

**Uirê Guimarães Vieira Ribeiro**

# **Estudo de Viabilidade Econômica de Instalação de Fontes de Energia Renováveis Baseadas em Células Fotovoltaicas Para o Uso Residencial**

Trabalho de Conclusão de Curso  
apresentado à Escola de Engenharia de São  
Carlos, da Universidade de São Paulo

Curso de Engenharia Elétrica com  
ênfase em Sistemas de Energia e Automação

ORIENTADOR: Rogério Andrade Flauzino

São Carlos  
2012

AUTORIZO A REPRODUÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO,  
POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS  
DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

G484e      Guimarães Vieira Ribeiro, Uirê  
Estudo de Viabilidade Econômica de Instalação de  
Fontes de Energia Renováveis Baseadas em Células  
Fotovoltaicas Para o Uso Residencial / Uirê Guimarães  
Vieira Ribeiro; orientador Rogério Andrade Flauzino.  
São Carlos, 2012.

Monografia (Graduação em Engenharia Elétrica com  
ênfase em Sistemas de Energia e Automação) -- Escola de  
Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo,  
2012.

1. energia fotovoltaica. 2. sistemas fotovoltaicos  
conectados à rede. 3. módulos fotovoltaicos. I. Título.

# FOLHA DE APROVAÇÃO

Nome: Uirê Guimarães Vieira Ribeiro

Título: "Estudo de Viabilidade Econômica de Instalação de Fontes de Energia Renováveis Baseadas em Células Fotovoltaicas para o Uso Residencial"

*Trabalho de Conclusão de Curso defendido e aprovado  
em 23/11/2012,*

*com NOTA 10,0 (dez, zero), pela Comissão Julgadora:*

**Prof. Dr. Rogério Andrade Flauzino (Orientador)**  
**SEL/EESC/USP**

**Prof. Assistente Carlos Goldenberg**  
**SEL/EESC/USP**

**Prof. Dr. Danilo Hernane Spatti**  
**SEL/EESC/USP**

**Coordenador da CoC-Engenharia Elétrica - EESC/USP:**  
**Prof. Associado Homero Schiabel**

# Sumário

Capítulo 1 .....	1
1.1 Introdução .....	10
1.2 Objetivos .....	2
Capítulo 2 .....	4
2.1 História.....	4
2.2 Indústria e Pesquisa Fotovoltaica no Brasil .....	5
2.3 Geração Distribuída (GD).....	6
2.3.1 Tecnologias de Geração Distribuída .....	7
2.3.2 Vantagens da GD.....	10
2.3.3 Desvantagens da GD .....	11
2.4 A Célula e o Módulo Fotovoltaico .....	11
2.5 Os Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede (SFCR) .....	16
2.5.1 Componentes do SFCR .....	18
2.5.2 Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede no Brasil.....	20
Capítulo 3 .....	23
3.1 Custos e Viabilidade Econômica dos SFCR.....	23
3.1.1 Custos para aquisição no Brasil.....	24
3.1.2 PVPS (Photovoltaic Power Systems Programme).....	25
3.1.3 Evolução dos preços dos SFCR.....	26
3.2 Modelos de Incentivo Governamental .....	28
3.2.1 Os incentivos financeiros nos EUA.....	30
3.2.2 <i>Dual Metering</i> .....	30
3.2.3 <i>Net Metering</i> .....	31
3.2.4 <i>Feed-in Tariffs</i> .....	32
3.2.5 <i>Buydown</i> .....	34
Capítulo 4 .....	37
4.1 Inserção da Energia Fotovoltaica no Brasil .....	37
4.1.1 Indústria de SFCR no Brasil.....	38
4.1.2 Regulamentação Brasileira .....	39
4.2 Estratégias Para a Inserção da Tecnologia Fotovoltaica no Brasil .....	40
4.2.1 Medidas Para Aumento da Demanda.....	42
4.2.2 Desenvolvimento da Cadeia Produtiva.....	44
Capítulo 5 .....	46

5.1 Conclusão .....	46
Bibliografia.....	49

## Resumo

A necessidade de se encontrar fontes alternativas de energia já é sabida e vem sendo sanada por meio da pesquisa e desenvolvimento de tecnologias que permitam aproveitar energia de fontes renováveis e não poluentes. A geração de energia elétrica através da conversão fotovoltaica da irradiação solar vem se mostrando uma das alternativas com melhor relação entre custo e benefício e já se tornou uma fonte de energia significativa da matriz energética de países como a Alemanha, Espanha, Portugal e Suíça. A importância estratégica deste setor está despertando o interesse das maiores potências mundiais, que vêm investindo fortemente para que o setor cresça e se consolide internamente, evitando que futuramente se tornem cativos tecnológicos deste mercado. Neste contexto, o Brasil apresenta enorme potencial para se tornar um dos principais produtores e consumidores do setor, uma vez que somos o segundo maior produtor de silício do mundo e possuímos uma incidência solar média muito maior do que a encontrada na Alemanha (maior produtor de energia elétrica de origem solar). Em vista deste cenário, pode-se concluir que o nosso país deve investir o quanto antes na energia solar, focando na pesquisa, no mercado consumidor e na indústria relacionada à produção de sistemas fotovoltaicos. No entanto, a iniciativa deve partir do governo, que deve fazer incentivos monetários, estruturais e tributários que estimulem o rápido crescimento do mercado de sistemas fotovoltaicos. Os incentivos devem ser feitos principalmente, e primeiramente, na estrutura tarifária e nas linhas de crédito nacionais, que são inadequadas para atender às necessidades específicas apresentadas pela geração fotovoltaica, desestimulando investidores que possam estar interessados em investir na geração distribuída por células fotovoltaicas.

**Palavras-chaves:** energia fotovoltaica, sistemas fotovoltaicos conectados à rede, módulos fotovoltaicos, célula fotovoltaica.



## Abstract

The need of finding alternative energy resources is already known and has been solved through researches and the development of technologies that allow the use of renewable and clean energy sources. The generation of electric power through the photovoltaic conversion of the solar irradiation is showing itself one of the alternatives with the best relation between cost and benefit and has become a significant energy source of the energy matrix of countries such as Germany, Spain, Portugal and Switzerland. The strategic importance of this sector is wakening the interest of the biggest world power countries, which have been investing heavily to make the sector develop and consolidate internally to avoid becoming technologically captive in this market. In this context, Brazil shows great potential to become one of the biggest producers and buyers of the sector, once we are the second silicon world producer and have a solar incidence much bigger than the one found on Germany (biggest producer of electrical power from the Sun). In this scenario, it's possible to conclude that our country must invest as soon as possible in solar energy, focusing on research, on the consumer market and on the industry related to the production of photovoltaic systems. However, the initiative must come from the government, which must do monetary, structural and tributary incentives that stimulates the fast growth of the photovoltaic systems market. The incentives must be done mainly, and firstly, on the national tributary structure and credit lines, that are inappropriate to comply with the specific needs presented by the photovoltaic generation, discouraging investors that might be interested in investing on the distributed generation through photovoltaic cells.

**Keywords:** photovoltaic energy, grid connected photovoltaic systems, photovoltaic module, photovoltaic cell.





# Capítulo 1

## 1.1 Introdução

Como já é bem sabido, em especial no setor de energia, desde as primeiras crises energéticas na década de 1970 quando faltou gás e gasolina até para o aquecimento de residências em pleno inverno, o mundo passou a preocupar-se com a possível falta de combustíveis para suprir suas necessidades energéticas futuras. No mesmo período, começaram a ser levantadas questões acerca dos impactos ambientais causados pela atuação indevida do homem na natureza que passou a afetar o equilíbrio ambiental no nosso planeta. Dentre os diversos aspectos ambientais questionados podemos citar a geração de resíduos, a emissão de gases pela queima de combustíveis fósseis, efeito estufa, chuva ácida, aquecimento global e destruição de ecossistemas. Ambos estes fatos nos levaram a buscar fontes que fossem não só limpas, mas também renováveis, para que se evitem novas crises energéticas.

Sobre as questões relativas às fontes de energia, temos como desafio nos tornarmos menos dependente das fontes fósseis que além de altamente agressivas ao meio ambiente, são fontes finitas de energia. Esta agressividade é comprovada por estudos que revelaram que a maior parte da poluição atmosférica é proveniente da queima dos combustíveis fósseis, que emitem gases na atmosfera causando chuvas ácidas e o aquecimento global.

A dependência desta fonte de energia acaba por se mostrar arriscada, pois estimativas dizem que as reservas de gás e carvão ainda durarão por aproximadamente mais um século, e as reservas de petróleo possuem aproximadamente mais 40 anos antes de esgotarem (o cálculo desse valor é obtido a partir das reservas descobertas que a tecnologia atual permite explorar). Prazo que não geraria muita preocupação se a matriz energética mundial não possuísse somente 8% em fontes alternativas de energia, enquanto os combustíveis fósseis representam 87%, sendo 33,5% coberta somente pelo petróleo.

Não é difícil de constatar que a nossa dependência dos combustíveis fósseis já é um problema, e que se agravará de acordo com que cheguemos mais próximos do esgotamento das reservas de petróleo. Por esse motivo, vê-se em todo o mundo uma corrida pelo desenvolvimento de tecnologias que viabilizem a exploração de fontes renováveis de energia,

corrida esta, que é liderada por um pequeno grupo de países: China, Alemanha, EUA, Espanha, Índia e Portugal.

O investimento em pesquisa em fontes de energia que possam ajudar a suprir a demanda da sociedade fez surgir diversas ideias de fontes que pudessem ser exploradas. Logo no início, descartaram-se algumas destas, enquanto que as que se mostraram mais promissoras, passaram a receber maior atenção e esforço. Dentre as fontes estudadas como alternativas ao petróleo, as que apresentaram melhores resultados iniciais em termos de geração mais limpa, eficiência e confiabilidade foram: solar, eólica, célula combustível, maremotriz, geotérmica e biomassa. Dentre estas fontes de combustível, o uso de biomassa, que é a queima de combustível orgânico, é a mais consolidada devido à semelhança do seu método de conversão com as fontes convencionais, enquanto a eólica e a solar são as que vêm recebendo maior foco da comunidade científica e industrial, revelando serem excelentes alternativas devido ao uso de fontes completamente limpas, possuindo impactos ambientais quase nulos e já apresentarem características técnicas que as tornem economicamente mais viáveis.

Este trabalho terá foco no uso da energia solar para conversão fotovoltaica de energia, ou seja, teremos maior foco na conversão direta da irradiação solar em energia elétrica. Sendo esta uma das melhores fontes de energia em termos ambientais devido a ausência de emissão de ruídos ou poluentes durante seu funcionamento. Este tipo de geração se dá através de células fotovoltaicas, que convertem energia luminosa em eletricidade na forma de corrente contínua e em baixa densidade energética. Características essas que fazem deste tipo de geração uma excelente opção para o abastecimento de cargas isoladas ou a geração distribuída (GD).

## **1.2 Objetivos**

Este estudo é objetivado no levantamento de dados técnicos e econômicos para a avaliação da viabilidade econômica da geração de energia elétrica a partir de sistemas fotovoltaicos como geradores distribuídos no cenário brasileiro, na avaliação de modelos de incentivo realizados no exterior que possam ser aplicados à realidade do Brasil, e nos benefícios que podem ser obtidos pela economia interna caso investirmos no setor. Tal avaliação será feita através do estudo de relatórios e pesquisas da última década que revelam a realidade desta tecnologia e nos permitem prever o seu comportamento futuro no Brasil e no mundo.

### **1.3 Organização do Trabalho de Formatura**

No Capítulo 2, será feito um breve relato sobre a história da célula fotovoltaica, da história da indústria deste produto no Brasil. Neste encontram-se ainda uma introdução às características gerais da GD, da célula e do módulo fotovoltaico, e dos elementos que compõem os sistemas fotovoltaicos conectados à rede.

No Capítulo 3, são apresentados estudos sobre custos e a viabilidade econômica dos geradores fotovoltaicos, e modelos de incentivo governamental que foram utilizados no mundo para estimular o mercado de módulos em outros países.

O Capítulo 4 tem como foco as propostas de medidas a serem tomadas para que ocorra uma inserção rápida e saudável da energia solar fotovoltaica no Brasil.

Por fim, o Capítulo cinco apresentará as conclusões obtidas ao termino da pesquisa realizada.

## Capítulo 2

### 2.1 História

A história da geração de energia elétrica a partir da radiação solar teve início em 1839 quando Edmond Bequerel observou o surgimento de uma diferença de potencial entre as extremidades de uma estrutura semicondutora quando esta se encontrava sob a incidência de luz, esse efeito ficou conhecido como efeito fotovoltaico. Em 1877, os americanos W. G. Adams e R. E. Day utilizaram as propriedades semicondutoras do selênio para desenvolver o primeiro dispositivo sólido de geração por exposição à luz, um avanço sobre o modelo de Bequerel, que consistia em uma placa metálica imersa em um eletrólito (Vallêra, A. M., 2007).

A primeira célula solar moderna foi desenvolvida em 1953 por Calvin Fuller, funcionário dos Bell Labs, que desenvolveu um método de introdução de impurezas no silício, denominado dopagem. Como resultado, ele desenvolveu duas placas de silício dopadas com elementos de polaridades opostas, e ao juntá-los, observou a presença de um campo elétrico permanente entre as duas placas. Foi notado então, que quando sob a incidência de luz, surgia corrente elétrica entre os dois extremos da estrutura, criando assim a primeira célula de silício. Porém, logo ficou claro que os elevados custos para a produção e a baixa eficiência das células impossibilitariam o uso em escala comercial, limitando o uso das mesmas somente onde o custo não é fator limitante, como satélites, lugares remotos, boias de navegação e equipamentos de comunicação localizados em locais remotos.

Em 1973, o preço do petróleo quadruplicou devido à crise energética que se instalou no mundo. Somada as preocupações ambientais causadas pelas mudanças climáticas constatadas no mesmo período, a crise do petróleo levou as potências mundiais a investirem fortemente na tecnologia fotovoltaica, buscando assim reduzir os custos da geração a partir do Sol. Como resultado desses investimentos iniciais, o custo da eletricidade proveniente desta forma de geração passou de 80 \$/Wp para 12 \$/Wp em menos de uma década.

As ameaças de falta de fontes de energia e de catástrofes climáticas motivaram a criação do primeiro grande parque de geração fotovoltaica, em 1982 nos EUA, e os telhados solares, em 1990 na Alemanha e em 1993 no Japão. Neste mesmo período, pesquisas revelaram que a redução de custos relativos à instalação de células não é resultado somente do desenvolvimento tecnológico, mas também consequência do aumento na produção e

melhorias das técnicas de fabricação. Acredita-se que com essas reduções de custo, os painéis solares passariam a ser uma alternativa de geração com custos competitivos com o da energia convencional, (1 euro/Wp).

