

**CENTRO UNIVERSITÁRIO DO SUL DE MINAS  
ENGENHARIA ELÉTRICA  
ADILSON AMARO DA SILVA**

**INSERÇÃO DA MICRO E MINIGERAÇÃO FOTOVOLTAICA DISTRIBUÍDA NO  
BRASIL PARA UNIDADES CONSUMIDORAS DO GRUPO B**

**Varginha  
2016**

**ADILSON AMARO DA SILVA**

**INSERÇÃO DA MICRO E MINIGERAÇÃO FOTOVOLTAICA DISTRIBUÍDA NO  
BRASIL PARA UNIDADES CONSUMIDORAS DO GRUPO B**

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao curso de Engenharia Elétrica do Centro Universitário do Sul de Minas - UNIS MG, como pré-requisito para a obtenção de grau de bacharel, sobre orientação do Prof. Me. Josué Alexandre Aquino.

**Varginha  
2016**

**ADILSON AMARO DA SILVA**

**INSERÇÃO DA MICRO E MINIGERAÇÃO FOTOVOLTAICA DISTRIBUÍDA NO  
BRASIL PARA UNIDADES CONSUMIDORAS DO GRUPO B**

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao curso de Engenharia Elétrica do Centro Universitário do Sul de Minas UNIS MG, para a obtenção de grau de bacharel pela banca examinadora composta pelos membros:

Aprovado em    /    /

---

Prof. Msc Josué Alexandre Aquino

---

Prof. Msc Eduardo Henrique Ferroni

---

Prof. Msc Hugo Rodrigues Vieira

Dedico este trabalho a Deus, minha esposa Marisa, meus filhos Caio e Débora, minha nora Grasielle e netos Lívia e Davi, sem os quais certamente não estaria desfrutando desta conquista importante em minha vida.

## AGRADECIMENTOS

A Deus pela saúde, inspiração e perseverança que me foi dada por todo o período da faculdade e de toda minha vida.

Ao meu orientador professor Msc. Josué Alexandre de Aquino pelo seu incentivo, orientação e dedicação para realização deste trabalho.

À minha cunhada Marilda e aos filhos do coração (Ivan e Camila) que sempre me apoiaram durante esta caminhada.

Aos meus colegas de faculdade que se tornaram grandes amigos (Diogo, Sady, Bruno, Diego e Jader) sempre presente em todas as horas proporcionando momentos inesquecíveis.

Aos Engenheiros José Mário Furtado e Carlos Alberto Branco, pela atenção, pela disponibilidade do material cedido e informações técnicas.

Aos profissionais da CEMIG – Companhia Energética de Minas Gerais, (os quais contribuíram fortemente com informações técnicas para o trabalho).

Aos demais professores do centro universitário UNIS, pelos ensinamentos cedidos nesses anos tendo sua parcela de contribuição na minha formação como ser humano e profissional.

## EPÍGRAFE

"Eu colocaria meu dinheiro no sol e na energia solar. Que fonte de energia!

Espero que não precisemos esperar até que o petróleo e o carvão acabem para encarar isto."

Thomas Edison - Em conversa com Henry Ford e Harvey Firestone em 1931.

