



Universidade Federal de Campina Grande

Centro de Engenharia Elétrica e Informática

Curso de Graduação em Engenharia Elétrica

CLÁUDIO MOREIRA DE LIMA

*INSERÇÃO DA ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA NA MATRIZ
ELÉTRICA BRASILEIRA*

Campina Grande, Paraíba
Novembro de 2014

CLÁUDIO MOREIRA DE LIMA

*INSERÇÃO DA ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA NA MATRIZ
ELÉTRICA BRASILEIRA*

*Trabalho de Conclusão de Curso submetido à
Unidade Acadêmica de Engenharia Elétrica da
Universidade Federal de Campina Grande como
parte dos requisitos necessários para a obtenção do
grau de Bacharel em Ciências no Domínio da
Engenharia Elétrica.*

Área de concentração: Geração de Energia

Orientador:

Professor Leimar de Oliveira, M. Sc.

Campina Grande, Paraíba
Novembro de 2014

CLÁUDIO MOREIRA DE LIMA

*INSERÇÃO DA ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA NA MATRIZ
ELÉTRICA BRASILEIRA*

Trabalho de Conclusão de Curso submetido à Unidade Acadêmica de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Campina Grande como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Bacharel em Ciências no Domínio da Engenharia Elétrica.

Área de concentração: Geração de Energia Solar

Aprovado em 27 / 11/ 2014

Prof. Leimar de Oliveira, M.Sc,
Universidade Federal de Campina Grande
Orientador

Prof. Luís Reyes Rosales Montero
Universidade Federal de Campina Grande
Avaliador

Dedico este trabalho a minha mãe, a meu pai que me apoiaram de todas as formas na realização dos meus sonhos.
A meus irmãos que me acompanharam, me dando força nesta caminhada.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, em primeiro lugar, por todas as bênçãos em minha vida e por estar sempre ao meu lado me guiando e iluminando os caminhos dessa jornada.

Agradeço também à minha mãe, Jeane, a meu pai Eduardo, por terem se esforçado tanto para me proporcionar uma boa educação, por ter me alimentado com saúde, força e coragem, as quais que foram essenciais para superação de todas as adversidades ao longo desta caminhada.

Agradeço também a meus irmãos e a toda minha família, que com todo carinho e apoio, não mediu esforços para eu chegar a esta etapa da minha vida.

Agradeço ao meu orientador, Professor Leimar de Oliveira, pela paciência e tempo dedicado as sugestões.

Aos companheiros, amigos de batalha e futuros colegas de profissão, Eng. Tiago da Silva Balbino, Eng. José de Sousa Lima Junnior, Eng. Fausto Vilar Gonçalves, Eng. Francisco Luiz de Oliveira Júnior, Eng. Luciano Duarte Medeiros e Eng. Wallysson de Vasconcelos Sousa, que trilharam comigo esta longa jornada, tornando os momentos de adversidades e afazeres em inestimáveis histórias de superações e alegrias.

Enfim, agradeço a todos que de alguma forma, passaram pela minha vida e contribuíram para a construção de quem sou hoje.

*“Quando os ventos de mudança sopram,
umas pessoas levantam barreiras, outras
constroem moinhos de vento.”*

Érico Veríssimo

RESUMO

O presente trabalho apresenta um estudo sobre a inserção da energia solar na matriz elétrica brasileira, apresentando um panorama da geração fotovoltaica no mundo e a potencialidade de implantação efetiva no Brasil. Por meio de pesquisa bibliográfica com base em livros, artigos científicos, periódicos indexados e materiais disponibilizados pelos principais órgãos e instituições responsáveis pelo setor elétrico brasileiro, impressos ou em formato digital. *A priori*, será feita uma explanação geral acerca dos princípios da energia solar, mostrando as suas utilizações e os aspectos técnicos de funcionamento da geração de energia elétrica por fonte solar, com ênfase na geração fotovoltaica. Em seguida, realizou-se, com base nas notas técnicas da EPE e da ABINEE, a explanação sobre o potencial nacional, custo de produção e os incentivos a geração de energia solar fotovoltaica. Por fim, constatou-se que no Brasil e principalmente na Região Nordeste a energia solar deverá ser considerada uma alternativa energética relevante.

Palavras-chave: Energia Solar, Potencial Brasileiro de Energia Solar, Incentivos a Geração de Energia Solar Fotovoltaica.

ABSTRACT

This paper presents a study on the integration of solar energy in the energy matrix of Brazil, an indexed overview of photovoltaic generation in the world and the potential for effective deployment in Brazil, by means of literature based on books, scientific articles, journals and materials provided by major agencies and institutions responsible for the Brazilian, in print or digital format electricity sector. At first, a general explanation about the principles of solar energy will be showing their uses and the technical aspects of operation of electric power generation by solar power, with an emphasis on photovoltaic generation. Then took place, based on the technical notes of EPE and ABINEE, the explanation of the national potential, cost of production and incentives to solar photovoltaic power generation. Finally, it was found that in Brazil and the Northeast Region mainly solar energy should be considered a relevant alternative energy source.

Keywords: Solar Energy Potential of Brazilian Solar Energy Incentives Generation Photovoltaics.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 2.1- Variação da radiação solar no brasil	18
Figura 2.2- Média anual de insolação diária no brasil (horas).....	19
Figura 2.3 - Fluxograma das aplicações práticas de energia solar.....	20
Figura 2.4 - –O aquecimento solar baseia-se na convecção natural da água(esq). Emprego de coletores planos num conjunto habitacional no Brasil (Dir).	21
Figura 2.5 -Conjunto de módulos de silício monocristalino utilizados para produzir energia elétrica.....	22
Figura 2.6- Evolução da potência instalada em sistemas fotovoltaicos no mundo.....	22
Figura 3.1-Célula de boro (esq.), silício (centro) e fósforo (dir.) com número de elétrons na banda de valência, respectivamente igual a 3,4, e 5. Isto explica porque o boro é utilizado como dopante para formar o semicondutor tipo-p e o fósforo para formar o semicondutor tipo-n de uma célula de silício.	26
Figura 3.2- Corte transversal de uma célula fotovoltaica mostrando o funcionamento do efeito fotovoltaico	27
Figura 3.3 Circuito elétrico equivalente de uma célula fotovoltaica alimentando uma carga z; modelo simplificado.	27
Figura 3.4- Circuito elétrico equivalente detalhado de uma célula fotovoltaica alimentando uma carga z.	29
Figura 3.5– Cadeia produtiva fotovoltaica	30
Figura 3.6– Módulos fotovoltaicos mais comuns.	32
Figura 3.7–Controlador de carga (esquerda) e banco de baterias (direita).	33
Figura 3.8 - Configuração básica de um SFI.	35
Figura 3.9– Torres de telecomunicação com alimentação através de energia solar.	36
Figura 3.10: Exemplo de um sistema fotovoltaico centralizado conectado à rede elétrica	36
Figura 3.11- Painel fotovoltaicos: Consumo por aplicação	37
Figura 3.12- Potência fotovoltaica instalada na Alemanha até 2010.....	42
Figura 3.13- Net metering nos EUA.....	44
Figura 3.14– Potência instalada em geração fotovoltaica, por setor.....	45
Figura 4.1 - Preço de sistemas fotovoltaicos de 100 kw na alemanha.	48
Figura 4.2- Preço médio anual do módulo fotovoltaico em diversos países europeus.	49
Figura 4.3- Custo de produção de energia (r\$/kwh) para faixas de custo de instalação (eixo x) e “famílias” de curvas com fatores de capacidade variando entre 12 % e 18 %.	52
Figura 4.4– Tarifa de energia com impostos para clientes na baixa tensão.	53
Figura 4.5- Tarifa de energia acrescida de impostos para clientes na alta tensão.	54
Figura 4.6 Expansão acumulada no mercado fotovoltaico interno até 2015	60
Figura 4.7 Expansão acumulada no mercado fotovoltaico interno de 2016 a 2020	60

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Comparação da irradiação das cidades brasileiras com as melhores regiões do mundo.....	18
Tabela 3.1 - Número de instalações e quantidade em kWp adquirido pelo PRODEEM	25
Tabela 3.2 - Custo de investimento em sistemas fotovoltaicos , referência internacional.....	41
Tabela 4.2 - Custo de investimento em sistemas fotovoltaicos – referência no Brasil.	48
Tabela 5.1 - Descrição dos principais mecanismos utilizados para incentivar a geração fotovoltaica.	51

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

- ABINEE – Associação Brasileira da Indústria Elétrica e Eletrônica
- ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica
- BNDS – Banco Nacional do Desenvolvimento Social
- CA – Corrente alternada
- CC – Corrente contínua
- CE – Ceará
- CEPEL – Centro de Pesquisas de Energia Elétrica
- CHESF – Companhia Hidro Elétrica do São Francisco
- CO₂ – dióxido de carbono
- COSERN – Companhia Energética do Rio Grande do Norte
- CPT-Condições padrão de teste
- CRESESB – Centro de Referência em Energia Solar e Eólica Sérgio de Salvo Brito
- EPE – Empresa de Pesquisa Energética
- EUA – Estados Unidos da América
- GW – gigawatt (10⁹ watts)
- GWEC - Global Wind Energy Council
- GWh – gigawatt-hora
- GWh/ano – gigawatt-hora por ano
- IEA-International Energy Agency
- INMET Instituto Nacional de Meteorologia
- INPE – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
- kWh - Kilowatt-hora
- km – quilômetros
- km² – quilômetros quadrados
- kV – quilovolt
- kW – quilowatt

m – metro

m/s – metro por segundo

MCT – Ministério da Ciência e Tecnologia

MMA - Ministério do Meio Ambiente

MME- Ministério de Minas e Energia

MW – megawatt (10^6 watts)

N – Norte

PCH – Pequenas Centrais Hidrelétricas

PE – Pernambuco

P&D – Pesquisa e Desenvolvimento

PRODEEM

PRODIST -Procedimentos de Distribuição

PROINFA – Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica

RN – Rio Grande do Norte

RS – Rio Grande do Sul

S – Sul

SC – Santa Catarina

SECTI – Secretaria de Ciência, Tecnologia e Inovação

SEE – Secretaria de Energia

SENAI – Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial

SFCR- Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede

SIN - Sistema Elétrico Interligado Nacional.

SRECs -- Solar Renewable Energy Certificate

SWERA – Solar and Wind Energy Resource Assessment

SP – São Paulo

TWh – terawatt-hora

TWh/ano – terawatt-hora por ano

UFPE – Universidade Federal de Pernambuco

UFSC - Universidade Federal de Santa Catarina –

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS	iv
RESUMO	vi
ABSTRACT.....	vii
LISTA DE ILUSTRAÇÕES.....	viii
LISTA DE TABELAS	ix
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS	x
SRECs -- Solar Renewable Energy Certificate.....	xi
SUMÁRIO	xii
1 Introdução.....	14
1.1 OBJETIVOS	15
1.1.1 Objetivo Geral	15
1.1.2 Objetivos Específicos	15
1.1.3 Estrutura do trabalho	15
2 A energia solar.....	17
2.1 A energia solar irradiada no Brasil.....	17
2.1.1 Aproveitamento da energia solar	19
2.1.2 Energia solar heliotérmica	20
2.1.3 Energia solar térmica	21
2.1.4 Energia Solar Fotovoltaica	21
3 ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA.....	24
3.1 EVOLUÇÃO HISTÓRICA	24
3.2 Efeito fotovoltaico	25
3.3 Modelo matemático	27
3.3.1 Estabelecimento do modelo simplificado	27
3.3.2 Modelo detalhado	29
3.4 Sistemas fotovoltaicos	30
3.4.1 Módulos.....	31
3.4.2 Inversores	33
3.4.3 Controladores de carga e baterias	33
3.4.4 Cabos	34
3.4.5 Estrutura de suporte	34
3.5 Aplicações de sistemas fotovoltaicos.....	34
3.5.1 Sistemas fotovoltaicos isolados	34
3.5.2 Sistemas de telecomunicações e monitoramento remoto.....	35
3.5.3 Sistemas conectados à rede.....	36
3.6 Benefícios da energia fotovoltaica	37
3.7 Potencial nacional de energia solar	38
3.8 Barreiras à expansão fotovoltaica no Brasil.....	38

3.8.1	Aspectos técnicos	38
3.8.2	Aspectos econômicos	39
3.9	Incentivos à Geração Fotovoltaica	40
3.9.1	<i>Feed-in tariffs</i> e o caso da Alemanha	41
3.9.2	Leilões e a Missão Solar Nacional na Índia	42
3.9.3	Subsídios à produção e o Projeto Golden Sun na China	43
3.9.4	Iniciativa solar nos Estados Unidos: <i>net metering</i> , crédito e incentivos tributários.....	43
4	Inserção da Energia solar fotovoltaica na matriz elétrica brasileira	47
4.1	Aspectos econômicos.....	47
4.1.1	Custo dos Módulos	49
4.1.2	Custo dos Inversores.....	49
4.1.3	Custo dos Demais Componentes	50
4.1.4	Custos nacionalizados.....	50
4.1.5	Custo de produção de sistemas fotovoltaicos	51
4.1.6	Tarifas de energia elétrica.....	52
4.2	Indústria fotovoltaica nacional	54
4.3	Aceleração da demanda	56
4.3.1	Interlocução e coordenação estratégica	56
4.3.2	Leilão específico.....	57
4.3.3	Geração distribuída.....	58
4.3.4	Financiamentos e incentivos tributários	59
4.4	Cenário atual	59
5	Conclusão	62
6	Referências	64

1 INTRODUÇÃO

Com as crises energéticas da década de 70, quando ocorreram gradativos e ilimitados aumentos no preço do petróleo, formou-se um consenso global sobre a necessidade de produção de energia a partir de outras fontes, o mundo passou a se preocupar com a possível falta de combustíveis para suprir as necessidades energéticas futuras. Assim como também começaram a ser levantadas questões acerca dos impactos ambientais causados pela atuação indevida do homem na natureza que passou a afetar o equilíbrio ambiental do nosso planeta. Ambos os fatores foi de importância para que se leve a buscar fontes que fossem não só limpas, mas também renováveis, como a Energia Solar Fotovoltaica.

A Energia Solar Fotovoltaica é a energia obtida através da conversão direta da luz em eletricidade (Efeito Fotovoltaico). Sendo a célula fotovoltaica a unidade fundamental do processo de conversão. O efeito fotovoltaico, relatado por Edmond Becquerel, em 1839, é o aparecimento de uma diferença de potencial nos extremos de uma estrutura de material semicondutor, produzida pela absorção da luz. O aproveitamento da energia gerada pelo Sol, inesgotável na escala terrestre de tempo, tanto como fonte de calor quanto de luz, é hoje, sem sombra de dúvidas, uma das alternativas energéticas mais promissoras para se enfrentar os desafios do novo milênio. E quando se fala em energia, deve-se lembrar que o Sol é responsável pela origem de praticamente todas as outras fontes de energia. Em outras palavras, as fontes de energia são, em última instância, derivadas da energia do Sol [GTES,1999].

Nos últimos anos a energia fotovoltaica tem sido vista internacionalmente como uma tecnologia bastante promissora. Experiências internacionais apresentam importantes contribuições para análise sobre expansão do mercado, ganhos na escala de produção e redução de custos para os investidores. Estima-se que o Brasil possua atualmente cerca de 20MW de capacidade de geração solar fotovoltaica instalada, em sua grande maioria (99%, segundo IEA, 2011) destinada ao atendimento de sistemas isolados e remotos, principalmente em situações em que a extensão da rede de distribuição não se mostra economicamente viável. Também se observa o uso destes sistemas em aplicações como suporte a antenas de telefonia celular e a radares de trânsito.

Em [EPE, 2012], o Brasil possui uma série de características naturais favoráveis, tais como, altos níveis de insolação e grandes reservas de quartzo de qualidade, que podem gerar importante vantagem competitiva para a produção de silício com alto grau de pureza, células e módulos solares, produtos estes de alto valor agregado. Tais fatores potencializam a atração de investidores e o desenvolvimento de um mercado interno, permitindo que se vislumbre um papel importante na matriz energética para este tipo de tecnologia.

Matriz energética é toda energia disponibilizada para ser transformada, distribuída e consumida nos processos produtivos, é uma representação quantitativa da oferta de energia, ou seja, da quantidade de recursos energéticos oferecidos por um país ou por uma região.

A análise da matriz energética é fundamental para a orientação do planejamento do setor energético, que deve garantir a produção e o uso adequado da energia produzida, onde uma das informações mais importantes adquiridas é a quantidade de recursos naturais que está sendo utilizada, para saber se esses recursos estão sendo feitos de forma racional.

