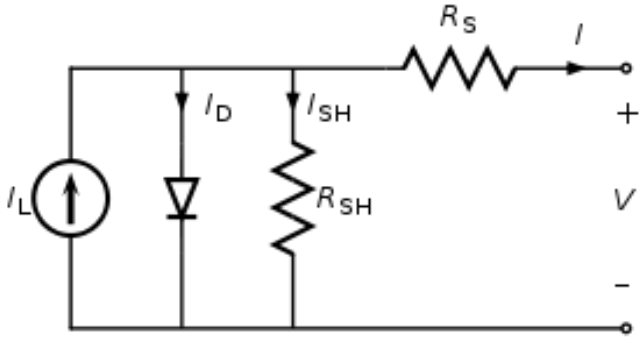


Figura 43: Modelo eletrônico simplificado de uma célula solar.
*Fonte: **http://en.wikipedia.org/wiki/Theory_of_solar_cells***

3.4 Geração e recombinação de portadores de carga e outros mecanismos de perda

Como visto na seção anterior, fótons são absorvidos por elétrons dentro da célula solar gerando pares elétrons-buracos, que são os portadores de carga da célula. A absorção de luz pela célula depende do coeficiente de absorção do material utilizado e de sua espessura. A Figura 44 mostra o coeficiente de absorção de alguns semicondutores cristalinos e a espessura (*penetration depth*) para o qual a parte não absorvida (transmitância) corresponde a 1/e do valor incidente. Observa-se que o silício tem um coeficiente de absorção relativamente baixo, requerendo lâminas espessas (da ordem de 300-500 micra) para absorver a maior parte da luz incidente, principalmente da região infravermelha.

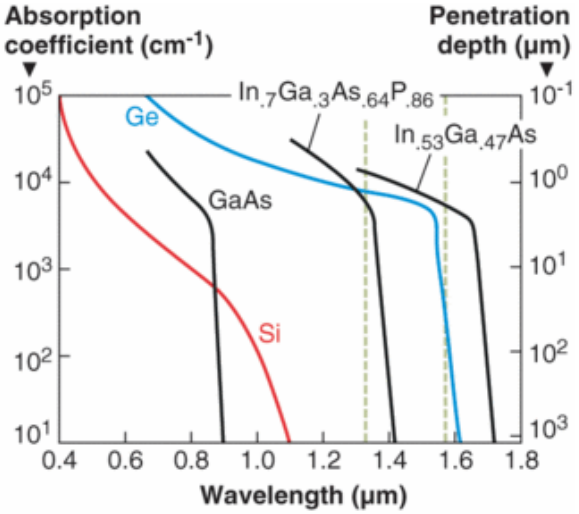


Figura 44: Coeficiente de absorção de alguns semicondutores cristalinos.
Fonte: http://www.laserfocusworld.com

Os pares elétrons-buracos gerados precisam ser separados rapidamente devido aos fenômenos de recombinação, que ocorre em tempos da ordem de microssegundos. A recombinação ocorre naturalmente, com emissão de luz ou através de geração de fônons (vibração da rede cristalina, que reflete na temperatura da célula solar). Outros mecanismos que aumentam significativamente a recombinação são os defeitos no material e nas interfaces entre semicondutor e contatos, na junção p-n e entre os grãos de materiais policristalinos. Por esta razão, células solares fabricadas em silício policristalino são geralmente menos eficientes do que células solares fabricadas em silício monocristalino.

3.5 Eficiência quântica de células solares

Um parâmetro importante em células solares refere-se à eficiência de geração de corrente por fótons absorvidos, conhecido como eficiência quântica. A Figura 45 ilustra a influência desse parâmetro em relação à célula ideal, ou seja, quanto maior a eficiência quântica, mais próxima a célula se aproxima da ideal.

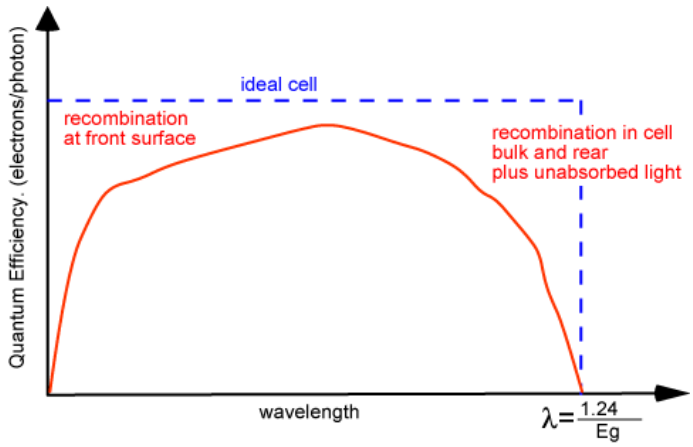


Figura 45: Eficiência quântica típica em uma célula solar ideal (pontilhado azul) e em uma célula real, mostrando os efeitos da recombinação na face frontal e na face traseira. No eixo da abcissa λ representa o comprimento de onda ("wavelenght" em inglês) da luz incidente e E_g é a banda proibida do semicondutor utilizado.
*Fonte:: **http://pveducation.org/pvcdrom/design/current-losses-due-to-recombination***

3.6 Mecanismos de transporte em células solares

Uma vez que os pares elétrons-buracos são gerados pela absorção de luz, eles movem-se através da célula solar por diversos mecanismos, cujos principais são difusão e varredura (drift). A equação característica de uma célula solar pode ser escrita como:

$$I = I_L - I_0 \left\{ \exp\left[\frac{q(V + IR_S)}{nkT} \right] - 1 \right\} - \frac{V + IR_S}{R_{SH}}. \qquad (1)$$

onde (em unidade do SI):

I_L = corrente fotogerada (Ampere)
I_0 = corrente de saturação reversa (Ampere)
q = carga elementar ($1{,}6 \times 10^{-19}$ C)
n = fator de idealidade (adimensional, próximo de 1)
k = constante de Boltzman ($1{,}38 \times 10^{23}$ m^2 kg s^{-2} K^{-1})
T = temperatura absoluta (K)
R_{sh} = Resistência paralela (Ohm)
R_s = Resistência série (Ohm)

O estudo das curvas I x V (Figura 41) em função da temperatura pode ser utilizado para a identificação dos mecanismos de transporte. Em uma boa célula solar de silício cristalino, o fator de idealidade é próximo de 1.

3.7 Processos de fabricação de células solares de silício

A Figura 46 mostra um diagrama de blocos apresentando as principais etapas na confecção de uma célula solar de silício cristalino, a seguir descritas.

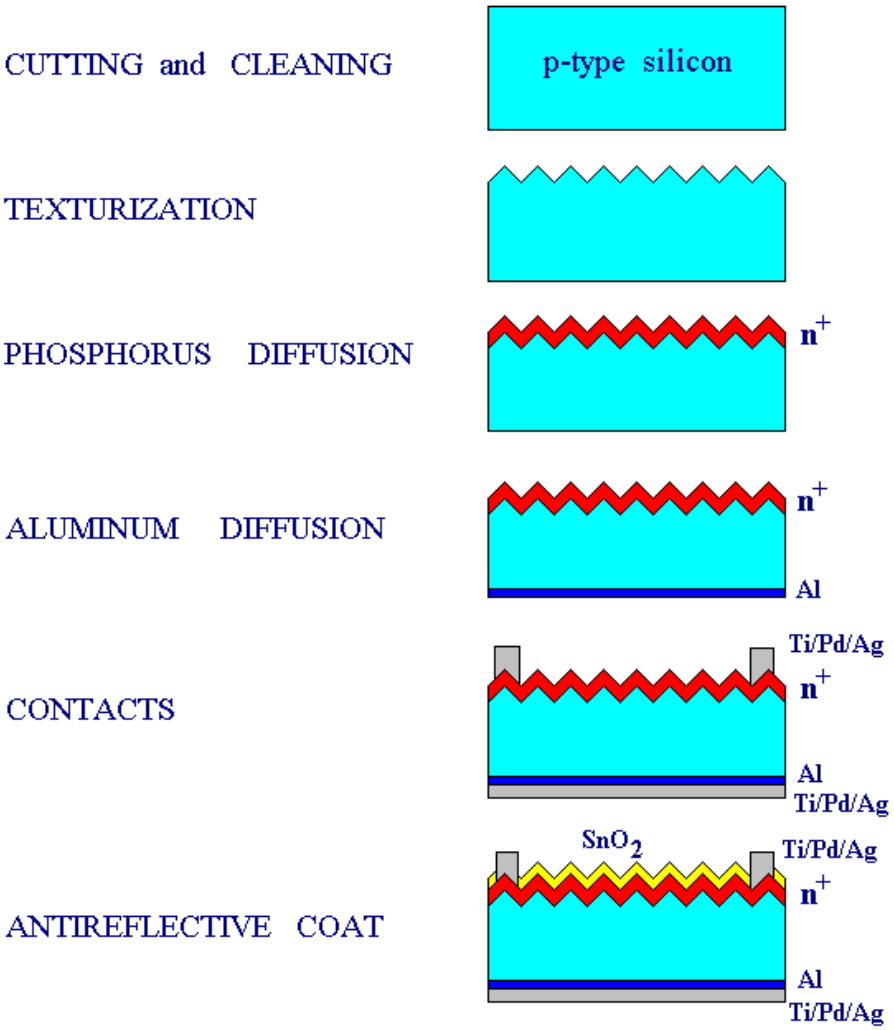


Figura 46: Principais etapas de fabricação de células solares de silício.
Fonte: Elaboração própria.