## RESUMO

A energia solar fotovoltaica está se tornando realidade e se consolidando no Brasil, principalmente na forma da geração distribuída (GD). Este processo teve início com a publicação da Resolução Normativa 482/2012, da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) em 17 de abril de 2012. Projeções feitas por aquela agência estimaram que até 2024 cerca de 1,2 milhões de unidades consumidoras passassem a produzir sua própria energia, totalizando 4,5 GW de potência instalada. Entretanto, desde a publicação da Resolução em 2012 até outubro de 2015, foram instaladas apenas 1.285 centrais geradoras, sendo 1.233 (96%) com a fonte solar fotovoltaica, 31 eólicas, 13 híbridas (solar/eólica), 6 movidas a biogás, 1 a biomassa e 1 hidráulica. Ainda de acordo com dados da ANEEL, apresentados durante a Audiência Pública nº 026/2015, ocorrida no dia 19 de junho de 2015 em Brasília/DF durante o processo de revisão da RN 482, até aquele momento foram conectadas à rede elétrica cerca de 670 unidades de geração distribuída que utilizam o sistema de compensação (*Net metering*) estabelecido pela referida resolução. A participação da fonte fotovoltaica representava 632 unidades geradoras, ou seja, 94,3%. Este trabalho tem como objetivos analisar a inserção da geração fotovoltaica na micro e minigeração distribuída no Brasil para unidades do grupo B (consumidores em baixa tensão), identificando as causas do baixo índice de adesão às possibilidades de geração distribuída (GD) e apresentar o escopo de um projeto que possa contribuir para difundir esta tecnologia em nossa instituição (UNIS) bem como em nossa região. Assim, baseado nos dados levantados este trabalho procurou fazer uma análise sobre a inserção da geração fotovoltaica no Brasil - em unidades do grupo B, buscando encontrar razões pelas quais após três anos da publicação da RN 482/2012, entradas das bandeiras tarifárias e *smart grid*, ainda é inexpressível a implantação da micro e minigeração fotovoltaica distribuída no Brasil. Tendo como metodologia a pesquisa bibliográfica, participação em congresso e cursos específicos da área de energia solar, acompanhamento de conexões de unidades consumidoras na GD, este trabalho identificou pontos vulneráveis, no que se refere a difusão desta nova tendência de mercado. Como resultado principal da análise destacou-se a desarticulação entre os agentes envolvidos (Concessionárias, prestadores de serviços, empresas fornecedoras de equipamentos e consumidores), desarticulação esta provocada pela carência na capacitação dos profissionais de engenharia envolvidos em projetos de soluções fotovoltaicas. A análise também permitiu concluir que outros fatores tais como o modelo de compensação financeira (*Net metering*), a instabilidade econômica e política, obstáculos institucionais e tributários além dúvidas quanto aos itens de qualidade de

energia elétrica gerada, além é claro, do elevado custo de implantação da Usina Solar Fotovoltaica (USFV) também contribuíram para os baixos índices de adesão.

**Palavras-chave:** Geração distribuída. Sistema fotovoltaico *on-gride*. *Net metering*.



## **ABSTRACT**

*The photovoltaic solar energy is becoming reality and consolidated in Brazil, mostly in the form of distributed generation (DG). This process began with the publication of normative resolution (REN) No 482/2012, of the National Electric Energy Agency (ANEEL) on 17 April 2012. Projections made by that Agency estimated that until about 2024 of 1.2 million consumer units to produce their own energy, totaling 4.5 GW of installed capacity. However, since the publication of the resolution in 2012 by October 2015, only 1,285 generating stations have been installed, with 1,233 (96%) with the source solar photovoltaic, wind, hybrid 13 31 (solar/wind), biogas-fired 6, biomass and hydraulic 1. According to data from ANEEL, presented during the public hearing No. 026/2015, which occurred the day 19 June 2015 in Brasilia/DF during the review process of the RN 482, up to that time were connected to the mains about 670 of distributed generation units that use the system of compensation (Net metering) established by that resolution. The participation of photovoltaic source represented 632 generating units, namely, 94.3%. This study aims to analyze the integration of photovoltaic generation in micro and minigeration distributed in Brazil for Group B units (consumers in low voltage), identifying the causes of the low rate of accession to the possibilities of distributed generation (DG) and present the scope of a project that will help to spread this technology in our institution (UNIS) as well as in our region. So, based on data collected this work sought to make an analysis on the integration of photovoltaic generation in Brazil-in Group B units, seeking to find reasons why after three years of publication of RN 482/2012, flags entries and smart grid pricing, is still the inexpressible minigeração distributed in photovoltaic and micro Brazil. With the methodology to bibliographical research, participation in Congress and specific courses in the area of solar energy, monitoring of connections of consumer units in GD, this work identified soft spots with regard to dissemination of this new market trend. As a main result of the analysis was the disarticulation between the actors involved (Dealers, service providers, equipment suppliers and consumers), this caused by the lack disarticulation in the training of engineering professionals involved in projects of photovoltaic solutions. The analysis also allowed the conclusion that other factors such as model of financial compensation (Net metering), economic and political instability, institutional obstacles and tributaries as well as doubts as to the items of quality of electric power generated, and of course, the high cost of deployment of photovoltaic Solar power plant (USFV) also contributed to the low levels of membership.*

