

## PANORAMA DO DESENVOLVIMENTO TECNOLÓGICO E MERCADO DE MÓDULOS FOTVOLTAICOS

**Elielza Moura de Souza Barbosa, Olga Castro Vilela, Naum Fraidenraich e Chigueru Tiba**  
Universidade Federal de Pernambuco, Departamento de Energia Nuclear.  
Av Prof. Luiz Freire, 1000- CDU Recife PE Brasil CEP 50.740.540  
elimsb@hotmail.com.br

*Recibido: 16/08/12; Aceptado: 05/10/12*

**RESUMEN.** En los últimos años, Brasil está presentando iniciativas que permiten hacer predicciones de una nueva etapa para las fuentes de energía renovables. La tecnología solar fotovoltaica, en particular, que no está todavía presente en la matriz energética brasileña aparece ahora con una posibilidad real para componerla. Las privilegiadas condiciones del recurso solar en casi todo el territorio - más intensamente en la región nordeste, sumada a programas de incentivos y la calificación profesional pueden dar a esta tecnología un papel importante en la generación de energía eléctrica en el país. Con el objetivo de proporcionar información que puede ser utilizada en la selección del tipo adecuado de tecnología fotovoltaica o incluso informar sobre el estado de la arte de los dispositivos fotovoltaicos, este trabajo presenta aspectos relevantes que están disponibles en la literatura, pero dispersos en varios documentos. El compendio de informaciones y referencias agrupadas en este documento incluye, entre otros, la evolución del mercado, principales fabricantes, módulos más eficientes, y las áreas de ocupación en función del tipo de la tecnología fotovoltaica.

**Palabras-clave:** Energía renovable, Sistemas Fotovoltaicos, Producción, Tecnología e Eficiencia de Fotovoltaicos

### INTRODUÇÃO

No Brasil, historicamente, a oferta interna de energia elétrica vem sendo de fontes renováveis (79%). As renováveis biomassa e hidráulica são as grandes responsáveis respondendo por cerca de 75 % da eletricidade no país. Ademais, uma série de ações de incentivo governamentais e estratégias políticas vêm sendo implantadas visando fortalecer a participação da biomassa, de pequenas centrais hidráulicas e da eólica e incluir a geração solar na matriz energética brasileira como foi, por exemplo, o PROINFRA<sup>1</sup> e os leilões de energia específicos, prioritariamente posicionando a geração eólica que atingiu 928 MW no final de 2011, um crescimento de cerca de 54% em relação ao ano anterior, (BEN. 2011).

Particularmente, para a geração solar fotovoltaica duas ações atuais se destacam. O lançamento pela Agência Nacional de Energia Elétrica da Chamada de Projeto Estratégico de P&D 013/2011 e Resolução Normativa N<sup>o</sup> 482/2012, (ANEEL, 2011; 2012).

A Chamada P&D 013/2011 objetiva incluir a geração solar fotovoltaica na matriz energética brasileira, estimular a redução de custos de geração e incentivar o desenvolvimento no país de toda a cadeia produtiva da indústria solar fotovoltaica, com a nacionalização da tecnologia empregada. Os projetos contemplados devem prever a instalação de usinas fotovoltaicas conectadas à rede de distribuição de energia elétrica, com capacidade entre 0,5 MWp e 3,0 MWp além de estudos de avaliação tanto do recurso solar quanto das características operacionais e econômicas das plantas. Dentro dessa filosofia, 95 propostas foram encaminhadas à ANEEL, um quantitativo surpreendente e que expressa certo estado de desenvolvimento e perspectivas de negócios. Como resultado final do processo 18 projetos foram contemplados correspondendo a cerca de 25 MWp de fotovoltaicos, envolvendo em torno de 400 milhões de reais, (ANEEL, 2011; Revista Energia, 2011; CEMIG, 2012)

A Resolução Normativa N<sup>o</sup> 482, aprovada em abril de 2012, estabelece as condições gerais para o acesso de microgeração e minigeração distribuída aos sistemas de distribuição de energia elétrica, o sistema de compensação de energia elétrica, e dá outras providências. Aprova a geração distribuída de pequeno porte, que incluem a microgeração, com até 100 KW de potência, e a minigeração, de 100 KW a 1 MW. Homologa o Sistema de Compensação de Energia, que permite ao consumidor instalar pequenos geradores em sua unidade consumidora e trocar energia com a distribuidora local. Possibilidade que pode ser economicamente interessante para os consumidores de áreas de concessão onde a tarifa encontrase em patamares semelhantes aos valores cobrados pela concessionária local. A regra é válida para geradores que utilizem fontes incentivadas de energia (hídrica, solar, biomassa, eólica).

---

<sup>1</sup> PROINFRA: Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica: programa do Governo Federal instituído em 2004 com o objetivo de aumentar a participação da energia elétrica produzida por empreendimentos concebidos com base em fontes eólica, biomassa e pequenas centrais hidrelétricas (PCH) no Sistema Elétrico Interligado Nacional (SIN).

Desde a época do PRODEEM<sup>2</sup>, não se tinha notícias de importantes programas para estimular a redução de custos de geração e incentivar o desenvolvimento no país de toda a cadeia produtiva da indústria solar fotovoltaica, com a nacionalização da tecnologia empregada. Como expressado no *Jornal Energia*, “pode-se afirmar que as alterações para incentivar a expansão da microgeração e, especialmente, da geração solar, são uma evolução. Mas se as mesmas não chegarem a fazer um verão, podem ao menos sinalizar um promissor início de primavera, (*Revista Energia*, 2012).

O mercado mundial fotovoltaico ainda encontra-se suportado por políticas de incentivo, mas, são fortes os indicadores de que a geração FV pode tornar-se economicamente viável em breve. A tecnologia encontra-se em uma fase bastante favorável de sua história com células com eficiência superiores a 30%, módulos mais robustos e confiáveis e a paridade entre tarifas alcançável em vários países nos próximos anos para sistemas residenciais com o emprego de “netmetering” e tarifa diferenciada (EPIA, 2011).

No Brasil as condições privilegiadas do recurso solar somadas a programas adequados de incentivo e capacitação de pessoal poderão fazer com que essa tecnologia desempenhe um papel importante na geração de energia elétrica no país.

Objetivando apresentar subsídios para a elaboração de projetos de geração de eletricidade fotovoltaica apresenta-se um compêndio de informações, disponíveis na literatura de forma dispersa em vários documentos, sobre o estado de arte dessa tecnologia, abordando os dispositivos mais atuais que vem apresentando substancial aumento da eficiência de conversão de energia solar em energia elétrica, o crescimento da produção e vendas, a abertura de mercados no âmbito internacional e o aumento de oportunidades para aplicação da tecnologia.

## PANORAMA MUNDIAL DA ENERGIA SOLAR

A conversão fotovoltaica na sua forma moderna iniciou-se em 1954 quando D.M. Chapin e colaboradores, do Bell Telephone patentaram uma célula solar de Silício com 4,5% de eficiência de conversão (Chapin et al., 1954). Pesquisas focando principalmente a redução da resistência série da célula permitiram um aumento da eficiência, a qual atingiu, em 1959, os 10%. Nessa ocasião, a sua utilização economicamente competitiva apresentava-se direcionada à produção de eletricidade em satélites. Desde então, essa tecnologia experimentou um enorme desenvolvimento e está sendo utilizada atualmente como principal fonte de geração elétrica em aplicações espaciais. As primeiras aplicações terrestres das células fotovoltaicas ocorreram em meados da década de 60, com sistemas isolados, para abastecer cargas distantes da rede convencional de eletricidade, principalmente para finalidades de telecomunicação, sinalização e proteção catódica.