1.1 OBJETIVOS

A seguir, são descritos os objetivos deste trabalho tanto em caráter geral quanto específico.

1.1.1 OBJETIVO GERAL

Analisar a inserção da energia solar fotovoltaica na matriz elétrica brasileira.

1.1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Destacar o aproveitamento da energia solar, assim como a caracterização da cadeia industrial, o potencial nacional e a competitividade da geração fotovoltaica e os incentivos que este tipo de geração vem recebendo.

1.1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO

No capítulo 2 faz-se uma revisão bibliográfica, sobre energia solar, irradiação com comparação da irradiação das cidades brasileiras com as melhores regiões do mundo, o seu aproveitamento nas aplicações diretas podem ser classificadas como energia solar ativa e a

passiva. A primeira pode ser dividida ainda como solar heliotérmica, solar térmica e fotovoltaica. A energia solar passiva, por sua vez, é resumida às aplicações da arquitetura solar.

No capítulo 3, aborda-se uma evolução histórica da energia solar no Brasil proporcionando uma visão sobre o Sistema Fotovoltaico, assim como os equipamentos empregados. Ainda neste capítulo é apresentado os modelos matemáticos simplificado e o detalhado, as iniciativas mais recentes de promoção da inserção desta fonte assim com a identificação dos atributos favoráveis e as barreiras à inserção fotovoltaica. Apresentam-se ainda as políticas de incentivos adotadas por alguns países selecionados e os impactos destas políticas sobre a demanda e o desenvolvimento da indústria fotovoltaica, e toda sua cadeia, em cada um destes países. Programas de incentivos têm sido utilizados em diversos países do mundo para, de forma geral, encorajar a indústria fotovoltaica a atingir a escala necessária para competir com outras fontes de geração de eletricidade.

Neste capítulo mostra que o Brasil é um país privilegiado, pois a maior parte do território brasileiro está localizada relativamente próxima da linha do Equador, de forma que não se observam grandes variações na duração solar do dia.

No capítulo 4, apresenta-se, a inserção da energia fotovoltaica na matriz elétrica brasileira, os aspectos econômicos, tais como custo de implantação e produção, apresentado reduções significativas, fazendo com que a geração fotovoltaica já comece a se tornar competitiva com relação a algumas fontes de geração de eletricidade. Ainda é apresentado uma visão sobre a indústria fotovoltaica nacional e incentivos para que ela possa se desenvolver e competir com os das grandes empresas multinacionais do ramo. Assim como medidas para que haja uma aceleração da demanda.

No capítulo 5, faz-se as considerações finais e conclusões sobre a inserção da energia fotovoltaica na matriz elétrica do Brasil, levando-se em consideração tudo que foi apresentado nos capítulos anteriores.

2 A ENERGIA SOLAR

2.1 A ENERGIA SOLAR IRRADIADA NO BRASIL

A energia solar irradiada na superfície da Terra é suficiente para atender 10.000 vezes o consumo de energia do mundo. Somente a luz do sol é capaz de produzir uma média de 1.700 kWh de energia elétrica por ano para cada metro quadrado de área [Brakmann et alii, 2003]. Entretanto, o aproveitamento desta energia exige o conhecimento das componentes direta e difusa da sua radiação local. Dessa maneira, é necessário medir a radiação e a insolação. A primeira é feita através de piranômetros, que fazem o registro da energia solar que incide em todo o hemisfério celeste. A última é medida por heliógrafos, que determinam a duração da radiação solar direta no período de tempo considerado [Craveiro, 2005].

No Brasil, existem levantamento de dados de radiação solar [Lyra et alii, 1993], dentre eles pode-se destacar o Atlas Solarimétrico do Brasil [Tiba, 2000], Atlas brasileiro de energia solar [Bueno, 2006].

O índice de radiação solar do Brasil é um dos mais altos do mundo. Grande parte do território brasileiro está localizada relativamente próxima a linha do Equador, de forma que não se observam grandes variações de radiação solar durante o dia. A região nordeste do Brasil, por estar ainda mais próxima do que as demais regiões, é a que possui maior área de radiação solar e também aonde ela é mais eficaz.

A radiação solar no país varia de 8 a 22 MJ/m² durante o dia, sendo que as menores variações ocorrem nos meses de maio a julho, quando a radiação é varia de 8 a 18 MJ/m² como mostra a Figura 2.1.

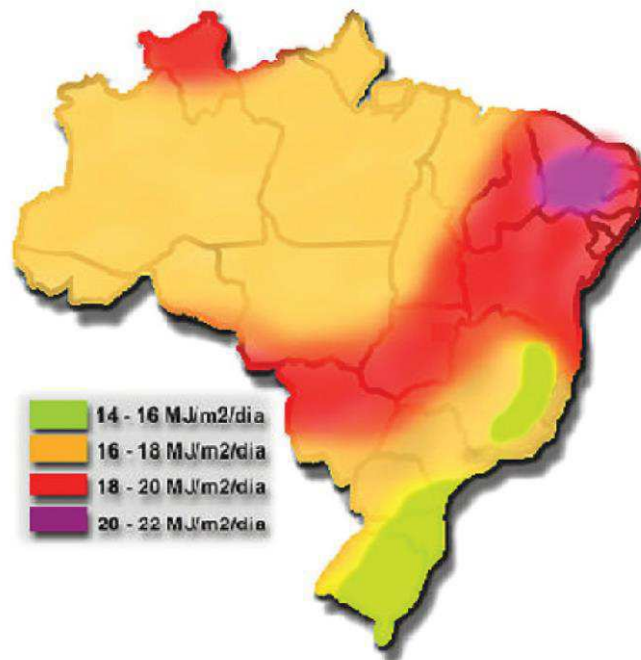


Figura 2.1- Variação da radiação solar no Brasil

Fonte: Tiba, 2000.

A região do Nordeste brasileiro é a que possui maior radiação solar, com média anual comparável as melhores regiões do mundo, como a cidade de Dongola, no deserto do Sudão, e a região de Dagget no Deserto de Mojave, Califórnia (vide Tabela 2.1).

Tabela 2.1 - Comparação da irradiação das cidades brasileiras com as melhores regiões do mundo

Localidade	Radiação mínima (MJ/m ²)	Radiação máxima (MJ/m ²)	Média anual (MJ/m ²)	Radiação máx./Radiação min.
Dongola (Sudão)	19,1 (Dez)	27,7 (Mai)	23,8	1,4
Dagget (EUA)	7,8 (Dez)	31,3 (Jun)	20,9	4,0
Belém	7,8 (Dez)	19,9 (Set)	17,5	1,4
Florianópolis – PI	17,0 (Jun)	22,5 (Out)	19,7	1,3
Petrolina – PE	16,2 (Jun)	22,7 (Out)	19,7	1,4
B.J. Lapa – BA	15,9 (Jun)	21,1 (Out)	19,7	1,3
Cuiabá – MT	14,7 (Jun)	20,2 (Out)	18,0	1,4
B. Horizonte – MG	13,8 (Jun)	18,6 (Out)	16,4	1,3
Curitiba – PR	9,7 (Jun)	19,4 (Jan)	14,2	2,0
P. Alegre – RS	8,3 (Jun)	22,1 (Dez)	15,0	2,7

Fonte: Adaptado de Atlas Solarimétrico do Brasil, 2000.

Analisando-se as radiações solar de outras regiões, como Dongola no Sudão e Dagget nos EUA, verifica-se que a radiação mínima, radiação máxima e a média anual do Brasil não fica a desejar. Os valores de irradiação solar global incidente em qualquer região do território brasileiro são superiores aos da maioria dos países da União Europeia (como Alemanha,

França e Espanha), onde projetos para aproveitamento de recursos solares, alguns contando com fortes incentivos governamentais, são amplamente disseminados.

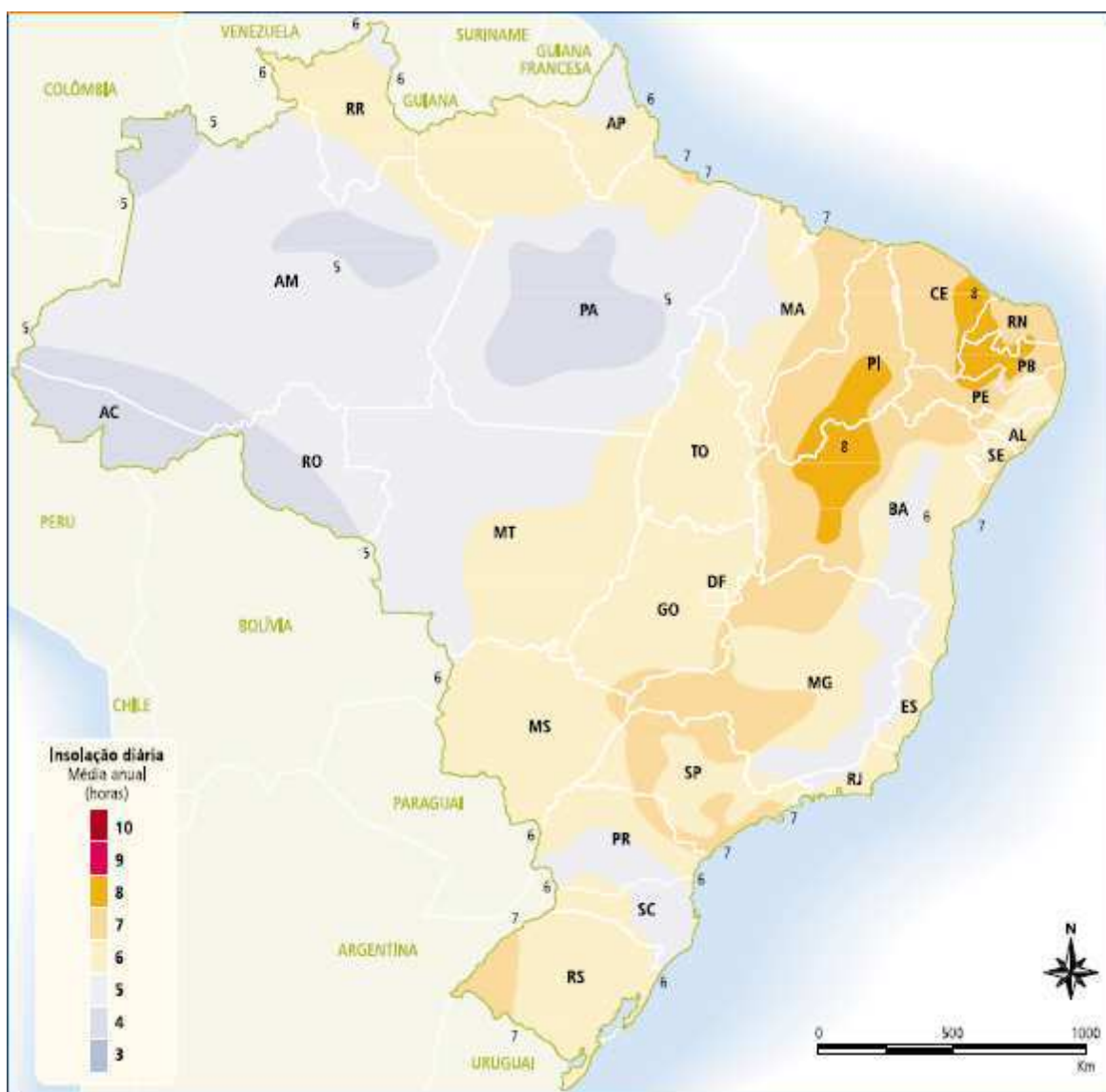


Figura 2.2- Média anual de insolação diária no Brasil (horas)

FONTE: ATLAS SOLARÍMÉTRICO DO BRASIL., 2000.

2.1.1 APROVEITAMENTO DA ENERGIA SOLAR

As aplicações diretas podem ser classificadas como energia solar ativa e a passiva. A primeira pode ser dividida ainda como solar heliotérmica, solar térmica e fotovoltaica. A energia solar passiva, por sua vez, é resumida às aplicações da arquitetura solar.

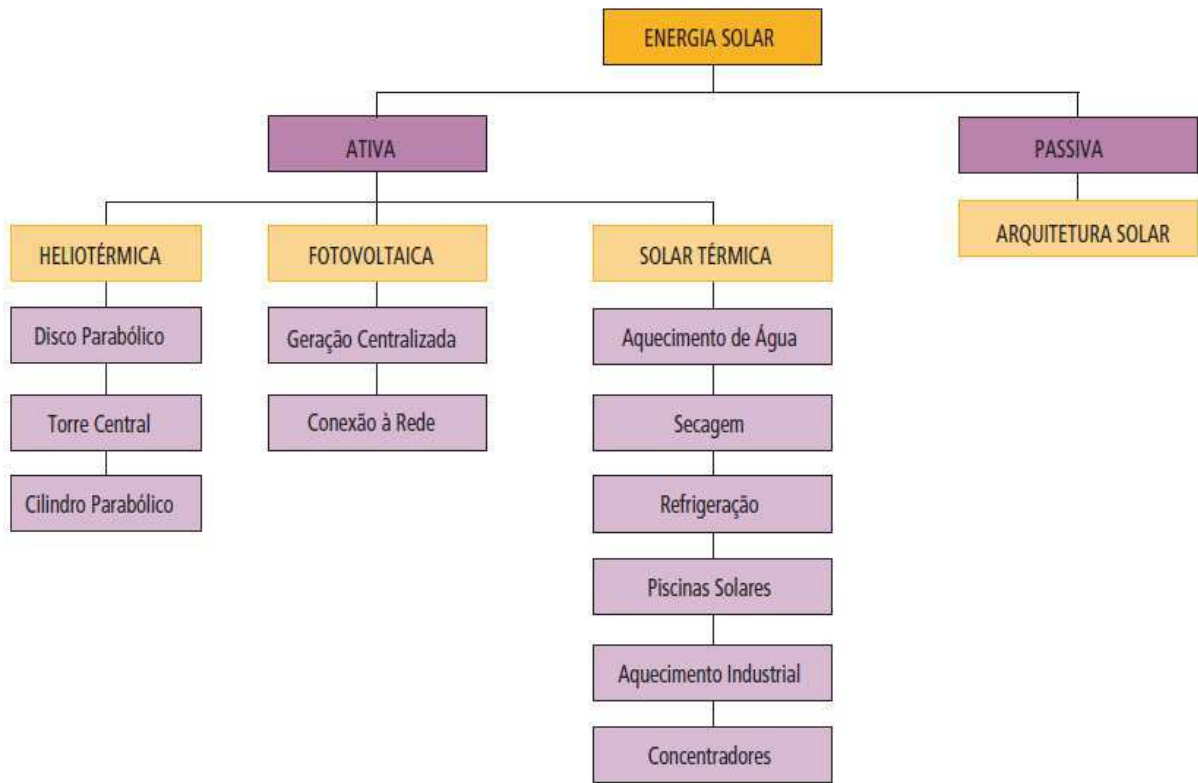


Figura 2.3 - Fluxograma das aplicações práticas de energia solar

Fonte: Pereira et alii, 2004.

2.1.2 ENERGIA SOLAR HELIOTÉRMICA

A energia solar heliotérmica é a conversão de irradiação solar em calor para geração de energia elétrica. O processo completo está ligado a otimização de quatro fatores: a coleta da irradiação solar, sua conversão em calor, o transporte e armazenamento do calor e sua conversão final em eletricidade. Para esse processo, todas as tecnologias heliotérmicas, cilindro parabólico, torre central e disco parabólico, contam com quatro itens básicos: coletor, receptor, armazenamento, transporte e conversão. Os coletores concentram a irradiação usando refletores ou lentes com sistema de rastreamento em um receptor, onde a energia solar é absorvida como calor e convertida em eletricidade ou incorporada como energia química. Cada uma das tecnologias é caracterizada pelo formato da superfície refletora onde a luz solar é coletada e concentrada.

2.1.3 ENERGIA SOLAR TÉRMICA

A energia solar térmica é obtida através de coletores planos ou de concentradores solares. Diferentemente das células fotovoltaicas, a solar térmica é usada para gerar calor, não somente para aquecimento de água no uso doméstico ou em piscinas, mas também para secagem ou aquecimento industrial, enfim, para uma série de aplicações como mostrado na Figura 2.4.

Segundo [Pereira et alii (2004)], o aproveitamento da energia solar térmica, através de instalações de aquecimento solar de pequeno, médio e grande porte, tem-se mostrado como uma solução técnica e economicamente viável, tanto para o consumidor residencial, quanto para as concessionárias de energia. No caso do setor residencial, a substituição dos chuveiros elétricos pode representar uma grande economia de energia e, do lado das concessionárias, propicia a modulação da curva de carga, já que a demanda no horário de ponta pode atingir até cinco vezes a média de potencial requerida.