***Key – Words: Distributed generation. Photovoltaic system on-gride.Net metering.***

## LISTA DE FIGURAS

Figura 01- Arquitetura Smart Grid. ....	21
Figura 02- Usina Solar FV no Smart Communities. ....	23
Figura 03- Telha Solar. ....	24
Figura 04- Cobertura para Estacionamento. ....	24
Figura 05- USFV Instalada em Casa de Campo. ....	25
Figura 06- Cobertura de varanda residencial. ....	25
Figura 07- O sol como fonte de energia. ....	26
Figura 08- Mercado brasileiro de aquecimento solar. ....	28
Figura 09- Vendas de aquecedores por segmento. ....	29
Figura 010- CSP produção de vapor para acionamento de turbina. ....	30
Figura 11- Esquema ilustrativo de uma célula fotovoltaica. ....	32
Figura 12- 1955 A primeira bateria solar. ....	33
Figura 13- Crescimento da produção de energia SFV x Investimento (custos). ....	35
Figura 14- Capacidade de geração em FV no mundo em 2013. ....	35
Figura 15- Estrutura de banda de energia. ....	42
Figura 16- Geração elétron-lacuna pela incidência de fótons. ....	44
Figura 17- Níveis de energia em materiais semicondutores tipo pn. ....	46
Figura 18- Junção pn no escuro em equilíbrio térmico. ....	49
Figura 19- Corrente fotogerada na junção pn iluminada (célula FV). ....	50
Figura 20- Fatores que limitam a eficiência de uma célula. ....	51
Figura 21- Curva I-V de uma célula fotovoltaica de Si. ....	54
Figura 22- Circuito equivalente básico para uma célula FV (modelo com diodo). ....	54
Figura 23- Símbolo do módulo FV. ....	55
Figura 24- Esquema do módulo fotovoltaico. ....	58
Figura 25- Módulo FV. ....	59
Figura 26- Célula fotovoltaica m-Si. ....	60
Figura 27- Célula fotovoltaica p-Si. ....	61
Figura 28- Filmes finos de a-Si. ....	62
Figura 29- Medidor Bidirecional. ....	64
Figura 30- Interface para comunicação remota. ....	64
Figura 31- Suporte para montagem de painel FV. ....	66
Figura 32- Fachada da USF Mineirão. ....	85
Figura 33- Inversores. ....	86
Figura 34- Medidores de faturamento. ....	87
Figura 35- Sala de medição. ....	87
Figura 36- Representação do Sul e Sudoeste de minas. ....	88
Figura 37- Acúmulo de sujeira nos painéis solares. ....	89

## LISTA DE TABELAS

Tabela 01- Bandas/Tensão Eg – Fonte: Adaptação Cepel .....	43
Tabela 02- Eficiência das Melhores Células FV em Laboratório– Fonte: Cepel.....	52
Tabela 03- Níveis de Tensão e Tempos SFV - Fonte: Adaptação ABNT NBR 10899.....	65
Tabela 04- Custo sistema fotovoltaico – Fonte: EPE .....	69

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	14
<b>2 ENERGIA ALTERNATIVA E RENOVÁVEL</b> .....	19
<b>2.1 Smart Grid</b> .....	19
2.1.1 Características do Smart Grid .....	20
2.1.2 Arquitetura do Smart Grid .....	21
2.1.3 Sistema Fotovoltaico Inserido na Arquitetura Moderna.....	23
<b>2.2 Energia Solar</b> .....	25
2.2.1 Energia Solar Térmica .....	27
2.2.2 Energia Solar Fotovoltaica .....	31
2.2.2.1 Energia solar fotovoltaica no mundo .....	32
2.2.3 Desenvolvimento da indústria fotovoltaica .....	34
2.2.3.1 Europa.....	35
2.2.3.2 Ásia e Oceania .....	36
2.2.3.3 América do Norte .....	37
2.2.3.4 Energia solar fotovoltaica no Brasil .....	37
<b>2.3 Células Fotovoltaicas</b> .....	41
2.3.1 Princípio de Funcionamento das Células Fotovoltaicas .....	42
2.3.2 Características Elétricas das Células Fotovoltaicas .....	52
2.3.2.1 Curva I-V .....	52
2.3.2.2 Parâmetros elétricos.....	55
2.3.2.3 Garantias de Módulos Fotovoltaicos .....	56
<b>2.4 Componentes básicos de sistemas fotovoltaicos</b> .....	57
2.4.1 Módulo Fotovoltaico .....	57
2.4.2 Tipos de Célula Fotovoltaica .....	59
2.4.2.1 Silício (Si) Monocristalino .....	60
2.4.2.2 Silício (Si) Multicristalino .....	60
2.4.2.3 Filmes Finos.....	61
2.4.2.4 Diferenciais.....	62
2.4.2.5 Silício amorfo .....	63
2.4.2.6 Células com concentração .....	63
2.4.3 Eficiência das Células fotovoltaicas .....	63
2.4.4 Medidores Bidirecionais .....	64
2.4.5 Inversores.....	64