Em 1961, pesquisadores do United States Army Signal Research and Development Laboratory obtiveram a eficiência de 14,5% com uma célula solar fabricada sobre substrato dopado com Fósforo (Mandelkorn et al., 1962). Uma década se passou até que esse valor de rendimento fosse superado. No início da década de 70, uma célula conhecida como “célula violeta” desenvolvida pelos Comsat Laboratories - USA, atingiu 16% (Lindmayer e Allison, 1973). Finalmente, em 1974, foi desenvolvida uma célula com rendimento entre 18 e 19%, chamada de célula negra. Nesse caso, o grande avanço ocorreu devido à drástica redução das perdas por reflexão com a utilização de superfícies frontais texturizadas, e coberturas anti-reflexivas de elevada qualidade. Grande impulso foi dado à utilização terrestre na geração fotovoltaica a partir da crise mundial de energia de 1973 - 1974. No fim da década de 70, a produção de células solares para uso terrestre superou a utilização de células para equipamentos espaciais, sendo que esta diferença tem aumentado gradualmente. Este uso crescente vem sendo acompanhado por inovações que permitem o aumento da eficiência de conversão de energia das fotocélulas, bem como uma significativa redução de seus custos. No início da década de 90, com os avanços adicionais da tecnologia e a significativa redução de custos, além das urgências de ordem ambiental, a conversão fotovoltaica ampliou suas aplicações terrestres e inseriu-se crescentemente no mercado mundial. Estima-se que em fins do século XX o mercado fotovoltaico era de cerca de um bilhão de dólares/ano (Fraidenaich, 2003). Os investimentos no setor cresceram para 33 bilhões de dólares em 2008, apresentando uma redução (27%) em 2009 para 24 bilhões de dólares (Rovere et al. 2011).

A busca contínua por melhorias nas eficiências das células fotovoltaicas resultou em células de Silício com eficiência da ordem de 25% sem concentração (células PERL - passivated emitter, rear locally diffused). As pesquisas em células de multijunção com concentração, constituídas de materiais de diferentes GAPs abriram caminho para eficiências superiores a 30%. Em 2011 uma célula de multijunção desenvolvida pela empresa Solar Junction, da Califórnia, anunciou a fabricação de uma célula fotovoltaica de 43.5% de eficiência de conversão. Esse valor foi confirmado em ensaios de laboratório realizados pelo NREL (National Renewable Energy Laboratory -EUA).

Atualmente, módulos fotovoltaicos aplicando os novos conceitos de células de multijunção de Silício (poli e filme fino) sem concentração, e células formadas de materiais como Arsênio, Gálio, Germânio e outros (com concentração) vêm sendo inseridos no mercado com perspectivas de redução de custos devido às altas eficiências alcançadas. O progresso realizado desde os passos iniciais até o presente tem sido surpreendente. Melhoria substancial da eficiência do processo de conversão

---

<sup>2</sup> PRODEEM: Programa de Desenvolvimento Energético dos Estados e Municípios- programa do Governo Federal instituído em 1994 para atender às localidades isoladas não supridas de energia elétrica pela rede convencional com energia de fontes renováveis locais.

de energia solar em energia elétrica, crescimento da produção e vendas, abertura de mercados no âmbito internacional, aumento de oportunidades para aplicação da tecnologia.

## Mercado Fotovoltaico

### Produção e comercialização

Nos últimos anos o mercado mundial de módulos fotovoltaicos tem experimentado um crescimento muito rápido. Anuários de referencia na área específica acusam a existência de 63,43 (NAVIGANT, 2012) a 67,35 GW (EPIA, 2011) de fotovoltaicos comercializados até 2011. Dados de balanços anuais importantes com diferenças da ordem de 6%, o que pode ser atribuído as diferentes abordagens nos balanços entre a produção planejada e a realizada com as quantidades comercializada e real instalada, em um mercado dinâmico, com grandes desafios e onde a origem da produção situa-se, muitas vezes, em diferentes locais da demanda e da comercialização. O mercado fotovoltaico assim como os demais e mais diversificados mercados estão passando por um momento peculiar, onde informações e dados assumem valores diferentes em curto espaço de tempo. Os dados seguintes têm como fontes os últimos relatórios publicados em 2011 e pode-se constatar que algumas previsões não foram verificadas.

Segundo o *Global market outlook for photovoltaics until 2015*, (EPIA, 2011), as vendas acumuladas desde o período inicial de comercialização até o ano de 2011 totalizam aproximadamente 67,35 GW, representando um crescimento em torno de 70% do volume acumulado total existente em 2010 (39,7 GW), como mostra a Fig.1a e 1b, onde os dados relativos ao volume comercializados são também contabilizados como capacidade instalada. A liderança na capacidade instalada de fotovoltaicos permanece com a Europa, que em 2011 atingiu o total acumulado de cerca de 50 GW, cerca de 64,5% do total mundial. Índice menor do que o apresentado em 2010, em torno de 74%, correspondente a 29,3 GW. No intuito de tornar mais claro as ocorrências se faz necessário uma comparação entre 2010 e 2011. Em 2011, dentro da União Européia, a Itália apresentou o melhor desempenho com 33% (9 GW), totalizando cerca de 12,5 GW de fotovoltaicos instalados. A Alemanha instalou 27% (7,5 GW), acumulando o total de 24,7 GW. O Japão atingiu 1,1 GW (4%) e terminou com 4,7 GW. Os Estados Unidos com 6% (1,6) totalizou 4,3 GW e a China instalou cerca de 2,0 GW (7%), totalizando em torno de 2,9 GW. Cabe ressaltar que a China, apesar de ter entrado mais recentemente no mercado, vem apresentando um desempenho comercial excepcional nos últimos anos, com crescimento médio anual de 185% contra os 81% da União Européia entre os anos de 2007 a 2010. Entre 2010 a 2011 a China mais que triplicou suas instalações fotovoltaicas.