Figura 2.4 - –O aquecimento solar baseia-se na convecção natural da água(esq). Emprego de coletores planos num conjunto habitacional no Brasil (Dir).

Fonte: ABINEE, 2012

2.1.4 ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA

A tecnologia fotovoltaica, por sua vez, é um processo em que um material semicondutor é adaptado para liberar elétrons, as partículas negativamente carregadas que formam a base da eletricidade. O material semicondutor mais comum é o silício. Todas as células fotovoltaicas têm, pelo menos, duas camadas de tais semicondutores, uma positiva e outra negativamente carregada. Quando a luz do sol atinge o semicondutor, o campo elétrico entre a junção das duas camadas inicia um fluxo de energia, gerando corrente contínua.



Figura 2.5 -Conjunto de módulos de silício monocristalino utilizados para produzir energia elétrica

Fonte: ABINEE, 2012

Quanto maior a intensidade de luz, maior o fluxo de eletricidade. Um sistema fotovoltaico não precisa do brilho do sol para operar. Ele também gera eletricidade em dias nublados, entretanto, a quantidade de energia gerada depende da densidade das nuvens. Devido à reflexão da luz do sol, dias com poucas nuvens podem resultar em mais produção de energia do que dias completamente claros.

O crescimento da energia solar tem sido exponencial como mostra a figura 2.6. A indústria tem crescido de forma constante ao longo dos últimos anos, passando de uma base instalada de aproximadamente 5.000 MW em 2005 para quase 100.000 MW em 2012.

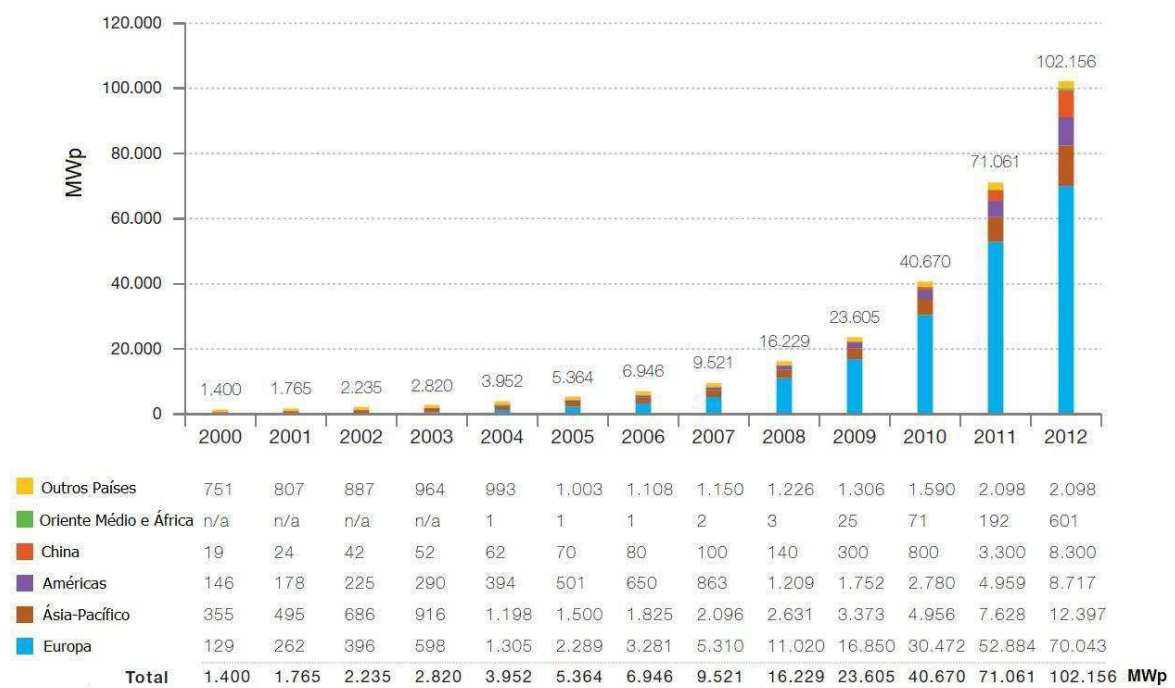


Figura 2.6- Evolução da potência instalada em sistemas fotovoltaicos no mundo.

Fonte: EPIA, 2013.

Esse crescimento foi liderado originalmente por países europeus, que entre 2005 e 2012 foram responsáveis por 60 por cento a 85 por cento da procura global anual. Outros mercados emergentes também estão adicionando quantidades significativas de energia solar fotovoltaica como é caso Ásia- Pacífico com destaque para China e Índia e as Américas.

3 ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA

O objetivo deste capítulo é apresentar uma evolução histórica no Brasil proporcionando uma visão sobre o Sistema Fotovoltaico, destacar as iniciativas mais recentes de promoção da inserção desta fonte e identificar os atributos favoráveis e as barreiras à inserção fotovoltaica.

3.1 EVOLUÇÃO HISTÓRICA

O uso da energia solar fotovoltaica no Brasil contou com algumas iniciativas voltadas para a eletrificação rural, através de concessionárias e instituições, conforme [VARELLA,2012]

Com a “Lei da Informática”, instituída em 1991, que estabelecia barreiras alfandegárias à importação de equipamentos de informática com o intuito de desenvolver a indústria nacional; e também protegia os equipamentos fotovoltaicos por empregarem silício monocristalino nas células solares. Esta lei trouxe resultados modestos à indústria nacional antes de o governo Collor dar um fim às barreiras alfandegárias em 1992.

Em 1994 foi criado O Programa de Desenvolvimento Energético de Estados e Municípios (PRODEEM), que promoveu a aquisição de sistemas fotovoltaicos por meio de licitações internacionais. Sendo instalado o equivalente a 5 MWp em aproximadamente 7.000 comunidades em todo Brasil como mostra a tabela 3.1. O PRODEEM foi incorporado ao Programa Luz para Todos como intuito de atender localidades remotas, para as quais a extensão da rede de distribuição traz custos proibitivos.

Tabela 3.1: Número de instalações e quantidade em kWp adquirido pelo PRODEEM

Fase		I	II	III	Bomb.	IV	V	Total	
Sistema FV de geração de energia	Qtd	190	387	677	x	1660	3000	5914	
	kWp	87	200	419	X	972	2172	3850	
Sistema FV de bombeamento d'água	Qtd	54	179	176	800	1240	x	24449	
	kWp	78	211	135	235	696	X	1355	
Sistema FV de iluminação pública	Qtd	137	242	X	x	X	X	379	
	kWp	7,5	17	x	X	x	X	24,5	
							Total	Qtd	8742
								kWp	5209,5

(Fonte: CRESESB,2002)

Em agosto de 2011, a ANEEL tornou pública a chamada N°. 013/2011 “Arranjos técnicos e comerciais para inserção da geração solar fotovoltaica na matriz energética brasileira”. Trata-se de uma chamada para projetos de pesquisa e desenvolvimento (P&D), nessa área, que foi incluída pela agência na lista de temas estratégicos. As empresas concessionárias de distribuição e geração de energia, que devem investir, de forma compulsória, uma fração de suas receitas operacionais líquidas em P&D, já submeteram projetos. Na introdução da chamada pública a ANEEL elenca alguns dos objetivos gerais a serem buscados pelos projetos de P&D.

Em abril de 2012, A ANEEL aprovou uma Resolução Normativa, criando a regulamentação necessária para que os consumidores de energia elétrica possam ser também geradores de energia. Inicia-se assim, a era da *Micro e Mini Geração Distribuída* no Brasil. Aos consumidores de eletricidade é permitido gerar parte ou todo o potencial elétrico que consomem, utilizando geradores que trabalham junto com a rede de distribuição, em regime de troca de energia.

3.2 EFEITO FOTOVOLTAICO

O efeito fotovoltaico foi observado pela primeira vez pelo físico francês Alexandre Edmond Becquerel em 1839 (utilizando o primeiro componente eletrônico da história). Sendo o surgimento de uma tensão elétrica em um material semicondutor, quando é exposto à luz visível.

Células fotovoltaicas são fabricadas com material semicondutor, ou seja, material com características intermédias entre um condutor e um isolante.

O silício apresenta-se normalmente como areia. Através de métodos adequados obtém-se o silício em forma pura. O cristal de silício puro não possui elétrons livres e, portanto é mal condutor elétrico. Para alterar isto acrescentam-se porcentagens de outros elementos. Este processo denomina-se dopagem.

O silício possui quatro elétrons de valência e necessita de mais quatro átomos vizinhos para formar uma ligação covalente. Ao inserir um elemento de 5 elétrons de valência(ex.: fósforo ou arsênio) o quinto elétron ficará fracamente ligado ao átomo de origem e, quando o semiconductor estiver à temperatura ambiente, esse elétron ficará livre, fazendo com que o cristal de silício *dopado* com esse material fique negativamente carregado. Esse é um semiconductor do **Tipo N**.

Realizando o mesmo processo, mas agora acrescentado Boro ao invés de Fósforo, obtém-se um material com características inversas, ou seja, falta de elétrons ou material com cargas positivas livres (silício tipo P).

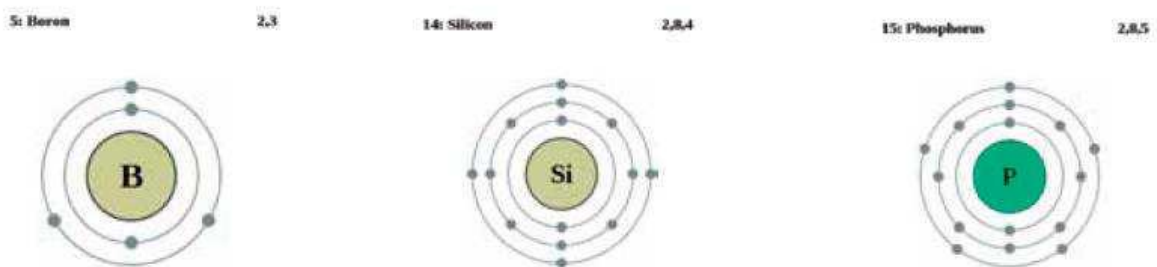


Figura 3.1-Célula de boro (esq.), silício (centro) e fósforo (dir.) com número de elétrons na banda de valência, respectivamente igual a 3,4, e 5. Isto explica porque o boro é utilizado como dopante para formar o semiconductor tipo-p e o fósforo para formar o semiconductor tipo-n de uma célula de silício.

Fonte:GTES,2014

Para formar uma célula fotovoltaica são unidos os dois tipos de semiconductor. Na área da união, chamada de Junção-PN, os elétrons livres do semiconductor tipo N migrarão para o semiconductor tipo P. Essa migração não ocorre indefinidamente, pois forma-se um campo elétrico na área de junção que impede que os elétrons continuem fluindo.

Ao receberem fótons de luz visível os elétrons são energizados, mas não conseguem fluir da camada N para a camada P. Ao ligar as duas camadas externamente, pode-se aproveitar a corrente elétrica que se forma na passagem dos elétrons de uma camada para outra. É assim que funciona uma célula fotovoltaica.

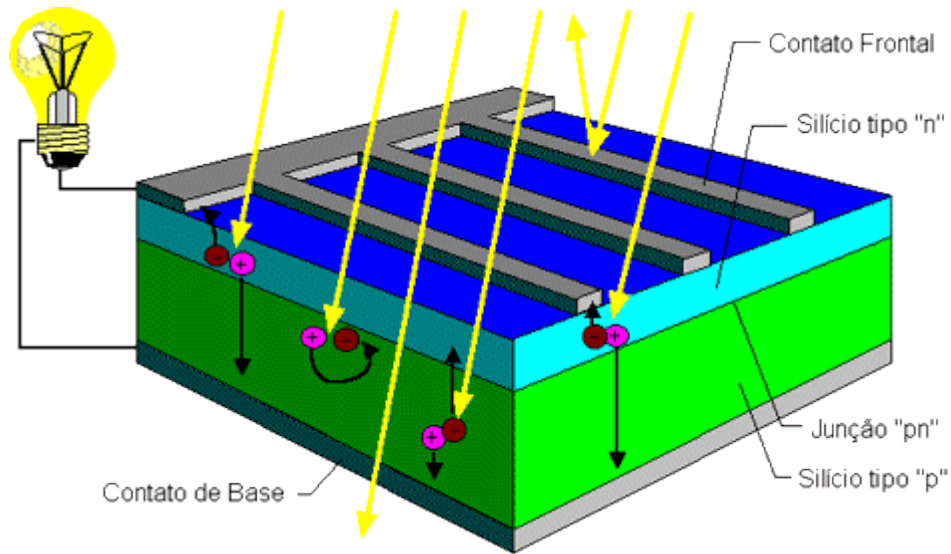


Figura 3.2- Corte transversal de uma célula fotovoltaica mostrando o funcionamento do efeito fotovoltaico

Fonte: BLUESOL EDUCACIONAL, 2011.

3.3 MODELO MATEMÁTICO

3.3.1 ESTABELECIMENTO DO MODELO SIMPLIFICADO

Em [Castro, 2002], no modelo matemático simplificado, uma célula pode ser descrita através do circuito elétrico equivalente que se mostra na Figura 3.6.

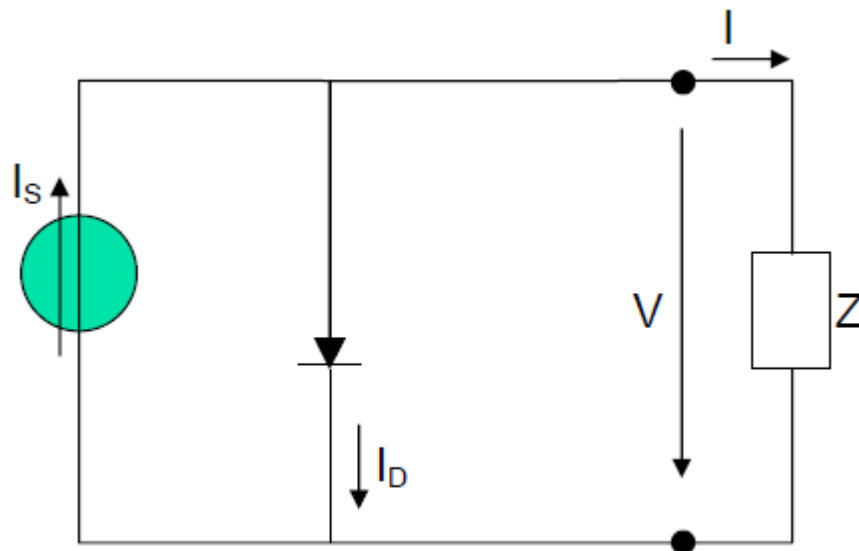


Figura 3.3 Circuito elétrico equivalente de uma célula fotovoltaica alimentando uma carga Z ; modelo simplificado.

FONTE: CASTRO 2002

A fonte de corrente I_s representa a corrente eléctrica gerada pelo feixe de radiação luminosa, constituído por fótons, ao atingir a superfície ativa da célula (efeito fotovoltaico); esta corrente unidirecional é constante para uma dada radiação incidente. A *junção p-n* funciona como um díodo que é atravessado por uma corrente interna unidirecional I_D , que depende da tensão V aos terminais da célula.

A corrente I_D que se passa através do díodo é:

$$I_D = I_0 \left(e^{\frac{v}{mV_T}} - 1 \right) \quad (1)$$

Em que:

- I_0 – corrente inversa máxima de saturação do díodo
- V – tensão aos terminais da célula
- m – *fator de idealidade do díodo* (díodo ideal: $m = 1$; díodo real: $m > 1$)
- V_T – designado por *potencial térmico* $V_T = \frac{KT}{q}$
- ✓ - K : *constante de Boltzmann* ($K = 1,38 \times 10^{-23} \text{ J}^\circ\text{K}$)
- ✓ - T : temperatura absoluta da célula em $^\circ\text{K}$ ($0^\circ\text{C} = 273,16 \text{ }^\circ\text{K}$)
- ✓ - q : carga eléctrica do eletro ($q = 1,6 \times 10^{-19} \text{ C}$)

A corrente I que se passa pela carga é, portanto:

$$I = I_s - I_D = I_s - I_0 \left(e^{\frac{v}{mV_T}} - 1 \right) \quad (2)$$

Dois pontos de operação da célula merecem atenção particular:

1- Curto-circuito exterior

Neste caso é:

$$\begin{aligned} V &= 0 \\ I_D &= 0 \\ I &= I_s = I_{cc} \end{aligned} \quad (3)$$

I_{cc} (corrente de curto-circuito) é o valor máximo da corrente de carga, igual, portanto, à corrente gerada por efeito fotovoltaico. O seu valor é uma característica da célula, sendo um dado fornecido pelo fabricante para determinadas condições de radiação incidente e temperatura.