Corte e limpeza das lâminas: As lâminas de silício são cortadas com serras de fio ou serras de diamante. Após o corte, é necessário eliminar a superfície das lâminas devido aos danos causados pelo corte. Isto é feito quimicamente com solução ácida ou básica.

Texturização: para a texturização é necessário que o silício tenha a orientação <100>. O processo é simples e feito com solução de NaOH ou KOH em temperaturas de ordem de 80-90 ºC por cerca de 10 minutos. A Figura 39a mostra uma superfície texturizada obtida neste tipo de procedimento.

Difusão de fósforo: Para a formação da camada tipo-n sobre silício tipo-p, geralmente utiliza-se o $POCl_3$ como fonte de fósforo que é borbulhada para um forno em pressão atmosférica a 900 ºC. A difusão é feita por cerca de 20 minutos. A Figura 47 mostra um forno de difusão utilizado para dopar silício com fósforo.

Figura 47: Forno de difusão utilizado para dopar silício com fósforo no Laboratório de Pesquisas Fotovoltaicas (LPF) do IFGW/Unicamp
Fonte: IFGW/Unicamp

Difusão de alumínio: para melhorar a célula é adicionada uma pequena barreira de potencial na face traseira. Isto é feito com alumínio que é obtido por evaporação (Figura 48) ou pelo uso de pasta aplicada por silkscreen e simetrizadas a uma temperatura de ~560 ºC. A sinterização pode ser realizada no mesmo forno mostrado na Figura 47 acima.

Figura 48: Evaporadora de metais utilizado para evaporar alumínio, titânio, paládio e prata nos processos de deposição de contatos metálicos em células solares.
Fonte: Laboratório de Pesquisas Fotovoltaicas do IFGW/Unicamp

Contatos metálicos: na indústria os contatos são feitos com silkscreen utilizando-se uma pasta de prata. Em laboratório, utiliza-se evaporação sequencial de filme de titânio (Ti), paládio (Pd) e prata (Ag). A Figura 48 acima mostra uma evaporadora de metais adotado para depositar estes três metais.

Camada antirefletora: na indústria é comum o uso de nitreto de silício depositado por *Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposiction* (PECVD). Alternativamente, pode-se utilizar outros materiais como SnO_2 depositado por spray químico (Figura 49).

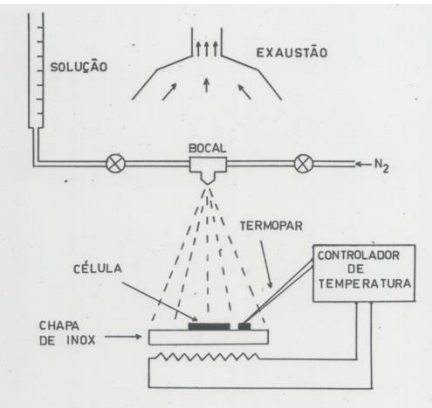
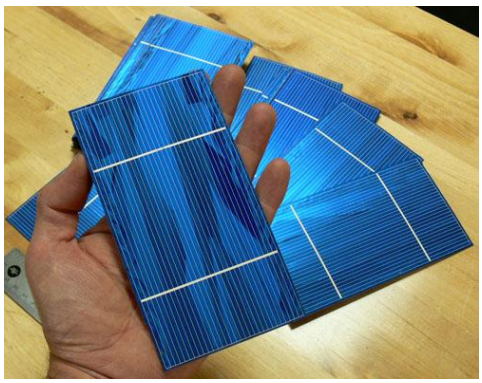


Figura 49: Diagrama de um sistema de spray químico utilizado para depositar camada antirefletora de dióxido de estanho (SnO_2)
Fonte: Elaboração própria.

A Figura 50 mostra exemplos de células solares de silício monocristalino e policristalino utilizados em painéis solares e onde se pode ver os contatos metálicos depositados.



(a)

(b)

Figura 50: (a) Células solares de silício policristalino e (b) monocristalino.
Fonte: (a) ***http://unitednuclear.com/index.php?main_page=product_info&cPath=91&products_id=717&zenid=6ff8a70b94eb45b4d7791fe5cb7fc631****; (b)* ***http://www.top-alternative-energy-sources.com/silicon-solar-cells.html***

4 CÉLULAS SOLARES DE FILMES FINOS (Segunda Geração)

Um dos problemas das células solares de primeira geração é que o coeficiente de absorção é relativamente baixo, requerendo muito material (espessura da ordem de 200-500 micra) para absorver toda a luz. Este problema pode ser resolvido com o uso de materiais amorfos, que possuem coeficiente de absorção muito maior que seus similares cristalinos, e são depositados na forma de filmes finos, são as células solares de segunda geração.

Com isto, pode-se reduzir significativamente a espessura das células para cerca de poucos micra, reduzindo a quantidade de semicondutor utilizado na fabricação da célula e, portando, reduzindo o custo final das células. Outra vantagem é que devido à pequena espessura e o fato de que estes materiais são depositados em temperaturas relativamente baixas (200-300 ^{o}C), podemos fabricar células solares em substratos flexíveis, como alguns plásticos. Outra grande vantagem é que filmes finos podem ser depositados em grandes áreas (da ordem de vários m^2), o que seria extremamente difícil com materiais cristalinos. O maior problema destas células é que a eficiência é menor do que a eficiência obtida com materiais cristalinos. Além disso, a vida útil das células de filmes finos também é menor quando comparada com a de materiais cristalinos, devidos à degradação da célula pela presença de defeitos ou alterações na composição dos materiais envolvidos.

As células solares de segunda geração são preparadas por deposições de filmes finos em diferentes substratos, como vidro, metal ou plásticos.

Existem vários materiais que são utilizados nas células solares de segunda geração. Os mais comuns são o silício amorfo (a-Si), o telureto de cádmio (CdTe) e as ligas de cobre-índio-gálio-selênio (CIGS). A Figura 20 mostra a máxima eficiência obtida com estas estruturas: 13%, 17% e 20%, respectivamente. A estrutura destas células depende das propriedades do material.

4.1 Células solares de a-Si

As células de silícico amorfo utilizam a estrutura p-i-n, ou seja, uma camada tipo-p, sobre uma camada intrínseca, seguida de uma camada tipo-n (Figura 51).

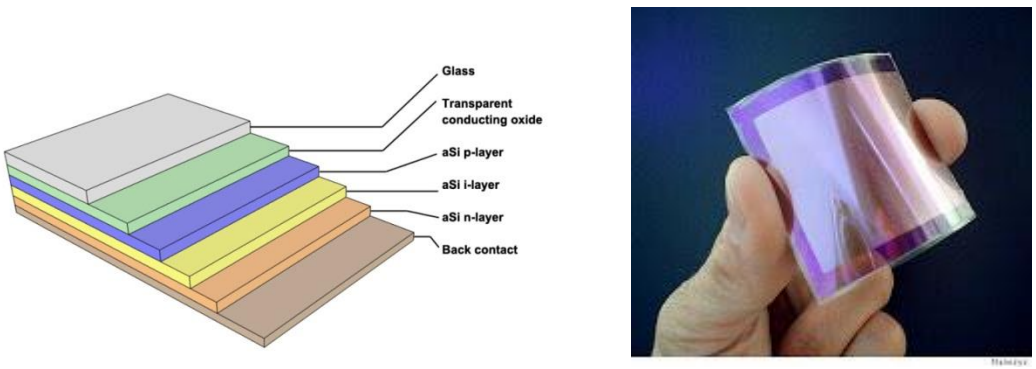


Figura 51: Estrutura representativa de uma célula solar de silício amorfo (esq.); (b) Células solar de silício amorfo (dir.).
Fonte: (a) ***http://www.residentialsolar101.org/thin-film-solar-technology/****;(b)* ***http://nature-log.blogspot.com.br/2010/01/types-of-solar-cells.html***

As células solares de silício amorfo degradam-se com iluminação e não são muito recomendadas para uso em grandes centrais fotovoltaicas, mas são muito usadas em pequenos dispositivos eletrônicos, como calculadoras.