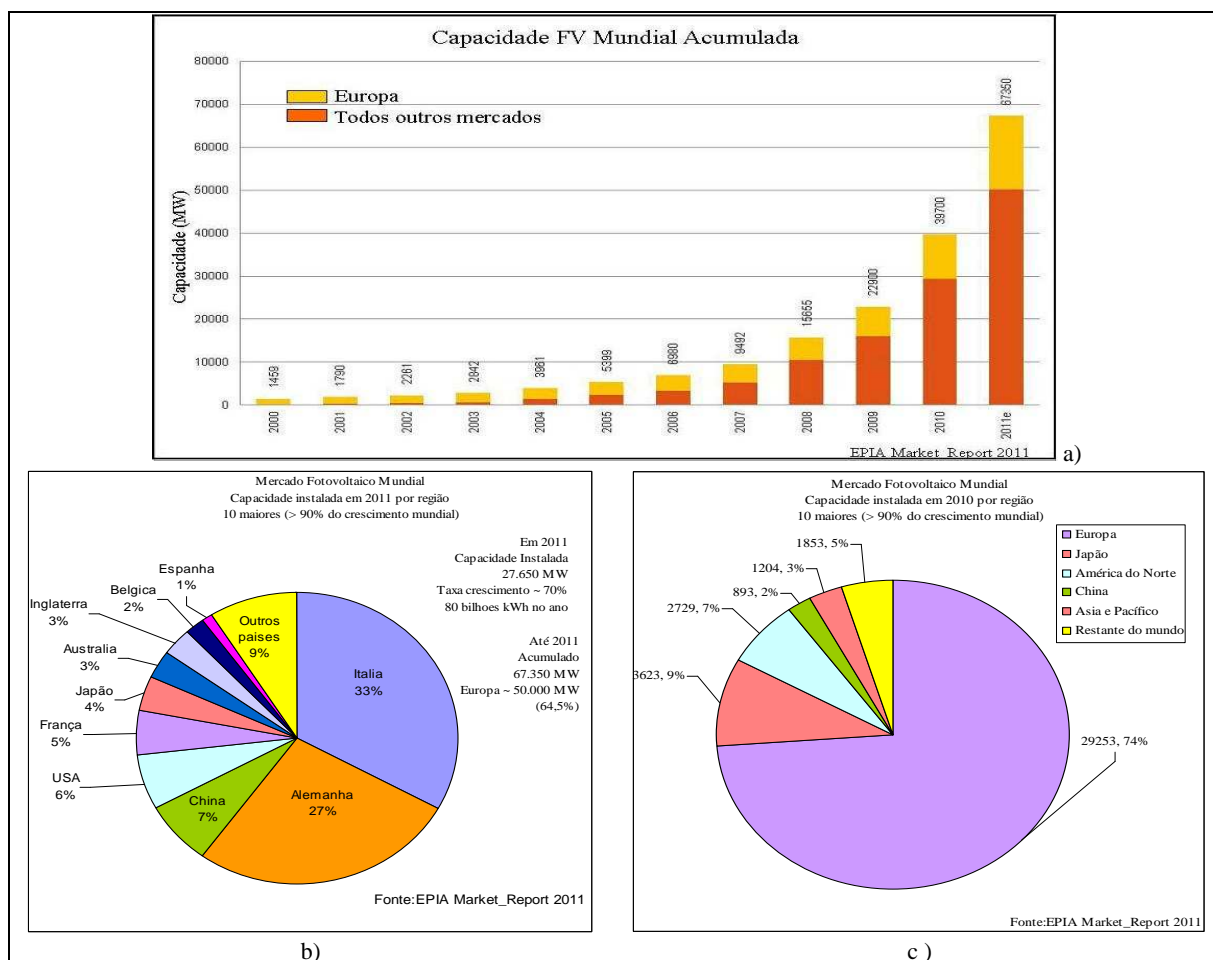


Figura 1- Mercado mundial de módulos fotovoltaicos: a) Capacidade instalada acumulada 2000 –2011. b) Capacidade mundial instalada por região em 2011 e em 2010

Existem outras regiões que estão iniciando sua inserção no mercado FV, como os países árabes, por exemplo, com grande potencial de compra e boas condições para a utilização do recurso solar.

De acordo com Photovoltaic Manufacturer Shipments, Capacity & Competitive Analyses 2011/2012 (Navigant, 2012), que apresenta as mais recentes análises, considerando os valores médios anuais de fotovoltaicos dos últimos 11 anos (2001 a 2011), se faz necessário corrigir alguns índices por no mínimo dois anos. Na Fig. 2 constam alguns resultados dessa análise. Observa-se um crescimento, médio anual, na capacidade produzida mundial de fotovoltaicos em torno de 53,5% e um crescimento na quantidade de fotovoltaicos comercializada (*shipments*) da mesma ordem, em torno 54%.

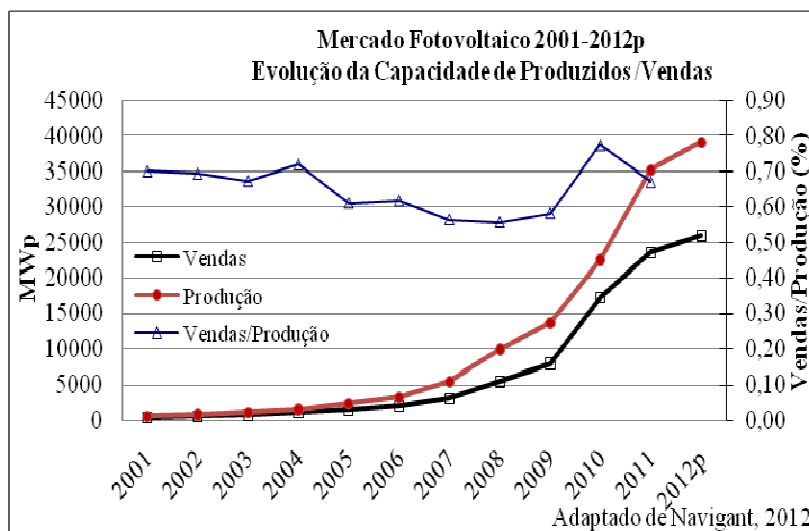


Figura 2- Evolução da capacidade de produzidos e de vendas 2001 –2012parcial.

A partir de 2005 o volume de produzidos não corresponde ao de fotovoltaicos comercializados, que por sua vez habitualmente é considerado como capacidade instalada. O percentual de vendas tem se mantido na faixa de 65 a 70% da capacidade produzida mundial, como pode ser visualizado na Fig.2. Os altos índices resultam do volume de vendas surpreendente nos anos 2008, 2009 e 2010, com crescimento médio de 81%. Cerca de 5.500, 7.900 e 17.400 MWp foram negociados respectivamente. A expansão esperada para 2010/2011 em patamar similar a 2009/2010 (120%) não se verificou e o ano de 2011 fechou com 23,6 GW, significando um crescimento de 35,7%, valor bem mais baixo do que o esperado, mas, ainda bastante alto. Como resultado do acumulado até 2011 se registra o valor de 63,43 GW de fotovoltaicos comercializados. As análises também indicam um parcial nas vendas de 25,9 GW para o corrente ano, 2012p. O referido relatório comenta da necessidade de correção dos índices divulgados anteriormente se considerando nos balanços as diferenças entre as capacidades de produção anunciada e verificada, comercializada e real instalada. e que diante da recessão mundial, a indústria solar vai experimentar ainda mais agitação, mas, poderá surgir mais fortalecida competitiva e ágil depois de superar os desafios atuais, (Navigant, 2012).

Embora o mercado fotovoltaico esteja fortemente concentrado na União Européia, desde 2004, a fabricação dos módulos tem se deslocado para a Ásia. Um número crescente de módulos instalados no mundo é importado do Japão e China a fim de abastecer esse mercado. A China, que em 2006 representava 15% da produção mundial de módulos FV, atingiu mais de 50% em 2010 e 55% em 2011.