2- Circuito aberto

Neste caso é:

$$I = 0$$

$$V_{ca} = mV_T \ln \left(1 + \frac{I_S}{I_0} \right) \quad (4)$$

V_{ca} (tensão em vazio) é o valor máximo da tensão aos terminais da célula, que ocorre quando esta está em vazio. O seu valor é uma característica da célula, sendo um dado fornecido pelo fabricante para determinadas condições de radiação incidente e temperatura.

3.3.2 MODELO DETALHADO

O modelo simplificado como o próprio nome indica, não é uma representação rigorosa da célula fotovoltaica. Nas células “reais” observa-se uma queda de tensão no circuito até aos contatos externos, a qual pode ser representada por uma resistência série R_s . Do mesmo modo, também existem correntes de fuga, que podem ser descritas por uma resistência paralela, R_p . O circuito elétrico equivalente é o que se representa na Figura 3.4.

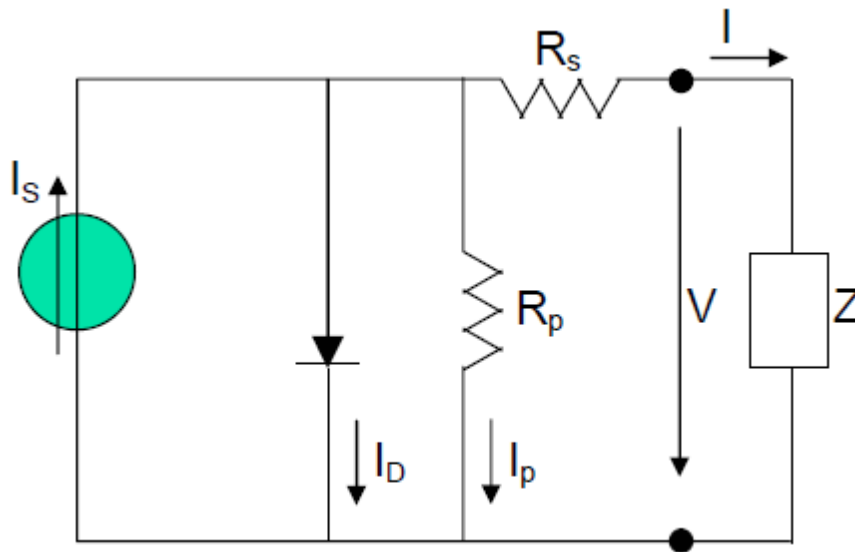


Figura 3.4- Circuito elétrico equivalente detalhado de uma célula fotovoltaica alimentando uma carga z .

FONTE: CASTRO, 2002

A corrente I que se fecha pela carga é:

$$I = I_S - I_D - I_p = I_S - I_0 \left(e^{\frac{V+R_S I}{mV_T}} - 1 \right) - \frac{V+R_S I}{R_p} \quad (5)$$

3.4 SISTEMAS FOTOVOLTAICOS

Sistemas fotovoltaicos são compostos por módulos, inversores, dispositivos de proteção, sistema de fixação e suporte dos módulos, cabos e, opcionalmente, baterias e controladores de carga, que são mais usuais em sistemas isolados.

Cabe destacar que existem fabricantes nacionais e internacionais estabelecidos no Brasil para baterias, controladores de carga e inversores, como ABB, CP Eletrônica, Eltek, Enertec, Moura, PHB, Santerno, Tudor, Unitron, WEG, entre outras. Para módulos fotovoltaicos, 2011 marca o início do funcionamento da fábrica da Tecnometal, em Campinas, que utiliza componentes nacionais e importados (e entre estes as células). Ainda não há produção nacional de células fotovoltaicas em escala industrial.

A cadeia de produção da indústria fotovoltaica começa na extração do quartzo e seu beneficiamento para produção de lingotes de silício. Seguem-se a fabricação das células e painéis fotovoltaicos e a produção dos equipamentos eletromecânicos complementares como mostra figura 3.5.



Figura 3.5– Cadeia produtiva fotovoltaica

Fonte: CGEE 2010

O fato é que no Brasil, atualmente, não há uma cadeia produtiva consolidada de sistemas fotovoltaicos, embora o País detenha uma das maiores reservas mundial de Silício, que é a matéria prima para a fabricação desses componentes.

A oportunidade para a inserção da tecnologia fotovoltaica no contexto energético nacional, com a criação de um parque industrial competitivo, capaz, inclusive, de disputar o mercado internacional, está condicionada à instalação de indústrias de beneficiamento do Silício para fabricá-lo no grau de pureza solar.

Existe um grande e crescente mercado de silício no mundo, do qual o Brasil só participa como exportador de Silício metalúrgico, de baixo valor agregado. O beneficiamento para a obtenção de graus maiores de pureza multiplica de 7 a 10 vezes o valor desse material

para exportação, além de tornar mais abundante e acessível no país a matéria-prima para sistemas fotovoltaicos a custos competitivos. Esse mercado crescente, e a consequente diminuição dos custos permitem vislumbrar que, num futuro não muito distante, essa tecnologia poderá tornar-se uma alternativa econômica e viável para a geração distribuída em ambiente urbano, onde particulares, por iniciativa própria, se tornarão suas próprias “companhias” de energia. O Brasil pode optar por ser um mero expectador deste processo ou um líder atuante. [GT-GDSF ,2009]

3.4.1 MÓDULOS

A tensão de circuito aberto de cada célula fotovoltaica é pequena, da ordem de 0,5-0,6 Volts para células de silício cristalino. O número de módulos é definido de maneira a atingir a potência desejada. Os módulos podem ser ligados em série e/ou em paralelo dependendo da corrente e tensão desejadas.

A potência nominal de uma célula ou módulo solar fotovoltaico é a potência de pico (ou potência máxima) obtida sob condições padrão de teste (CPT). Daí vem o fato de se incluir o sufixo “pico” (ou “p”) à unidade de potência utilizada.

Watt-pico(Wp) é uma medida de potência energética, normalmente associada com células fotovoltaicas. As unidades mais correntemente usadas são os múltiplos do Wp, como o kWp ou o MWp. Dado que as condições de produção de energia elétrica dependem bastante de fatores externos à célula, o valor da potência dado em Wp é um valor obtido em condições ideais específicas. Assim, o valor de Wp de um determinado sistema fotovoltaico que funcione em corrente contínua é a potência medida, quando este sistema é irradiado por uma luz que simula a luz solar com a potência de 1000 W/m², à temperatura de 25°C.

Tipos de módulos

Os materiais mais utilizados hoje para a fabricação das células fotovoltaicas são o silício monocristalino e policristalino e os chamados filmes finos: silício amorfo e silício microcristalino

O *silício monocristalino* é o material mais usado na composição das células fotovoltaicas, atingindo cerca de 60% do mercado. A uniformidade da estrutura molecular resultante da utilização de um cristal único é ideal para potenciar o efeito fotovoltaico. O rendimento máximo atingido em laboratório ronda os 24%, o qual em utilização prática se reduz para cerca de 15%. A produção de silício cristalino é cara.

O *silício policristalino*, constituído por um número muito elevado de pequenos cristais da espessura de um cabelo humano, dispõe de uma quota de mercado de cerca de 30%. As descontinuidades da estrutura molecular dificultam o movimento de elétrons e encorajam a recombinação com as lacunas, o que reduz a potência de saída. Por este motivo os rendimentos em laboratório e em utilização prática não excedem os 18% e 12%, respectivamente. Em contrapartida, o processo de fabricação é mais barato do que o do silício cristalino.

O *silício amorfo* não tem estrutura cristalina, apresentando defeitos estruturais que, em princípio, impediriam a sua utilização em células fotovoltaicas, uma vez que aqueles defeitos potenciavam a recombinação dos pares elétrons lacuna. No entanto, se ao silício amorfo for adicionada uma pequena quantidade de hidrogénio, por um processo chamado *hidrogenização*, os átomos de hidrogénio combinam-se quimicamente de forma a minimizar os efeitos negativos dos defeitos estruturais. O silício amorfo absorve a radiação solar de uma maneira muito mais eficiente do que o silício cristalino, pelo que é possível depositar uma *fina película* de silício amorfo sobre um substrato (metal, vidro, plástico). Este processo de fabricação é ainda mais barato do que o do silício policristalino. Os equipamentos solares domésticos (calculadoras, relógios) são habitualmente feitos com células de silício amorfo, representando cerca de 4% do mercado. Em laboratório é possível obter rendimentos da ordem de 13%, mas as propriedades conversoras do material deterioram-se em utilização prática, pelo que os rendimentos descem para cerca de 6%.



Figura 3.6– Módulos fotovoltaicos mais comuns.

Fonte: ABINEE, 2012

3.4.2 INVERSORES

São dispositivos elétricos ou eletromecânicos capazes de converter um sinal elétrico CC (corrente contínua) variável produzido pelos módulos em sinal elétrico CA (corrente alternada), em tensão adequada (a mesma da rede elétrica) e com frequência e formato de onda o mais próximos da corrente da rede elétrica, no caso de sistemas interligados.

O processo produtivo de inversores para aplicações fotovoltaicas tem grande sinergia com a produção de equipamentos eletroeletrônicos para aplicações na área de informática, telecomunicações e geração de energia. Logo os fabricantes nacionais produzem um número significativo de equipamentos, com capacidade para atuação no mercado global.

3.4.3 CONTROLADORES DE CARGA E BATERIAS

Os controladores são dispositivos eletrônicos que operam a corrente contínua com a função primordial de administrar a carga e a descarga das baterias. São normalmente empregados em sistemas isolados, controlando a geração fotovoltaica, que é armazenada nas baterias durante o dia (carga), e a descarga da bateria para atendimento ao consumo durante o dia e à noite.



Figura 3.7–Controlador de carga (esquerda) e banco de baterias (direita).

Fonte: GTES, 2000

A produção nacional de baterias, que não é voltada exclusivamente para o setor fotovoltaico, é capaz de atender às demandas do setor. Particularmente, este é um segmento onde a importação esbarra em questões logísticas importantes, uma vez que o produto final, devido a suas dimensões, tem elevado custo de transporte.

3.4.4 CABOS

Os cabos são dimensionados de forma a reduzirem as perdas de potência nas instalações em função da distância entre as cadeias dos módulos fotovoltaicos e o inversor, tensão e/ ou corrente. Entre os módulos e os inversores e entre os inversores e o quadro de força devem existir esquemas de proteção, que são disjuntores, dispositivos de proteção contra surtos atmosféricos, chaves seccionadoras etc., empregados para proteger e isolar o sistema fotovoltaico para execução de reparos ou manutenção.

A produção de cabos e dos demais componentes do sistema fotovoltaico, o *balance of system*, BoS, é quase totalmente feita no Brasil, uma vez que seus produtos não são manufaturados exclusivamente para a indústria fotovoltaica. Existem diversos produtores nacionais de cabos, fios, proteções, antenas, chicotes elétricos e estruturas.

3.4.5 ESTRUTURA DE SUPORTE

Normalmente estruturas metálicas (alumínio anodizado ou aço inox) são utilizadas para a fixação dos módulos nos telhados ou no solo. Em algumas usinas os suportes podem estar acoplados a dispositivos projetados para acompanhar o movimento aparente do sol no céu, para maximizar a produção de energia. O ganho econômico decorrente do aumento na produção de energia deve superar o incremento no custo decorrente da instalação de eixos móveis (um ou dois eixos) somado ao incremento no custo de operação e manutenção do sistema.

3.5 APLICAÇÕES DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS

Os Sistemas Fotovoltaicos (SFV) podem ser classificados em duas categorias principais: isolados e conectados à rede. Em ambos os casos, podem operar a partir apenas da fonte fotovoltaica ou combinados com uma ou mais fontes de energia, quando são chamados de híbridos.

3.5.1 SISTEMAS FOTOVOLTAICOS ISOLADOS

Sistemas isolados (SFI), puramente fotovoltaicos (SFV) ou híbridos (SFH), em geral, necessitam de algum tipo de armazenamento. O armazenamento pode ser em baterias, quando

se deseja utilizar aparelhos elétricos nos períodos em que não há geração fotovoltaica, ou em outras formas de armazenamento de energia. A bateria também funciona como uma referência de tensão c.c. para os inversores formadores da rede do sistema isolado.

Os sistemas isolados foram regulamentados inicialmente pela Resolução Aneel N° 83/2004, a qual teve um papel importante na inserção dos sistemas fotovoltaicos nos programas de eletrificação rural no país. Devido ao potencial de uso das diferentes configurações usando fontes intermitentes e à demanda por atendimento de minirredes isoladas, a Aneel publicou em junho de 2012 a Resolução Aneel N° 493/2012 (ANEEL, 2012), que substituiu a anterior e estabelece os procedimentos e as condições de fornecimento por meio de Microssistema Isolado de Geração e Distribuição de Energia Elétrica, além do Sistema Individual de Geração de Energia Elétrica com Fontes Intermitentes, o qual já havia sido regulamentado pela resolução anterior. A figura 3.8 mostra o esquema de um SFI básico

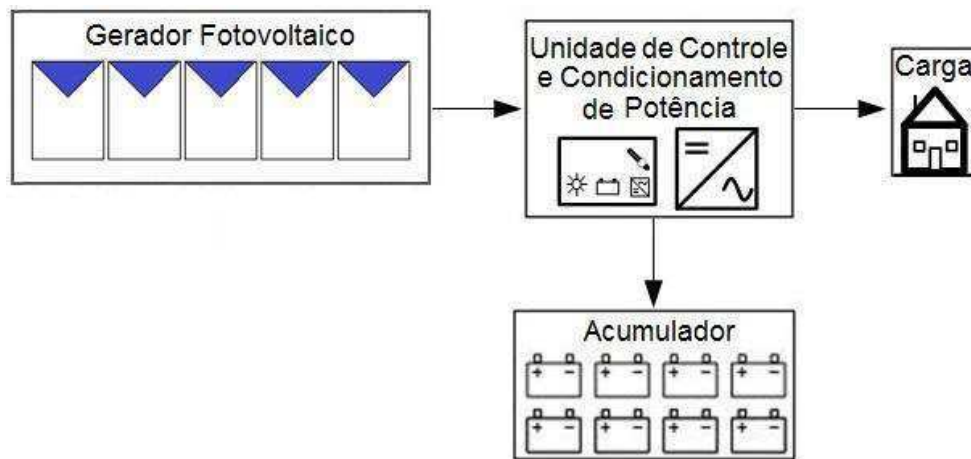


Figura 3.8 - Configuração básica de um SFI.

Fonte: ABINEE, 2012

3.5.2 SISTEMAS DE TELECOMUNICAÇÕES E MONITORAMENTO REMOTO

Desde o início de suas aplicações terrestres, os Sistemas Fotovoltaicos são usados para fornecer energia para a área de telecomunicações, devido à sua simplicidade e reduzida manutenção. A confiabilidade das fontes de energia para a maioria das aplicações nesta área deve ser bastante alta. Geralmente, esses sistemas necessitam de baixa potência e são instalados em áreas remotas com acesso limitado e, frequentemente, com severas condições climáticas (vento, maresia).



Figura 3.9– Torres de telecomunicação com alimentação através de energia solar.

Fonte: Suncomex

3.5.3 SISTEMAS CONECTADOS À REDE

Sistemas conectados à rede são aqueles em que a potência produzida pelo gerador fotovoltaico é entregue diretamente à rede elétrica. Para tanto, é indispensável que se utilize um inversor que satisfaça às exigências de qualidade e segurança, para que não degrade a qualidade do sistema elétrico ao qual se interliga o gerador fotovoltaico. Os Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede (SFCCR) foram incluídos na regulamentação disposta pela Aneel, através da Resolução 482 de abril de 2012, que estabeleceu preliminarmente as condições gerais para o acesso de microgeração e minigeração distribuída aos sistemas de distribuição de energia elétrica.

No Brasil, os sistemas fotovoltaicos enquadrados como sistemas de micro e minigeração, são regulamentados pela Resolução Normativa Aneel Nº 482/2012, e devem atender aos Procedimentos de Distribuição (PRODIST), Módulo 3, e às normas de acesso das distribuidoras locais. A Resolução 482 estabelece as condições gerais para o acesso de microgeração e minigeração distribuídas aos sistemas de distribuição de energia elétrica e o sistema de compensação de energia elétrica.



Figura 3.10: Exemplo de um sistema fotovoltaico centralizado conectado à rede elétrica

Fonte: Tractebelenergia.