O silício amorfo utilizado em células solares são produzidos pela técnica PECVD (*plasma enhanced chemical vapor deposition*) (Figura 52), utilizando a silana (SiH_4) como matéria prima para a fabricação do semicondutor amorfo, que neste caso fica hidrogenado, chamado de silício amorfo hidrogenado (a-Si:H). O hidrogênio é fundamental neste tipo de material, pois elimina as ligações pendentes que existem em grande quantidade em materiais não hidrogenados (a-Si). As deposições são feitas entre 250-300 ºC. As camadas tipo-n e tipo-p, são também depositadas por PECVD, mas dopadas com fósforo (utilizando a fosfina, PH_3), ou diborana (B_2H_6) para dopagem tipo-n e tipo-p, respectivamente. Sobre esta estrutura é depositada uma camada antirefletora.

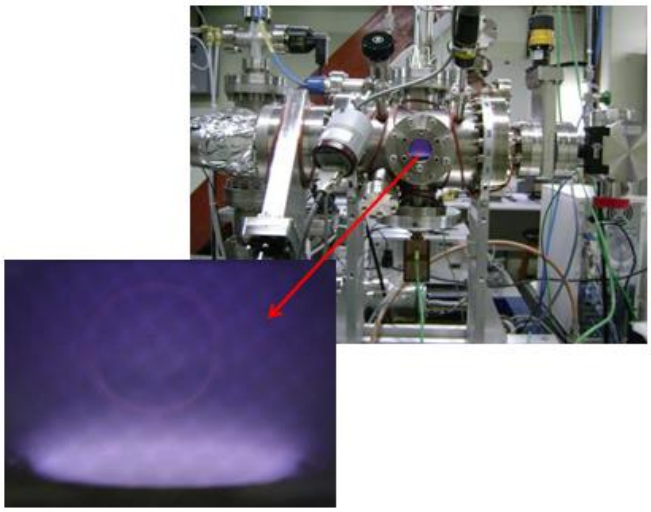


Figura 52: Sistema PECVD utilizado para produção de silício amorfo hidrogenado.
Fonte: IFGW/Unicamp

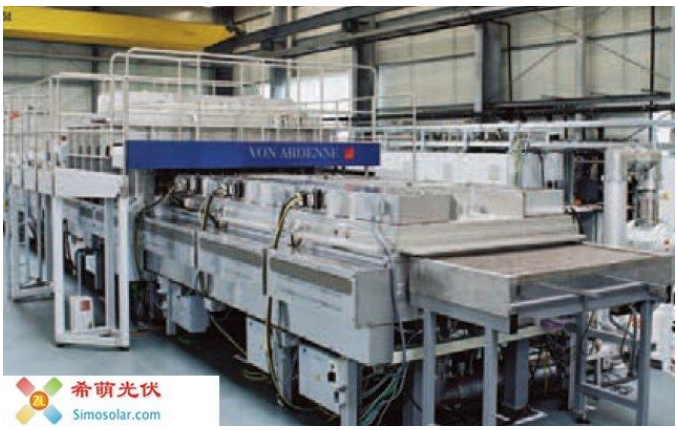


Figura 53: Sistema de sputtering industrial para metalização de contatos para células de silício amorfo.
Fonte:
http://www.bombayharbor.com/productImage/0167822001253951617/Plasma_Metallizer_For_Amorphous_Silicon_Pv_Solar_Cells.jpg

Os contatos metálicos podem ser depositados por diferentes técnicas, como *sputtering*, evaporação térmica, *silk-screen*. A Figura 53 mostra um sistema de

sputtering comercial para produção de contatos em larga escala. Maiores detalhes sobre as propriedades do silício amorfo hidrogenado e células solares pode ser encontrado na referência 5.

4.2 Células solares de telureto de cádmio (CdTe)

As células solares de telureto de cádmio têm estruturas similares a da Figura 54.

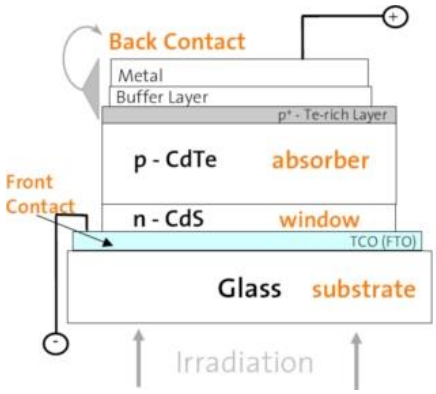


Figura 54: Estrutura representativa de uma célula solar de Telureto de Cádmio (CdTe).
Fonte: não disponível.

As células são depositadas sobre um substrato sólido (metal ou vidro) ou flexível (um polímero, por exemplo). O semicondutor ativo é o CdTe que é aplicado em forma de filme fino. O EVA é utilizado para colar as camadas com o vidro e para selar a célula isolando-as do meio ambiente que podem degradar a eficiência da célula.

Estas células tem um grande problema, pois o cádmio é um material altamente tóxico, semelhante ao mercúrio, podendo ser acumulado na cadeia alimentar e ser absorvido pelo tecido humano, o que tem sido uma das barreiras para seu uso em larga escala. A Figura 55 mostra uma célula solar de CdTe e uma amplificação da estrutura obtida por microscopia eletrônica de varredura (SEM).

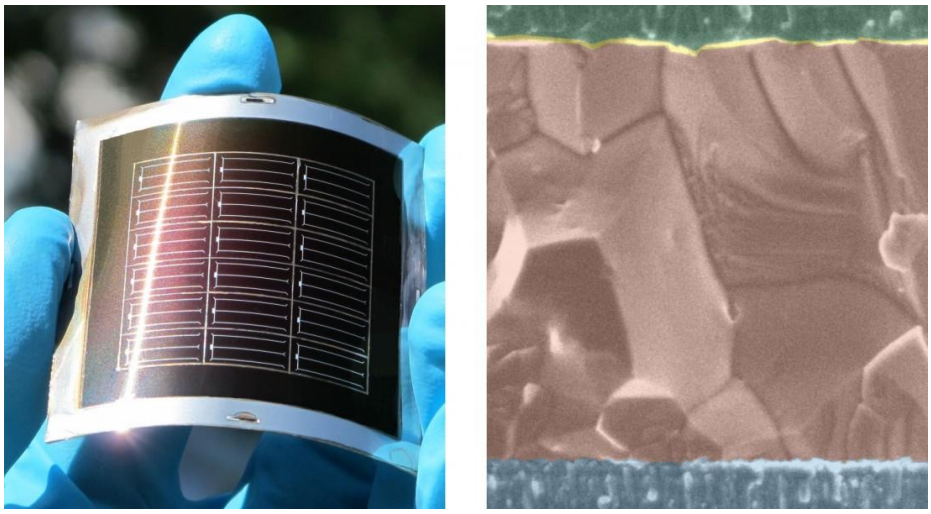


Figura 55: Célula solar de telureto de cádmio (CdTe) depositada sobre um lamina flexível de metal (esq.). Microscopia eletrônica de varredura (SEM) mostrando o contato superior de metal (no topo da imagem), seguida da camada de CdTe, no centro, e do contato traseiro de metal, embaixo (dir.).
Fonte: K. L. Gretener, et al., Doping of polycrystalline CdTe for high-efficiency solar cells on flexible metal foil. Nature communication, 4 PMID: 23942035 (2013).

O telureto de cádmio pode ser depositado por várias técnicas. A Figura 56 mostra um diagrama esquemático de 8 métodos diferentes.