Segundo a GTM Research, (2011), a indústria de fabricação de *wafers* encontra-se concentrada na China, com 55% da capacidade global de produção que procura outros mercados como a America do Sul. A Alemanha detém de cerca de 10% seguida pelo Japão, Taiwan, Noruega e EUA. Considerando o tipo de tecnologia da célula, a maior produção mundial de módulos de Silício cristalino encontra-se na Ásia, com 50% de produção na China, 15% em Taiwan. A União Européia responde por cerca de 10%, o Japão com um pouco menos que 10% e menos de 5% nos EUA. Para os módulos de filmes finos, a capacidade global de produção atingiu cerca de 3.5 GW em 2010. Da capacidade total produzida de filmes finos, os módulos com a tecnologia CIGS (CuInGaSe), representaram em torno de 15%, com o restante dividido igualmente entre as tecnologias de Telureto de Cadmio (CdTe) e Silício (filme fino). Os módulos de filmes finos são fabricados, na maior parte, nos EUA, EU, Japão e Malásia. A título de subsídios quando a fabricação por tecnologia na Tab.1 consta uma relação dos tradicionais produtores.

As maiores empresas responsáveis pela produção de módulos fotovoltaicos em 2009 e 2011 são mostradas na Fig.3. Em 2009, entre os maiores fabricantes de módulos consta em primeiro lugar a First Solar Inc, com um volume de produção de aproximadamente 1,16 MW, seguida pela Suntech Power (~700 MW), Sharp (~600 MW) e Yingli Green Energy (~520 MW). Observa-se que a First solar responde por uma produção 100% maior que a quarta colocada (Yingli). As previsões era

que essa empresa continuasse classificada em primeiro lugar nos anos seguintes, (GTM Research, 2011). No entanto, já no ano 2011 a First solar passa para o segundo lugar, superada pela Suntech, e como varias outras empresas é atingida pelas dificuldades no mercado com a atual recessão.

Diante da recessão mundial, a indústria fotovoltaica não deixou de ser atingida e vai experimentar ainda mais agitação, mas, poderá surgir mais fortalecida competitiva e ágil depois de superar os desafios atuais.

Tabela 1- Tecnologias de fotovoltaico por fabricante

Fabricante	País	Tipo de tecnologia do fotovoltaico
First Solar	USA	Telureto de Cádmio (CdTe)
Trina Solar	China	Silício cristalino (c-Si)
Yingli Green Energy	China	Silício cristalino (c-Si)
Suntech Power	China	Silício cristalino (c-Si)
REC	Noruega	Silício cristalino (c-Si)
Astronergy	China	Tandem Si
Solibro GmbH (Q-Cells)	Alemanha	Disseleneto de Cobre, (Gálio) e Índio (CIGS )
LDK Solar	China	Silício cristalino (c-Si)
Solar Frontier	Japão	Disseleneto de Cobre, (Gálio) e Índio (CIGS )
Sun Power	EUA	Super mono (c-Si)
Sharp	Japão	Silício cristalino e TF
Canadian Solar	China	Silício cristalino (c-Si)
Eging Photovoltaic Tech	China	Silício cristalino (c-Si)

Fonte:GTM Research PV Technology, Production and Cost. OUTLOOK: 2010-2015, 2011

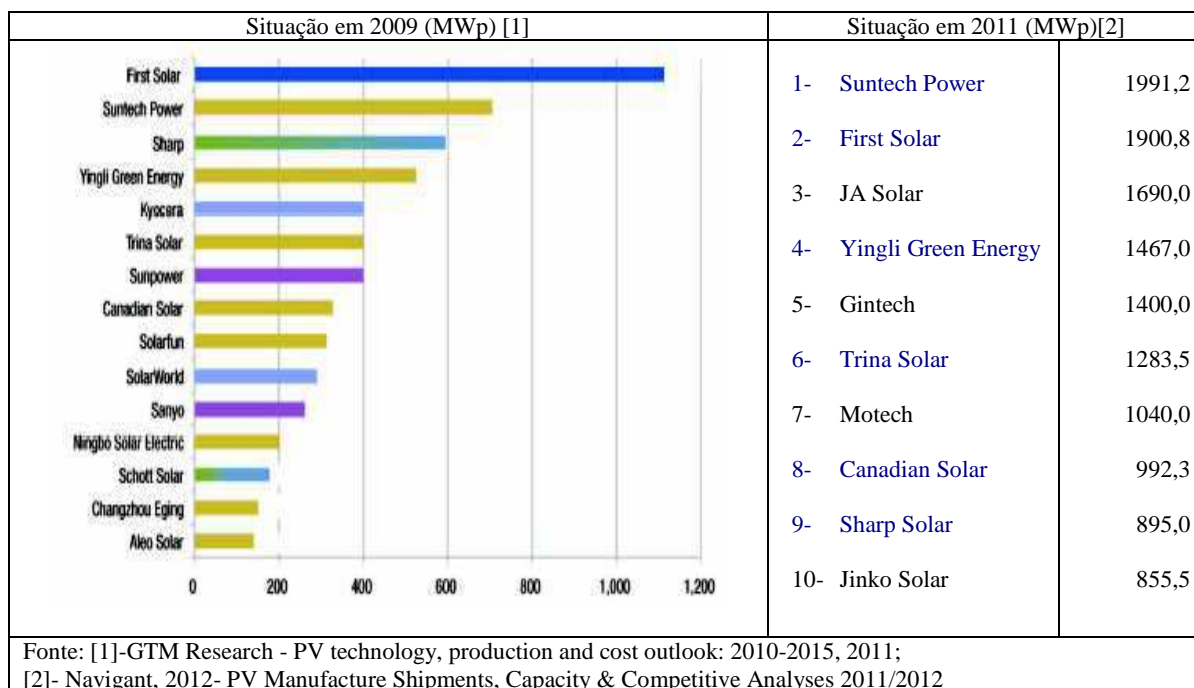


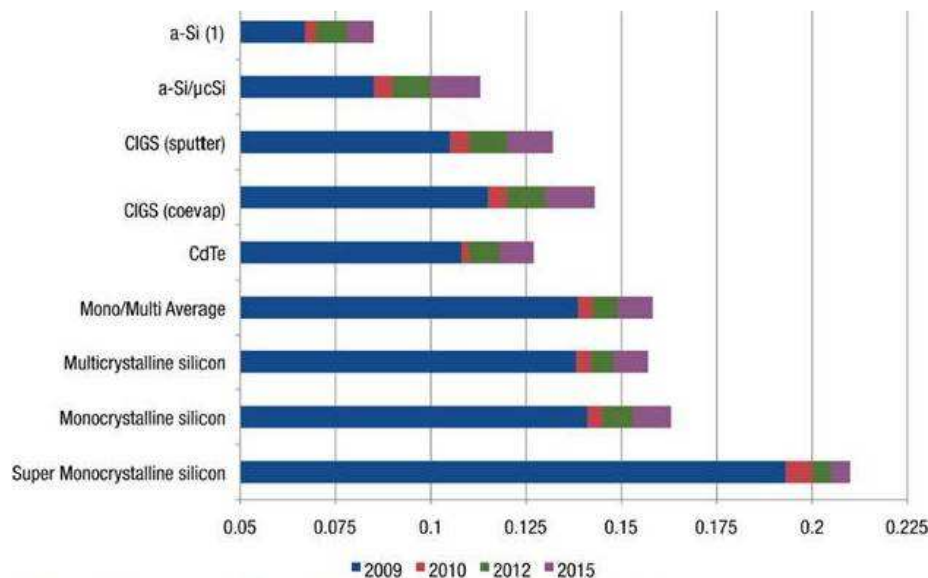
Figura 2- Ranking de produção (MW) dos 20 maiores fabricantes de módulos FV em 2009 e 2011.