Os sistemas conectados a rede vem ultimamente sendo o que mais consome painéis fotovoltaicos chegando em 2008 a 90% do total de painéis produzidos como mostra a figura 3.11.

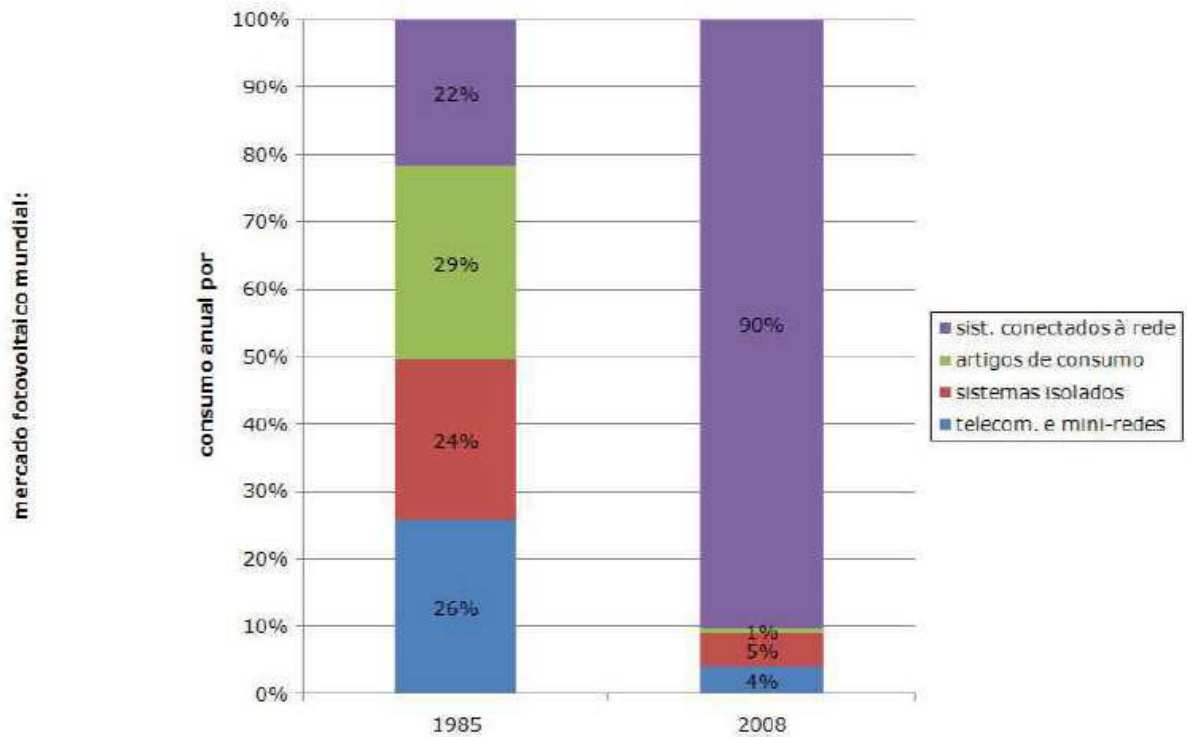


Figura 3.11- Paineis fotovoltaicos: Consumo por aplicação

(Fonte:IDEAL,2011, <http://www.americadosol.org/vendas/>)

3.6 BENEFÍCIOS DA ENERGIA FOTOVOLTAICA

Os sistemas fotovoltaicos conectados à rede (SFCR) em edificações podem atuar em sinergia com o sistema de distribuição, minimizando a carga, como aquela gerada por equipamentos de ar condicionado em centros comerciais. Nos centros urbanos, os sistemas fotovoltaicos poderão ser utilizados em áreas já ocupadas, telhados de residências, coberturas de estacionamentos e coberturas de edifícios, como unidades de geração distribuída.

Os impactos ambientais para a energia gerada por módulos fotovoltaicos são mínimos. Não há qualquer emissão na produção de energia com estes sistemas (100% livre de emissões).

3.7 POTENCIAL NACIONAL DE ENERGIA SOLAR

Em relação ao potencial de energia solar, o Brasil é um país privilegiado, pois a maior parte do território brasileiro está localizada relativamente próxima da linha do Equador, de forma que não se observam grandes variações na duração solar do dia.

Existem várias iniciativas no sentido de levantamento de dados de radiação solar para se determinar o potencial de energia solar. Entre elas estão o Atlas de Irradiação Solar do Brasil, de 1998, realizado pelo Instituto Nacional de Meteorologia – INMET e pelo Laboratório de Energia Solar da Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC, e o Atlas Solarimétrico do Brasil, de 2000, desenvolvido pela Universidade Federal de Pernambuco – UFPE e pela Companhia Hidroelétrica do São Francisco – Chesf, com apoio do Centro de Pesquisa de Energia Elétrica – CEPEL por meio de seu Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sergio de Salvo Brito – CRESESB. Mais recentemente, em 2006, foi publicado o Atlas Brasileiro de Energia Solar, produzido no âmbito do projeto SWERA – Solar and Wind Energy Resource Assessment, sob coordenação do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE. Para estimativa do potencial de energia solar no Brasil, o Atlas Brasileiro de Energia Solar pode ser considerada a referência mais atual e completa.

3.8 BARREIRAS À EXPANSÃO FOTOVOLTAICA NO BRASIL

3.8.1 ASPECTOS TÉCNICOS

As principais barreiras identificadas, dificultando a penetração da energia solar fotovoltaica, estão relacionadas com a inadequação do marco regulatório às especificidades dessa fonte, à complexidade das regras de comercialização para produtores em pequena escala e à falta de interesse de um ator fundamental para a promoção da energia solar fotovoltaica que são as distribuidoras de energia elétrica. Assim, torna-se necessário:

Os Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional (PRODIST) precisam ser revisitados de forma a simplificar. No entanto, a ANEEL deveria deixar espaço para as empresas detalharem seus procedimentos de forma a contemplar as características de cada concessão.

O Módulo 03 – Acesso aos Sistemas de Distribuição estabelece a rotina junto à concessionária de distribuição para a consulta de acesso e os critérios exigidos. No modelo atual, o prazo médio entre o pedido de informação de acesso e o efetivo acesso e indicação do ponto de conexão pode superar seis meses. Obviamente, tal prazo é uma barreira à promoção desse tipo de geração.

3.8.2 ASPECTOS ECONÔMICOS

Em diversos países há incentivos para a geração renovável em geral. Historicamente, o mais comum era o mecanismo de tarifa prêmio para a compra, em geral compulsória, da energia produzida por fontes renováveis, entre elas a solar, através de contratos de longo prazo (por exemplo, de 20 anos) conhecidas internacionalmente por *feed-in tariff*.

O Brasil teve seu programa de incentivo através do PROINFA – Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica, de 2004. O objetivo do PROINFA era aumentara participação da energia eólica, a biomassa e a energia gerada em pequenas centrais hidrelétricas (PCH) através de projetos conectados ao Sistema Elétrico Interligado Nacional (SIN). A energia solar não foi incluída no programa por, naquele momento, não se tratar de uma fonte considerada viável e estratégica, principalmente por seu custo de produção ser consideravelmente superior às demais fontes.

Em 2012, a ANEEL aprovou regulamentação a resolução normativa 481, que ampliou, para o caso da energia solar, a redução do desconto das tarifas de uso dos sistemas de transmissão (ou distribuição) de 50% para 80% nos dez primeiros anos de operação, regressando ao patamar de 50% de desconto nos anos subsequentes e a resolução normativa 482 estabelecendo um sistema de compensação de energia segundo o qual eventuais excessos da produção com relação ao consumo se transformam em créditos (kWh) que poderão ser aproveitado pelo consumidor nas próximas faturas da concessionária. Os créditos não podem ser acumulados indefinidamente, o que significa que no limite a produção se iguala ao consumo. Este mecanismo, juntamente com a simplificação do processo de conexão da instalação fotovoltaica com a rede, contribuirá para impulsionar o setor fotovoltaico.

3.9 INCENTIVOS À GERAÇÃO FOTOVOLTAICA

A fonte solar fotovoltaica tem se mantido como uma das tecnologias de geração de eletricidade que mais cresce no mundo. A redução nos custos de equipamentos, as novas tecnologias, o grande e crescente interesse dos investidores e uma forte política de incentivos à geração a partir de fontes renováveis explicam este movimento. Serão apresentadas as políticas de incentivos adotadas por alguns países selecionados e os impactos destas políticas sobre a demanda e o desenvolvimento da indústria fotovoltaica, e toda sua cadeia, em cada um destes países.

Programas de incentivos têm sido utilizados em diversos países do mundo para, de forma geral, encorajar a indústria fotovoltaica a atingir a escala necessária para competir com outras fontes de geração de eletricidade. Tais programas possuem motivações diversas, tais como a promoção de independência energética, domínio tecnológico e redução das emissões de gases do efeito estufa.

A literatura reconhece como principais mecanismos de incentivo ao aproveitamento energético de fontes renováveis o sistema de cotas (renewable certificates e leilões de compra), pelo qual as distribuidoras de energia elétrica são obrigadas a atender parte de seu mercado com fontes renováveis, e o sistema de preços (feed-in tariff), pelo qual a geração por fontes renováveis é adquirida a preços diferenciados. Outros mecanismos típicos são os procedimentos de conexão à rede com *net metering* e os subsídios ao investimento ou produção. No sistema de preços, tal como praticado em países europeus, toda a energia produzida pela fonte incentivada é medida e remunerada a preços diferenciados. Em outras regiões, como proposto recentemente na Califórnia, apenas a parcela da energia exportada para a concessionária é medida e remunerada (net metering e net billing). [EPE,2012]

Tabela 3.2. Descrição dos principais mecanismos utilizados para incentivar a geração fotovoltaica

Mecanismos	Breve descrição
Tarifa-premio	Aquisição, pela distribuidora, da energia a uma tarifa superior aquela paga pelo consumidor. Subsídio dado pelo governo e repassado aos demais consumidores.
Cotas (ROC, RPO, REC, RPS e leilões)	Instrumento de aquisição obrigatória de determinado patamar de geração elétrica a partir de fontes renováveis.
Subsídio ao investimento inicial	Subsídio direto, seja sobre equipamentos específicos, seja sobre o investimento total no sistema fotovoltaico.
Dedução no imposto de renda	Dedução no imposto de renda de parte ou todo investimento realizado em sistemas fotovoltaicos.
Incentivo a aquisição de eletricidade “verde” oriunda de sistemas fotovoltaicos	Confere ao consumidor final o direito de escolha quanto a aquisição de eletricidade proveniente de geração fotovoltaica, mediante o pagamento de uma tarifa maior.
Obrigatoriedade de aquisição de FV no portfólio obrigatório de renováveis	Instrumento de aquisição obrigatória de determinado patamar de geração elétrica proveniente de geração fotovoltaica.
Fundos de investimentos para FV	Oferta de ações em fundos privados de investimentos
Ações voluntárias de bancos comerciais	Concessão preferencial de hipotecas para construções que possuam sistemas fotovoltaicos e empréstimos para instalações destes sistemas.
Ações voluntárias de distribuidoras	Mecanismos de suporte a aquisição de energia renovável pelos consumidores, instalação de plantas centralizadas de FV, financiamento de investimentos e modelos de aquisição de eletricidade derivada de FV.
Padrões em edificações sustentáveis	Estabelecimento de padrões mínimos de desempenho para edificações (existentes e novas), cujo contexto favorece, entre outras, a adoção de sistemas fotovoltaicos.

Fonte: IEA (2011)

3.9.1 FEED-IN TARIFFS E O CASO DA ALEMANHA

O mecanismo de *feed-in tariff* (*FIT*), ou tarifa prêmio, foi um dos principais instrumentos utilizados no mundo para promoção das fontes renováveis na geração de energia elétrica. As tarifas prêmio objetivam acelerar os investimentos em energias renováveis através de contratos de produção de eletricidade tipicamente baseados no custo de geração de cada tecnologia. No caso da fotovoltaica, por exemplo, aos produtores é oferecido um preço mais elevado por MWh produzido, refletindo os maiores custos de produção desta fonte.

Normalmente, os contratos com tarifa prêmio incluem cláusulas de redução de preços ao longo do tempo, com o intuito de forçar ou incentivar desenvolvimentos que levem a redução do custo de geração da fonte.

O modelo alemão consiste na estimação de preço baseado no custo de produção de cada uma das fontes renováveis e incorpora uma redução deste valor ao longo do tempo baseada nas estimativas de diminuição de custo. Os contratos são de longa duração, 20 anos, e existem diferenças nas tarifas com base no tamanho e na aplicação do projeto. Além disso, os operadores da rede devem dar prioridade às plantas solares que desejem se conectar ao

sistema de distribuição de energia elétrica alemão. O financiamento desses investimentos, por sua vez, contam com o apoio do banco estatal KFWBankengruppe.

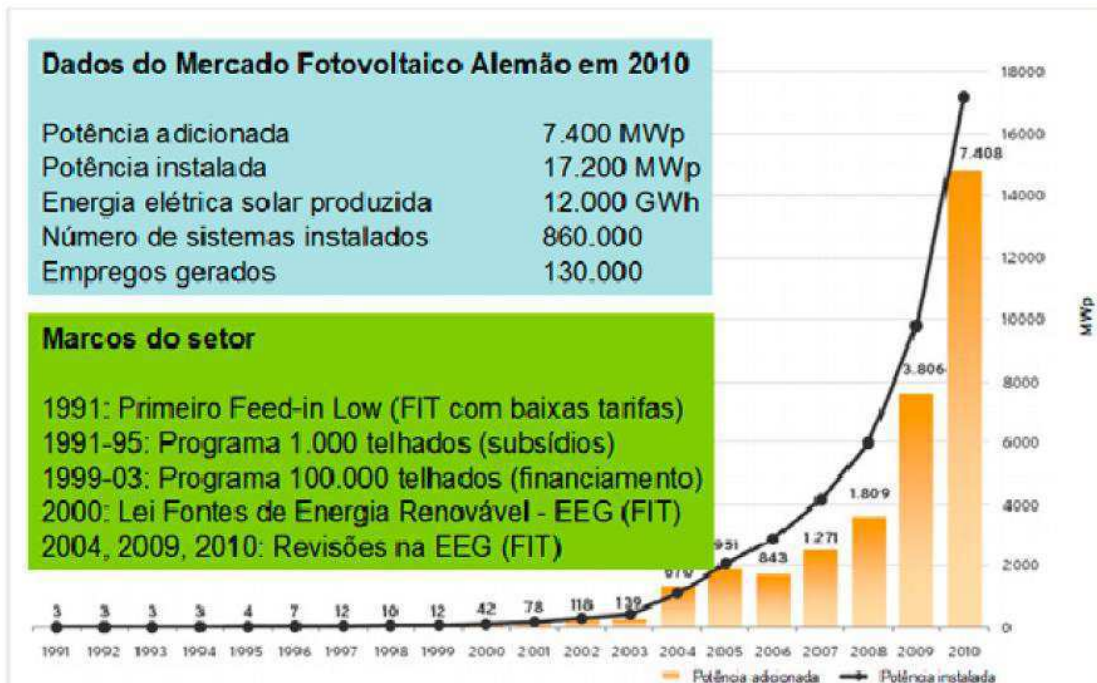


FIGURA 3.12- Potência fotovoltaica instalada na Alemanha até 2010

Fonte: ABINNE,2012

3.9.2 LEILÕES E A MISSÃO SOLAR NACIONAL NA ÍNDIA

O programa Jawaharlal Nehru National Solar Mission é uma expressiva iniciativa do governo indiano para promover a introdução de fontes de energia renováveis na matriz energética nacional, além de enfrentar os desafios de segurança energética. O programa, que tem como objetivo tornar a Índia um dos líderes mundiais na indústria solar, deverá instalar em sua primeira fase um total de 1 GW em plantas fotovoltaicas. Os projetos serão selecionados através de leilões e, embora existam controvérsias, deverão contar com índice de nacionalização da ordem de 60%. [ABINNE, 2012]

Em dezembro de 2011, no segundo leilão promovido pelo governo da Índia para contratação de geração solar fotovoltaica, 28 projetos, totalizando 350MW, foram contratados pelo prazo de 25 anos ao preço médio de US\$170 por MWh e preço mínimo de US\$ 147 por MWh. Destaque-se a particularidade de ter sido exigido que os projetos usassem painéis de silício fabricados na Índia ou, alternativamente, filme-fino importado. Os preços baixos estão associados a tecnologia do filme fino. [IEA, 2011]

Os leilões para fontes específicas estão sendo realizados no Brasil, atendendo à demanda das distribuidoras através da geração eólica e através de biomassa e recentemente de energia solar por exemplo. A discussão sobre leilões foi realizada no capítulo 4 deste trabalho.