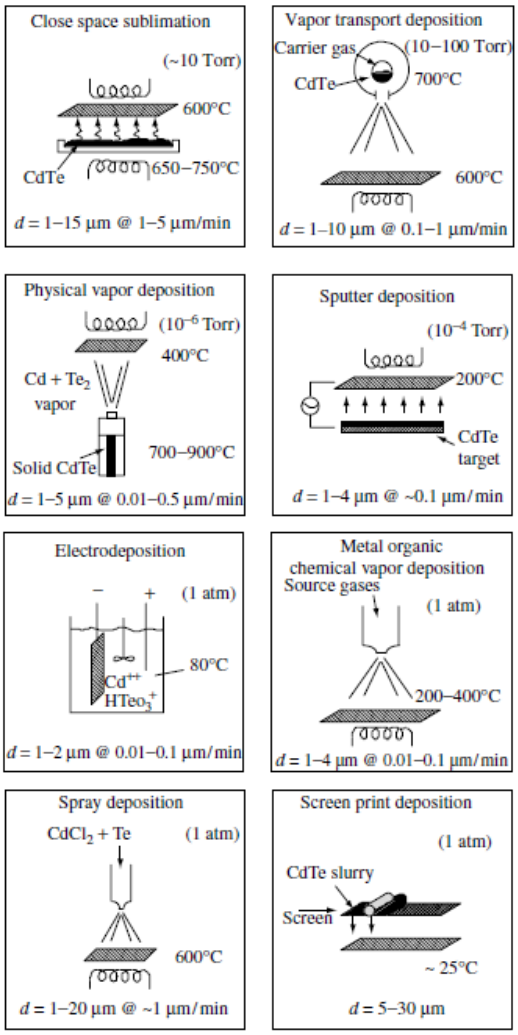
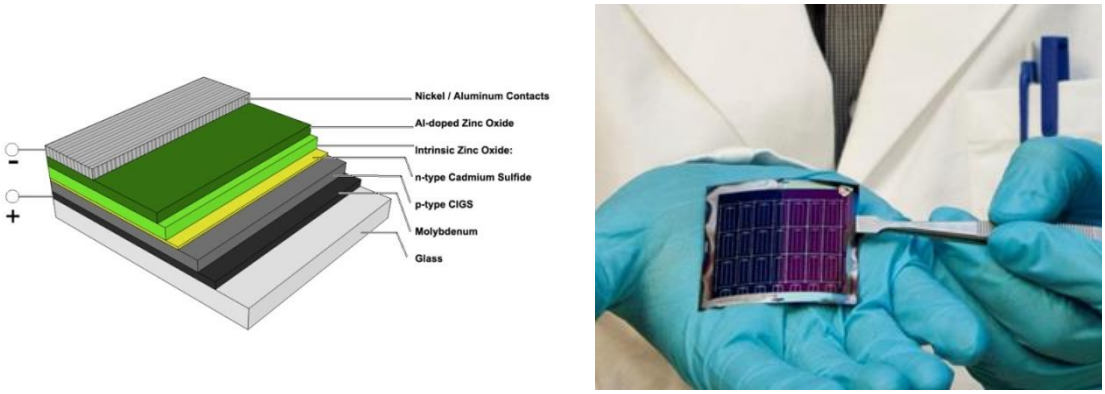


Figura 56: Diagrama esquemático de oito métodos diferentes para deposição de telureto de cádmio utilizado em células solares. O substrato está representado pelos retângulos hachurados. A espessura e a taxa de crescimento estão representadas em cada figura.
Fonte: Brian E. McCandless and James R. Sites, Cadmium Telluride Solar Cells, Cap. 14, Handbook of Photovoltaic Science and Engineering. Edited by A. Luque and S. Hegedus, 2003 John wiley & Sons, Ltd ISBN: 0-471-49196-9.
http://www.kepu.dicp.ac.cn/photo/07sl02/Handbook%20of%20Photovoltaic%20Science%20and%20Engineering/14.%20Cadmium%20Telluride%20Solar%20Cells.pdf

4.3 Células CIGS

As células CIGS (cobre-índio-gálio-selênio) (Figura 57), podem atingir eficiências de até 20% (Figura 22). Estas células funcionam de forma semelhante às células de silício, mas formado com uma heterojunção com o sulfeto de cádmio (CdS). O CIGS é altamente absorvedor fazendo com que as células solares possam ser muito finas, reduzindo o uso de material, como o índio (In), que é um metal escasso.



(a) (b)

Figura 57: (a) Estrutura representativa de uma célula solar CIGS; (b) Célula solare CIGS em substrato flexível de poliamida.
Fonte: (a) ***http://www.residentialsolar101.org/thin-film-solar-technology/****; (b)* ***http://dailyfusion.net/2013/11/new-technique-for-cost-efficient-thin-film-solar-cell-production-developed-24458/***

Células CIGS são preparadas por diferentes técnicas. Sputtering de um alvo contendo o cobre, índio e gálio são depositados em baixas temperaturas e recozidos em atmosfera de selênio. Eletrodeposição também é uma técnica muito usada ou impressão com tinta (Figura 58), contendo nanopartículas, entre outras.

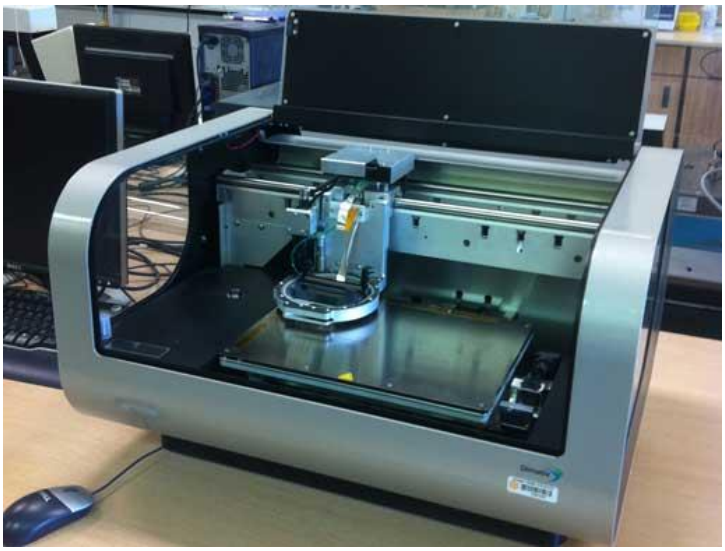


Figura 58: Impressora inkjet sendo utilizada para fabricar células solares de CIGS na Oregon State University.
Fonte: ***http://www.pbs.org/wnet/need-to-know/environment/inkjet-printing-solar-panels-cheap-and-almost-green/10348/***

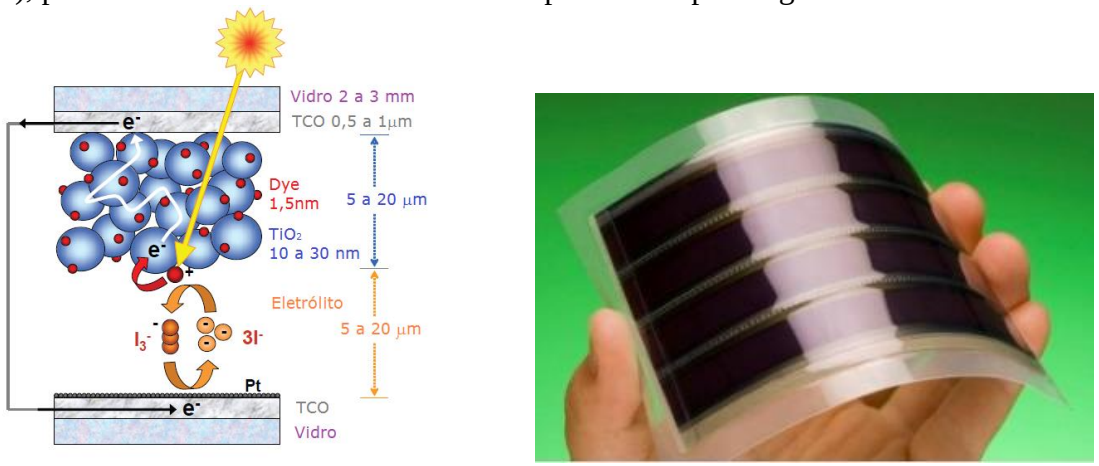
5 CÉLULAS SOLARES DE TERCEIRA GERAÇÃO

Novos tipos de células solares têm sido propostos nos últimos anos e são chamados células de terceira geração. Os mais comuns são as células de corante (dye-sensitized, ou Grätzel), as de materiais orgânicos (células orgânicas) e as de multijunções (*tandem*). Os outros tipos de células ou ainda não foram fabricadas com eficiência altas ou sequer tem sido demonstrado sua viabilidade experimentalmente.