### Custo e Eficiência

As eficiências das células de Silício cristalino fabricadas atualmente já se encontram bastante elevadas, e seu crescimento tende a ser pequeno nos próximos anos. Entretanto, espera-se que as eficiências das células de filmes finos continuem crescendo. As previsões feitas são de que em 2015, os módulos com células CIGS possam atingir eficiências equivalentes às dos melhores módulos de Silício policristalino produzidos atualmente, maiores que 14.3%. A Fig.4 mostra a evolução na eficiência de módulos fotovoltaicos por tipo de tecnologia da célula, (GTM, 2011).

Os investimentos em tecnologia de fabricação de células e módulos nos últimos anos têm resultado em produtos de elevada eficiência e baixo custo. Eficiência record de uma célula de CdTe de 17.3 % em laboratório foi anunciada pela empresa norte-americana First Solar, que até 2011 respondia pela maior parcela dos módulos fotovoltaicos produzidos.

As eficiências dos módulos de CdTe são atualmente da ordem de 11,1% com possibilidades de atingir valores da ordem de 15,3% em produção em massa. Embora a eficiência atual seja menor que a dos módulos de Silício, o custo por Wp é também menor. Valores em torno de US\$0,75/Wp já foram anunciados (Martin, 2011). A empresa Suntech, de origem chinesa desenvolveu células cristalinas fabricadas com alta tecnologia (PLUTO) com eficiência de 19% para mono e 17% para policristalinas.



Fonte: GTM Research PV technology, production and cost outlook: 2010-2015.

Figura 3- Evolução da eficiência de módulos fotovoltaicos por tipo de tecnologia

Os módulos monocristalinos comercializados apresentam médias de 15.7% de eficiência e os policristalinos 15% em condições padrão (STC) (Suntech, 2011). A Sharp empresa japonesa, que atua desde 1959 na fabricação de células fotovoltaicas, apresentou em 1992 a célula de Silício monocristalino comercializável com maior eficiência, da ordem de 22%. Em 2005 iniciou também a produção em massa de filmes finos. Em 2008 obteve a eficiência de conversão de 14,4% para produção em massa de módulos de Silício policristalino. A empresa também atua na fabricação de células de multijunção com uma célula de 35.8% a um sol (SHARP, 2011). A empresa Yingli Green Energy de origem chinesa produz células de Silício cristalino com eficiência média de 18,5%. A célula (PANDA tipo N) possui alta tolerância a impurezas, com a opção de usar poliSilício de menor qualidade em sua fabricação o que permite reduzir o custo da célula. Em 2010 as empresas Yingli e Trina Solar são as que apresentavam o menor custo de módulo FV no mundo, em torno de \$1/Watt (Mehta, 2010). Segundo estimativas da Bloomberg New Energy Finance nenhuma tecnologia de energia tem apresentado maior queda nos custos nos últimos três anos que a solar. Os preços atuais dos módulos fotovoltaicos colocam a energia solar pela primeira vez em condições de competir com o preço de varejo de eletricidade em vários países de elevada radiação solar (REWNE, 2001).

A redução de custos dos módulos fotovoltaicos está relacionada ao nível de maturidade atingido pela tecnologia, com elevadas eficiências de conversão e comprovada confiabilidade para atendimento de energia em diversas regiões do mundo, Fig. 5. Alguns países têm estabelecido políticas de promoção da tecnologia como adoção de uma tarifa de incentivo (Feed-in), adoção de sistema de medição líquida da energia injetada na rede de distribuição, descontado o consumo. A utilização desse crédito é abatida da fatura nos meses posteriores (Net Metering), estabelecendo quotas de energia que devem ser compradas compulsoriamente pelas distribuidoras. Esses mecanismos permitiram um grande aumento nos investimentos e na capacidade mundial de produção.

Efetivamente, verifica-se que a tendência de queda nos preços dos módulos fotovoltaicos tem acompanhado o crescimento da produção mundial, Fig. 4. De 2006 a 2010, 5 anos, a queda de preços dos módulos fotovoltaicos foi da ordem de 48%. Estudos realizados recentemente sobre a curva de aprendizado da tecnologia fotovoltaica mostram que os custos para Silício cristalino caem 17%, e para CdTe 16% cada vez que a produção acumulada dobra.

Em termos de sistemas, a redução de custos tem sido da ordem de 14% para a duplicação na produção acumulada (Kersten et al., 2011). Previsões realizadas pela Lux Research para custos de produtos vendidos (CPV) mostram que a tecnologia de Silício cristalino poderá atingir \$0.93/W em 2015, para os filmes finos de Silício os custos previstos são da ordem de \$0.80/W. A tecnologia de CdTe permanecerá na liderança em termos de CPV e poderá atingir custos da ordem de \$0.54/W em 2015. Para os módulos CIGS os custos serão da ordem de \$0.76/W com o aumento da eficiência para 14.2% e aumento da capacidade produção (Sullivan, 2011)

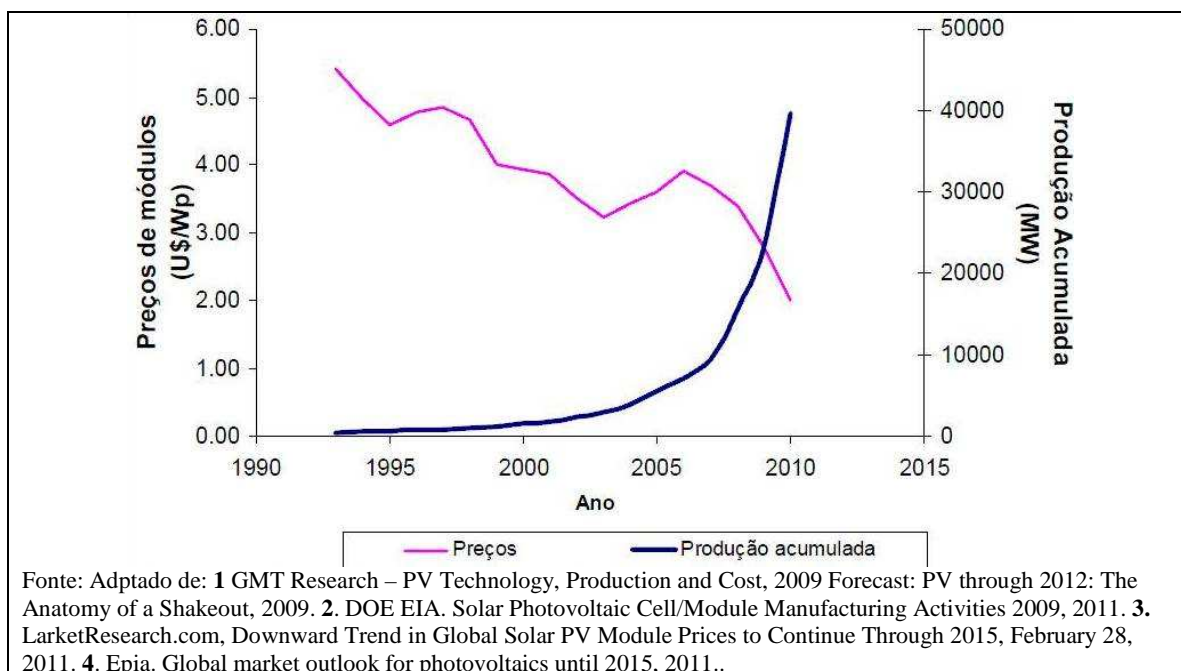


Figura 4- Preços de módulos (US\$/Wp) e Produção mundial acumulada (MW) no período de 1993 a 2010.