Com a realização desses leilões, os produtores locais de equipamentos estão otimistas com o programa e diversos *players* globais estão indicando aumento na sua participação no mercado local. A cadeia produtiva indiana tem se beneficiado da presença de grandes atores globais em áreas correlatas, como os produtores de equipamentos para geração eólica. Em razão das elevadas temperaturas observadas no país, as células de filme fino estão sendo consideradas como as mais adequadas para a geração. Esta situação demonstra claramente o ambiente extremamente propício para os investimentos em geração fotovoltaica e o grande interesse por parte dos investidores, que enxergam uma excelente oportunidade neste mercado.

3.9.3 SUBSÍDIOS À PRODUÇÃO E O PROJETO GOLDEN SUN NA CHINA

Na China, o programa de incentivos a instalação de plantas fotovoltaicas foi instituído em 2009, juntamente com um plano para promover a instalação de módulos em telhados (Solar Roofs Plan). Os subsídios seriam da ordem de 50% do valor do investimento em sistemas de geração conectados a rede, podendo chegar a 70% em áreas remotas, com o sistema off grid.

3.9.4 INICIATIVA SOLAR NOS ESTADOS UNIDOS: *NET METERING*, CRÉDITO E INCENTIVOS TRIBUTÁRIOS

Os Estados Unidos são um dos maiores mercados de energia solar fotovoltaica no mundo e contam com uma diversidade de programas de incentivos. O projeto chamado *Solar America Initiative* tem como objetivo, tornar a energia solar fotovoltaica competitiva em relação a outras formas de energia, através do desenvolvimento tecnológico, até 2015.

3.9.4.1 CRÉDITO E INCENTIVOS TRIBUTÁRIOS

Nos estudos de [ABINEE, 2012] e [EPE, 2012] os programas de incentivo ao mercado fotovoltaico nos Estados Unidos seguem basicamente a linha de condições especiais de financiamento ou incentivos tributários. Mais da metade dos estados norte-americanos

possuem políticas de incentivo via transferências diretas, que podem ser via descontos, empréstimos ou incentivos baseados em desempenho. Os incentivos incluem crédito via redução do imposto de renda (30% do custo da instalação), além de esquemas de depreciação acelerada.

3.9.4.2 NET METERING

Na maior parte dos Estados norte-americanos existe *net metering*, como mostra a figura 3.13, que é uma forma de incentivo ao consumo de energia solar fotovoltaica que consiste na injeção à rede do excesso de eletricidade gerado pelo consumidor, usualmente através de créditos em kWh. Estes créditos são usados para compensar o consumo de energia da rede, quando o sistema não está gerando. É necessária a existência de um medidor que seja capaz de registrar o consumo e geração da instalação (consumo líquido bidirecional).

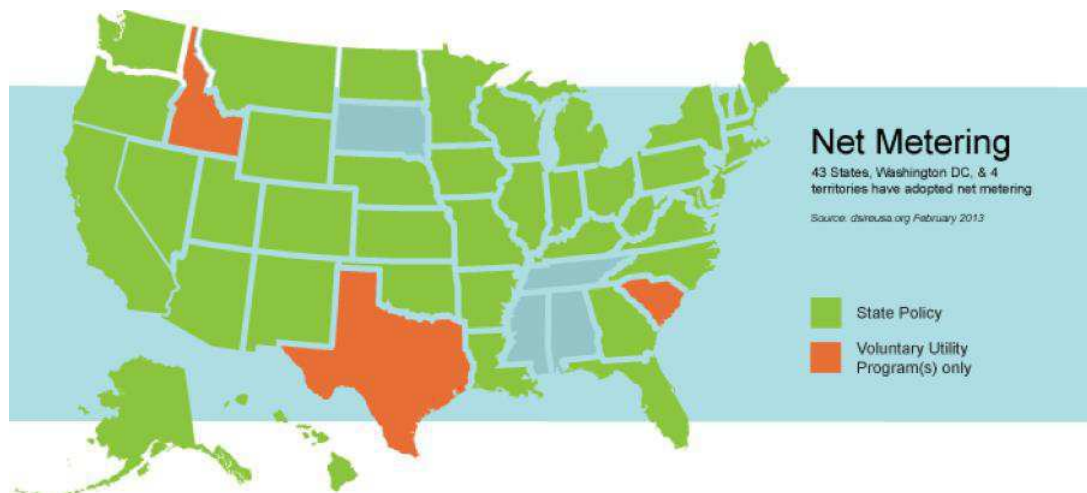


Figura 3.13- Net metering nos EUA.

FONTE: INSTITUTE FOR ENERGY RESEARCH

3.9.4.3 CERTIFICADOS DE ENERGIA RENOVÁVEL

Em [ABINNE, 2002], uma alternativa ao mecanismo de tarifa prêmio, mais populares na Europa, são os certificados de energia solar renovável (SRECs, na sigla em inglês). A diferença chave entre estes mecanismos, é que no caso dos SRECs, o próprio mercado é responsável pela precificação da energia solar gerada (no esquema de tarifa prêmio, o governo determina o preço da energia).

Os certificados são produzidos a cada 1.000 kWh de produção de um sistema fotovoltaico, uma vez que este sistema seja registrado e certificado por agências regulatórias

locais. Dependendo da legislação específica do estado, os parâmetros do certificado são obtidos através de medição ou estimativa.

3.9.4.4 INCENTIVOS À INDÚSTRIA

Vários incentivos tem sido utilizados por estados e governos locais para alavancar a instalação ou expansão de indústrias da cadeia fotovoltaica, como forma de melhorar o desempenho econômico da região, criar empregos, aumentar o acesso às fontes de energia renováveis e colaborar com políticas de combate às mudanças climáticas. Empréstimos, financiamento e reduções tributárias de maneira semelhante ao apresentado para consumidores, fazem partes desses incentivos.

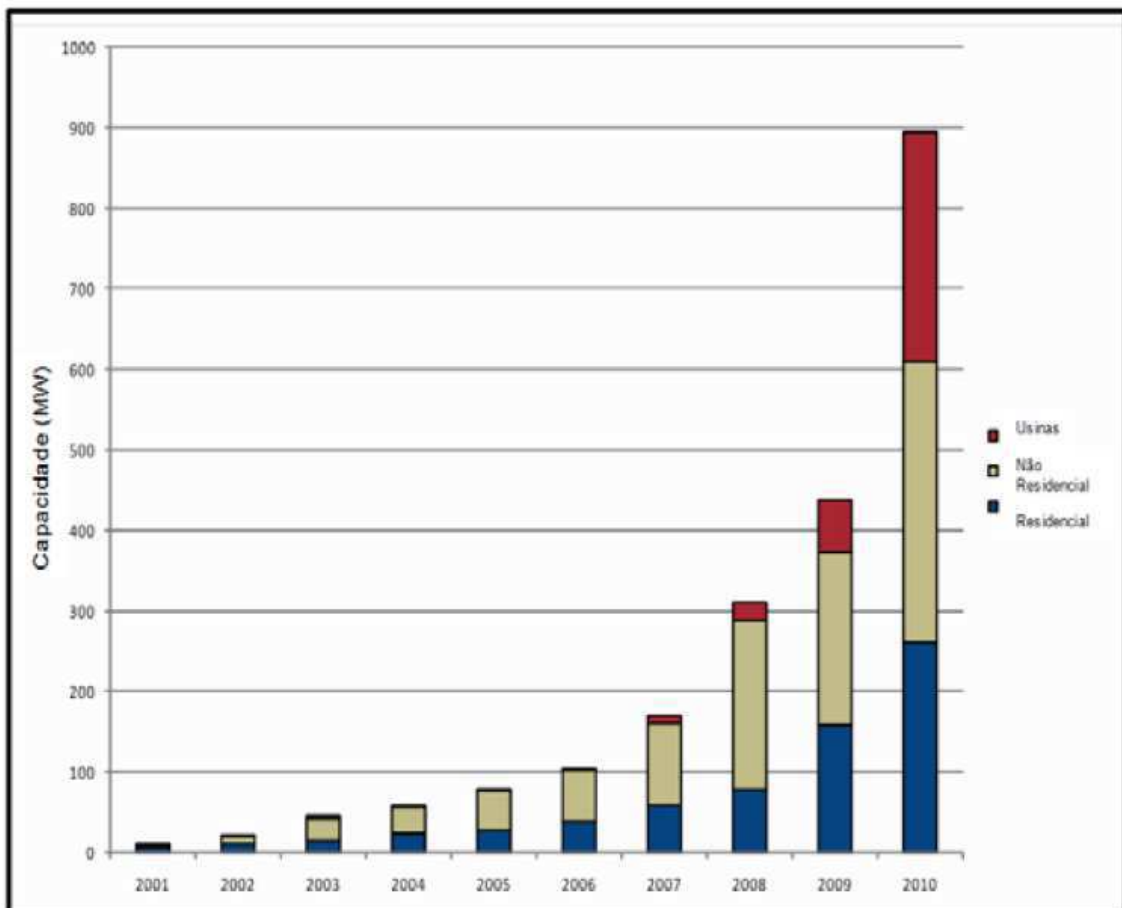


Figura 3.14– Potência instalada em geração fotovoltaica, por setor

(FONTE: ABINEE 2012). Os resultados práticos das políticas adotada para os Estados Unidos podem ser observados na figura 3.14, que mostra o expressivo crescimento na potência instalada no país entre 2001 (quando a maior parte das políticas começou a ser aplicadas) e 2010. Além disso, destaca-se a posição de empresas norte-americanas nas listas de maiores

produtores globais de diversos componentes da cadeia fotovoltaica, particularmente na produção de células e módulos.

4 INSERÇÃO DA ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA NA MATRIZ ELÉTRICA BRASILEIRA

O Brasil possui uma série de características naturais favoráveis a inserção da energia fotovoltaica na matriz elétrica, tais como, altos níveis de insolação e grandes reservas de quartzo de qualidade, que podem gerar importante vantagem competitiva para a produção de silício com alto grau de pureza, células e módulos solares, produtos estes de alto valor agregado. Tais fatores potencializam a atração de investidores e o desenvolvimento de um mercado interno, permitindo que se vislumbre um papel importante na matriz elétrica para este tipo de tecnologia.

Entretanto, há que se avaliar o melhor momento para viabilizar a tecnologia solar no país, em especial o desenvolvimento de sua cadeia produtiva, tendo em vista que o atual contexto internacional de mercado apresenta uma sobre capacidade de oferta de painéis solares, em especial, produzidos na China com baixo custo.

4.1 ASPECTOS ECONÔMICOS.

Uma das principais barreiras para a popularização da energia solar fotovoltaica no Brasil têm sido os custos de investimento associados a essa tecnologia, quando comparada com outras tecnologias de geração de eletricidade convencionais ou mesmo mais recentes, como o caso da geração eólica. Entretanto, esses custos têm apresentado reduções significativas, fazendo com que a geração fotovoltaica já comece a se tornar competitiva com relação a algumas fontes de geração de eletricidade.

O custo de investimento dos sistemas fotovoltaicos vem apresentando uma trajetória de redução de preços desde o ano 2000, acentuando essa tendência, sobretudo a partir de 2006, em função das significativas reduções verificadas nos preços dos módulos. Na Figura 4.1 são apresentados os preços médios, entre 2006 e o segundo trimestre de 2012, sem taxas, para sistemas de 100 kWp instalados em telhados na Alemanha.

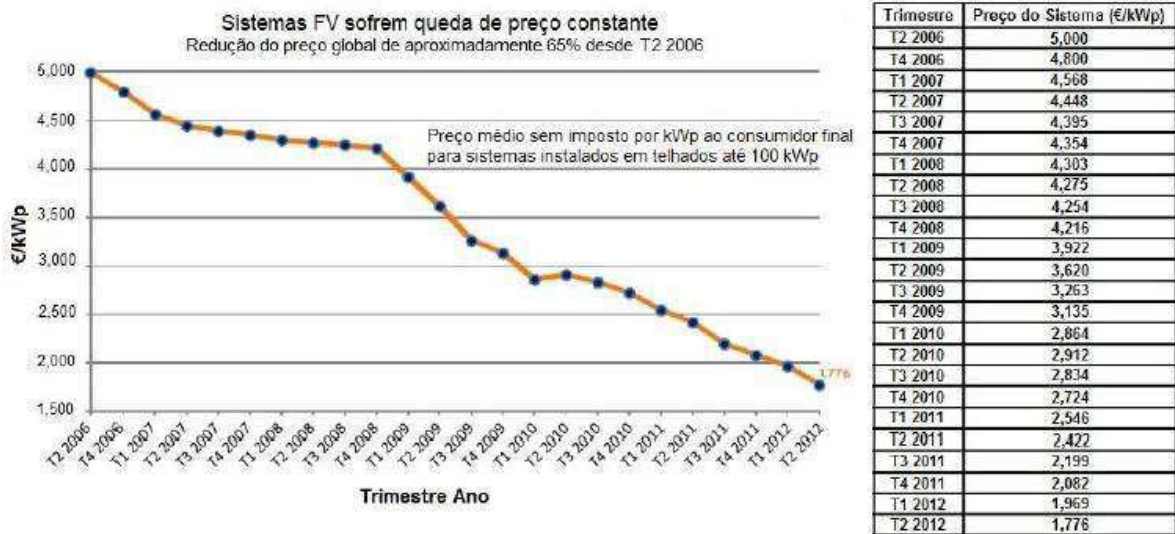


Figura 4.1 - Preço de sistemas fotovoltaicos de 100 kWp na Alemanha.

FORNTE: (BSW SOLAR, 2012).

De acordo com [EPE, 2012], que levantou e compilou os preços de conjuntos completos (painel e inversor) no mercado de varejo, para instalações comerciais e industriais, entre 50 kWp e 1.000 kWp, podem ser encontrados conjuntos com preços unitários médios entre US\$ 2,32/Wp, para sistemas de 50 kW, e de US\$ 1,90/Wp, para sistemas com potência superior a 1.000 kW. Esses custos, embora incluam os impostos de comercialização dos bens e serviços, estimados entre 10 % e 12 %, não embutem os custos de operação e manutenção (O&M), estimados em 20 % do custo total do investimento. Incluindo essa parcela de O&M, os custos dos sistemas para diferentes potências são apresentados na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 - Custo de investimento em sistemas fotovoltaicos – referência internacional (US\$/Wp).

Potência	Gerador FV	Inversores	Instalação & Montagem	Total
Residencial (4-6 kWp)	2,23	0,57	0,70	3,50
Residencial (8-10 kWp)	2,02	0,50	0,63	3,15
Comercial (100 kWp)	1,74	0,42	0,54	2,70
Industrial (≥ 1.000 kWp)	1,60	0,30	0,48	2,38

Nota: Preços com impostos nos seus mercados de origem

Fonte: [EPE, 2012].

4.1.1 CUSTO DOS MÓDULOS

O preço dos módulos, que atualmente representa 50% do custo de instalação de um sistema fotovoltaico de 1 kW conectado à rede no Brasil, é o principal responsável por essa trajetória de queda dos preços, motivada pela significativa elevação da produção de módulos fotovoltaicos na Europa, nos EUA e, mais recentemente, na China.

Na Figura 4.2 são apresentados os preços observados entre 2000 e julho/2011 para os países europeus. Na China, a queda dos preços do módulo no varejo foi de 83 % nos últimos seis anos, atingindo € 0,63/Wp no final de 2011.