## **2.2 Indústria e Pesquisa Fotovoltaica no Brasil**

A geração fotovoltaica no Brasil deu seu primeiro sinal de existência em 1952 no Centro de Mecânica Aplicada, do Ministério do Trabalho, Indústria e Comércio. Quando o Dr. Teodoro Oniga, por ocasião da realização do X Congresso Brasileiro de Química quando propôs-se a ideia de promover a utilização de energia solar no Brasil. A partir deste momento, a pesquisa no ramo foi continuada por pesquisadores independentes e grupos de pesquisa especializados em energia solar sediados em universidades ao longo do Brasil. No entanto, se tratavam de pequenos grupos com não mais do que 5 integrantes, tendo sua maioria sido dissolvidos até a década de 90. Em 1992, um levantamento da CEPEL mostrou que o número destes grupos havia reduzido significativamente (Benedito, R. da S., 2010).

Já a indústria nacional, teve início somente no final da década de 70, quando a firma da área de telecomunicações, Fone-Mat, começa a produzir módulos a partir de células importadas da empresa Soralex, sediada nos Estados Unidos. Esta firma chegou a produzir os componentes periféricos necessários para a geração fotovoltaica, como controladores de carga, solarímetros e outros dispositivos necessários no sistema.

Pouco depois, a firma Heliodinâmica iniciou suas atividades no ramo. Com a proposta de desenvolver o setor de energia solar no país, e futuramente de dispositivos eletrônicos, a Heliodinâmica passou a produzir coletores solares térmicos e tarugos de silício, dando início a uma linha de produção totalmente nacional.

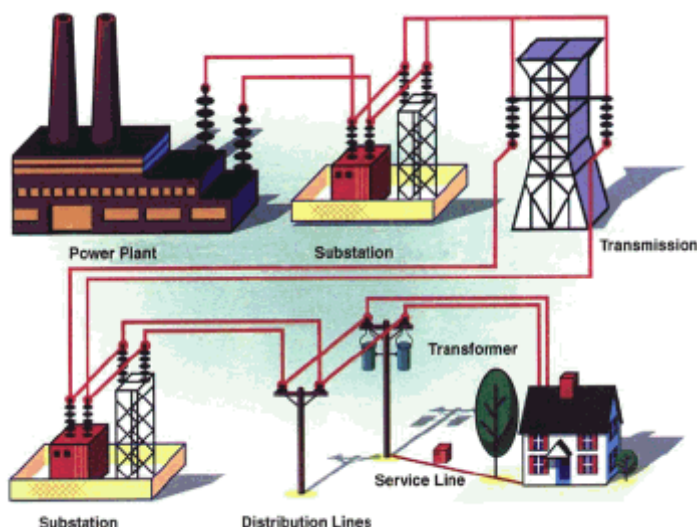
Em 1981, foi criada a Lei da Informática, que protegia o mercado interno de eletrônica. Devido ao fato de serem fabricados juntamente com os dispositivos eletrônicos, a indústria de painéis fotovoltaicos foi inserida na lei, passando a desfrutar dos benefícios trazidos por esta. Desta forma, a Heliodinâmica, empresa fundada para aproveitar o nicho de mercado que passou a ser reservado para a indústria nacional, obteve um crescimento expressivo no faturamento. A lei durou aproximadamente 10 anos, período em que a empresa deveria supostamente ter alcançado a estabilidade econômica necessária para competir com as multinacionais pelo mercado interno. Contudo, ao serem removidas as barreiras alfandegárias, e as empresas estrangeiras Siemens Solar e Soralex entrarem no mercado nacional de

equipamentos fotovoltaicos, a Heliodinâmica mostrou ainda não ter alcançado a estabilidade financeira necessária, vindo a perder mercado rapidamente para as empresa estrangeiras.

## 2.3 Geração Distribuída

Os primeiros registros do uso da GD são bem antigos, sendo datados de 1880 juntamente com a construção do primeiro sistema elétrico de potência. Apesar de o sistema ser muito pequeno, e alimentar somente um pequeno grupo de lâmpadas incandescentes, foi rapidamente aceito e copiado nas maiores cidades da época.

O mais importante para este trabalho, é saber que os geradores eram todos localizados próximos às cargas, caracterizando assim, o conceito de GD. Porém tal prática foi sendo deixada de lado devido ao aperfeiçoamento dos transformadores e da transmissão de energia elétrica em CA, que permitiu a transmissão para localidades de maiores distâncias com menores perdas. Essa tecnologia foi adotada e permitiu a interconexão de sistemas distantes, bem como a construção de grandes centrais de geração que ficassem afastadas dos centros de consumo. Este modelo é usado até hoje em todo o mundo e é representado no modelo da Figura 1.



**Figura 1 - Sistema de geração centralizada de energia**

Movidos pelos impactos ambientais causados pela implantação de grandes centros de geração, a escassez de fontes de energia que possam ser exploradas em larga escala, a inserção de pequenos geradores por parte dos consumidores e o interesse em aumentar a eficiência no uso da energia elétrica, os pesquisadores voltaram a discutir a GD nas últimas décadas.

Antes de tratarmos da GD, é importante defini-la. Porém não há um consenso quanto à definição desta, havendo um grande número de significados que são adotados como GD. Cada trabalho do ramo segue uma definição própria ou alguma fornecida em outros estudos. Contudo, é importante ressaltar que há um grupo de características que estão presentes em quase todas as definições fornecidas atualmente, sendo elas a produção de energia na tensão em que será consumida, a proximidade com a carga, e a geração em potências não muito grandes. Neste trabalho usaremos a definição dada pelo *GAS RESEARCH INSTITUTE*, no ano de 1999, pois se trata de uma definição simples, e que abrange unicamente estes termos comuns a todas as definições. Esta definição diz que:

*“Geração Distribuída são tecnologias de geração de pequeno porte, tipicamente inferior a 30 MW, estrategicamente localizadas próximas dos consumidores ou centros de carga, proporcionando benefícios aos consumidores e suporte para a operação econômica das redes de distribuição existentes.”*

### **2.3.1 Tecnologias de Geração Distribuída**

Atualmente, a GD acontece através do uso de tecnologias que já estejam disponíveis comercialmente, caracterizando geradores de tecnologias já consolidadas. As principais tecnologias de GD presentes nos sistemas ao redor do mundo são (Rodríguez, C. R C., 2002):

#### **a. Células a Combustível**

Trata-se da conversão eletroquímica de energia de um combustível (geralmente hidrogênio) em energia elétrica. Estes dispositivos são a melhor opção técnica dentre as fontes de energia, uma vez que atingem altos valores de eficiência, possuem baixa emissão de ruídos e poluentes, fácil automação, alta confiabilidade, e compatibilidade com a maioria dos sistemas modulares. No entanto o alto custo de produção ainda impede o uso destes geradores em maior escala, devendo o seu uso aumentar no médio ou longo prazo.

#### **b. Energia Eólica**

Consiste no uso da força dos ventos para mover as turbinas que farão a conversão eletromecânica de energia. Esta forma de geração é uma das mais pesquisadas atualmente sendo uma das que mais se aproximam da viabilidade econômica. Fora os fatores econômicos, os aerogeradores apresentam também rapidez na instalação, baixo custo de manutenção e nenhum custo para a sua fonte de energia.



Apesar de ser a fonte de energia alternativa que mais teve capacidade instalada nas últimas décadas, problemas com a inconstância dos ventos, limitação de locais em que se possam explorar os ventos efetivamente e os preços, desaceleraram a criação e expansão dos parques eólicos.

### **c. Motores de Combustão Interna**

Definitivamente, hoje é o dono do mercado definido como GD. Os motores de combustão interna vem sendo usados como geradores para suprir parcial ou totalmente a carga, sendo capaz de manter os equipamentos ligados durante uma falta sustentada, ou reduzindo a demanda de um cliente em horários de pico, onde o custo da energia é mais elevado.

Largamente usada em ambientes em que não é tolerável a falta de energia (aeroportos, hospitais, bases militares e locais com refrigeração de alimentos e/ou equipamentos raros ou caros), ganharam mercado pela sua confiabilidade e eficiência. Há alguns anos o seu caráter poluente colocou seu uso em cheque, forçando os fabricantes a melhorar suas tecnologias tornando as emissões aceitáveis. Atualmente já apresentam boa eficiência e emissões relativamente baixas.

### **d. Turbinas a Gás**

Altamente eficientes, com baixo custo de instalação e de operação, esses geradores também vêm sendo bastante utilizados na cogeração. Assim como os motores de combustão interna, eles são confiáveis e facilmente operáveis, sendo construídos em potências de 1 a 30MW.

Os primos de menor carga das turbinas a gás, as micro turbinas a gás, oferecem uma opção com os mesmos benefícios que seus primos maiores, porém com tamanho bem reduzido, e potências que variam entre 30 e 300 kW. Sendo uma opção bem mais razoável para a cogeração próximo a pequenas cargas.

### **e. Energia Solar**

A energia solar representa muito mais do que a irradiação do Sol sobre a Terra, sendo ela a origem de todas as fontes de energia, com exceção da maremotriz e da geotérmica. Essa afirmação vem do fato de que a biomassa é formada a partir da fotossíntese, a energia eólica é resultado da movimentação das massas de ar por convecção e a

hidroelétrica é a energia potencial gerada pelo ciclo das águas, causado pelo aquecimento da água pela luz solar.

O uso da energia solar é dado de duas formas, sendo elas:

- Aquecimento de água: que significa a simples captação da irradiação solar por coletores solares para o aquecimento da água contida nestes. A água circula por serpentinas e pelo reservatório por convecção, não havendo necessidade de uma bomba. Esta forma de uso da energia solar é comumente feito em residências através de um sistema instalado no telhado;
- Conversão em energia elétrica: esta conversão pode ser feita de duas formas, podendo ser feita através do efeito fotovoltaico, onde os fótons são convertidos em corrente por meio de uma estrutura de semicondutores. O efeito fotovoltaico será melhor tratado mais para frente; A segunda forma de conversão é o uso da luz para superaquecer fluídos de trabalho para que estes movam turbinas em processos semelhantes ao realizado nas usinas termoelétricas. Para que a luz solar possa aquecer o fluído de tal forma (de 150 a 1000°C), é necessário que se façam uso de vários espelhos para concentrar a luz em coletores térmicos. Por esse motivo esses sistemas ficaram conhecidos como *CSP (Concentrated Solar Power)*. Um exemplo deste tipo de usina é mostrado na Figura 2.



## **Figura 2 - Usina Solar PS10 em Sevilha, na Espanha**

É importante notar que as categorias apresentadas podem abranger mais de uma fonte de energia alternativa, como por exemplo, o motor a combustão interna que pode ser alimentado com biodiesel ou com álcool.

### **2.3.2 Vantagens da Geração Distribuída**

O uso da GD traz consigo diversos impactos à rede, tendo a sua magnitude variada de acordo com a profundidade da inserção desta nos SEP (quanto da energia consumida é de origem de pequenos geradores que possam ser classificados como GD). Dentre os impactos positivos esperados podemos citar (Gonçalves, L. F., 2004):

- Instalação de geradores próximos à carga, o que resulta na redução dos custos de transmissão da energia, do carregamento da rede e das perdas envolvidas na transmissão em condições normais;
- Reduz a demanda da energia proveniente dos grandes centros de geração, prorrogando assim, empreendimentos a serem feitos para a geração de energia em larga escala;
- Rapidez, praticidade e versatilidade na instalação. Uma vez que a GD é caracterizada por pequenos geradores ligados próximos à carga, torna-se rápida e barata a sua instalação em quase qualquer lugar da rede;
- Aumento do fator de potência da rede devido ao maior fator de potência presente nos pequenos geradores;
- Maior estabilidade do sistema diretamente relacionada à profundidade de inserção da GD na rede;
- O alívio de carga dos geradores convencionais permite que estes sejam utilizados para absorção de reativos da rede;
- Possibilidade de geração de energia a um custo abaixo do cobrado pela distribuidora;
- Incentivo à autoprodução e desenvolvimento do mercado relacionado às tecnologias de cogeração, gerando empregos e maior atividade econômica;

### **2.3.3 Desvantagens da Geração Distribuída**

No entanto, a inserção da GD se comporta como qualquer outra tecnologia, trazendo impactos negativos para a rede, podendo afetar a qualidade, a confiabilidade da rede e exigir gastos elevados para que a rede continue a funcionar corretamente. Dentre os impactos negativos, podemos citar:

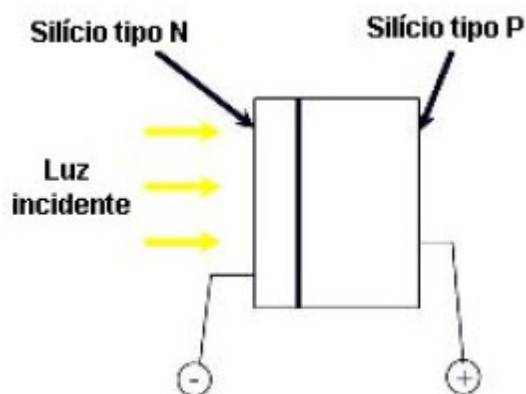
- Reajustes do sistema de proteção para a nova realidade da rede, isso se deve pelo fato de que o sistema foi originalmente estruturado para uma operação unilateral com distribuição radial;
- Aumento considerável dos custos necessários para fazer o controle do perfil da tensão do lado da transmissão;
- A operação dos pequenos produtores ficará a cargo dos mesmos, o que pode resultar em manobras de desligamento que podem afetar a proteção da rede. Como consequência, podem-se ter atuações indevidas, e em casos críticos, chegando a colapsos do sistema;
- Inserção de harmônicos por parte dos inversores presentes nos sistemas de geração a partir de fontes CC;
- Redução do coeficiente de amortecimento dos transitórios, resultando em uma resposta mais lenta do sistema devido à inserção de geradores rotativos;
- Falta de informação sobre os diversos geradores que serão acrescentados à rede;
- Pode levar ao aumento de ocorrências de sobre tensão na rede;
- Pode resultar no mal funcionamento de dispositivos da rede de distribuição, uma vez que foram projetados para um sistema radial e unilateral. Um exemplo existente e já estudado é a regulação errada nos taps dos transformadores;

## **2.4 A Célula e o Módulo Fotovoltaico**

A célula fotovoltaica é a unidade básica para a conversão da radiação solar em energia elétrica. Ela é composta de elementos semicondutores, ou seja, com características intermediárias entre condutor e isolante. A substância mais utilizada na conversão fotovoltaica é o silício.