#### Custos de instalação

O custo do sistema fotovoltaico instalado depende do tipo de tecnologia, aplicação e escala. Segundo, os resultados apresentados por Goodrich et alii, (2011), os custos situam-se na faixa de 3,5 a 6,6 \$/Wp (DC) para instalações nos Estados Unidos. Em valores médios, para sistemas residenciais (5 kW) o custo situa-se em 5,71 \$/Wp; para sistemas comerciais (215 kW) em 4,59 \$/Wp; para centrais (187,5 kW) fixas, com movimento em um eixo e dois eixos em 3,80, 4,40 e 4,13 \$/Wp, respectivamente, (NREL/PR-6A20-50955 NREL). Evidentemente, o local de instalação também influencia bastante na composição dos custos, principalmente quando são distantes de grandes centros comerciais e que não apresentam uma disponibilidade de serviços qualificados.

Verifica-se que os preços dos módulos representam, em geral, uma fração menor que 50% quando comparados aos custos adicionais do sistema instalado. Uma grande parcela dos custos está associada ao inversor, serviço e materiais de instalação. Uma estimativa do custo do kWh gerado pode ser realizada considerando-se duas localidades com diferentes condições climáticas no Brasil, Recife, com 1930 horas de insolação e Porto Alegre com 1560 horas. Estimando-se um valor de custo de instalação de 7 US\$/Wp, e as seguintes hipóteses alternativas, ou combinadas: Fator de recuperação de capital de 0,10 ( $r = 8\%$  e 20 anos), ou 0,05 (tempo de retorno simples,  $r = 0\%$  e 20 anos), desconto inicial de 3 US\$/W, retorno simples e 15% de reembolso do imposto de renda, obtém-se para o custo da eletricidade gerada valores entre 180 e 450 US\$/MWh, (Fraidenraich, 2010).

#### Competitividade com a Eletricidade Convencional

A energia solar fotovoltaica é atualmente apenas uma pequena parte da geração total de energia e de consumo. Para que a mesma represente uma fatia maior do mercado, deve ser competitiva com outras fontes de energia primária. Atingir esse objetivo depende de políticas de incentivos que reduzam os custos globais de implantação da tecnologia e do aumento inevitável de preços da geração de eletricidade convencional.

As aplicações conectadas à rede são os maiores segmentos do mercado fotovoltaico global, e são essas que transformaram a indústria FV no século 21. Enquanto a diferença entre o valor do kWh gerado é grande com relação aos custos de geração de energia convencionais, essa diferença é bastante reduzida quando se trata das tarifas de energia elétrica cobradas aos consumidores residenciais, comerciais e industriais. Isto é especialmente relevante porque o cliente compara o custo da eletricidade gerada por seu sistema FV com o custo da energia consumida e cobrada, e não com o custo de geração de energia. A instalação de pequenos geradores FV poderia ser de interesse do consumidor nas áreas de concessão onde os valores das tarifas de fornecimento da classe residencial, com inserção dos impostos, encontram-se em patamares próximos aos valores típicos da energia produzida pelos sistemas FV.

Segundo Nota Técnica da ANEEL (2011), analisando-se as tarifas aplicadas ao consumidor no Brasil (com impostos), verifica-se que 9 distribuidoras apresentam tarifas finais superiores a 600 R\$/MWh (300\$/MWh), e 22 apresentam valores entre 500 e 600 R\$/MWh (250 a 300 \$/MWh). Considerando-se essa faixa de custo para o MWh produzido de eletricidade fotovoltaica, esses valores poderiam viabilizar o uso desses sistemas com a adoção de medidas simples como o sistema de compensação de energia ou Net Metering. O documento ressalta ainda que o Sistema de Compensação de Energia pode ser

considerado como uma ação de eficiência energética, pois haverá redução de consumo e do carregamento dos alimentadores em regiões com alta densidade de carga, com redução de perdas e, em alguns casos, postergação de investimentos na expansão do sistema de distribuição. A proposta de que a Compensação de Energia promova apenas a troca de kWh entre o consumidor com geração distribuída e a distribuidora, não envolvendo a circulação de dinheiro foi aprovada pela ANEEL em meados de abril de 2012.

## TECNOLOGIA, EFICIÊNCIA E ÁREA DE OCUPAÇÃO

As tecnologias fotovoltaicas podem ser classificadas como de primeira geração – Silício cristalino; segunda geração – filmes finos, e terceira geração, que inclui as células com concentração; células orgânicas e outras tecnologias que ainda não são comercializadas em larga escala, (Greenpeace International & EPIA, 2011).

O Silício cristalino é a tecnologia fotovoltaica mais utilizada e madura, representando cerca de 80% do mercado. As eficiências de conversão das células encontram-se entre 14 e 22%, já os módulos, atingem eficiências entre 12 e 17%. As células de Silício cristalino são feitas de laminas finas (wafers). De acordo com o material que as constitui são classificadas como: mono cristalino (mc-Si), policristalino (pc-Si) e ribbon (técnica de crescimento em lâminas). As células monocristalinas proporcionam as maiores eficiências. As células mais comuns têm dimensões de 12,7 x 12,7 cm ou 15 x 15 cm e produzem de 3 a 4,5 W. Um módulo padrão de Silício cristalino para pequenos sistemas autônomos é composto por cerca de 36 células solares com uma potência variando entre 45 e 75 Wp. Para aplicações de maior porte (sistemas interligados à rede) o número de células pode estar entre 60 e 72 com uma potência nominal variando entre 120-300 Wp dependendo do tamanho e da eficiência (Greenpeace International & EPIA, 2011).

Módulos de filme fino são construídos através da deposição de camadas muito finas de material fotossensível em substratos de baixo custo, tais como vidro, aço inoxidável ou de plástico que são normalmente, colocados entre duas camadas de vidro, sem moldura. Uma vez que o material é depositado no substrato, é cortado a laser em várias tiras de células. As células de filmes finos não estão limitadas às dimensões padrão como no caso do Silício cristalino, mas sim à dimensão do substrato. O substrato é completamente coberto pelas células dando origem a uma superfície homogênea. Só num exame mais aprofundado podem ser observadas as linhas divisórias entre as tiras de células. Quando o material fotossensível é depositado em um filme plástico, o módulo torna-se flexível. Isso cria oportunidades para integrar geração de energia solar em edificações com diferentes propostas arquitetônicas ou aplicações.