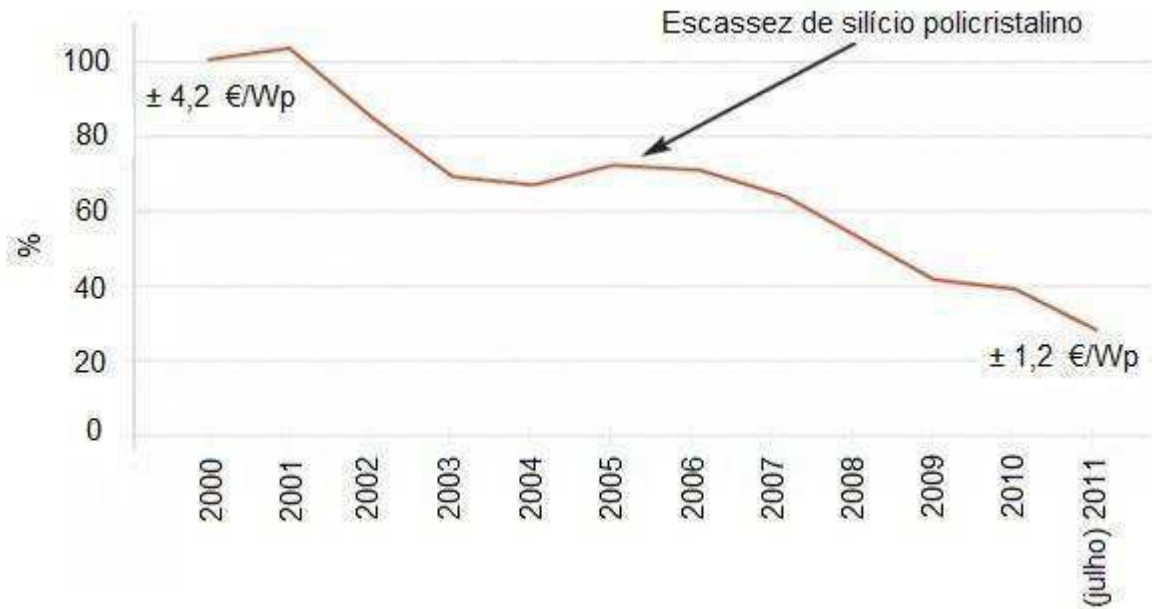


Figura 4.2- Preço médio anual do módulo fotovoltaico em diversos países europeus.

FONTE: [EPIA, 2012].

4.1.2 CUSTO DOS INVERSORES

Os inversores correspondem atualmente a 30 % do custo do sistema. Em função da expectativa de continuidade de redução do preço dos módulos, prevê-se que na próxima década, inversores e demais componentes passem a representar metade do custo total de investimento, com o custo dos módulos representando entre 30 e 50 % do sistema.

O estudo em [ABINEE, 2012] a amostra levantada pela *PHOTON International* conta com 1.301 modelos levantados no mercado alemão. Observa-se clara dispersão neste item,

com preços ao início de setembro de 2011 na faixa de 0,19 €/Watt para inversores maiores (acima de 10 kW), com variação entre 0,11 €/Watt e 0,24 €/Watt.

4.1.3 CUSTO DOS DEMAIS COMPONENTES

O estudo em [ABINEE, 2012]) estimou que os custos dos demais componentes, que englobam os custos associados aos equipamentos elétricos auxiliares, estruturas de sustentação, cabos, conexões, disjuntores, projeto básico e projeto executivo, despesas com licenciamento, aquisição de terrenos e O&M, representem valor igual à soma do custo dos módulos e inversores. Assim, com base nos preços médios de módulos e inversores adotados no referido estudo, de € 0,98/W para os módulos e € 0,19/W para os inversores, o preço dos demais componentes seria da ordem de € 1,17/W, resultando no custo total do sistema solar fotovoltaico da ordem de € 2,34/W.

4.1.4 CUSTOS NACIONALIZADOS

Os estudos de [ABINEE, 2012] e de [EPE, 2012] são as mais recentes publicações que estimam e analisam os preços nacionalizados dos sistemas fotovoltaicos para o Brasil. Basicamente, trata-se da nacionalização dos custos internacionais, por meio da agregação a estes da carga tributária brasileira incidente sobre os equipamentos/materiais e serviços necessários à implantação dos sistemas fotovoltaicos no país. Mais especificamente, o Imposto de Importação (II), ICMS, PIS, Cofins, ISS etc., mais outras taxas aplicáveis.

Então, a partir dos preços internacionais adotados referentes aos módulos, inversores e aos preços de instalação/montagem, já apresentados na Tabela 4.1, na avaliação de custos desenvolvida em [EPE, 2012], os preços nacionalizados para os mesmos equipamentos e custos de instalação/montagem para quatro tipos de instalação foram analisados, adotando uma taxa de câmbio de US\$ 1 = R\$ 1,75 e impostos nacionais de 25 %. Obtendo-se os resultados apresentados na Tabela 4.2, para o custo do investimento nacionalizado. [EPE, 2012]

Tabela 4.2 - Custo de investimento em sistemas fotovoltaicos – referência no Brasil (R\$/Wp).

Potência	Gerador FV	Inversores	Instalação & Montagem	Total
Residencial (4-6 kWp)	4,88	1,25	1,53	7,66
Residencial (8-10 kWp)	4,42	1,09	1,38	6,89
Comercial (100 kWp)	3,81	0,92	1,18	5,91
Industrial (≥ 1.000 kWp)	3,5	0,66	1,04	5,2

Nota: Taxa de câmbio US\$ 1.00 = R\$1,75, com acréscimo de 25% de tributos nacionais.

Fonte: [EPE, 2012].

4.1.5 CUSTO DE PRODUÇÃO DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS

Para estimar o custo da energia (R\$/kWh) são calculados os fluxos de caixa associados às receitas e despesas de investimento e operacionais realizadas durante a vida útil da instalação, conforme metodologia sugerida pela EPIA (2011). O custo de produção (CP) de um sistema fotovoltaico, expresso em R\$ por kWh produzido pode ser calculado pela seguinte fórmula:

$$CE = [CAPEX + VP (OPEX)] / VP (EP) \quad (6)$$

onde:

CE: Custo de geração (R\$/kWh);

CAPEX: Custos de investimento do sistema fotovoltaico (R\$);

VP (OPEX): Valor presente de custos de operação e manutenção ao longo da vida útil da instalação (R\$);

VP (EP): Valor presente da energia produzida ao longo da vida útil da instalação (kWh).

O cálculo do custo de produção considera tanto os investimentos iniciais quanto uma previsão sobre custos de operação e manutenção ao longo da vida útil da instalação.

Na Figura 4.3 são apresentados os resultados encontrados no estudo desenvolvido pela ABINEE, para os quais foram adotados os seguintes parâmetros típicos:

Vida útil da usina: 25 anos;

Custo de investimento (CAPEX): parametrizado, entre R\$ 5/Wp e R\$ 12/Wp;

Custo de O&M (OPEX): estimado em 1 % do CAPEX ao ano, e VP de 12 %;

Eficiência das células: redução de 0,75 %/ano sobre valor original (100 %);

Taxa de desconto (valor ponderado do custo de capital): 7,5 %;
 Fator de capacidade da usina: parametrizado entre 12 % e 18 %.

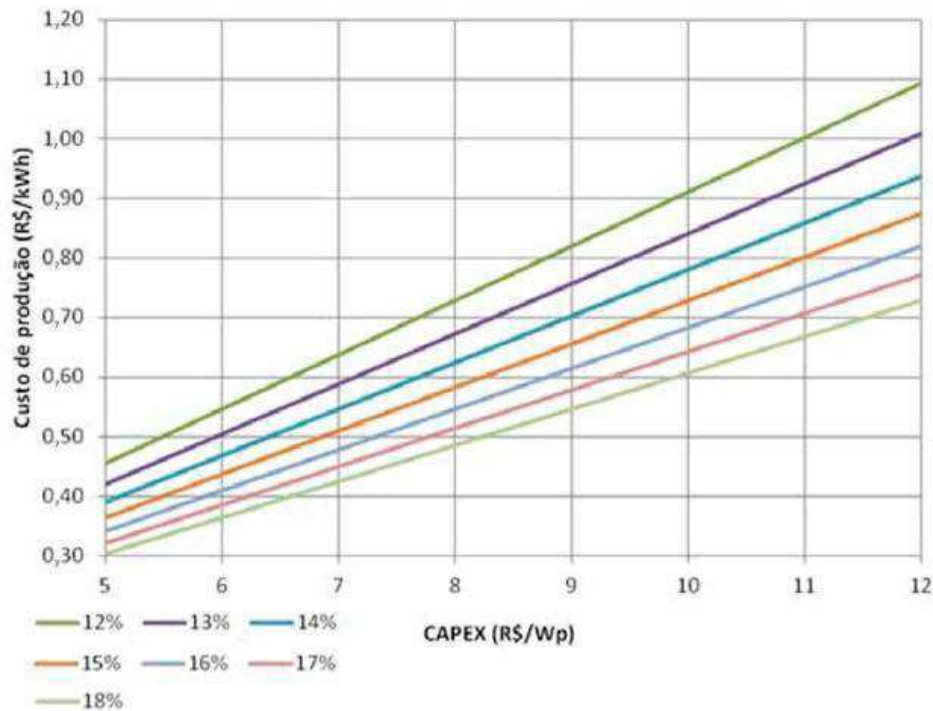


Figura 4.3- Custo de produção de energia (R\$/kWh) para faixas de custo de instalação (eixo x) e “famílias” de curvas com fatores de capacidade variando entre 12 % e 18 %.

Fonte: [ABINEE, 2012].

Observa-se que numa instalação com 15% de fator de capacidade (referência nacional) e custo de instalação de 7,12 R\$/Wp (referência do CAPEX para instalação residencial, vide seção anterior) acrescido de 12% (valor presente do OPEX), verifica-se que o custo de produção de energia é inferior a 0,60 R\$/kWh. Este valor é da ordem de grandeza da tarifa de energia de clientes residenciais de diversas concessionárias no Brasil, incluídos os impostos e encargos.

Essa análise não considera efeitos de impulsos resultantes de financiamentos ou de quaisquer outras medidas de incentivo, de natureza fiscal ou tributária, que eventualmente possam ser estabelecidas.

4.1.6 TARIFAS DE ENERGIA ELÉTRICA

Os estudos de [ABINEE, 2012], a tarifa de energia elétrica dos consumidores residenciais e pequenos comércios, consiste num valor único (R\$/kWh) aplicado ao consumo

de eletricidade mensal (kWh) e sobre o qual incidem impostos federais e estaduais, sendo este último variável de acordo com o estado, tipo de cliente e consumo.

A figura a seguir mostra as tarifas com impostos para clientes de baixa tensão (clientes residenciais) por Estado da federação, obtidos das resoluções específicas da ANEEL dos anos 2010 e 2011 (variando por concessionária), sobre as os quais foram acrescidos os impostos mencionados “por dentro”.



Figura 4.4– Tarifa de energia com impostos para clientes na baixa tensão.

FONTE: ANEEL, AGOSTO DE 2011

Observa-se grande dispersão de resultados, com a relação entre os valores finais superando um fator de dois (0,35 a 0,70 R\$/kWh), com AES SUL, COPEL, CERON, CEB, CAIUA e CPFL entre as menores tarifas finais e CELTINS, ENERGISA/MG, CEMAR e CEMAT entre as maiores tarifas finais.

Observa-se no mapa que instalações fotovoltaicas já seriam competitivas para clientes cativos conectados na baixa tensão (residenciais) em boa parte das concessionárias considerando o valor de produção de energia solar fotovoltaica de 0,60 R\$/kWh mostrado na figura 4.4.

A figura a 4.5 mostra as tarifas com impostos para clientes de alta tensão por estado da federação, obtidos das resoluções específicas da ANEEL dos anos 2010 e 2011 (variando por concessionária), sobre as os quais foram acrescidos os impostos mencionados “por dentro”.



Figura 4.5- Tarifa de energia acrescida de impostos para clientes na alta tensão.

As instalações fotovoltaicas ainda não seriam competitivas para clientes cativos conectados na alta tensão (grupo A4), pois em todos os casos a tarifa de energia é menor que 0,60 R\$/kWh.

A fonte solar fotovoltaica vem ocupando posição de destaque entre as opções para geração com baixo impacto ambiental. O número de instalações tem crescido exponencialmente ao longo da última década e é cada vez maior o número de investidores interessados no desenvolvimento de projetos ligados à indústria fotovoltaica.

4.2 INDÚSTRIA FOTOVOLTAICA NACIONAL

Sabe-se que a matriz elétrica no Brasil é historicamente “limpa”, baseada fortemente na fonte hidrelétrica e, mais recentemente, podendo contar cada vez mais com fontes diversificadas com origem em biomassa e energia eólica, diferente dos países europeus. Assim, o apelo ambiental se torna menos atrativo na discussão do planejamento elétrico brasileiro.

No entanto, a expansão da hidroeletricidade esbarra no fato de que o potencial hídrico brasileiro ainda não explorado encontra-se na região amazônica, o que envolve questões ambientais para seu pleno, assim a busca de novas fontes de energia, vai se tornando cada vez mais clara a oportunidade de explorar a energia fotovoltaica no Brasil, não apenas pela alta incidência de irradiação, que é sem dúvida um fator relevante, mas também pela firme trajetória de aumento de eficiência e queda dos custos de implantação de módulos e sistemas fotovoltaicos em nível internacional e nacional.

Como o Brasil a demanda e as instalações fotovoltaicas ainda são muito baixas, a uma necessidade de ações que permitam despertar os atores nacionais e globais para o elevado potencial de assimilação de tecnologia e geração de valor adicionado na produção local dos diversos elos desta cadeia.

A inserção do Brasil neste setor apenas se dará com incentivos paralelos à demanda (via criação e contínuo aperfeiçoamento de um ambiente regulatório e comercial favorável à penetração da fonte fotovoltaica em instalações residenciais e comerciais, microgeração distribuída; abertura à participação em leilões de energia nova, em especial em leilões específicos num primeiro momento) e à oferta, via incentivos diretos à produção local da maior parcela possível de partes e componentes desta cadeia de valor, partindo de programas já existentes de política industrial e tecnológica e outros que serão sugeridos.

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.

4.3 ACELERAÇÃO DA DEMANDA

4.3.1 INTERLOCUÇÃO E COORDENAÇÃO ESTRATÉGICA

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 fundamental que, em um primeiro momento, desenvolva-se dentro dos órgãos públicos competentes uma agenda conjunta que estabeleça metas objetivas e claras para o setor fotovoltaico

O Plano Brasil Maior, que incorpora a política industrial do período entre 2011 e 2014, é um exemplo palpável de como esta agenda pode ser construída. E para que ocorra o aumento da demanda de módulos no Brasil, algumas medidas que podem ser tomadas, 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 geração distribuída, 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 geração distribuída 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 posteriormente, para que o acesso à rede se torne mais fácil para o consumidor;
- 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;

4.3.2 LEILÃO ESPECÍFICO

Uma forma de viabilizar a expansão da energia solar seria a realização de leilões específicos, que garantiriam a contratação de determinados volumes desta energia por períodos longos, a exemplo dos leilões de fontes alternativas e dos leilões de energia de reserva. A grande vantagem desta forma de viabilização é a efetiva garantia de que os projetos seriam efetivamente contratados. Este simples fato já seria suficiente para incentivar investidores a realizar estudos, projetos e propostas, propiciando a base para um aumento rápido da penetração da energia solar na matriz do setor elétrico na medida em que ela se tornasse competitiva. [ABINEE, 2012]

Com a atuação direta do Ministério de Minas e Energia (MME) no sentido de realizar um leilão para a fonte fotovoltaica, com capacidade a ser contratada decidida pelo Governo como instrumento de política energética e industrial, o volume de energia negociado funcionaria como uma garantia de demanda mínima para atendimento das exigências de escala para instalação local das unidades produtivas, principalmente de módulos.

Com objetivo de colocar o Brasil na “vitrine” da área solar, aproveitando-se do período de retração do mercado, principalmente devido à crise na Europa. Os leilões serviriam principalmente para apontar as melhores tecnologias para o Brasil, isto é, aquelas capazes de produzir mais energia ao menor custo, com benefício direto aos consumidores brasileiros. Como visto anteriormente, a corrida tecnológica, tanto na melhoria dos processos de fabricação de células de silício, como na busca de materiais semicondutores mais econômicos ou soluções “híbridas” tem se intensificado bastante nos últimos anos. [ABINNE, 2012]

Sendo que a promoção de leilões seria objetiva na avaliação das alternativas mais adequadas ao Brasil e abriria também a perspectiva de uma “tropicalização” de componentes, além do incentivo aos fabricantes nacionais de inversores, estruturas metálicas, cabos, disjuntores, quadros elétricos e outros equipamentos utilizados nas usinas fotovoltaicas.

Em 2013, Pernambuco realizou o 1º leilão do Brasil de energia solar, onde foram contratados 122,82 megawatts de energia proveniente do sol, sendo o preço médio da energia negociado a R\$ 228,63, uma diminuição de 8,55% em relação ao preço inicial de R\$ 250.

Trata-se de uma importante iniciativa. Que contrário dos leilões federais realizados anteriormente, desta vez a energia solar foi oferecida como uma fonte exclusiva, tornando a competição mais justa.

4.3.3 GERAÇÃO DISTRIBUÍDA

A realização do leilão, embora já seja um estímulo suficiente para dar início ao processo de aceleração da demanda, contribuindo para que se permita a instalação de fábricas competitivas, deve-se ter o estímulo ao mercado de geração distribuída.