Geralmente obtido da natureza em forma de areia, o silício sofre processos industriais para a obtenção da sua forma cristalina e pura. No entanto, esta forma é isolante (sem elétrons livres), sendo necessária a inserção de impurezas no cristal de silício para torná-lo um semiconductor. Processo este que é denominado dopagem e é largamente usado na indústria de eletrônica.

Pelo processo da dopagem são criados dois tipos de cristais, um com a inserção de Fósforo, chamado “silício tipo p”, e outro com inserção de Boro, chamado de “silício tipo n”. Cada uma das partes é neutra isoladamente, no entanto, ao se criar uma junção desses dois cristais resulta em um campo elétrico constante na fronteira entre esses dois materiais. Essa junção é chamada de junção p-n e é mostrada na Figura 3.



**Figura 3 - Junção P-N**

Ao sofrer incidência de luz, esta junção é atingida por fótons e passa a se comportar como um condutor. Os elétrons captados dos fótons sofrem ação do campo elétrico fluindo de “P” para “N”. Instalando-se um condutor entre as camadas positiva e negativa, obtém-se uma corrente proporcional à incidência de luz. É importante lembrar que a célula fotovoltaica não armazena energia elétrica, ela somente converte luz em um fluxo de elétrons.

### **a. Silício Monocristalino**

Seu método de fabricação consiste na produção de barras de silício monocristalino que serão cortadas em pastilhas finas. As células formadas com esse material chegam a apresentar eficiência de conversão superior a 27%. A produção desse material exige um forno especial para este processo. Este tipo de silício é usado somente em aplicações que necessitem da alta eficiência oferecida por esta tecnologia, uma vez que o alto rigor do processo de fabricação resulta em elevados custos de produção.

## **b. Silício Policristalino**

Fundindo-se silício puro em moldes especiais, e depois o esfriando lentamente para que solidifique, resulta na produção do silício policristalino. Este processo resulta na formação de uma peça composta por mais de um cristal, o que resulta em uma eficiência de conversão inferior ao do silício monocristalino. A eficiência recorde obtida para esta tecnologia é de 20,4%

O fato de ser policristalino reduz o rigor da fabricação deste material, sendo assim mais barato que o silício monocristalino.

## **c. Silício Amorfo**

O silício amorfo é obtido pela deposição de uma fina camada de silício sobre vidro ou metal. Este tipo de silício é bem mais barato do que os outros dois citados, porém apresenta eficiência inferior, com recorde de 12,5%.

## **d. Células de Filmes Finos**

Geralmente feitos de silício amorfo hidrogenado, esses filmes são melhores aplicados sob luz artificial e para usos de baixo consumo de energia, como calculadoras e relógios.

No entanto, a flexibilidade, sua bela aparência e a versatilidade desse material tem ampliado o mercado de painéis fotovoltaicos, sendo usado em projetos arquitetônicos para revestimento de fachadas e telhados. Os filmes finos possuem eficiência recorde de 20,3%.

A eficiência destas e de outras tecnologias são mostradas na Tabela 1 e na Figura 4.

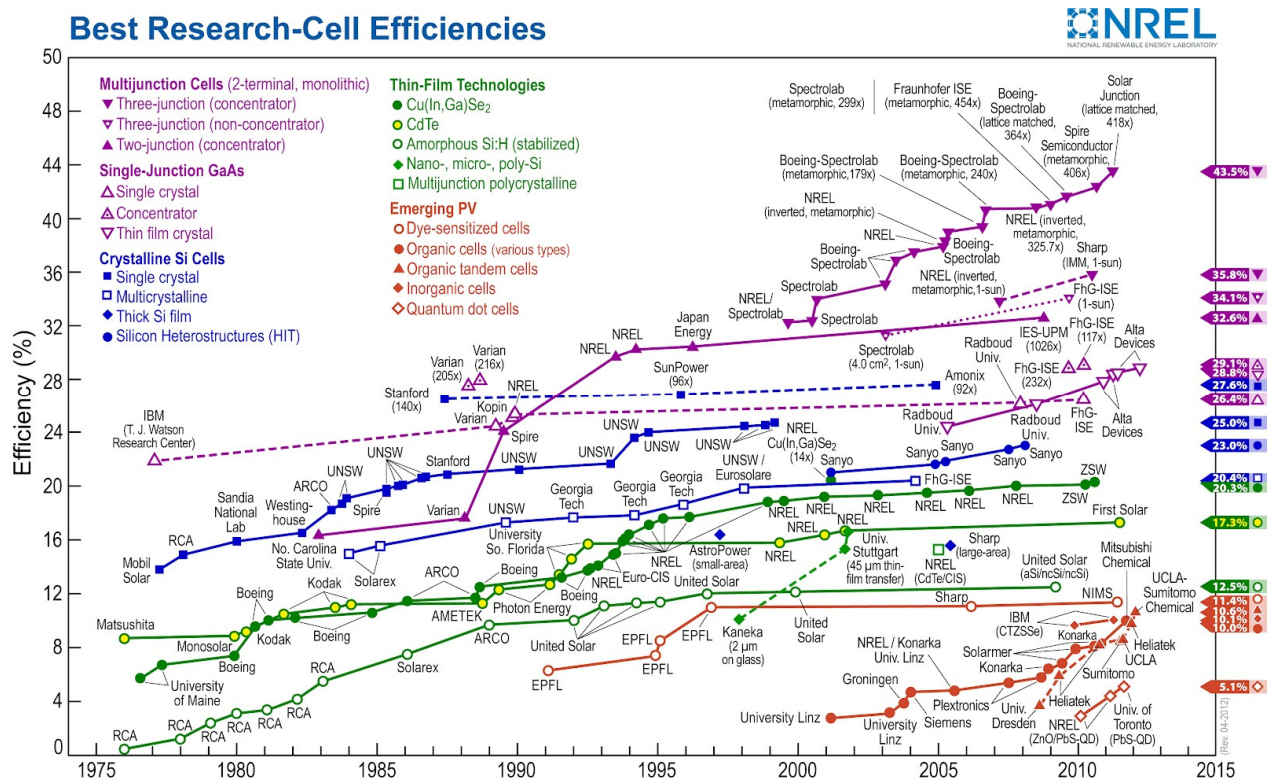
## **e. O Módulo Fotovoltaico**

As células fotovoltaicas produzem menos de 3  $W_p$  em uma tensão de 0,5V, valores que são muito baixos para qualquer uso. Para que se obtenham potências e tensões adequadas para as diferentes aplicações, as células são conectadas em configurações série-paralelo. Esse conjunto é chamado de módulo fotovoltaico, e gera uma potência de dezenas a centenas de  $W_p$ , podendo estes também ser organizados para fornecer até milhões de  $W_p$ .

**Tabela 1 – Tabela das eficiências recordes mais notáveis entre as tecnologias de células fotovoltaicas para incidência direta a 25°C.**

(Adaptada da original: “Terrestrial concentrator cell and module efficiencies measured under the ASTM G-173-03 direct beam AM1.5 spectrum at a cell temperature of 25°C” - Fonte: National Renewable Energy Laboratory - NREL)

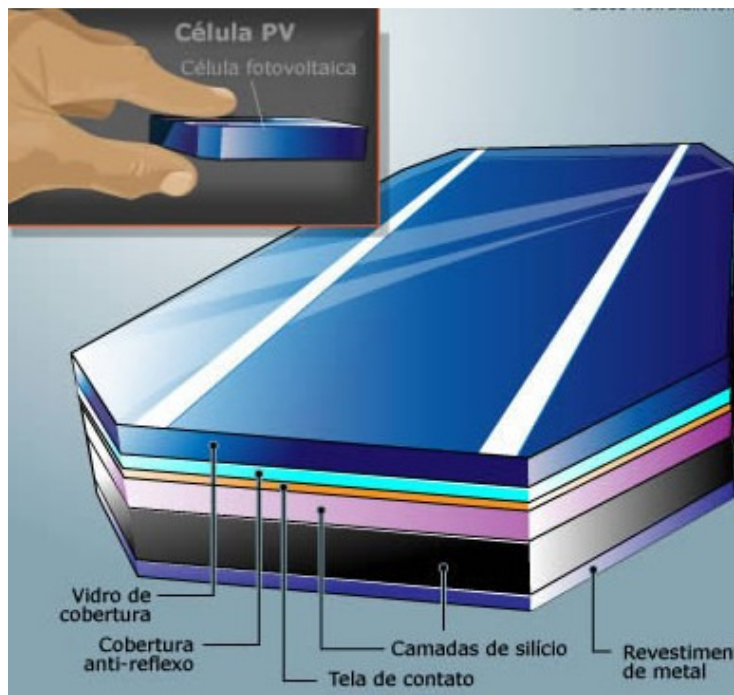
Classificação	Eficiência(%) <sup>a</sup>	Área (cm <sup>2</sup> ) <sup>b</sup>	Intensidade <sup>c</sup> (sois)	Centro de Teste
<b>Célula Única</b>				
GaAs	28,2 ± 1,0	0,203 (da)	213	Sandia (8/88) <sup>d</sup>
Si	27,6 ± 1,0	1,00 (da)	92	FhG-ISE (11/04)
CIGS (filme fino)	21,8 ± 1,5 <sup>f</sup>	0,102 (da)	14	NREL (2/01) <sup>d</sup>
<b>Células de Multijunção</b>				
GaInP/GaAs/Ge (2-terminais)	40,7 ± 2,4 <sup>e</sup>	0,267 (da)	240	NREL (9/06)
GaInP/GaAs/GaInAs (2-terminais)	40,8 ± 2,4 <sup>e,f</sup>	0,0976 (da)	140	NREL (7/08)
<b>Submódulos</b>				
GaInP/GaAs/Ge	27,0 ± 1,5 <sup>g</sup>	34 (ap)	10	NREL (5/00)
<b>Módulos</b>				
Si	20,5 ± 0,8 <sup>f</sup>	1875 (ap)	79	Sandia (4/89) <sup>d</sup>
<b>Excessões Notáveis</b>				
GaAs/GaSb (4-terminais)	32,6 ± 1,7 <sup>g</sup>	0,053 (da)	100	Sandia (10/89) <sup>d</sup>
InP/GaInAs (3-terminais)	31,7 ± 1,6 <sup>f</sup>	0,063 (da)	50	NREL (8/90) <sup>d</sup>
GaInP/GaInAs (2-terminais)	30,2 ± 1,2 <sup>g</sup>	0,1330 (da)	300	NREL/FhG-ISE (6/01)
GaAs (alta concentração)	26,6 ± 1,0	0,203 (da)	1000	Sandia (8/99) <sup>d</sup>
Si (grande área)	21,7 ± 0,7	20,0 (da)	11	Sandia (9/90) <sup>d</sup>



**Figura 4 - Eficiências registradas pelas diferentes tecnologias de células solares ao longo da história. (Fonte: National Renewable Energy Laboratory - NREL)**

O módulo fotovoltaico não é composto somente pelas células, tendo a sua composição feita de diversas camadas dispostas como na Figura 5. Estas camadas são: vidro de alta resistência, para proteger o módulo de eventuais impactos sofridos; uma cobertura antirreflexos, que irá maximizar a captação da luz incidida sobre o módulo; uma malha de contato bem fina responsável por fazer o contato elétrico entre as camadas de silício; as duas camadas de silício que formarão a junção p-n como descrito anteriormente; e uma armação de metal que será responsável pela sustentação do módulo como um todo.



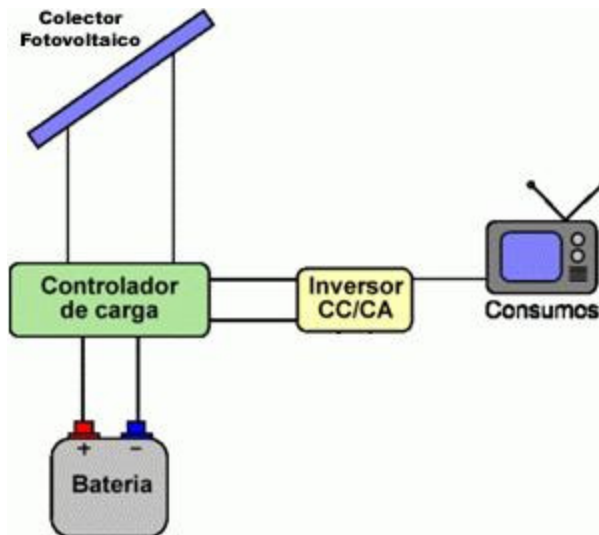


**Figura 5 - Camadas que compõem o módulo fotovoltaico.**

## **2.5 Os Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede (SFCR)**

A combinação de componentes eletrônicos, de armazenamento, proteção e de geração necessários para gerar energia elétrica a partir da energia solar é chamado de Sistema Fotovoltaico, tendo seu arranjo mostrado na Figura 6.

O arranjo mostrado é normalmente utilizado em sistemas isolados, onde a falta de uma rede exige a presença de um armazenador de energia, no caso uma bateria química, para suprir as cargas durante o período do dia em que a quantidade de luz solar não é suficiente para que os painéis gerem energia. Este período será denominado de período noturno, mesmo que na prática parte dele ainda sendo dia.



**Figura 6 - Esquema de um sistema fotovoltaico e seus componentes.**

Esse tipo de sistema é empregado principalmente em locais remotos com baixa densidade de carga, onde a transmissão de energia tem seu acesso impossibilitado por elementos físicos, ou por exigirem custos que superem os de instalação e manutenção dos sistemas fotovoltaicos.

Um exemplo desse tipo de sistema é mostrado na Figura 7. Este sistema foi instalado no RS em uma residência localizada em região remota.



**Figura 7 - Exemplo de sistema fotovoltaico instalado em um sistema remoto.**

Outra forma de se fazer a geração fotovoltaica é através de sistemas conectados à rede, os SFCR. Estes sistemas são mais comumente usados em regiões urbanas e tem como objetivo alimentar totalmente ou parcialmente um grupo de cargas.

Atualmente, os sistemas fotovoltaicos ligados à rede são divididos em dois tipos: as grandes centrais fotovoltaicas que são geralmente propriedade das distribuidoras e funcionam como um suporte ao sistema de distribuição para o aumento da estabilidade do sistema ou como uma alternativa de geração centralizada aos combustíveis fósseis e nucleares; e as pequenas unidades de geração instaladas diretamente no consumidor final, conhecidas como Edificações Solares Conectadas à Rede, ou EFCR (Rodríguez, C. R. C., 2002). Estas geralmente possuem capacidade de geração próxima ao consumo do proprietário, tendo como objetivo a redução da dependência do cliente em relação à concessionária. É importante lembrar que neste segundo caso, normalmente os excedentes de energia são vendidos à rede a um valor pré-determinado por contratos comumente padronizados para cada distribuidora. Em outros casos este excedente é utilizado como crédito para compensar a energia que será consumida futuramente pelo mesmo usuário.