Quatro tipos de módulos de filme fino são comercialmente disponíveis: *Silício amorfo (a-Si)*: A camada semicondutora tem cerca de (1µm) de espessura. O Silício amorfo pode absorver mais luz solar do que o Silício cristalino. No entanto, um menor fluxo de elétrons é gerado devido aos elevados mecanismos de recombinação na estrutura de Silício amorfo. Eficiências na faixa de 4 a 8% são obtidas. Com esta tecnologia o material de absorção pode ser depositado em substratos muito grandes (até 5,7 m<sup>2</sup> de vidro), reduzindo os custos de fabricação (Greenpeace International & EPIA, 2011); *Multijunção de Silício (a-Si/µc-Si)*: A célula é constituída por camadas de Silício amorfo e estruturas microcristalinas de Silício aplicadas sobre o substrato. A adição da camada de Silício micro-cristalino aumenta a absorção de luz na região do vermelho e infravermelho próximo, aumentando a eficiência da célula em até 10%. A espessura da camada µc-Si é da ordem de 3 µm, fazendo com que as células sejam mais espessas, mas também mais estáveis. O tamanho máximo do substrato para esta tecnologia é 1,4 m<sup>2</sup> (Greenpeace International & EPIA, 2011);

*Telureto de Cádmio (CdTe)*: apresentam menores custos de fabricação e têm uma eficiência do módulo atual de 11.1%, com possibilidades de elevação desse valor para cerca de 15,5%, (Martin, 2011). Isto a torna a tecnologia de filme fino mais econômica disponível no momento. As duas principais matérias-primas são Cádmio e Telúrio. O Cádmio é um subproduto da mineração de Zinco. O Telúrio é um subproduto do processamento de Cobre. A disponibilidade desse material em longo prazo pode depender da capacidade da indústria de Cobre de otimizar a extração, refino e reciclagem. As células de Disseleneto de Cobre (Gálio) e Índio (CIS e CIGS) oferecem a mais alta eficiência de todas as tecnologias de filme fino. Eficiências de 20% foram atingidas em laboratório, próximo dos níveis alcançados com o Silício cristalino. O processo de fabricação é mais complexo e menos padronizado do que para outros tipos de células, o que tende a aumentar os custos de fabricação. As eficiências atuais de módulo estão na faixa de 7 a 12%. Não existem problemas de disponibilidade a longo prazo para o Selênio e Gálio, entretanto, existem várias indústrias que podem competir pelos recursos de Índio: a indústria de display de cristal líquido (LCD) é atualmente responsável por 85% da demanda. (Greenpeace International & EPIA, 2011). É altamente provável que os preços do Índio continuarão altos nos próximos anos.

Dispositivos de terceira geração solar estão começando a surgir no mercado com tecnologias promissoras. Uma tecnologia importante é a de células orgânicas. Elas apresentam-se em dois tipos: células totalmente orgânicas (OPV) e células híbridas sensibilizadas por corantes (DSSC). As células OPV apresentam eficiência da ordem de 6% para áreas muito pequenas e inferiores a 4% para áreas maiores. Em torno de 5 MW de células OPV foram produzidas em 2009. Os fornecedores dessas células anunciaram planos para aumentar a produção para mais de 1 GW até 2012 (Greenpeace International & EPIA, 2011). As células DSSC apresentam eficiências de laboratório na faixa de 8 a 12% para áreas muito pequenas. As aplicações comerciais ainda têm uma eficiência inferior a 4%. Cerca de 30 MW de células solares DSSC foram produzidas em 2009. Para 2012 as previsões são de 200 MW produzidos (Greenpeace International & EPIA, 2011). Para ambas as tecnologias os custos de fabricação estão constantemente diminuindo e devem chegar a 0,50 Euros/W até 2020 (Greenpeace International & EPIA, 2011). Essa redução deve-se ao desenvolvimento de novos processos de fabricação. Os principais problemas enfrentados pela tecnologia são a baixa eficiência e sua instabilidade em longo prazo.

As tecnologias de terceira geração que estão começando a chegar ao mercado são chamadas de "emergentes". Além das tecnologias emergentes de terceira geração mencionadas uma série de novas tecnologias também está em desenvolvimento



como as células que introduzem pontos quânticos ou partículas de nanotecnologia. Esta tecnologia pode atender dispositivos com concentração. Os concentradores fotovoltaicos (CPV) também fazem parte da tecnologia de terceira geração. Os mesmos utilizam lentes ou cavidades refletoras para concentrar a luz solar em células fotovoltaicas. O objetivo é concentrar grandes quantidades de luz em uma célula com alta eficiência, embora de alto custo, porém de tamanho reduzido. Os materiais utilizados para as células podem ser o Silício ou materiais compostos III-V. Os sistemas CPV utilizam apenas irradiação direta, portanto, necessitam de estruturas de rastreamento solar de dois eixos. A concentração pode variar de 2 a 100 sóis (baixa concentração) e até 1000 sóis (alta concentração). Sistemas de concentração na faixa de 2 sóis utilizam módulos convencionais e concentradores tipo V. Para altas concentrações é necessário a utilização de estruturas óticas mais complexas como lentes de Fresnel e refletores de disco parabólico. Células de tripla junção com composição de (InGaP/InGaAs/Ge) atingiram em 2006 uma eficiência de 40.7% (Spectrolab); 41,6 % em 2010 (Spectrolab), e 42,3 % em 2011 (Spire Semiconductor). Esta tecnologia já é utilizada para geração de energia com conexão à rede e com previsões de se alcançar 50 % de eficiência no futuro próximo. As eficiências para os módulos são menores, da ordem de 25% (EPIA 2010).

A área de ocupação do modulo fotovoltaico para uma mesma potencia instalada está relacionada à sua eficiência. Módulos de filme finos ocupam uma área maior que os de Silício cristalino. Entre os filmes finos, o Silício amorfo apresenta uma menor densidade de potencia (kW/m<sup>2</sup>). Um resumo com as informações da área ocupada em função da tecnologia e eficiência do módulo é mostrado na Fig.5 para os melhores dispositivos atualmente disponíveis no mercado.

Tipo de Célula	Eficiência Módulo (%)	Área para 1 kWp (m <sup>2</sup> )
Silício monocristalino (m-Si)	13-19	5-8
Silício policristalino (p-Si)	11-15	7-9
Célula Tandem microcristais (a-Si/μcSi)	8-10	10-12
Filme-fino Cobre-Índio/Gálio-Sulfeto/Disseleneto (C/CS/Se)	10-12	8-10
Filme-fino Telureto de Cádmio (CdTe)	9-11	9-11
Silício amorfo (Si-a)	5-8	13-20

Adaptado de Inverter and PV System Technology 2012-Industry Guide

Figura 5- Módulos fotovoltaicos comerciais: área ocupada em função do tipo de tecnologia e eficiência.

Na seleção do dispositivo mais adequado, um outro aspecto muito importante que deve ser considerado é a dependência na potencia gerada em função do tipo de tecnologia do dispositivo quando opera em temperaturas diferentes da condição padrão (STC) de 25°C. O coeficiente de dependência do Ponto de Máxima Potencia (PMP) do módulo depende do tipo de tecnologia da célula, como pode ser observado na Fig. 6. Portanto, por exemplo, os módulos de Silício cristalino apresentam eficiência bem maior que o Silício amorfo, no entanto em climas quentes com temperaturas ambientes altas o decréscimo no ponto de máxima potencia é bem menor para o Silício amorfo que para o cristalino.