Como as principais barreiras ao desenvolvimento da demanda doméstica por sistemas fotovoltaicos está na dificuldade de acesso ao produto final, por questões culturais e financeiras.

A queda de preços da energia solar fotovoltaica, em âmbito global, deixará para trás a barreira econômica para o uso de sistemas solares pelo lado da demanda. Por essa razão, torna-se crítico o Brasil estar preparado para aproveitar essa oportunidade, avançando desde já na revisão da regulamentação da pequena geração distribuída conectada para que o avanço não prejudique a operação das redes de distribuição. [ABINEE, 2012]

Em Abril de 2012, a ANEEL aprovou a Resolução Normativa N° 482 com a finalidade de atualizar a situação da geração distribuída 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.

A resolução define que:

- i. Simplificação do processo de registro de autoprodutor e as exigências atuais de licenciamento ambiental;
- 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.

Inicia-se assim, a era da Micro e Mini Geração Distribuída no Brasil. Aos consumidores de eletricidade é permitido gerar parte ou todo o potencial elétrico que consomem, utilizando geradores que trabalham junto com a rede de distribuição, em regime de troca de energia.

4.3.4 FINANCIAMENTOS E INCENTIVOS TRIBUTÁRIOS

Um aspecto importante para aceleração da demanda doméstica se refere à disponibilização de linhas específicas de financiamento. Assim, os EUA possuem uma grande quantidade de linhas desse tipo que podem servir de inspiração para o mercado brasileiro. Dado que esta modalidade de empréstimo já é viável para a indústria e comércio, e que para uma maior capilarização da tecnologia fotovoltaica é necessário viabilizar a tecnologia para o consumo residencial, mostra-se necessária a criação de linhas específicas de financiamento para pessoas físicas e/ou pequenos investidores, possivelmente através de algum banco vinculado ao governo (Caixa Econômica Federal, por exemplo).[EPE, 2012]

Estas linhas precisam ser bem desenhadas e avaliadas para garantir taxas de juros e prazos atrativos e o BNDES se destaca como um potencial financiador destes projetos, utilizando inclusive a diversidade de linhas já existentes que se aplicam ao caso da energia fotovoltaica, como o Fundo Clima, programa do Ministério do Meio Ambiente (MMA).

4.4 CENÁRIO ATUAL

A inserção da energia fotovoltaica no Brasil vem ocorrendo de maneira lenta desde 2005 com o PRODEEM com a instalação de 5MWp, mais só a partir de 2011 que a energia fotovoltaica brasileira teve um crescimento significativo, com a implantação de algumas iniciativas isoladas

Na nota técnica de [ROVERE, 2011], as figuras 6.1 e 6.2 apresentam uma estimativa do mercado fotovoltaico potencial no país, para a próxima década, bem como o resultado obtido no exercício de projeção, em termos de potência instalada (MW) correspondente a cada segmento de mercado.

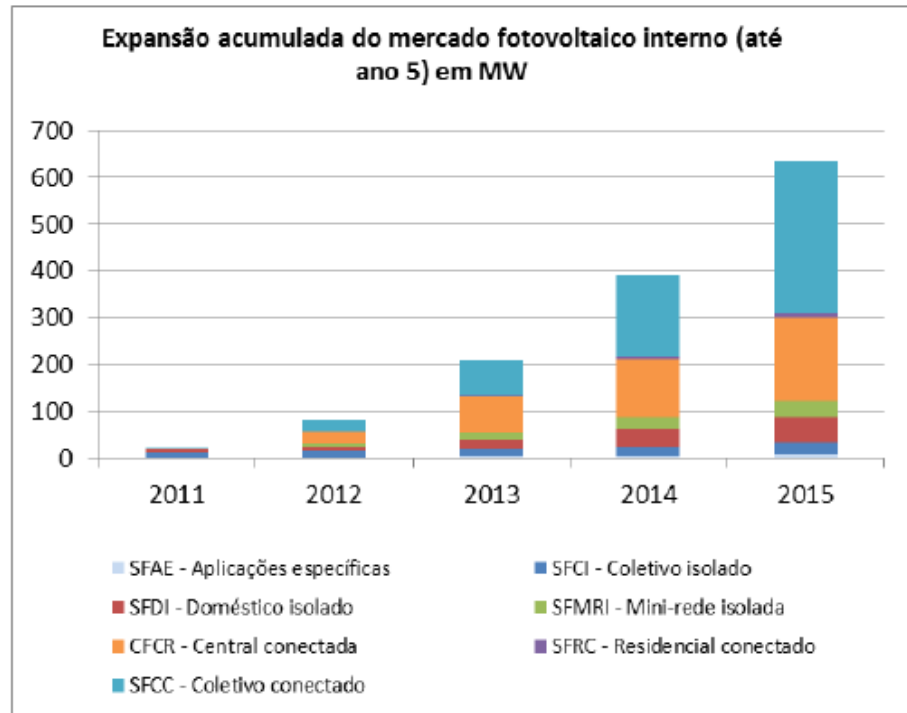


Figura 4.6 Expansão acumulada no mercado fotovoltaico interno até 2015

(Fonte: ROVERE,2011)

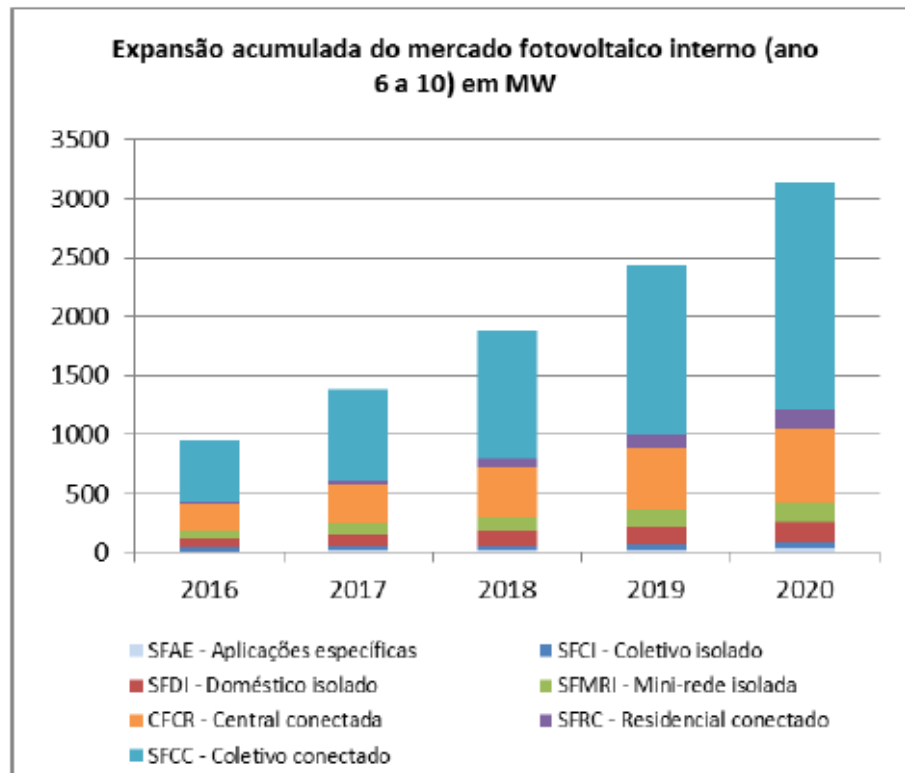


FIGURA 4.7 Expansão acumulada no mercado fotovoltaico interno de 2016 a 2020

(Fonte: ROVERE, 2011)

Em agosto de 2011 a MPX investiu R\$ 10 milhões para ter, no Ceará, o primeiro empreendimento comercial brasileiro de geração de energia a partir do sol, com capacidade inicial de 1 MW. Uma parceria já anunciada com a GE permitirá a duplicação da capacidade da usina solar, que chegará a ter quase 7 mil painéis instalados.

No final de 2012 em Campinas, no Estado de São Paulo, a CPFL Energia inaugurou, a Usina Tanquinho, com capacidade instalada de 1,1MW.

De acordo com dados do relatório de fiscalização da Agência Nacional de Energia (Aneel), atualizado em dezembro de 2012, a capacidade instalada de energia solar no Brasil é de aproximadamente 7,5 MW, o que representa apenas 0,01% da matriz energética brasileira. Espera-se, no entanto, que esse potencial cresça neste ano graças à regulamentação da micro e da minigeração de energia, que oficializa o consumidor como possível produtor de energia. A resolução 482/2012 permite que os brasileiros gerem energia, transfiram sua produção para a rede elétrica e, caso haja excedente, ganhem desconto na conta de luz pelo Sistema de Compensação de Energia.

No ano de 2013, Pernambuco realizou o 1º leilão do Brasil de energia solar, onde foram contratados 122,82 megawatts de energia proveniente do sol, sendo o preço médio da energia negociado a R\$ 228,63, uma diminuição de 8,55% em relação ao preço inicial de R\$ 250. As vencedoras implantarão esses empreendimentos em 18 meses e venderão a energia por 20 anos.

O ano de 2014 vai ficar conhecido como o ano da energia solar fotovoltaica no Brasil. Em agosto a maior usina de energia solar do Brasil, a Usina Fotovoltaica Cidade Azul, começou a operar comercialmente em Tubarão, no sul de Santa Catarina. Trata-se de maior usina solar do país em potência: são 3 Megawatts gerados atualmente. Além da realização em novembro do Leilão de Energia de Reserva com a contratação de 1.048 MW/p em 31 projetos fotovoltaicos pelo Brasil de geração centralizada, o que significa injetar mais 889,6MW na rede a partir de outubro de 2017. O preço de contratação dessa energia foi de R\$ 215,12, um deságio de 17,9% ante preço inicial de R\$262,00/MWh. Isso representa uma adição considerável no que existe instalado no Brasil em todos os projetos solar fotovoltaico conectados à rede.

Como se não bastasse o sucesso do primeiro leilão, tem-se indicações de que o planejamento político governamental pretende incluir contratações periódicas de energia solar, visto o sucesso no leilão mais longo da história com uma disputa acirradíssima de contratação e um deságio de 17,9% em relação ao preço teto especificado.

5 CONCLUSÃO

No momento em que o mundo se encontra, em meio a crises ambientais e em busca da diminuição do impacto ao meio ambiente, como redução da emissão global de gases do efeito estufa, juntamente com a racionalização de recursos e crescente aumento do custo de energias estabelecidas como uso de petróleo, a necessidade do estudo e da implementação de fontes alternativas de energia se torna cada vez mais premente. O uso da tecnologia solar fotovoltaica é uma realidade presente em vários países do chamado primeiro mundo, com grande inserção no sistema elétrico em países da Europa como a líder mundial neste segmento, Alemanha, em pleno funcionamento, e na China e Índia.

Logo a energia solar é uma opção promissora para complementar a geração de eletricidade. Os sistemas fotovoltaicos podem gerar energia elétrica em qualquer espaço onde for possível instalar um painel fotovoltaico. Dessa forma, telhados e fachadas de prédios e residências podem gerar eletricidade em áreas urbanas, e usinas de eletricidade podem ser construídas próximas ou distantes dos centros de consumo.

No quesito da fabricação de células solares, o Brasil figura como um dos líderes mundiais na produção de silício de grau metalúrgico, ficando atrás apenas da China, quando considerados os países individualmente. No entanto atualmente não existe a purificação de silício até o grau solar no Brasil em nível comercial, não figurando em ranking algum. O Brasil possui empresas envolvidas apenas nas extremidades da cadeia produtiva, ou seja, a produção de silício metalúrgico e a montagem do módulo, além das indústrias de suporte. Logo a principal conclusão deste trabalho é que se ao projetar o passado para o futuro, a energia solar fotovoltaica se dará com uma dependência tecnológica.

No Brasil, o potencial de geração de energia solar é ótimo em quase toda a sua extensão, e mesmo as áreas menos privilegiadas tem médias comparáveis à líder mundial em energia solar. Um importante passo na caminhada para a disseminação do uso de sistema fotovoltaicos conectados à rede foi a resolução da ANEEL nº 482, publicada em Abril de 2012, que regulamenta a conexão de sistemas de micro e mini geração de energia à rede elétrica.

A massificação da micro e mini geração de eletricidade com sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica tende a criar empregos na fabricação de painéis fotovoltaicos,

inversores eletrônicos e acessórios. Além disso, pode gerar demanda de profissionais no setor de serviços instalação, manutenção e treinamento.

O futuro da energia solar tende a ser favorecido pelo aumento das pressões mundiais para a utilização de fontes energéticas renováveis e limpas e a contínua busca pela diversificação das fontes de suprimento energético. Esse cenário deve prevalecer nos próximos anos, e a energia solar deverá ser considerada uma alternativa energética relevante para o Brasil.

A contratação de empreendimentos geradores de energia solar no recente Leilão de Energia de Reserva (LER) aponta a tendência do crescimento da fonte no País, com redução dos custos e menor preço por Megawatt/Hora (MW/h). Nos próximos 30 anos, com maior mercado e interesse dos investidores, a geração de energia pelo sol deve se expandir, ganhar escala e se tornar mais barata, além de ocupar cada vez mais espaço em nossa matriz energética, complementando outras fontes.

6 REFERÊNCIAS

1º Anuário Brasileiro das indústrias de Biomassa e Energias Renováveis (2012/1013).

Disponível em:

<http://issuu.com/anuariobiomassa/docs/anuario_biomassa_e_energias_renovaveis_2012/8?e=3524626/1672003>. Acesso em: 19 Jul. 2014.

2º Anuário Brasileiro das indústrias de Biomassa e Energias Renováveis (2013/1014).

Disponível em:

<http://issuu.com/anuariobiomassa/docs/anuario_biomassa_e_energias_renovav?e=3524626/5496897>. Acesso em: 19 Jul. 2014.

AMÉRICA DO SOL. Energia Fotovoltaica no mundo. Disponível em: <<http://www.americadosol.org/vendas/>> Acesso em: 19 Jul. 2014

ANEEL. **Atlas de Energia Elétrica do Brasil**. Agência Nacional de Energia Elétrica, 3ª edição, Brasília, 2008, 236p.

ANEEL. **Resolução normativa** Nº 482,. Agência Nacional de Energia Elétrica –. Brasília, 17 de Abril de 2012

ANEEL, Superintendência de Pesquisa e Desenvolvimento e Eficiência Energética – SPE, **Chamada No 013/2011 – Projeto Estratégico: “Arranjos Técnicos E Comerciais Para Inserção Da Geração Solar Fotovoltaica Na Matriz Energética Brasileira”**. Agência Nacional de Energia Elétrica Brasília, Brasília: 2011.

CASTRO, R. M. G. **Introdução à energia fotovoltaica**. 2. ed. Lisboa Universidade Técnica de Lisboa, Instituto Superior Técnico Secção de Energia, 2007.

Centro de Pesquisas de Energia Elétrica. Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio de Salvo Brito. Grupo de Trabalho de Energia Solar. **Manual de engenharia para sistemas fotovoltaicos** / Rio de Janeiro, CRESESB, 1999. pp ; cm.

EPE Empresa de Pesquisa Energética, **Nota Técnica EPE – Análise da Inserção da Geração Solar na Matriz Energética Brasileira**, 2012.

PEREIRA, Enicio Bueno & LIMA, Jorge Henrique (orgs.). **Solar and Wind Energy Resource Assessment**. São José dos Campos: INPE, 2008.

PEREIRA, Enicio Bueno, MARTINS, F. R., ABREU, S. L., RÜTHER, R., **Atlas Brasileiro de Energia Solar**. São José dos Campos: INPE, 2006.

PEREIRA, E. M. D. et alii. **Energia Solar Térmica**. In: “Fontes Alternativas de Energia no Brasil”. Rio de Janeiro:Ed. Ciência Moderna., 2004.

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.

TIBA, C. **Atlas Solarimétrico do Brasil – banco de dados terrestres**. Recife: Editora Universitária da UFPE, 2000.

VARELLA, F., CAVALIERO, C., SILVA, E.. **Regulatory Incentives To Promote The Use Of Photovoltaic Systems In Brazil**. HOLOS - ISSN 1807-1600, Natal, 3, jun. 2012. Disponível em: < <http://www2.ifrn.edu.br/ojs/index.php/HOLOS/article/view/883/552> >. Acesso em: 19 agosto 2014.

TRACTEBEENERGIA. **Usina solar cidade azul**. Disponível em: < <http://www.tractebelenergia.com.br/wps/portal/internet/parque-gerador/usinas-complementares/solar-cidade-azul>> Acesso em: 30 Ago. 2014.

SUNCOMEX. **Torres de telecomunicação**. Disponível em: <http://www.suncomex.com.br/> Acesso em: 03 Jul. 2014.