5.1 Células de corante (Grätzel)

As células Grätzel (Figura 59) usam um princípio completamente diferente dos outros tipos de células de primeira e segunda geração. Nela os fótons são absorvidos por moléculas, os corantes, que têm absorção na faixa da luz característica destas moléculas. Assim, a eficiência destas células depende muito do tipo de corante utilizado. As moléculas de corantes ficam adsorvidas na superfície de nanopartículas não absorvedoras e condutoras, como o dióxido de titânio, TiO_2. A grande vantagem destas células é que elas podem ser facilmente fabricadas sem o uso de material altamente puro, como as células de primeira geração, ou sem uso de equipamentos de vácuo como a maioria das células de segunda geração. Veja uma descrição mais detalhas destas células nas referências [10] e [11].

Os elétrons excitados nas moléculas do corante são transferidos para uma estrutura formada por nanopartículas de óxido de titânio (TiO_2), que chegam ao contato frontal formado por um óxido transparente condutor (TCO, *Transparent Conductive Oxide*), geralmente o dióxido de estanho dopado com flúor (FTO) ou o óxido de índio estanho (ITO). A estrutura está imersa em uma solução com iodo (eletrólito), que conduz os elétrons do eletrodo traseiro, que é geralmente formado por nanopartículas de platina (Pt), para as moléculas de corante como é representado pela Figura 59a.



(a) (b)

Figura 59: (a) Diagrama esquemático de uma célula solar de corante; (b) Célula solar Grätzel. Fonte: (a) adaptado por N. Coutinho de J. Halme, P. Vahermaa, K. Miettunen and P. Lund. Device Physics of Dye Solar Cells. Adv. Mater, 2010, 22, E210-E234. (b) ***http://m.qualenergia.it/content/dye-sensitized-solar-cells-rival-conventional-cell-efficiency***

O TiO_2 não é tóxico e é principalmente utilizado como pigmento branco para dar opacidade a tintas, cosméticos, plásticos e papel e também pode ser encontrado em protetores solares devido à sua capacidade de absorver a radiação ultravioleta.

O TiO_2 utilizado em células Grätzel é preparado em forma de pasta de nanopartículas e é depositado por silkscreen. Em laboratório é comum o uso da técnica chamada de "Doctor Blade", que consiste em espalhar a pasta utilizando um bastonete, geralmente de vidro, rolando sobre a superfície de uma lâmina de vidro com uma camada de um óxido transparente condutor.

Existem centenas de corantes que foram ou estão sendo utilizados em células de corante. Atualmente, os que fornecem os melhores resultados envolvem a inserção de rutênio na estrutura da molécula do corante, como os corantes N3, N719 e o Z907, entre vários outros. A eficiência máxima atingida (Figura 22), está em torno de 12 % e continua aumentando.

5.2 Células solares poliméricas e orgânicas

As células solares poliméricas utilizam polímeros, entre eles materiais orgânicos, como materiais eletricamente ativos. A estrutura destas células é semelhante à de células solares de filmes finos de segunda geração. São fabricadas em baixas temperaturas, em substratos flexíveis, utilizando processos livres de sistemas de vácuo, entre outras vantagens sobre as células solares convencionais de primeira geração. A Figura 22 mostra que a eficiência máxima atingida é de 7%, mas este valor já ultrapassou 10% recentemente.

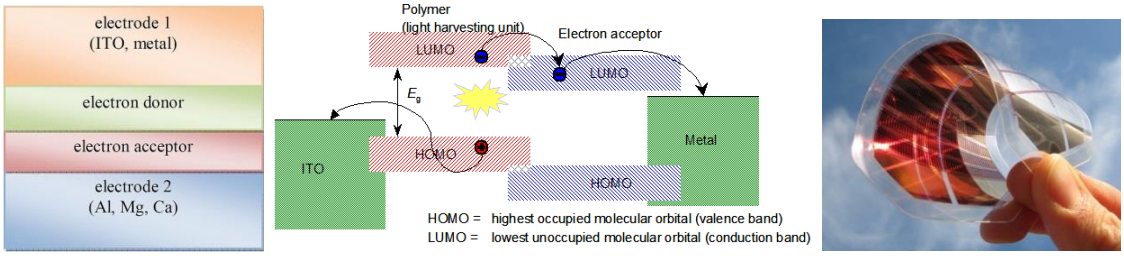
Numa estrutura simples, um semicondutor polimérico, que absorve a luz e atua como doador de elétrons, é depositado sobre outro semicondutor polimérico, que atua como aceitador de elétrons. O conjunto é colocado entre dois eletrodos, um óxido condutor transparente, como o óxido índio estanho (ITO), e o outro com um metal, como o alumínio (Al), Figura 60a. Esta estrutura é às vezes chamada de heterojunção planar doador-aceitador. Os fótons absorvidos pelo material doador (Figura 60b) excitam os elétrons para o nível eletrônico LUMO (*Lowest Unoccupied Molecular Orbital*) deixando um buraco no nível eletrônico HOMO (*Highest Occupied Molecular Orbital*). Os níveis eletrônicos de moléculas HOMO e LUMO fazem um papel similar aos das bandas de valência e condução, respectivamente, de semicondutores convencionais, como o silício e germânio. Após serem excitados, os pares elétrons-buracos (éxcitons) são separados pelo campo elétrico formado pela heterojunção. Os elétrons se deslocam para o nível HOMO da camada do material aceitador, e finalmente para o eletrodo metálico, enquanto os buracos se deslocam para o óxido condutor transparente, por onde entra a luz.

Estas células têm um grande problema que é a pouca estabilidade do material utilizado, as baixas eficiências obtidas e baixa resistência mecânica. Vários estudos têm sido realizados para aumentar sua eficiência e estabilidade com relativo sucesso. Algumas destas técnicas utilizam nanoestruturas com fulerenos funcionalizados. Engenharia molecular tem sido usada, por exemplo, para alterar a banda proibida destes materiais e aumentar sua estabilidade.

Várias estruturas de células têm sido investigadas utilizando diferentes materiais aceitadores e doadores e diferente eletrodos. Os polímeros mais comuns são: P3HT, PEDOT:PSS, C_{60}. O PEDOT:PSS usado na célula solar da Figura 60c é utilizado como material transparente e condutor e não como absorvedor.

O coeficiente de absorção das moléculas utilizadas nestes polímeros é elevado, permitindo que pouco material seja utilizado para absorver toda a luz incidente. Por outro lado o comprimento de difusão dos éxcitons é pequeno, bem menor do que as espessuras necessárias para absorver toda a luz. Isto cria dificuldades, reduzindo a

corrente das células solares. Este é um dos maiores problemas de se resolver nas células solares orgânicas.



(a) (b) (c)

Figura 60: (a) Diagrama esquemático de uma célula solar polimérica de heterojunção, (b) diagrama de banda equivalente e (c) célula solar utilizando PEDOT:PSS.
Fonte: (a) ***http://en.wikipedia.org/wiki/Organic_solar_cell*** *(b)* ***http://www.chemphys.lu.se/research/projects/teratransport/****, (c)* ***http://aaronbrownsdon.wordpress.com/2013/02/12/organic-dye-sensitive-solar-cells/***

Geralmente os materiais orgânicos são depositados por *spin coating*. Mas técnicas como evaporação térmica em vácuo e deposição por fase de vapor (OVPD) (Figura 61) e impressão com tinta estão sendo utilizados cada vez mais.