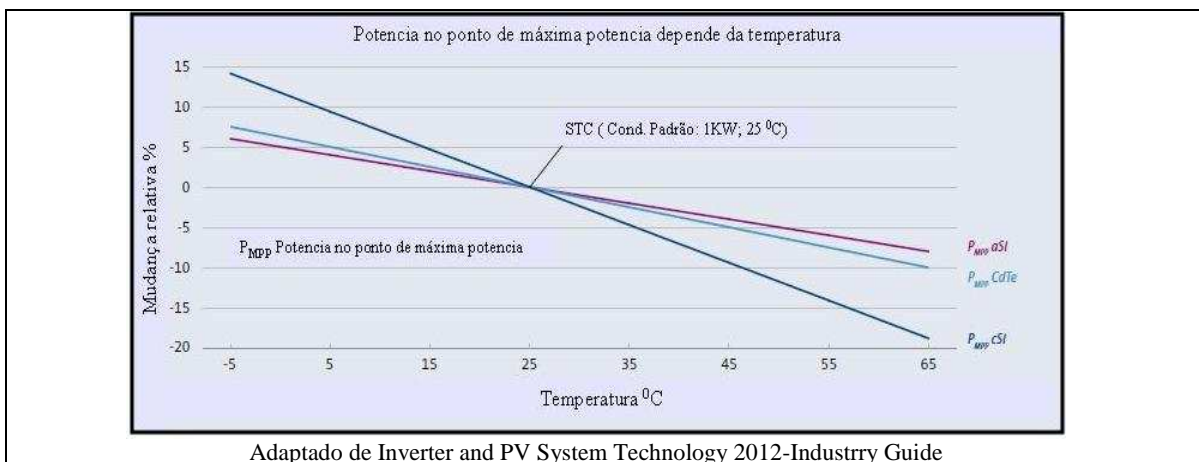


Figura 6- Módulos fotovoltaicos comerciais: área ocupada em função do tipo de tecnologia e eficiência.

## COMENTÁRIOS FINAIS

O Brasil inicia uma nova etapa para a geração de eletricidade de fontes renováveis ainda não participantes na sua matriz energética e a tecnologia solar fotovoltaica apresenta-se como uma possibilidade real. As condições privilegiadas do recurso solar em quase todo território, principalmente na região Nordeste, somadas a programas adequados de incentivo e capacitação de pessoal poderão fazer com que essa tecnologia desempenhe um papel importante na geração de energia elétrica no país.

## REFERÊNCIAS

- Bendt, P., Rabl, A., Gaul, H., Reed, K. A. (1979). Optical Analysis and optimization of line focus solar collectors, SERI/TR 34-092, Solar Energy Research Institute, Golden, EUA.
- ANEEL, (2011), Chamada nº 013/2011: Projeto estratégico: “Arranjos técnicos e comerciais para inserção da geração solar fotovoltaica na matriz energética brasileira”, SPE, ANEEL, Brasília, DF. 2011.
- ANEEL, (2011), RESOLUÇÃO NORMATIVA Nº 482, 17 /04/2012
- Chapin D.M., Fuller C.S., Pearson G.L. (1954). A New Silicon p-n Junction Photocell for Converting Solar Radiation into Electrical Power, Journal of Applied Physics, 25: 676-677; Solar Energy Converting Apparatus, Patente US2780765.
- DOE EIA. (2011). Solar Photovoltaic Cell/Module Manufacturing Activities 2009, 2011.
- EPIA. (2010). Photon international, EPIA analysis. Efficiency based on Standard Test conditions, 2010.
- EPIA. MARKET OUTLOOK 2010. European Photovoltaic Industry Association, 2010.(2010). <http://pt.scribd.com/doc/65322193/EPIA-Market-Outlook-2010-Public.2010>.
- EPIA. (2011).Global market outlook for photovoltaics until 2015 <http://www.epia.org,2011>.
- Fraidenrach, N, (2010). Análise prospectiva da introdução de tecnologias alternativas de energia no Brasil - Tecnologia solar fotovoltaica, ASADES 2010.
- Fraidenrach, N., Chiguero, T., Vilela, O. C., Barbosa. E. M. S. (2003). Livro: Fontes Renováveis de Energia no Brasil, Capítulo 6: Energia Solar Fotovoltaica, Ed. Interciência. 2003.
- Goodrich, A C, Woodhouse M, James T, (2011). Solar PV Manufacturing Cost Model Group: Installed Solar PV System Prices SEGIS-ADEPT Power Electronics in Photovoltaic Systems Workshop Arlington, Virginia February 8, 2011 NREL/PR-6A20-50955 NREL, 2011.
- GREENPEACE INTERNATIONAL & EPIA, (2011). Solar Generation 6. Solar photovoltaic electricity empowering the world, 2011. <http://www.greenpeace.org/international/en/publications/reports/Solar-Generation-6/>, acessado em 09/2011.
- GTM RESEARCH, (2011). PV TECHNOLOGY, PRODUCTION AND COST OUTLOOK: 2010-2015, 2011.
- LARKET RESEARCH, (2011). Downward Trend in Global Solar PV Module Prices to Continue Through 2015, [www.LarketResearch.com](http://www.LarketResearch.com) em 28/02/2011.
- Lindmayer J, Allison J. The violet cell: an improved silicon solar cell. COMSAT Technical Review, 3: 1–22; 1973.
- Mandelkorn J., McAfee C., Kesperis J., Schwartz L., E . Pharo W, Fabrication and Characteristics of Phosphorous-Diffused Silicon Solar Cells, J. Electrochem. Soc., 109 (4): 313-318; 1962.
- Martin C., (2011). First Solar’s Record Efficiency May Best China Solar Panels. Bloomberg News , Sep 19, 2011.
- NAVIGANT (2012). Photovoltaic Manufacturer Shipments, Capacity & Competitive Analyses 2011/2012 em [Navigant.com](http://www.Navigant.com)
- REN21, (2010). Renewables 2010 - Global Status Report.
- REWNE (2011). (Renewable Energy World Network Editors) Renewables Investment Breaks Records, August 29, 2011, <http://www.renewableenergyworld.com/rea/news/article/2011/08/renewables-investment-breaks-records>, 2011.
- Rovere E. L., Valle C., Pereira A, Poppe M.K. (2011). Projeto “A Carta do Sol” Relatório Técnico Subsídios para o Planejamento da Promoção da Energia Solar Fotovoltaica no Brasil. 2011.
- SHARP. History of Sharp’s solar cell development. <http://www.sharp.net.au/articles/solar/sharp-solar/sharp-solar-history/>, acessado em 08/2011.
- SUNTECH.(2011) Suntech Silicon-Powered Solar Technology. <http://ap.suntechpower.com/en/technology/technology.html>, acessado em 08/2011.
- Sullivan T. (2011). How Thin-Film Solar Will Fare Against Crystalline Silicon's Challenge. Renewable Energy World January 3, 2011.

**ABSTRACT.** In the last few years Brazil is presenting initiatives that allow predictions of a new phase for the renewable energy sources. Photovoltaic solar technology, in particular, which is still not present in Brazilian’s power matrix appears now with a real possibility to compose it. The privileged conditions of the solar resource in almost all the territory - more intensely in the northeastern region, added to incentive programs and professional qualification could give to this technology an important role in the electric energy generation in the country. With the objective to provide a review of information which can be useful in the selection of adequate photovoltaic technology type or even to report the state of the art of photovoltaic devices, this work presents relevant aspects that are available in literature, but spread in several documents. The compendium gathered in this paper includes, among other, market evolution worldly, main manufacturers, most efficient modules, and the areas of occupation based on the type of the photovoltaic technology.

**Key words:** Renewable energy, Production of photovoltaic, technology and efficiency of photovoltaic