Quando falamos de sistemas conectados à rede, os EFCR foram pouquíssimos utilizados de início, dando-se preferência às grandes centrais de geração a partir da luz solar. No entanto, vantagens como a geração próxima à carga, redução das perdas e dos carregamentos envolvidos na transmissão e distribuição de energia, e a grande redução nos custos de instalação dos EFCR vem tornando esse tipo de geração cada vez mais frequente, fato que pode ser notado no aumento acentuado do número de sistemas distribuídos na rede.

### **2.5.1 Componentes do SFCR**

Como peculiaridade, temos que os EFCR são geralmente instalados em paralelo com a rede, permitindo que o proprietário do sistema seja alimentado tanto pelo sistema fotovoltaico quanto pela rede, garantindo assim a alimentação das cargas mesmo em períodos de baixa incidência de luz. Atividade esta que é possível graças ao uso de componentes de eletrônica de potência na saída do módulo.

Os elementos necessários para o devido funcionamento dos SFCR são:

- Módulo fotovoltaico;
- Controlador de carga: responsável por controlar os valores de tensão e corrente fornecidos à bateria e ao inversor. É o equipamento responsável por

impedir que valores muito altos, ou muito baixos passem para a bateria e a rede, o que poderia danificar a rede;

- Banco de baterias;
- Inversor de frequência;

Os inversores de frequência são componentes eletrônicos que convertem tensão contínua em tensão alternada. Podem ser alimentados por diversos valores de tensão, sendo possível assim, alimentá-lo com uma tensão igual à de alimentação de uma bateria. A saída é normalmente dada em 120/127 ou 220 V em corrente alternada, e frequência de 50 ou 60 Hz.

Os inversores disponíveis no mercado atualmente podem oferecer saídas com diferentes níveis de distorção em relação a uma senóide, sendo possível obter saídas quase idênticas a uma senóide perfeita, bem como saídas em onda quadrada. A eficiência e a distorção harmônica de cada inversor variam drasticamente, podendo chegar a eficiências na ordem de 95%, e distorção harmônica indo de 40% para onda quadrada a 5% para inversores com saída senoidal (Rodríguez, C. R. C., 2002). Como neste trabalho o objetivo é usar um sistema fotovoltaico acoplado à rede, consideraremos inversores com saída senoidal, pois é o formato de onda exigido pelas distribuidoras de energia.

Uma vez que o sistema estará conectado a rede, são necessárias algumas medidas de segurança para evitar danos aos equipamentos da rede. Os principais aspectos da qualidade a serem acompanhados são:

- A distorção harmônica: esta deve ser mantida inferior a 5% de acordo com a norma IEEE 519, onde as harmônicas não devem superar valores pré-determinados em tabela;
- O fator de potência deve ser continuamente supervisionado. Em geral não há cobrança sobre o fator de potência de consumidores residenciais, porém os SFCR podem apresentar valores consideráveis de demanda de potência reativa, tornando esse fator significativo;
- As variações da luz incidente sobre o módulo podem causar variações instantâneas sobre os valores de tensão de saída. Como consequência, podem-se ter flutuações de tensão na rede. Para evitar esse problema, é necessário que o inversor disponha de um sistema de controle interno, evitando assim, que o painel opere fora da faixa de segura, geralmente entre 88% e 106% da tensão nominal.

Para que possamos fazer considerações sobre os EFCR como um gerador equivalente, devemos calcular o fator de capacidade (FC) do sistema. Este fator é calculado a partir da relação entre toda a energia gerada em um período de tempo (geralmente de um ano) pela energia incidida sobre os painéis, onde o cálculo desse valor é feito pela multiplicação da irradiação solar ( $\text{Wp/m}^2$ ) e a área total dos módulos fotovoltaicos.

O FC é composto pela irradiação solar e do fator de desempenho (razão entre a potência gerada e a potência nominal do sistema). Na prática o fator de desempenho (PR) nunca alcançará o valor unitário, ficando geralmente entre 0,60 e 0,80. A não obtenção da totalidade da energia que o sistema poderia gerar é causada pela combinação de diversos fatores, como:

- i. Perdas no inversor e nos condutores do sistema;
- ii. Indisponibilidade do sistema para manutenção;
- iii. Sombreamento sobre o sistema seja por nuvens ou por acúmulo de poeira sobre o painel;
- iv. Redução da eficiência do módulo devido ao aquecimento do mesmo a temperaturas acima de  $25^{\circ}\text{C}$  (temperatura em que os fabricantes medem a eficiência destes);
- v. Não operação constante no ponto de máxima eficiência;

Esses dois fatores são de extrema importância, pois por meio destes é possível se analisar o sistema de uma forma abrangente, podendo-se calcular tanto a incidência solar como a eficiência do sistema com o trabalho destes valores.

## **2.5.2 Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede no Brasil**

No Brasil, quase a totalidade dos sistemas fotovoltaicos são instalados em sistemas isolados, sendo responsáveis por alimentar pequenos grupos ou pequenas cargas com o auxílio de acumuladores de energia, baterias. Atualmente, somente uma pequena fatia dos sistemas instalados no território nacional é conectada à rede.

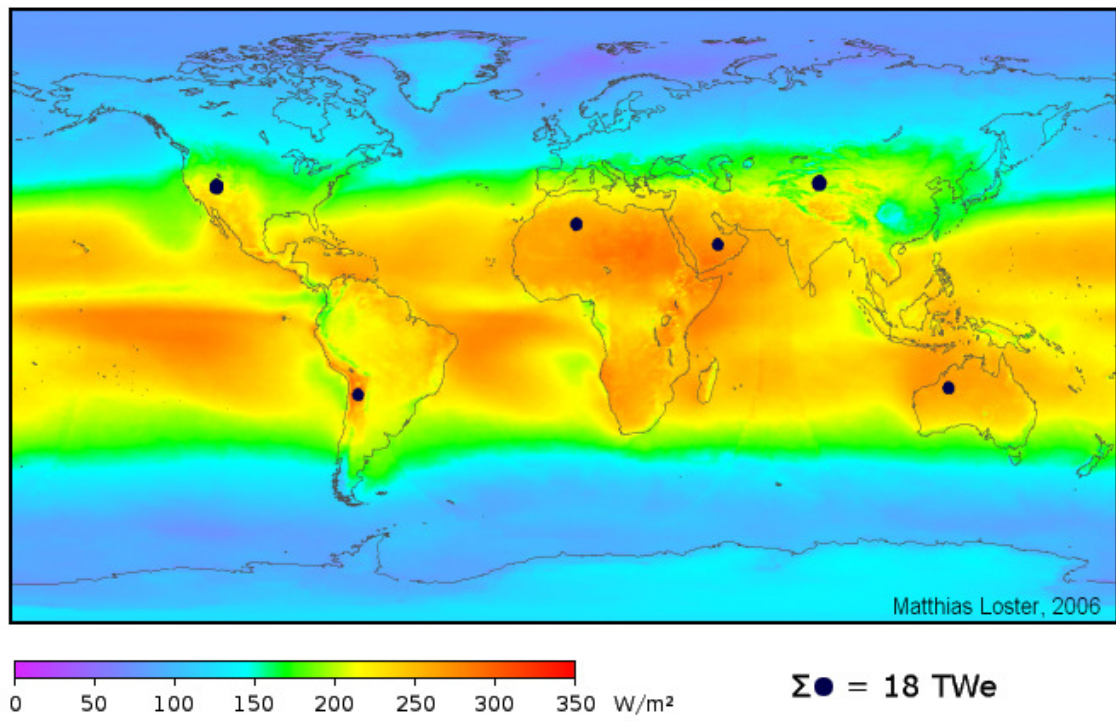
Na Tabela 2, podemos ver 39 sistemas instalados no Brasil, que totalizam um potência de  $161,32 \text{ kW}_p$ , dos  $1.750 \text{ kW}_p$  instalados atualmente no país. 1 MW desta potência é referente à usina de Tauá, da empresa MPX, enquanto que o restante é relativo a todos os outros sistemas instalados no território brasileiro. A tabela possui uma disparidade de quase

590 kW que é devida a não serem conseguidas informações atualizadas sobre os sistemas instalados após o ano de 2010.

**Tabela 2 - Potência instalada de SFCR no Brasil até 2010 (Tabela Adaptada de Benedito, R., 2010).**

LOCAL	SISTEMAS	POTÊNCIA (kW <sub>p</sub> )
Universidade Federal de Santa Catarina – LabSolar	3	13,2
Universidade de São Paulo – LSF	4	16,1
Universidade Federal do Rio Grande do Sul	1	4,8
Universidade Federal de Pernambuco – Grupo FAE	3	5,7
Universidade Federal de Juíz de Fora	1	31,7
Universidade Federal do Pará – GEDAE	1	1,6
Universidade Estadual de Campinas – LH2	1	7,,5
CEPEL – Centro de Pesquisas em Energia Elétrica	1	16,0
CELESC – Centrais Elétricas de Santa Catarina	3	4,2
CEMIG – Companhia Energética de Minas Gerais	4	11,0
Eletrosul Centrais Elétricas S.A.	2	14,3
Tractebel Energia	3	6,0
Intercâmbio Eletro Mecânico – Porto Alegre	1	3,3
Clínica Harmonia – São Paulo	1	2,9
GREENPEACE – Sede São Paulo	1	2,9
Residências Particulares	2	3,9
Solaris (Leme- SP)	1	1,0
Grupo Zeppini	2	17,1
<b>Total</b>	<b>35</b>	<b>161,32</b>

A Tabela 2 mostra que a potência instalada no Brasil é muito pequena para a incidência solar presente no nosso território variando entre 4,8 e 6,0 kWh/m<sup>2</sup>. O pouco aproveitamento deste tipo de energia fica ainda mais gritante quando comparamos o Brasil à Alemanha, que somente em algumas regiões já possui mais de 2,5 GWp instalados, mesmo com sua incidência solar máxima sendo de 3,4 kWh/m<sup>2</sup>, 30% menor que a menor incidência do território brasileiro. A Figura 8 nos mostra a incidência solar no mundo.



**Figura 8 - Incidência solar no Mundo**

## Capítulo 3

### 3.1 Custos e Viabilidade Econômica dos SFCR

O alto investimento inicial necessário para a instalação dos SFCR é o principal gargalo para o desenvolvimento deste mercado no Brasil, desacelerando o crescimento do setor mesmo que este já seja comprovadamente um investimento lucrativo em longo prazo e seus custos de manutenção e operação serem praticamente nulos.

O custo para se instalar um SFCR é composto por: módulos, inversor, os demais elementos do sistema (cabos, proteção, chicotes elétricos e a estrutura de sustentação) e os serviços de instalação, que serão analisados com seus custos em euros para posterior nacionalização dos custos considerando-se os impostos de importação e o comércio interno. A análise inicial em euros se dá pela importância do mercado europeu no setor e por haver uma quantidade grande de dados recentes sobre os custos de cada elemento disponíveis para pesquisa.

Neste trabalho usaremos o levantamento de preços feito por uma publicação da *PHOTON International* feita em 2011. O estudo mostra que os módulos asiáticos vendidos na Alemanha já romperam a barreira do 1 €/Watt, atingindo a média de 0,98 €/Watt com valores oscilando entre 0,70 €/Watt e 1,25 €/Watt. Estes resultados foram obtidos pelo levantamento do preço de 7.153 modelos.

O levantamento abrange ainda os custos dos inversores, que tiveram 1.301 modelos do mercado alemão avaliados, com uma média de custo de 0,19 €/Watt para dispositivos com potência acima de 10 kW. Notou-se uma dispersão considerável nos valores, variando entre 0,11 €/Watt e 0,24 €/Watt.

O custo dos demais elementos do sistema e dos serviços, que chamaremos de “demais custos”, possuem valores muito variáveis, necessitando avaliar cada local de instalação para que se possa fazer uma estimativa mais correta. Por esse motivo, consideraremos que os demais custos serão da mesma ordem da soma dos valores levantados para os inversores e os módulos juntos, ou seja, 1,17 €/Watt, o que resulta em um custo total de 2,34 €/Watt.



### 3.1.1 Custos para aquisição no Brasil

Uma análise econômica nos permite calcular o custo final de instalação por watt no Brasil considerando a compra de equipamentos importados aos custos dados na seção anterior e aplicando os tributos sobre produtos importados no Brasil.

Para calcular o valor final, devemos inserir:

- a. Os impostos de importação (12% sobre módulos e 14% sobre os inversores);
- b. Incidência de do Imposto sobre Produtos Industrializados (IPI). Sendo 0% sobre os módulos, conforme Tabela de Incidência do Imposto sobre Produto Industrializado (TIPI) anexa ao decreto nº 7.660, de 23/12/2011, e 15% sobre os inversores;
- c. Incidência de ICMS sobre o inversor, variando de um estado para o outro;
- d. Incidência de PIS (1,65%) e COFINS (7,6%) sobre módulos e inversores. O efeito combinado equivale a 10,2%;
- e. Serviços alfandegários;
- f. Aquisição de projetos e os demais elementos do sistema;

Considerando um sistema de 100 kWp, com todos os custos de nacionalização listados, o valor em R\$/Watt para os módulos e os inversores saem por aproximadamente 3,87 R\$/Watt para câmbio de 2,30.

Para os demais componentes do SFCR, consideraremos a aquisição destes no mercado interno, sendo necessário que consideremos três cenários diferentes, o residencial (3 kW), o comercial (30 kW) e o de usinas (30 MW). Para o caso residencial, que é o nosso foco neste trabalho, obtemos que os cabos e a proteção possuem custo de 0,75 R\$/Watt, enquanto o sistema de fixação e a estrutura, bem como os demais custos, relativos a serviços, são de 1,25 R\$/Watt.