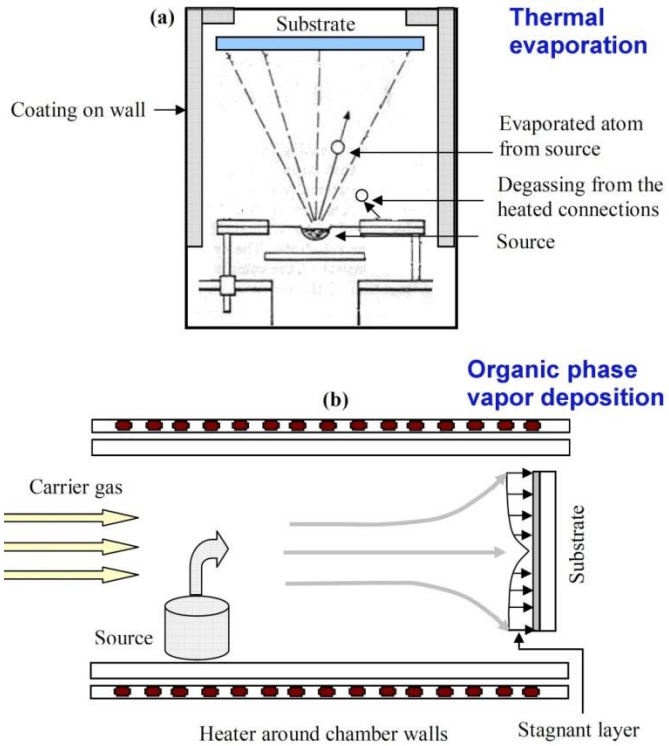


Figura 61: (a) evaporação térmica em vácuo e (b) deposição por fase de vapor (OVPD), para preparação de células solares orgânicas.
Fonte: ***http://en.wikipedia.org/wiki/Organic_solar_cell****.*

5.3 Células de multijunção

Outra maneira de se aproveitar melhor o espectro solar é utilizar células com várias junções, onde cada célula é constituída por um semicondutor com banda proibida diferente, de forma a aproveitar melhor o espectro solar. A Figura 62 ilustra a estrutura

de uma célula com 3 junções. A Figura 62b mostra as regiões do espectro solar onde cada célula atua. A eficiência máxima atingida com estas estruturas já chegou a 45% (Fig. 22).

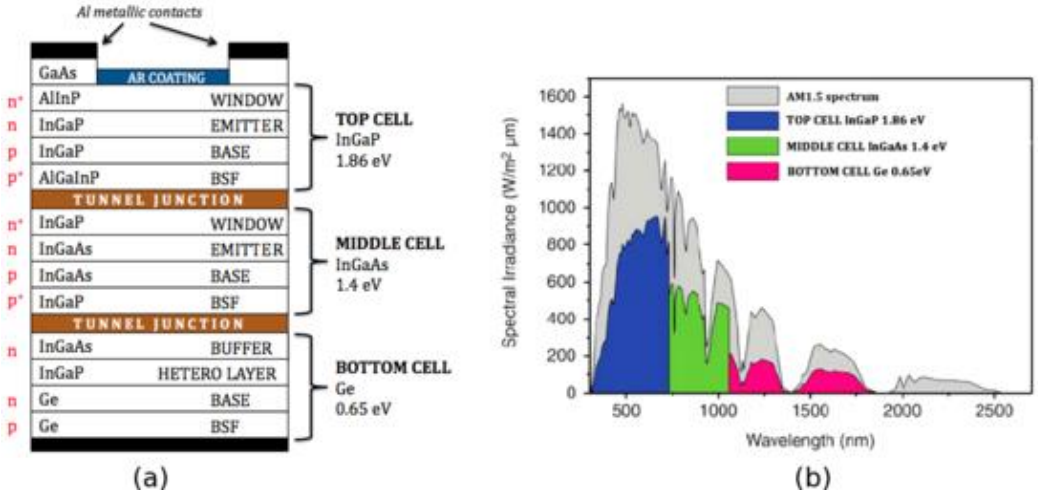


Figura 62: (a) Diagrama esquemático de uma célula solar de 3 junções e (b) região do espectro solar onde cada célula atua.
Fonte: ***http://en.wikipedia.org/wiki/Multijunction_photovoltaic_cell***

5.4 Células inorgânicas, plasmônicas, geradoras de múltiplos éxcitons e outras estruturas

A máxima eficiência possível para conversão da radiação solar em energia elétrica utilizando células solares de junção p-n de silício foi estimada em 31% por Schockley e Queisser [1]. Várias tentativas em exceder este limite têm sido propostas e estão sob intensa investigação. Nesta abordagem incluem-se células *tandem* (multijunções, ver seção 5.3), células solares por transporte quente, células solares que produzem múltiplos pares elétrons-buracos por fótons, células solares de multibandas e impurezas e células termofotovoltaicas e termofotônicas. Teoricamente, algumas destas estruturas poderiam fornecer eficiências superiores a 70%.

O uso de nanoestruturas em células solares tem atraído muita atenção devido ao seu potencial na obtenção dos fenômenos mencionados acima, podendo fornecer células solares de alta eficiência de conversão. Por exemplo, a banda proibida de nanocristais semicondutores pode ser alterada utilizando efeitos quânticos (conhecido como confinamento quântico). Assim, a banda proibida pode então ser ajustada para a região de energia efetiva para intensidade de absorção máxima do espectro de radiação solar, potencializando seu uso em células de multijunções. Vários materiais têm sido investigados como CdSe, CdS, InP e InAs. Em geral, nanopartículas de pequenas dimensões, conhecidas como pontos quânticos (*quantum dots*), oferecem várias vantagens por proporcionar a capacidade de melhor corresponder ao espectro solar porque a absorção do espectro pode ser sintonizada com o tamanho das partículas.

Outra situação tem sido observada em pontos quânticos que produzem múltiplos pares elétron-buraco por fóton absorvido, que em princípio permitiria um aumento significativo na eficiência de células solares. A técnica mais comum para a fabricação de nanomateriais tem sido por processos coloidais, implantação iônica, epitaxia por feixe molecular (MBE), Magnetron sputtering e Ablação a Laser Pulsado (PLD). Outro processo para criação de pontos quânticos é a obtenção de nanocristais embebidos em

matrizes de óxidos, cuja técnica consiste na precipitação dos nanocristais (Si ou Ge, por exemplo) em matrizes de óxidos (SiO_2 e GeO_2).

5.4.1 Células inorgânicas

Células inorgânicas têm sido largamente investigadas ultimamente. Geralmente são obtidas através do uso de nanopartículas preparadas quimicamente e se assemelham às células de filmes finos de segunda geração, com a diferença básica de serem preparadas com nanopartículas. Entre estes, tem sido usado o CdTe, que também possui similares preparados por outras técnicas.

5.4.2 Células plasmônicas

Estruturas plasmônicas podem ser utilizadas em qualquer tipo de células, não constituindo um tipo especial de célula solar. É constituído de nanopartículas depositadas sobre a superfície de células solares que têm o objetivo de aumentar a absorção de fótons na região do infravermelho (acima de 700 nm) do espectro da radiação solar utilizando o efeito plasmônico.

5.4.3 Células com geradores de múltiplos éxcitons

Um dos problemas das células solares de primeira e segunda geração é que a energia dos fótons que excedem a banda proibida do semicondutor ativo é perdida na forma de calor. Este problema pode ser reduzido se fótons com energia acima da banda proibida puderem gerar dois ou três pares elétron-buracos (éxcitons). Este é o princípio das células geradoras de múltiplos éxcitons, cuja viabilidade experimental foi recentemente demonstrada.

5.4.4 Outras estruturas

Além das estruturas mencionadas acima, existem outras estruturas como as células solares por transporte quente (*hot carrier*) que usa o princípio de se aproveitar a energia dos elétrons excitados para níveis eletrônicos mais elevados antes de eles retornarem para os níveis mais baixos da banda de condução (termalização), e as células solares de bandas múltiplas, que usam níveis eletrônicos dentro do gap, gerados por impurezas, para funcionarem com etapas de absorção de fótons de energia menores que a banda proibida. Entretanto, com exceção das células de múltipla geração de éxcitons, nenhuma destas estruturas foi provada experimentalmente, sendo objeto de estudo utilizando nanoestruturas que possam promover o efeito esperado.

6 MÓDULOS FOTOVOLTAICOS

Atualmente, a montagem de módulos (ou painéis) fotovoltaicos é uma combinação de trabalho automatizado e manual, com automatização crescente. A seguir seguem alguns vídeos interessantes disponibilizados na internet de diferentes plantas industriais[2]:

- **http://www.youtube.com/watch?v=ihEIaYsB4yg**
- **http://www.youtube.com/watch?v=h6TWjSfPvEI**
- **http://www.youtube.com/watch?v=fZ1SC-vUe_I** (também contém processos de fabricação da célula solar)

Para a fabricação dos módulos solares, primeiramente as células são cortadas para a dimensão apropriada. No caso de células de silício cristalino em lâminas circulares, é comum se cortar um pouco as bordas deixando uma forma mais próxima de um quadrado para cobrir melhor o painel (ver a célula na Figura 50b e como ela fica montada no módulo na Figura 68a).

As células solares são então conectadas em série e/ou paralelo. A associação em série é utilizada para se atingir a tensão desejada do painel, uma vez que cada célula fornece apenas uma tensão tipicamente inferior a 1 volt (tipicamente 0,5V no caso de células de silício cristalino). Um painel geralmente é fabricado para se obter uma tensão em torno de 12 V (típico de baterias convencionais) quando exposto à radiação AM1. A associação em paralelo é utilizada para aumentar a corrente fornecida pelo painel. Assim, uma associação em série e paralelo aumenta a potência final. Os fios utilizados para a conexão são feitos com metal altamente condutor como cobre, prata ou outro metal não magnético.

A soldagem das células para montar um painel pode ser feita de diferentes maneiras. Uma maneira convencional é usar um procedimento do tipo ferro de soldar sobre uma fita estanhada. Outro procedimento (Figura 63) utiliza radiação infravermelha ou ultrassom.

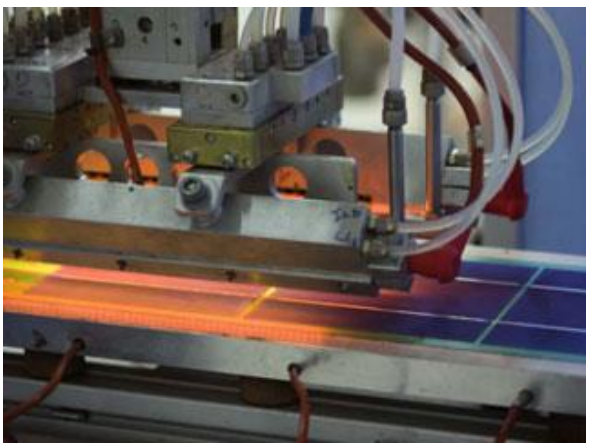


Figura 63: Soldagem de células solares com radiação infravermelha e uso de contato com índio e prata.
*Fonte: **http://www.torrisolare.it/it/it/owners/parts/manufactoringprocess.html***

[2] Não há qualquer tipo de vínculo pessoal, profissional ou de interesse comercial com empresa ou pessoas relacionadas a esses vídeos ou de qualquer outro tipo que não meramente para fim didático. Acessados em fevereiro de 2014.

Após a soldagem das células solares, elas são encapsuladas na foram de um painel utilizando uma estrutura de proteção, como mostrado na Figura 64.

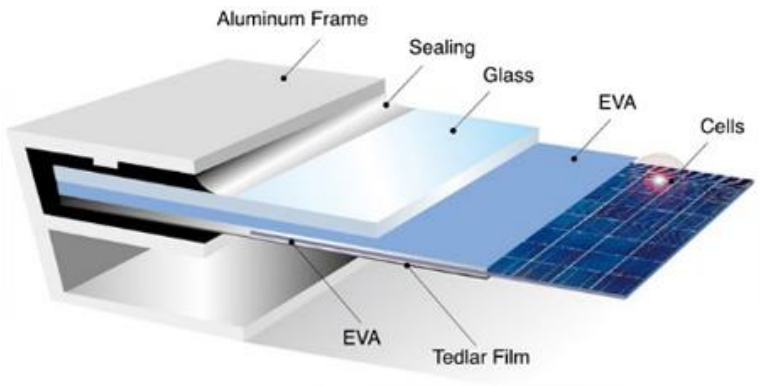


Figura 64: Estrutura de um painel fotovoltaico.
Fonte: ***http://www.china-aluminum.com/products/aluminum_solar_frame.htm***

Primeiramente, as células são revestidas com um material polimérico, EVA (*Ethylene Vinyl Acetate*) (Figura 65), que funciona como um termoplástico, adesivo com calor, transparente, flexível, elástico, à prova de água, resistente à radiação UV, utilizado para colar o conjunto de células com o vidro, para a face frontal, e com a base do módulo, usando Tadler, que é um material leve feito de polímero (PVF-*Polyvinyl fluoride*). O EVA também ajuda e isolar as células do meio ambiente, garantindo uma maior durabilidade do sistema, pois evita a degradação dos contatos elétricos tanto das células quanto das conexões realizadas entre as células na construção do módulo. O Tadler (filme de fluoreto de polivinil) é um material isolante, inerte, que suporta altas temperaturas e serve de acabamento para a base do painel de células solares. Este procedimento é realizado por uma laminadora (Figura 66).

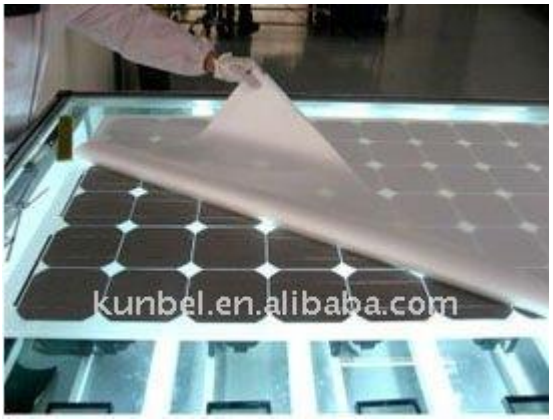


Figura 65: Colocação do EVA sobre as células conectadas.
Fonte: ***http://kunbel.en.alibaba.com/product/517798239-212242877/Solar_EVA_film_for_laminating_cells.html***

Figura 66: Laminadora de painéis solares automatizada.
Fonte: ***http://www.hawkestechnical.com/solar-module.asp***

Após a colagem das células com EVA no vido e na base de Tadler, o conjunto é preso a uma moldura de alumínio e selada com silicone para evitar que a umidade entre no sistema (Figura 67).

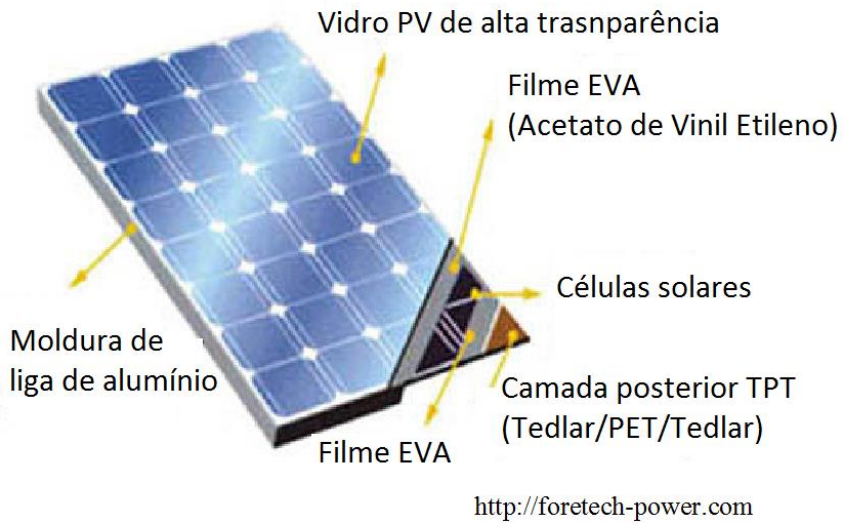


Figura 67: Componentes principais de um painel solar.
Fonte: Adaptado de: ***http://foretech-power.com/html_info/FAQ.html***

O vidro utilizado nos módulos solares é caracterizado por serem altamente transparentes na região do espectro solar, livre de ferro em sua composição para evitar aquecimento, baixa reflexão e resistente a impactos. Toda a associação em série e em paralelo termina com dois terminais que serão utilizados para a conexão com outros painéis. Usa-se um diodo para evitar perda de potência quando se liga com baterias ou para reduzir os efeitos de sombreamento de painéis.

Existem vários fabricantes de painéis solares. Entre os maiores fabricantes do mundo podemos citar: Suntech, First Solar, Sharp Solar, Canadian Solar, SunPower. No Brasil, apenas a Tecnometal fabrica painéis. A Figura 68 mostra alguns painéis solares de diferentes formatos e diferentes materiais semicondutores.