Quando acrescentamos os gastos relativos à instalação, concluimos que o valor total de um sistema fotovoltaico conectado à rede em níveis residenciais no Brasil é de 7,12 R\$/Watt. Deve-se notar, contudo, que nestes cálculos não foram considerados os valores relativos as margens de lucro presentes quando há intermediários, sendo considerado que o comprador final adquira os produtos diretamente dos fornecedores, adquirindo os componentes sem o auxílio de uma empresa especializada. No mercado brasileiro, o custo de instalação quando há intermediários sobe para, em média, 10 R\$/Watt. Este estudo acerca dos custos de aquisição dos componentes do SFCR pode ser acompanhado na íntegra no trabalho

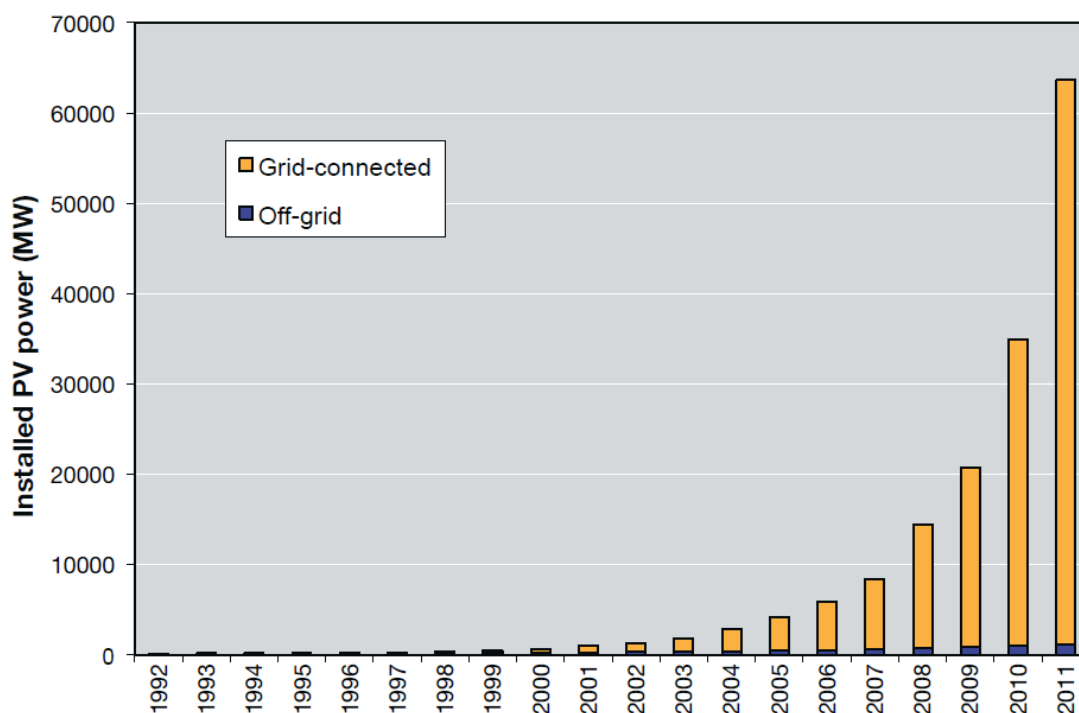
“Proposta para Inserção da Energia Solar Fotovoltaica na Matriz Energética Brasileira”, da ABINEE (Associação Brasileira da Indústria Elétrica e Eletrônica).

### **3.1.2 PVPS (Photovoltaic Power Systems Programme)**

O programa faz parte da IEA (*International Energy Agency*) e foi criada pela parceria dos vinte países e membros com o intuito de realizar catorze grandes projetos, chamados de Tasks, onde seis destes projetos já foram concluídos. O grupo é composto de 27 membros, que são: Austrália, Áustria, Bélgica, Canadá, China, EPIA (*European Photovoltaic Industries Association*), European Union, França, Alemanha, Israel, Itália, Japão, Coreia, Malásia, México, Holanda, Noruega, Portugal, SEIA (*Solar Energy Industries Association*), SEPA (*Solar Electric Power Association*), Espanha, Suécia, Suíça, Turquia, Reino Unido e os Estados Unidos.

Os países membros recebem um conjunto de metas do programa, estas devem ser desenvolvidas internamente, e culminam nos objetivos finais da PVPS. Para que se possam organizar as atividades, cada país possui um representante no programa, sendo cada um destes o responsável tanto por coordenar as atividades desenvolvidas no seu país, quanto por enviar os relatórios do que foi feito para a IEA-PVPS. Todas as informações a respeito dos projetos, objetivos e *Tasks*, tanto sobre o que já foi feito quanto sobre o que se planeja fazer, estão disponíveis no site do programa.

O programa vem dando resultados significativos para a geração fotovoltaica, sendo o maior movimento em prol desta tecnologia. Este crescimento é mostrado no Figura 9, que nos mostra o crescimento da potência instalada em sistemas fotovoltaicos pelos membros do PVPS (*Photovoltaic Power Systems Programme*) entre 1992 e 2011.



**Figura 9 - Evolução da potência fotovoltaica instalada no PVPS (Fonte: <http://www.iea-pvps.org>)**

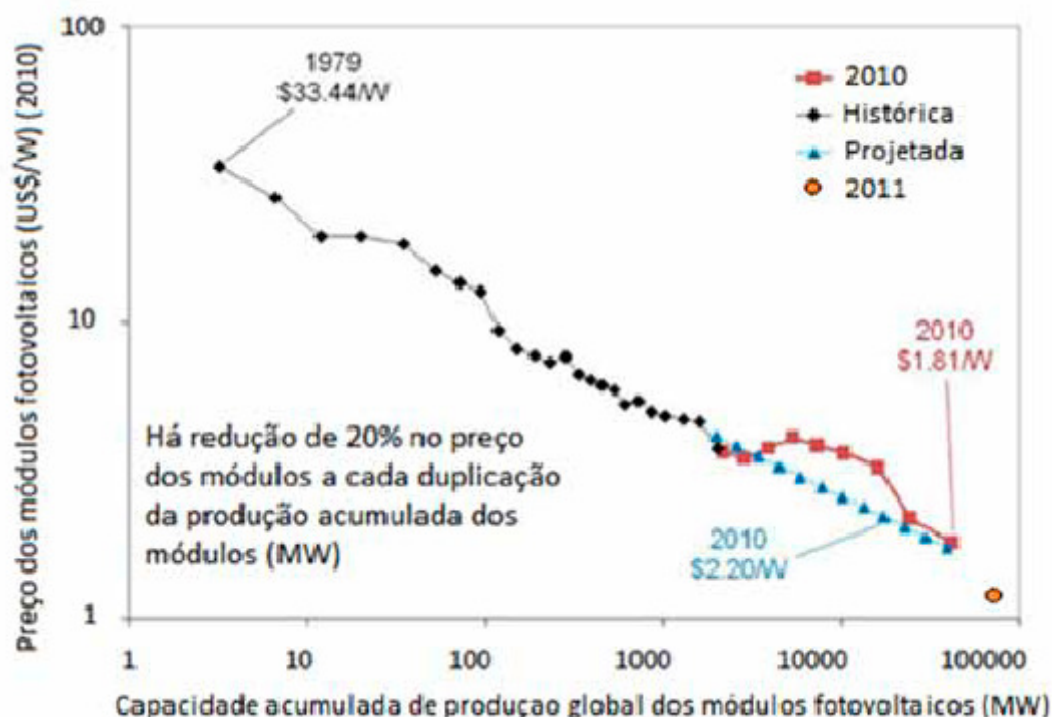
Da Figura 9, temos que só em 2011 os países membros do PVPS instalaram aproximadamente 28 GW, praticamente dobrando a potência instalada no ano anterior, e subindo o acumulado instalado para mais de 63 GW. De todo o potencial instalado, por volta de 60% foi instalado somente na Alemanha e na Itália. Se somarmos os valores instalados na China, EUA, França e Japão, chegamos a 86% da potência instalada em 2011, sendo estes seis, os únicos países a alcançarem a faixa de mais de 1 GW instalado neste ano. Um resultado satisfatório se comparado com 2010, onde somente a Alemanha, a Itália e a República Tcheca já haviam ultrapassado esta marca.

Ainda observando o gráfico da Figura 9, pode-se ver que a potência instalada com sistemas fotovoltaicos não conectados à rede é muito pequena, representando menos de 0,4% de todo o potencial instalado em 2011 nos países membros do PVPS.

### 3.1.3 Evolução dos preços dos SFCR

Nos últimos 30 anos os módulos fotovoltaicos têm sofrido uma redução significativa em seus preços, na faixa de 8% ao ano. Comportamento este, que pode ser colocado em um gráfico juntamente com a capacidade acumulada de produção global nos fornecendo a taxa de curva de aprendizado tecnológico, mostrada na Figura 10. Como esperado, podemos ver no

gráfico que o aumento da produção mundial resulta na redução dos preços dos painéis, sendo essa igual a 20% dos custos para cada duplicação da capacidade acumulada global (Perlotti *et al*, 2012).



**Figura 10 – Curva de aprendizado dos módulos fotovoltaicos (Fonte: Proposta para Inserção da Energia Solar Fotovoltaica na Matriz Elétrica Brasileira, 2012)**

Utilizando como base a curva e diferentes taxas de crescimento do consumo de painéis fotovoltaicos ao ano, é possível fazer previsões quanto aos preços dos módulos nos momentos futuros. Os resultados obtidos indicam que:

1. Em 2020 o consumo anual dos módulos variará entre 39 e 97 GW/ano, sendo o segundo resultado 150% do acumulado até Junho de 2012;
2. Em 2020 o consumo acumulado estará entre 369 GW e 612 GW dependendo do cenário da simulação;
3. A queda nos preços ficará entre 40 e 50%, o que resultará em módulos que custem \$0,5/W e SFCR na ordem de \$1/Watt, caso consideremos esta mesma curva para os outros componentes do sistema;

Estes resultados não são somente esperados pelos elementos do mercado fotovoltaicos. Há organizações trabalhando para alcançar tal redução nos preços dos painéis.

Um bom exemplo é o seminário “Sistemas Fotovoltaicos a \$1/Watt” oferecido pelo Departamento de Energia dos Estados Unidos, que estabeleceu como meta para 2017 que o custo do Watt fotovoltaico passe a ser somente 1 dólar.

Um segundo seminário americano, realizado pelo *Rocky Mountain Institute*, buscou definir todos os possíveis elementos de onde se pudesse reduzir conseguir reduções para os custos finais dos SFCR. O resultado diz que a combinação de todas as reduções relativas a estudos, papelada e permissões refletiria em uma redução dos custos do Watt para \$1,28. Sendo que estes resultados poderiam ser alcançados em curto prazo.

Considerando a simulação e as afirmações feitas nos seminários, é possível afirmar que num prazo de 10 anos ou menos o custo do dos SFCR cairão para o patamar de \$1/Watt, mostrando que a entrada da geração de energia elétrica a partir da irradiação solar na matriz energética mundial se intensificará na próxima década.

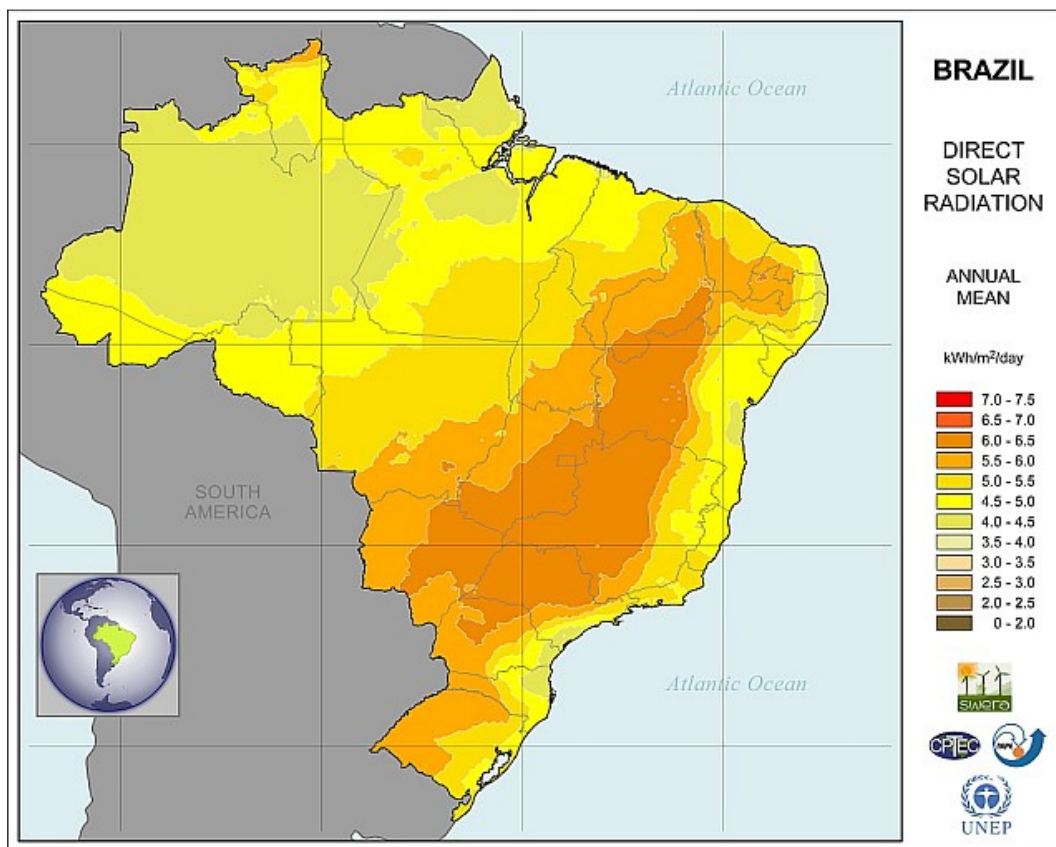
Estas afirmações deixam claro que o Brasil deve se preparar para o futuro do mercado energético, uma vez que os estudo mostram que com a irradiação presente no Brasil, a energia de origem solar pode chegar ao custo de produção de 125 R\$/MWh, bem próximo aos custos das fontes convencionais de geração no país e valores bem abaixo das tarifas cobradas pelas concessionárias brasileiras (Perlotti *et al*, 2012).

### **3.2 Modelos de Incentivo Governamental**

O fator que faz com que a energia fotovoltaica seja cara é quase que exclusivamente dado pelos altos custos dos equipamentos necessários, pois uma vez que o sistema esteja operante, a manutenção é mínima e a fonte de energia (luz solar) é gratuita. No Brasil, o custo médio de instalação do  $W_p$  ainda é muito alto, estando no patamar de 10 R\$/ $W_p$ . Este alto custo e a falta de linhas de crédito específicas fazem com que o tempo de retorno do investimento realizado seja entre 7 e 15 anos, dependendo da região do país em que o sistema for instalado. Um tempo de retorno tão grande acaba desestimulando o capital privado, e consequentemente o desenvolvimento deste mercado que é de grande importância para a matriz energética nacional.

Uma vez que gerar energia a partir da luz solar é tão caro e desinteressante para o investidor privado, é justificável questionar o como foi feito para que países como a Alemanha, Itália, Suíça, Espanha e EUA tenham instalado uma potência considerável nos

últimos anos, e o mais importante, tendo a maior parte desse potencial sido instalado com investimento privado, mostrando que se trata de um investimento lucrativo.



**Figura 11 - Níveis de incidência solar no Brasil (Fonte: <http://www.leb.esalq.usp.br/atlasolar.html>)**

O que aconteceu nestes países foi que os líderes políticos perceberam a importância estratégica que esta tecnologia passou a representar no mundo, o que os levou a traçar metas relativas à geração fotovoltaica, e para que estas fossem alcançadas, foi, e ainda é necessário que o governo tome ações positivas para o mercado fotovoltaico com o intuito de auxiliá-lo a se desenvolver até que este seja capaz de manter-se por conta própria.

Os modelos de incentivo são variados, havendo grandes diferenças entre os sistemas criados em um país ou no outro. Dentre os principais modelos criados, podemos citar:

Uma ferramenta historicamente muito utilizada para estimular o desenvolvimento de um mercado são os incentivos fiscais e creditícios, aplicados por iniciativa governamental para aumentar a atratividade de setor por meio da redução dos impostos sobre um dado produto, ou pela criação de linhas de crédito a juros bem abaixo do mercado. No caso do

mercado fotovoltaico, estes incentivos financeiros foram ou são aplicados nos EUA, Espanha, Japão, França, Portugal, Áustria, Coreia, Itália, Dinamarca e Grécia.

### **3.2.1 Os incentivos financeiros nos EUA**

Nos EUA os incentivos financeiros são um dos principais meios de incentivo para a energia de origem solar fotovoltaica, estes são representados tanto pela obtenção de crédito em linhas especiais, quanto pela redução de impostos.

As linhas de crédito a baixos juros são encontradas nos estados da Califórnia, Colorado, Maine, Nova York e Wisconsin, e representam um apoio significativo na compra de um SFCR uma vez que o investimento inicial necessário é uma das principais barreiras para se aumentar o uso desta tecnologia de GD. Em Nova York, as taxas caem em média 4% inferiores às aplicadas a empréstimos normais caso a aplicação do dinheiro seja em sistemas fotovoltaicos. Em Orlando os empréstimos podem chegar a US\$ 20.000,00 com taxas de 2 a 5,5% para períodos de 10 anos (Perlotti *et al*, 2012).

Os incentivos tributários são encontrados de duas formas nos EUA, podendo tanto ser aplicados sobre os impostos sobre edifícios de acordo com a instalação de sistemas, podendo chegar a 20% dos gastos com o sistema a serem abatidos ao longo de quatro anos, como em Nova York, Oregon, Arizona, Maryland e Ohio. Outra forma é a redução ou remoção dos encargos aplicados sobre os produtos alvo, reduzindo assim o custo final dos mesmos.

### **3.2.2 Dual Metering**

Em 1978, o FERC (*Federal Energy Regulatory Commission*) estabeleceu nos EUA que as distribuidoras eram forçadas a comprar energia de origem renovável sempre que os seus preços fossem menores do que os custos evitados das companhias elétricas (Rodríguez, C. R. C., 2002). Consequentemente, criou-se um modelo de contrato chamado *Dual Metering*, que passou a ser estabelecido entre os consumidores que possuíssem geração própria e as distribuidoras. O contrato permitia que as distribuidoras comprassem a energia gerada excedente.

O modelo determinava que as distribuidoras instalassem dois medidores na residência, um que medisse todo o excedente de energia do consumidor, e o outro para medir a quantidade de energia consumida proveniente da rede. A concessionária então comprava o excedente pelo mesmo valor dos custos evitados, que representam de 20 a 35% do valor da

tarifa cobrada pela energia da rede. Este valor era abatido da quantia a ser cobrada devido a energia a rede utilizada pelo consumidor, pagando ou recebendo do consumidor dependendo do balanço final dos dois valores.

Uma vez que a energia era comprada a baixos preços, os consumidores passaram a preferir consumir a energia no momento em que é gerada para que se vendesse o mínimo de energia possível para a distribuidora e houvesse menor perda de valor agregado da energia autogerada. Outro aspecto deste modelo foi o fato de ele criar custos adicionais para a distribuidora, uma vez que é necessária a adição de um medidor, a cobrança de uma conta extra e o processamento de um dado adicional.

### **3.2.3      *Net Metering***

Este modelo consiste na aplicação de um medidor bidirecional capaz de medir o fluxo total de energia dentro de um período, ou seja, em caso de o consumo ser maior que a energia gerada, o medidor irá medir a quantidade de energia fornecida ao consumidor normalmente, já para o caso oposto, onde a energia gerada é superior ao consumo, o gerador irá se mover no sentido inverso ao convencional, registrando assim a energia fornecida à rede.

Ao final de um período pré-determinado (geralmente de um ano), o medidor é verificado e só então é feito a cobrança, em caso de consumo de energia, ou o pagamento, em caso de fornecimento de energia. No caso de o consumidor ter fornecido mais energia à rede do que consumiu, a concessionária deve agir de acordo com o que for determinado pela lei em vigor, que pode ser tanto pagar ao cliente o valor dos custos evitados, o fornecimento de um crédito para que o consumidor o use no período seguinte, ou, como em alguns casos, a distribuidora não dá nenhuma compensação ao consumidor.

Este modelo foi adotado por iniciativa de alguns estados americanos que visavam desenvolver a economia ou distribuidoras que juntamente com seus clientes buscavam um maior cuidado ambiental. Este vem se mostrando uma forte política de incentivo para a geração fotovoltaica, uma vez que se estima que mais de 3.500 sistemas tenham sido instalados devido aos incentivos do programa.

O modelo segue o padrão explicado acima em todos os estados. No entanto, algumas características são modificadas de um estado para outro, sendo as mais marcantes:

- Tecnologia de cogeração utilizada: dependendo do estado, a fonte de energia é levada em conta para que seja aceita no programa;



- Tipo de consumidor elegível: o *Net Metering* pode ser um programa aberto somente para consumidores residenciais, bem como ser expandido para consumidores comerciais. Em alguns casos, o modelo é aplicável para qualquer tipo de consumidor;
- Limite de capacidade instalada: geralmente são determinados limites de capacidade instalada para os clientes, sendo esse limite geralmente inferior a 100 kW. Em alguns casos a distribuidora estipula também um limite total de capacidade instalada de GD, ou seja, o somatório de todas as capacidades instaladas dos consumidores não deve passar um teto, normalmente fixado em 0,1% da demanda de horário de pico da companhia;

Este modelo de geração representa uma ótima solução para incentivar os consumidores a investir em geração, já que se trata de um modelo com baixíssimo custo de aplicação. Em adição, representa uma ótima oportunidade de redução da conta de energia destes consumidores e também uma oportunidade de a concessionária melhorar o seu fator de carga, a tensão em pontos distantes da rede e reduzir as perdas com T&D da energia (Rodríguez, C. R. C., 2002).

Algumas distribuidoras temem ter de aumentar suas tarifas para suprir as quantias não arrecadadas pela energia gerada pelos consumidores e com isso incentivar mais a autogeração criando assim um ciclo vicioso que leve à quebra das mesmas. Este cenário não é inteiramente não fundamentado, justificando assim a criação dos já descritos, tetos de GD para cada distribuidora. Porém deve-se lembrar da extrema importância de que sejam feitos estudos da rede antes de se determinar este teto, portanto, caso o Brasil venha a se interessar pelo *Net Metering* deverão ser feitos estudos a cerca do sistema brasileiro antes de se definir valores limites para a capacidade instalada.

### **3.2.4      *Feed-in Tariffs***

Este programa é o principal instrumento de incentivo às tecnologias renováveis conectadas à rede na Europa, sendo em alguns países, aplicada não somente para o caso da geração fotovoltaica, mas também para a eólica e a biomassa.

As *Feed-in Tariffs* são as taxas pagas pelas concessionárias aos consumidores que possuem geradores distribuídos dos tipos determinados pelo país em que a energia for gerada. As distribuidoras são obrigadas a comprar toda a energia gerada a um valor acima do pago pela energia de fontes convencionais, este valor é chamado de *buy-back rate*. Os preços

pelos quais o kWh é comprado variam de um país para o outro, respeitando as tarifas locais, o local em que o gerador distribuído é instalado, seja na ponta ou na base, as tarifas sazonais e a agressividade do programa em cada país. Nos locais onde o incentivo é mais incisivo, o *buy-back rate* chega a ser até dez vezes ao que seria pago pela energia convencional, e em alguns casos a empresa operadora da rede é obrigada a comprar a totalidade da energia gerada pelo consumidor, e não somente a quantidade injetada na rede.

O programa tem como intuito estimular o crescimento do mercado fotovoltaico do país, por meio da compra por estas taxas especiais, o consumidor passa a ter a geração fotovoltaica como uma possibilidade não somente de reduzir sua conta de energia, mas também de receber lucro em médio prazo, uma vez que o *buy-back rate* faz com que o sistema se pague em um tempo muito menor do que o esperado.

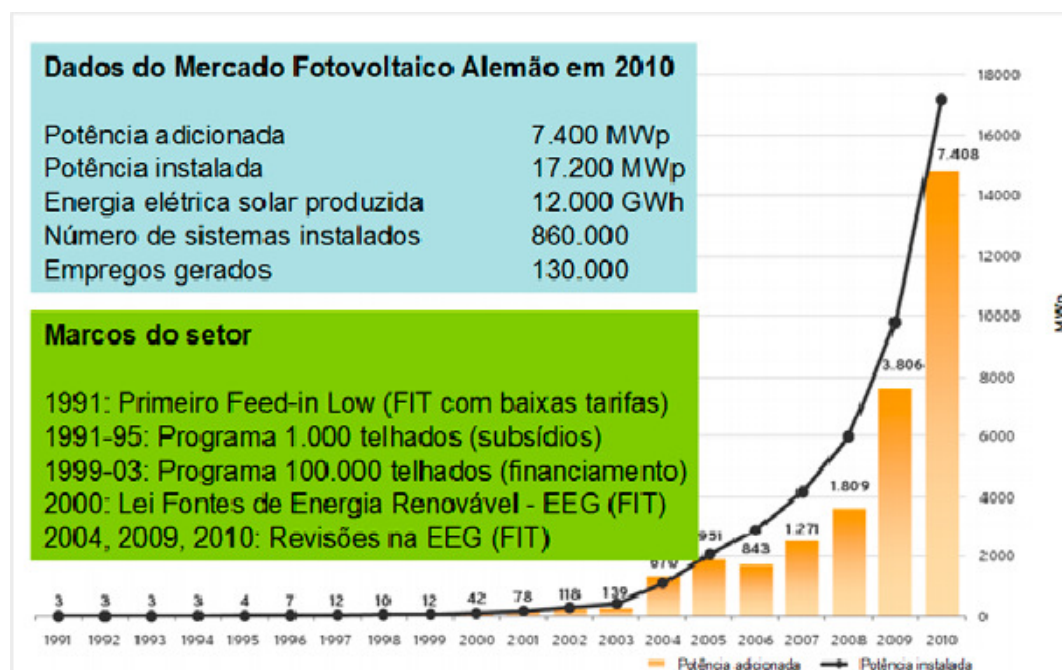
A aplicação deste programa pode ser feita tanto por iniciativa governamental, como pela iniciativa das próprias distribuidoras. O primeiro caso ocorreu na Espanha, Itália, Alemanha e Portugal, onde através da criação de leis nacionais, as concessionárias foram obrigadas a comprar energias de fonte renovável a preços especiais. As iniciativas das distribuidoras é geralmente uma resposta aos interesses dos clientes, que buscam tornar seu consumo mais sustentável. Exemplos destes casos são presentes na Suíça, Japão e Holanda, sendo importante dar um destaque para o programa suíço *solar stock Exchange*, onde a distribuidora compra toda a energia fotogerada e revende para consumidores que desejem comprar energia de origem solar. Este programa atingiu 21.000 usuários no início de 2000 e seus contratos já somavam 3,5 GWh ao ano.

Como dito, este modelo permite uma recuperação mais rápida dos altos custos iniciais necessários para a geração renovável, sendo uma excelente ferramenta de apoio ao crescimento deste mercado. O programa ainda é considerado bem mais saudável que os subsídios para compra dos sistemas, isso é causado pelo fato de o *Feed-in Tariffs* estar ligado à energia injetada na rede, e não à capacidade instalada do sistema, ou seja, os proprietários do sistema não buscarão somente instalar um sistema de grande potência, e sim obter um sistema eficiente e otimizado (Rodríguez, C. R. C., 2002).

### **O caso do *Feed-in Tariffs* na Alemanha**

A Alemanha adotou o mecanismo de tarifas prêmio (*Feed-in Tariffs*) em 2000, e logo se tornou um dos principais mercados para a indústria fotovoltaica mundial. Como resultados gerais, pode-se dizer que o setor fotovoltaico alemão se tornou forte, chegando a

produzir 12.000 GWh só em 2010, representando mais de 2% da energia total gerada no país. Os módulos atenderam a demanda de 3,4 milhões de residências, evitaram a emissão de 6,2 milhões de toneladas de CO<sub>2</sub> na atmosfera e ainda geraram 8 novos empregos por MWp instalado no ano (Perlotti *et al.*, 2012). Na Figura 12 temos alguns dados sobre o mercado fotovoltaico Alemão até 2010.



**Figura 12 - Potência fotovoltaica instalada na Alemanha até 2010**

O estímulo de mercado é respondido com a presença de 10 mil empresas envolvidas na cadeia fotovoltaica, desde a fabricação do painel, até a instalação e integração com a rede. Como esperado, o investimento privado resultou na queda dos preços dos SFCR na Alemanha, tendo caído pela metade em 5 anos, atingindo, sem os impostos, o custo de 2,2 euros por kWp para um EFCR com mais de 100 kWp.

### 3.2.5 *Buydown*

O programa *Buydown* pode ser definido, concisamente, como um fundo governamental destinado à concessão de subsídios (rebates) em efetivo para poder reduzir, de maneira eficaz, o custo de aquisição de nova tecnologia por parte dos usuários (Rodríguez, C. R. C., 2002).

Este programa é caracterizado por um conjunto de aspectos que podem variar significativamente de acordo com os objetivos desejados com o programa. Dentre os principais objetivos, podemos listar:

- A duração do programa, sendo válido geralmente por 1 ano ou mais;
- Quem receberá os pagamentos dos subsídios, podendo ser tanto os fabricantes, para que o custo de produção caia e consequente o preço final, os varejistas ou os consumidores;
- A forma e a programação com que serão feitos estes pagamentos, sendo feito em parcela única no ato da compra, ou em parcelas anuais predeterminadas ou dependentes da quantidade de energia gerada. Estes poderão ser feitos tanto por sistema instalado quanto por W produzido;
- O comportamento do nível de subsídio ao longo do programa, sendo constante ou variando ao longo da duração do programa;
- Tamanho do fundo e os critérios para determinação do tamanho dos incentivos a serem dados para cada sistema, sendo definidos o quanto será investido por kW por exemplo, bem como a análise dos sistemas a serem vendidos e para quais componentes e finalidades o subsídio deverá valer;

O objetivo do programa é incentivar o mercado a comprar os equipamentos necessários para a geração de energia através desta tecnologia, consequentemente estimulando a indústria e a pesquisa a cerca da mesma. Este cenário tornaria esta fatia de mercado mais atrativa, resultando em investimentos que reduziriam os custos de produção no setor.