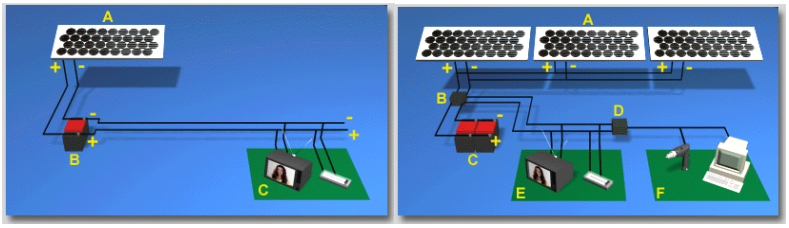
(a) (b) (c)

Figura 68: (a) Painel de silício; (b) Painel solar de silício amorfo; (c) Painel solar de CIGS. Fonte: (a) ***http://pcelectricalandsolar.co.uk/solar-panels/commercial-solar-panels/*** *(b)* ***https://www.solarmarket.com.au/buying-tips/choosing-the-right-system/solar-panel-technologies/*** *(c)* ***http://www.solarpowerworldonline.com/2012/05/ionomer-encapsulant-reduces-cost-increases-strength-cigs-modules/***

7 SISTEMAS FOTOVOLTAICOS

Os módulos fotovoltaicos são limitados em termos de potência quando necessitamos alimentar equipamentos mais pesados como geladeira, TV, ar condicionado etc. Assim, é necessário montarmos sistemas com vários módulos para atender necessidades específicas, ou mesmo a construção de uma usina de energia solar.

Os painéis fotovoltaicos são modulares, ou seja, podemos simplesmente associá-los em série e paralelo para se atingir a tensão e correntes desejadas, como ilustra a Figura 69. Suas aplicações em sistemas isolados é uma das mais típicas, pois podem funcionar sem a necessidade de se providenciar combustível, como nos motores a óleo diesel.



(a) (b)

Figura 69: Característica modular dos painéis fotovoltaicos isolados utilizando baterias. Em (a) um único painel solar e em (b) três painéis são colocados em série para alimentar mais equipamentos
Fonte: não disponível.

A modularidade dos painéis fotovoltaicos é uma de suas grandes características, permitindo a instalação de sistemas de qualquer potência, podendo ser ampliada facilmente para qualquer outra potência desejada simplesmente adicionando-se mais painéis solares. Esta é uma grande vantagem comparada com outras tecnologias, como hidrelétricas, termelétrica, usina nuclear que não têm a flexibilidade dos sistemas fotovoltaicos.

Cada dia mais sistemas fotovoltaicos estão sendo conectados à rede. A Figura 70 mostra um conjunto de painéis ligados em série e conectados à rede. Neste caso, como a tensão fornecida pelo sistema é contínua, utilizam-se inversores para gerar corrente alternada (50 Hz ou 60 Hz, dependendo do local), e com a tensão desejada, que pode ser 127, 220 ou maiores. Veja a referência 8 e 9 para mais detalhes.

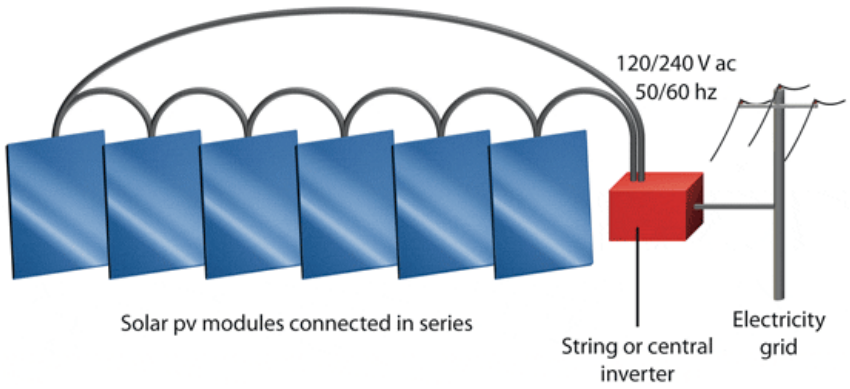


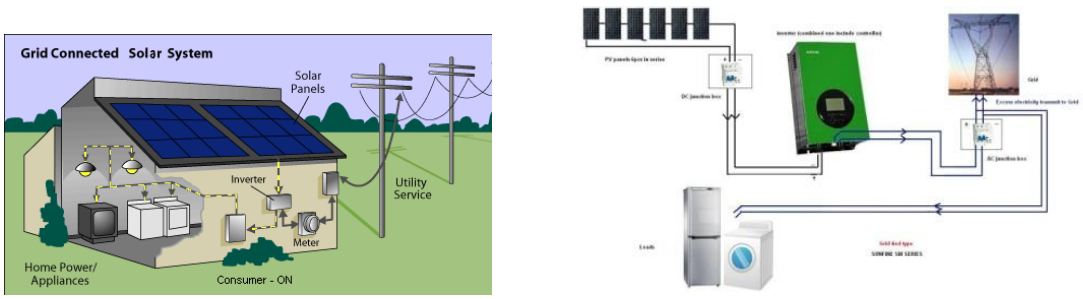
Figura 70: Vários painéis podem ser colocados em série, e conectados à rede elétrica convencional através do uso de inversores.
*Fonte: **http://www.enecsys.com/products/micro-inverter-technology/***

Existem muitos modelos de inversores e projetados para diferentes potências. A Figura 71 mostra dois exemplos de inversores, um pequeno inversor doméstico e um de grande porte para centrais fotovoltaicas.

(a) (b)

Figura 71: (a) pequeno inversor utilizando em pequenas instalações; (b) Grande inversor utilizados em usinas fotovoltaicas
Fonte: (a) ***http://www.rowetel.com/blog/?p=58*** *(b)* ***http://www.greenbang.com/siemens-boosts-efficiency-of-pv-solar-inverters_9647.html***

Com o uso de inversores, podemos colocar painéis solares em residências (Figura 72) cuja energia é utilizada para alimentar os utensílios domésticos da residência e o excedente é transferido para a rede de energia elétrica. Durante a noite a residência utiliza energia da rede e durante o dia supre a rede com a energia excedente. A Figura 72b mostra como é feita a ligação dos painéis com o inversor e a rede.



(a) (b)

Figura 72: (a) Ilustração de uma montagem de um sistema fotovoltaico em residência e integrado à rede elétrica convencional; (b) Montagem do inversor com os painéis solares, a rede e os eletrônicos da residência.
Fonte: (a) ***http://www.tepsmarttech.com/turnkey-projects/solar-power-system.html****; (b)* ***http://image.made-in-china.com/2f0j00ivBQTGCnCmkY/Solar-System-PV-Inverter.jpg***

8 REFERÊNCIAS

1. W. Shockley, H.J. Queisser, ***Detailed Balance Limit of Efficiency of p-n Junction Solar Cells***J. Appl. Phys. 32 (1961) 510.
2. M.A. Green, Solar Cells, Operating Principles, Technology, and System Applications, Prentice-Hall series in solid state physical electronics.
3. M.A. Green, High Efficiency Silicon Solar Cells, Editora: **Springer Series in Optical Sciences**, (2009)
4. M. A. Green, Third Generation Photovoltaics, Springer Berlin Heidelberg, 2005,
5. M. H. Brodsky (ed.). Amorphous semiconductors, Topics in Applied Physics Vol. 36. Editora: Springer-Verlag Berlin, Heidelberg, New York 1979.
6. T. P. Benito, Prática de Energia Solar Fotovoltaica, Editora: Publindústria, ISBN: 9789728953423, 2010**.**
7. A. S. Pereira, Laboratório de Energia Solar Fotovoltaica, Editora: Publindústria , 2011, ISBN: 9789728953775,
8. F. Pereira, Guia de Manutenção de Instalações Fotovoltaicas, Editora:Publindústria**,** 2012, ISBN: 9789897230189 ,
9. M.A.B. Galhardo, R. Zilles, S.H.F. Oliveira e W.N. Macêdo, Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede Elétrica, Editora: Oficina de Textos, ISBN: 9788579750526, 2012.
10. Anders Hagfeldt, Gerrit Boschloo, Licheng Sun, Lars Kloo, and Henrik Pettersson, Dye-Sensitized Solar Cells, *Chem. Rev.* 2010, *110,* 6595–6663.
11. J.S. Agnaldo, J.B.V. Bastos, J.C. Cressoni e G.M. Viswanathan, Células solares de TiO_2 sensibilizado por corante, Revista Brasileira de Ensino de Física, V. 28, N. 1, p. 77-84, (2006). **http://www.sbfisica.org.br/rbef/pdf/v28_77.pdf**

O 4° InovaFV é promovido e organizado por:

UNICAMP
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA

international energy initiative

Este minicurso contou com o patrocíno de:

International Copper Association Brazil
Copper Alliance

cpfl serviços
Uma empresa do Grupo CPFL Energia

viridis.iq
consulting · materials · excellence

knbs
Knowledge Networks & Business Solutions