### **O *Buydown* na Califórnia**

O programa existe desde 1996, quando por decreto ficou determinado que seria criado um fundo para apoio às tecnologias de geração por fontes renováveis de energia. O fundo era de US\$ 540 milhões a serem arrecadados pelas três maiores distribuidoras do estado da Califórnia por meio de taxas adicionais na tarifa da energia.

Foi determinado que 10% (US\$ 54 milhões) deste fundo seriam alocados para a criação de programas de incentivo junto ao consumidor. O modelo adotado foi o *Buydown* e teve 60% voltado a sistemas com menos de 10 kW, e os outros 40% para sistemas acima dessa potência. O valor total foi dividido em cinco blocos, sendo cada um sujeito a valores diferenciados de desconto máximo para o sistema e para o watt instalado. Os blocos permitiram que o programa respondesse de acordo com a demanda gerada no mercado ao invés de haverem prazos pré-definidos, o que poderia resultar em um esgotamento precoce dos recursos para um número menor de sistemas instalados.

O comportamento dos grupos pode ser visto na Tabela 3 da California Energy Comission (2001a).

Bloco do Programa	1	2	3	4	5	Total
Fundos por bloco (milhões)	US\$ 10,5	US\$ 10,5	US\$ 10,5	US\$ 10,5	US\$ 12,0	US\$ 54,0
Máximo desconto por watt	US\$ 3,0	US\$ 2,50	US\$ 2,0	US\$ 1,50	US\$ 1,0	N.D
Máximo desconto (% do custo do sistema)	50%	40%	30%	25%	20%	N.D

**Tabela 3 - Valores de abate no programa de *Buydown* da Califórnia**

Como regras para o incentivo, foi determinado que o subsídio devesse ser entregue ao consumidor, ou ao vendedor, no ato da firmação do contrato entre estes, e que o total do incentivo não poderia superar 50% dos custos do sistema.

### **O *Buydown* no Japão**

Com o intuito de aumentar o número de sistemas fotovoltaicos conectados à rede, o governo japonês criou um pesado programa de *buydown*. Em adição, foram criados linhas de créditos especiais com baixos juros e programas de marketing que conscientizavam e estimulavam a população a adotar a tecnologia.

O programa aumentou significativamente a quantidade de EFCR no Japão, sendo 36 MW instalados entre 1994 e 1997. O subsídio é de 50% do custo do equipamento e era dado aos comerciantes varejistas, em contraste com o programa da Califórnia. O incentivo ao mercado de SFCR causou uma queda impressionante no preço do Wp, passando de 13 US\$/Wp em 1994 para pouco mais de 3US\$/Wp em 2010.

## Capítulo 4

### 4.1 Inserção da Energia Fotovoltaica no Brasil

A geração fotovoltaica já se encontra presente no Brasil, tendo sido trazida principalmente pelo programa federal “Luz para Todos” e pelo PRODEEM (Programa de Desenvolvimento Energético de Estados e Municípios) de 1994, que determinaram que todos os brasileiros tivessem direito ao acesso a energia elétrica. Como resultado, foram construídos milhares de quilômetros de rede, mais de 1 milhão e meio de conexões e foram instalados milhares de sistemas fotovoltaicos para o abastecimento de moradores de áreas onde a conexão com a rede representa custos proibitivos. O programa permitiu também a realização de diversos estudos sobre o uso de geradores fotovoltaicos, o que praticamente não havia ocorrido ainda no país.

Consequentemente aos programas listados acima, o Brasil acumulou experiência no uso de sistemas fotovoltaicos, porém esta se restringe à geração para cargas isoladas e não para SFCR, que é o futuro da geração solar fotovoltaica. Outro aspecto negativo é que no ato da compra dos componentes dos sistemas usados, foi realizados leilões internacionais, uma vez que o Brasil não possui indústria neste setor, havendo no nosso país somente empresas que realizem a montagem de painéis a partir de células importadas. Esta dependência da tecnologia importada nos torna cativos dos países que controlam os processos de fabricação dos componentes dos SFCR. Como resultado, pagamos altos valores pela obtenção de uma tecnologia já consolidada nos países produtores. Situação característica da inserção de novas tecnologias em países em desenvolvimento.

Quando se pretende inserir qualquer nova tecnologia em um país, um vasto questionamento deve ser feito antes que se possa de fato investir em tal empreendimento. Devemos considerar que não basta trazer o conhecimento, e sim desenvolver todo um Sistema Tecnológico, que se trata do conjunto de entidades que produzem, fiscalizam e controlam o fluxo de informações tecnológicas envolvidas.

O maior a ser enfrentado pelo Brasil para inserir a energia fotovoltaica se deve à diferença cultural e intelectual presente entre as pessoas de baixa renda e a população da classe alta, resultando que o que para uns é uma realidade possível e viável, representa para outros uma tecnologia presente somente na ficção científica. Deste modo, fica muito mais

difícil para que o planejamento, feito por intelectuais, seja posto em prática eficientemente, atividade concretizada geralmente pelas classes mais baixas (Ferreira, 1993).

A melhor forma para lidar com este desafio é o desenvolvimento cultural da população, levando-a não só a compreender a importância desta nova tecnologia, mas também a aceitá-la como acessível e economicamente lucrativa. Para isso, é necessário que haja uma forte iniciativa financeira de origem governamental, subsidiando a entrada da tecnologia em todas as camadas sociais do Brasil.

A ideia é criar uma indústria nacional de painéis fotovoltaicos juntamente com centros de pesquisas tecnológicas nacionais, uma vez que para que o controle de uma tecnologia só é possível quando se possui a produção e a pesquisa realizados próximos um ao outro, o que permite a troca de informações e experiências que resultam em uma evolução mais rápida para ambos os setores. A importância desta proximidade é dada por que a construção de uma linha de produção sem auxílio do desenvolvimento tecnológico resulta em atraso desta indústria perante o resto do mundo, continuando assim a depender de técnicas tecnologicamente já ultrapassadas nos países detentores da tecnologia para o suprimento do mercado interno.

#### **4.1.1 Indústria de SFCR no Brasil**

A geração por painéis fotovoltaicos encontra-se em uma fase de rápido crescimento em todo o mundo, em especial nos países membros do PVPS (*Photovoltaic Power Systems Programme*), como foi explicado no Capítulo 7. Na tentativa de participar deste setor promissor, o Brasil vem tomando medidas estratégicas, ainda tímidas, para preparar o país para desenvolvimento deste mercado.

Em Agosto de 2011, a ANEEL lançou uma chamada pública para projetos de pesquisa e desenvolvimento, a chamada Nº.013/2011 “Arranjos técnicos e comerciais para a inserção da geração solar fotovoltaica na matriz energética brasileira”. A chamada conseguiu mobilizar aproximadamente uma centena de empresas, inclusive concessionárias, que devem investir uma fração de suas receitas operacionais líquidas em P&D.

A ANEEL tem como objetivos desenvolver toda a cadeia produtiva solar fotovoltaica, incentivando assim o surgimento de um conjunto de empresas nacionais que atuem em todo o processo de fabricação dos elementos necessários para que se gere energia a partir do Sol, e se possa injetá-la à rede, seja no nível de distribuição, seja de transmissão.

Pretende-se ainda, capacitar mão de obra suficiente para que haja pessoal habilitado a instalar, operar e realizar a manutenção necessária para estes equipamentos. Busca-se ainda realizar ajustes na regulamentação e nos encargos tributários aplicados, para que juntamente com as melhorias nos processos industriais, resultem na queda dos preços do watt.

Dentre os objetivos buscados pela ANEEL na chamada 013/2011, o desenvolvimento de uma indústria nacional capaz de produzir painéis fotovoltaicos a custos competitivos com os das grandes empresas multinacionais do ramo é, inquestionavelmente, o mais complexo de ser concretizado. Essa dificuldade vem do fato de que a produção de painéis fotovoltaicos é realizada por atores globais, com produção e conhecimento suficiente para otimizar seus processos e se manterem competitivos no mundo todo, com atenção especial para as empresas chinesas, que usufruem do benefício de um sistema extremamente barato de produção industrial característico da China.

No caso dos inversores, no Brasil há uma indústria capaz de produzi-los de forma satisfatória para atender a demanda nacional, sendo necessária somente a ampliação das fábricas, o que aconteceria naturalmente com o desenvolvimento do mercado de painéis fotovoltaicos, sendo, provavelmente, estímulos tributários suficientes para apoiar o setor. É importante ressaltar que os componentes de origem asiática são mais baratos que os produzidos internamente, e que a indústria nacional só se torna competitiva em projetos locais, uma vez que possui conhecimento e mão de obra qualificada disponível para realizar projetos internos.

Os demais elementos necessários para o sistema, como cabos, fios, proteção, antenas, estrutura e chicotes elétricos, são fabricados no Brasil e podem ser supridos por esta indústria sem grandes dificuldades, mesmo sendo necessárias adaptações para alguns destes elementos.

Os serviços e a mão de obra qualificada para trabalhar com a produção e instalação dos SFCR ainda é um problema a ser combatido, uma vez que o mercado nacional trabalha quase que exclusivamente com a importação de componentes e a integração destes na rede.

#### **4.1.2 Regulamentação Brasileira**

No dia 17 de Abril de 2012, a ANEEL lançou a Resolução Normativa Nº 482 com a finalidade de atualizar a situação da GD no Brasil. Até então, qualquer pessoa física, ou jurídica, que montasse uma central geradora e desejasse conectá-la à rede estaria sujeita às mesmas condições aplicadas sobre as usinas de grande porte. Ou seja, a menos que a



distribuidora tivesse por iniciativa medidas para os geradores distribuídos, um consumidor que instalasse um EFCR em sua casa teria de obedecer aos mesmos pré-requisitos apresentados às usinas hidroelétricas.

A resolução entrará em vigor 240 dias após a sua emissão, quando as distribuidoras deverão atender as solicitações de acesso à rede, bem como realizar reforços no sistema, de acordo com a Seção 3.7 do Módulo 3 do PRODIST.

A resolução define que:

- I. Será cobrada dos consumidores uma taxa mínima, sendo esta igual ao custo de disponibilidade para consumidores do Grupo A, e igual ao da demanda contratada para consumidores do Grupo B;
- II. A fatura será feita sobre a diferença entre o consumo da unidade e a energia injetada na rede. Qualquer excedente ficará como crédito a ser usado posteriormente por esta unidade;
- III. Os excedentes têm prioridade de serem utilizados no mesmo período de faturamento, e deverão respeitar a diferença entre as tarifas, caso haja;
- IV. O excedente possui validade de 36 meses e podem ser passados para outras unidades consumidoras desde que estas pertençam ao mesmo titular, ou façam parte de um grupo pré-cadastrado que tenha se juntado por interesse comum;

Determinam-se ainda as questões relativas a danos causados à rede por falhas dos geradores distribuídos e valores a serem cobrados do consumidor devido à troca de medidor e adequação da rede.

## **4.2 Estratégias Para a Inserção da Tecnologia Fotovoltaica no Brasil**

Como mostrado, o mercado fotovoltaica vem se desenvolvendo em um ritmo acelerado, especialmente nos países membros do PVPS. Estes países já vêm aplicando medidas para estimular o setor há mais de uma década, e como resultado, já possuem uma indústria bastante desenvolvida e capaz de vender seus produtos a preços competitivos globalmente.

No Brasil, essa indústria ainda é extremamente tímida, sendo a demanda de todo o nosso país menor do que algumas regiões da Alemanha, que possuem uma incidência solar

consideravelmente inferior às encontradas em qualquer local do nosso país. Estima-se que a nossa demanda não tenha sido superior a 7 MWp em 2011, enquanto regiões alemãs já possuam mais de 25.000 MWp instalados.

Este crescimento do mercado fotovoltaico, presente não só na Alemanha, mostra a importância estratégica que este setor vem ganhando nos últimos anos, e a possibilidade de tomar parte deste mercado global está sendo aproveitada pelas principais economias, sendo imperativo que o Brasil comece a tomar medidas mais explícitas para se tornar também, um agente global.

São claros os motivos pelos quais o governo brasileiro ainda não havia buscado desenvolver este mercado, uma vez que o Brasil sempre possuiu uma matriz energética limpa, tendo como principal fonte de energia a hidroelétrica e que a geração de energia por meio da conversão fotovoltaica vinha se mostrando uma forma extremamente custosa de se obter energia.

Na última década, porém, esta fonte de energia mostrou uma curva de aprendizado muito estimulante, com uma redução dos seus custos a ponto de se tornar não somente tecnicamente viável, mas também uma alternativa competitiva de geração. A alta eficiência, os baixos custos, a curva de aprendizado positiva e a alta incidência solar não são os únicos fatores que ditam que o Brasil deveria investir neste mercado. A sua importância estratégica, a possibilidade de desenvolver um mercado de destaque global e a grande disponibilidade da matéria prima necessária para esta indústria que é encontrada no Brasil são outros fatores que mostram que o país não só deve agir diretamente para o desenvolvimento do mercado, mas que já está atrasado em fazê-lo.

Características deste mercado no nosso país, como o baixo conhecimento desta tecnologia de geração e a ínfima magnitude da demanda e potencial instalados, mostram que as forças de mercado brasileiras são muito pequenas, e se forem deixadas como únicos responsáveis pelo desenvolvimento deste mercado, resultarão na perda do *timing* de entrada neste mercado estratégico, tornando o país cativo tecnológico de futuros detentores desta tecnologia.

A participação neste mercado vai além de desenvolver uma indústria nacional em um ramo estratégico, a criação de empregos qualificados, melhora do saldo comercial e arrecadação de capital por meio de impostos e tributos. Desenvolver este mercado seria fortalecer uma indústria diretamente relacionada com a de semicondutores e eletrônica, que

representa um mercado em que o Brasil é historicamente um cativo e possui uma balança comercial crescentemente deficitária.

Para que a tecnologia fotovoltaica passe a ser produzida e consumida no Brasil, é necessário que se façam esforços em duas frentes: a da demanda, que com seu aumento por si só já fortalecerá o setor internamente; a da cadeia produtiva, onde o governo deve apoiar para que se crie tanto a pesquisa, quanto a produção desta tecnologia nos tornando independentes do resto do mundo.

#### **4.2.1 Medidas Para Aumento da Demanda**

Como dito anteriormente, a demanda brasileira por painéis fotovoltaicos é muito pequena. Isso se dá pela falta de conhecimento dessa tecnologia por parte da população e pelos altos investimentos iniciais necessários para instalá-la, o que a torna inviável sem que haja linhas de financiamento adequadas às características únicas associadas a esta forma de geração.

É necessário que os órgãos públicos elaborem primeiramente um cronograma com estratégias e metas muito bem definidas e claras, bem como foi feito no Plano Brasil Maior, que inclui a política industrial entre 2011 e 2014. O plano foi desenvolvido em cooperação de diversos ministérios e tem como finalidade dar continuidade a antigos programas da área, o que para o setor fotovoltaico, que por ser próximo à indústria de componentes elétrico-eletrônicos, poder-se-ia até mesmo realizar somente a extensão do trabalho desenvolvido pela LCA Consultores para a ABINEE (que incluía até mesmo as ações a serem realizadas em parceria pelos agentes privados e públicos) para que se incluíssem os componentes dos SFCR no plano.

A consultoria realizada pela PSR cita uma lista de medidas que podem ser tomadas para que ocorra o aumento da demanda de módulos no Brasil, sendo elas:

- Acelerar a demanda pelos SFCR – o que pode ser feito através de leilões criados especificamente para SFCR, devendo incentivar inclusive a construção de grandes usinas, que mesmo tendo se mostrado uma opção menos benéfica que a GD, serviria para divulgar o mercado fotovoltaico brasileiro para o mundo e garantir mercado para os fabricantes brasileiros. Estes leilões serviriam ainda como uma forma de avaliar quais as melhores tecnologias a serem usadas no Brasil, uma vez que as tecnologias

predominantes foram desenvolvidas para climas temperados, onde há menos incidência solar e temperaturas mais baixas;

- A GD deve ser melhor estudada, exigência essa que deve ser feita pelo governo perante as concessionárias através de resoluções como a nº 482, de 17/04/2012, tratada anteriormente, para que o acesso à rede se torne mais fácil para o consumidor;
- Ajustes regulatórios são de extrema importância para que a geração fotovoltaica cresça de forma correta. Ajustes acerca da geração fotovoltaica de pequeno porte serão sugeridos na seção seguinte;
- Criação de modelos comerciais que aumentem a aceitação da população para esta tecnologia e possivelmente, torne-a mais barata para o consumidor final. Um modelo comercial bastante usado nos EUA é o “*Solar Lease*”, que consiste em empresas que oferecem a geração fotovoltaica como um serviço semelhante à TV a cabo. A empresa vende, instala e mantém os SFCR a um custo fixo cobrado ao cliente mensalmente, custo esse, geralmente inferior às parcelas que seriam pagas para se instalar um sistema por conta do consumidor. Outro modelo é a construção de usinas comunitárias, que nada mais é do que a construção de pequenas usinas com o capital de diferentes interessados na construção de um sistema, mas não podem por algum impedimento particular. O custo, e o benefício obtido da usina são divididos igualmente entre os investidores, sendo necessário somente fazer um cadastro com a concessionária constando todos os envolvidos.
- Criação de linhas de financiamento específicas para investimentos em SFCR, devendo ser muito bem avaliadas quanto a prazos e taxas para que estimulem adequadamente o mercado sem causar grandes impactos no capital público;
- A criação de normas brasileiras para o setor é outro fator de grande importância. O desenvolvimento de NBRs e os programas de etiquetagem estão atrasados, sendo necessário investimento para se criar um padrão que forneça segurança para o mercado;
- O setor público, em parceria com o setor privado, deve criar uma agenda com metas e prazos claros para o setor fotovoltaico. Nesta agenda deve conter, por exemplo, os prazos para desenvolvimento das medidas listadas acima;

## 4.2.2 Desenvolvimento da Cadeia Produtiva

Para que haja um bom desenvolvimento da cadeia produtiva o governo não deve tomar medidas tão extremas como as necessárias para ampliar a demanda pelos módulos, pois o crescimento da produção está mais relacionado à demanda de um dado produto, crescendo juntamente com esta. As medidas a serem tomadas são referentes ao desenvolvimento de setores da microeconomia que incentivem o crescimento da indústria como um todo.

O setor em questão possui como característica uma queda considerável dos custos de fabricação em relação ao aumento da quantidade produzida. Ou seja, se houver uma demanda minimamente grande, ter-se-á como resultado uma redução significativa no custo de produção do Wp. Portanto, além das medidas a serem tomadas juntamente com a demanda, o governo só precisa se preocupar com medidas tarifárias que facilitem a compra de equipamentos e/ou matéria-prima e com medidas que reduzam os custos de produção dos módulos para que estes cheguem com menores preços ao cliente final.

O Brasil já dispõe de medidas benéficas nesse sentido, o Plano Brasil Maior e a Lei da informática (que beneficia produtos que envolvam semicondutores, inclusive os módulos fotovoltaicos), que estimulam o crescimento do setor por meio da remoção de tarifas sobre a comercialização de semicondutores e sobre a compra dos equipamentos necessários para a produção do mesmo.

Quando se pensa nas etapas de produção do módulo, pode-se dizer que o nosso país já possui algum domínio da primeira etapa, a produção da célula fotovoltaica, uma vez que somos o segundo maior produtor de silício do mundo, havendo *know-how* para extrair e trabalhar o quartzo para produção do silício metalúrgico. O problema é que as empresas brasileiras ainda não são capazes de purificar o silício ao grau solar nem ao grau eletrônico, o que é consequência da grande quantidade de energia exigida pelo processo de purificação do silício, energia esta que é comprada a altos preços no Brasil.

Mesmo com o alto investimento necessário, qualificar a indústria nacional a purificar o silício a graus mais nobres pode trazer resultados econômicos extremamente positivos se considerarmos que a purificação do silício metalúrgico causa uma valorização no produto final (silício) na ordem de 100 vezes quando purificado até o grau solar, e 1000 vezes se comparado com o grau eletrônico, aditivamente ao fato de que o desenvolvimento de uma indústria capaz de purificar o silício fortaleceria todo o setor de eletrônica do país.

A produção dos outros componentes, como o inversor, já é feita no Brasil e é capaz de abastecer o mercado interno. O crescimento e os custos de produção deste setor são diretamente relacionados com a demanda, portanto acredita-se que a tomada de medidas para incitar a demanda já seria capaz de solucionar eventuais entraves enfrentados pelos produtores. Os outros componentes do SFCR, comumente chamados de BoS (*Balance of System*), podem ser produzidos por empresas brasileiras, pois mesmo que os produtores não possuem linhas de produção exclusivas para o mercado fotovoltaico, as linhas atuais são perfeitamente capazes de produzir os elementos com as características desejadas.

Por último, devemos lembrar que a criação deste setor resultará na criação de empregos em todos os níveis da cadeia produtiva e de consumo dos painéis fotovoltaicos. A estimativa é que a geração de empregos seja semelhante à ocorrida nos EUA, que é de 30 empregos diretos por MW instalado, o que representa seis mil empregos para cada 200 MW instalados no país.

## Capítulo 5

### 5.1 Conclusão

O modelo energético da humanidade atualmente é altamente agressivo ao nosso planeta, fato que é comprovado pelas mudanças climáticas e danos ambientais graves presenciados nas últimas décadas. Como solução, vem-se buscando formas de suprir as nossas necessidades energéticas com fontes renováveis de energia que permitam, futuramente, nos tornarmos sustentáveis e reduzamos ao máximo os impactos causados à natureza.

A energia solar é, juntamente com a eólica, a fonte de energia renovável que se mostrou mais eficiente e rentável sob os aspectos econômico e técnico. Ao longo da última década, a energia solar sofreu enormes melhorias técnicas, havendo sido desenvolvidas novas técnicas de produção que aumentaram a eficiência e o tempo de vida dos módulos solares. Estes avanços não aconteceram somente para as células de silício, mas também para outros semicondutores que vêm apresentando altos valores de custo-benefício, como é o caso dos filmes finos que são mais extremamente mais versáteis e baratos e já apresentam eficiência de 20,3%, sendo praticamente igual à eficiência das células de silício policristalino (20,4%) que são as mais utilizadas atualmente.

Estudos recentes acerca da GD aperfeiçoaram ainda o acoplamento de geradores distribuídos à rede, retirando as antigas dúvidas levantadas sobre proteção, fluxo de carga e estabilidade do sistema. Exemplos do sistemas em que GD já se encontra profundamente inserida ajudam a remover dúvidas sobre este aspecto, bons exemplos são alguns dos países membros do PVPS, em especial a Alemanha, Espanha, EUA e Suíça.

Juntamente com os desenvolvimentos tecnológicos das células fotovoltaicas, diversas técnicas de fabricação foram desenvolvidas para permitir a fabricação de um número muito maior de células a preços mais baratos. Como consequência, temos que a curva de aprendizado dos módulos solares possui uma queda acentuada e contínua nos últimos anos (redução de 20% do custo dos módulos para cada vez que se dobra potência fabricada), já tendo quebrado a barreira do 1 €/Watt para os módulos asiáticos vendidos na Alemanha, como mostrado em uma publicação da *PHOTON International*. Todos estes fatores positivos vêm culminando no rápido aumento das potências fabricada e instalada de módulos fotovoltaicos, que está crescendo exponencialmente na última década e deve se manter assim nos próximos anos.

Todos estes avanços presentes no mercado de módulos fotovoltaicos são consequência dos investimentos realizados pelo governo e por algumas entidades privadas do setor de energia fotovoltaica. Tais investimentos foram feitos principalmente pelo capital público dos países interessados, aplicados por meio de programas de incentivo à pesquisa e ao mercado, focados em benefícios financeiros e tributários com o objetivo de desenvolver a indústria, e programas que estimulassem, através de subsídios e modelos de comercialização de energia, a compra e operação destes sistemas por parte do consumidor. Em decorrência destes investimentos e da melhora do custo por watt foto gerado, este mercado acabou por aquecer rapidamente, devendo se tornar (possivelmente já tendo se tornado) de grande importância estratégica.

No Brasil, o mercado de energia fotovoltaica encontra-se em fase germinativa, não existindo fabricação de células brasileiras mesmo o país sendo o segundo maior produtor de silício e possuir uma incidência solar muito maior do que a do líder mundial em fabricação e consumo de módulos solares, a Alemanha.

Como mostrado ao longo do trabalho, o Brasil possui um enorme potencial para fabricar e consumir módulos fotovoltaicos, podendo se tornar um dos principais agentes mundiais do setor. Mas para que isso aconteça, é necessário que se tomem um grupo de medidas que acelerem o desenvolvimento interno do mercado de energia solar fotovoltaica.

Tendo como base os estudos feitos, os dados mostrados sobre o mercado fotovoltaico no Brasil e no mundo, e a oferta de matéria prima e do combustível necessário para a geração por conversão fotovoltaica, tem-se a conclusão de que as medidas a serem tomadas pelo governo brasileiro devem seguir duas frentes, uma focada em criar e desenvolver a produção de SFCR totalmente nacionais, nos tornando produtores e não compradores deste produto. Esta frente deve incluir benefícios tarifários e que beneficiem empresas do setor, acelerando o seu crescimento e estabilização no mercado. Estas medidas devem atrair o capital privado para a abertura ou expansão de empresas para incluir a fabricação de células nacionais. Estímulos à pesquisa devem aumentar também, nos mantendo assim na vanguarda tecnológica do setor.

A segunda focará no aumento da demanda interna por módulos. Os grandes fabricantes de módulos já possuem tecnologia e linhas de produção grandes o suficiente para produzir módulos a custos mais competitivos, dificultando assim que fábricas brasileiras que sejam montadas possam concorrer pelo mercado externo. Porém, o aumento da demanda



interna, que se limita a poucas pessoas que possuem conhecimento desta tecnologia e seus benefícios, levaria às empresas recém-abertas no país a possuir um mercado consumidor para seus produtos.

Para que a demanda aumente, é necessário que o governo adote primeiramente políticas de informação para que a geração fotovoltaica deixe de ser uma tecnologia “de outro planeta”, e passe a ser uma opção de geração rentável e simples para qualquer consumidor brasileiro. Em segundo lugar, a necessidade de um grande investimento inicial deve ser combatida, criando-se linhas de crédito especiais ou subsídios que reduzam o peso deste custo para o comprador reduzindo o tempo de retorno altíssimo inerente aos SFCR atualmente. As melhores políticas a serem adotadas para aumentar a demanda foram listadas na seção 4.2.1 do Capítulo 4.

O Brasil encontra-se atrasado em relação a outros agentes do mercado fotovoltaico, porém algumas características benéficas ao setor se apresentam fortemente no território nacional, e somado ao fato de ser um mercado ainda em crescimento podemos nos tornar uma potência no setor se tomarmos as devidas medidas. O domínio desta tecnologia traria consigo não somente lucro para o Brasil, como também a geração de inúmeros empregos em diversos níveis de qualificação e o desenvolvimento do sistema energético e da matriz nacional.

## **Bibliografia**

- BENEDITO, R. DA S. (2009). Caracterização da geração distribuída por meio de Sistemas fotovoltaicos conectados à rede, no Brasil, sob aspectos técnico, econômico e regulatório. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica, Faculdade de Economia e Administração, Instituto de Eletrotécnica e Energia e Instituto de Física, Universidade de São Paulo, São Paulo. 108 f.
- BENEDITO, R. (2010). A expansão da oferta de energia elétrica nos centros urbanos brasileiros por meio de sistemas fotovoltaicos conectados à rede. Em Revista Brasileira de Energia, Vol. 16. pp. 7-19.
- CERVANTES RODRÍGUEZ, C. R. (2002). Mecanismos regulatórios, tarifários e econômicos na geração distribuída: o caso os sistemas fotovoltaicos conectados à rede. Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas. 135 f.
- FERREIRA, M. J. G. (1993). Inserção da Energia Solar Fotovoltaica no Brasil. Dissertação (Mestrado) – Universidade de São Paulo, São Paulo.
- GONÇALVEZ, L. F. (2004). Contribuições para o estudo teórico e experimental de sistemas de geração distribuída. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.
- PERLOTTI, E.; CAMARGO, F.; GRANVILLE, A.; CUNHA, G.; PEREIRA, M.; KELMAN, R. (2012). Proposta para Inserção da Energia Solar Fotovoltaica na Matriz Elétrica Brasileira. 2012. 176 f. (Relatório Técnico) - Estudo do Grupo Setorial de Sistemas Fotovoltaicos da Abinee, LCA Consultores, PSR Soluções e Consultoria em Energia.
- RESOLUÇÃO NORMATIVA Nº 506, de 4 de Setembro de 2012. Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL. Brasil.
- TRENDS IN PHOTOVOLTAIC APPLICATIONS, Survey report of selected IEA countries between 1992 and 2011 (Relatório Técnico). Photovoltaic Power Systems Programme – PVPS. Report IEA – PVPS T1-21:2012.
- VALLÊRA, A. M. Meio Século de história fotovoltaica. Gazeta de Física, Campo Grande, v. 29, p. 10-15, fev., 2007.