2.4.6 Sistema de montagem .....	66
<b>3 GERAÇÃO DISTRIBUÍDA .....</b>	<b>67</b>
<b>3.1 Geração Distribuída Fotovoltaica .....</b>	<b>68</b>
3.1.1 Vantagens da Geração Distribuída .....	68
3.1.2 Viabilidade econômica da geração distribuída fotovoltaica .....	69
<b>3.2 Geração Distribuída na Legislação Brasileira .....</b>	<b>70</b>
3.2.1 Avanços e Barreiras na Inserção da Geração Distribuída fotovoltaica no Brasil	72
3.2.1.1 Legislação .....	75
3.2.1.2 Fontes de Financiamento .....	76
3.2.1.3 Normatização e Certificação.....	77
3.2.1.4 Tributação .....	78
3.2.1.5 Social .....	80
3.2.1.6 P&D .....	80
<b>3.3 Potencial e Projeções da geração fotovoltaica distribuída no Brasil.....</b>	<b>81</b>
<b>3.4 Profissionais envolvidos na instalação das usinas solares fotovoltaicas .....</b>	<b>81</b>
<b>4 MÉTODOS E MATERIAIS .....</b>	<b>84</b>
<b>4.1 USF Mineirão .....</b>	<b>84</b>
4.1.1 Obras de revitalização.....	84
4.1.2 Sala Técnica dos Inversores – STI.....	85
4.1.3 Subestação Elevadora .....	86
4.1.4 Sala Técnica de conexões - STC.....	86
<b>4.2 Acompanhamento de novas conexões .....</b>	<b>87</b>
<b>4.3 Histórico de manutenções em USFV ligadas na GD.....</b>	<b>88</b>
<b>4.4 Curso para elaboração de projetos de USF.....</b>	<b>89</b>
<b>4.5 Congresso Brasileiro de Energia Solar (CBENS).....</b>	<b>89</b>
<b>5 CONCLUSÃO.....</b>	<b>90</b>
<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>91</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Em uma tendência clara, onde a perspectiva de mudança do modelo de negócios do setor energético decorre de uma série de mudanças potencialmente radicais, tais como: acelerada redução/extinção dos recursos do planeta (Petróleo, Carvão, Óleo, gás, urânio e etc.), busca por projetos mais sustentáveis e nova modelagem das matrizes energéticas. A geração descentralizada ou distribuída (GD) aponta mesmo que de forma incipiente (em alguns países), uma vertente a ser seguida. A inserção destes geradores distribuídos no sistema elétrico se dará através de redes inteligentes (*Smart Grids*<sup>1</sup>), que por sua vez viabilizam o gerenciamento mais efetivo da cadeia energética.

O Brasil, que possui uma matriz energética pouco diversificada, essencialmente composta de fontes hidrológicas, a geração descentralizada utilizando fontes alternativas e renováveis, acaba se tornando uma solução possível para minimizar o risco de dependência majoritária de recursos hidrológicos, mesmo que a tendência seja a manutenção da base hídrica.

Em escala mundial a 13<sup>a</sup> pesquisa global de energia e serviços públicos da *PwC*, verificou uma pressão cada vez maior sobre o tradicional modelo e estrutura das empresas setor elétrico, pressão esta que direciona para mudanças em tecnologia e custo. Nesta pesquisa também mostra que o crescimento da geração distribuída (GD) e a ameaça que isso impõe ao modelo de negócios do setor elétrico dependem de avanços tecnológicos e de custos. Na Europa, com destaque para Alemanha, a ascensão da GD se deu principalmente á base de subsídios. Mas ainda existem em diversos países, barreiras de custos e tecnologias que ainda impedem que a GD seja uma solução de mercado. No entanto se em algum momento essas barreiras puderem ser superadas, estaria armado o cenário ideal para uma transformação radical do setor em escala mundial. Para alguns gestores do setor energético, esse momento está muito perto. Projetos de eficiência energética, queda de custos da energia solar, tecnologias de gerenciamento da demanda e *smart grids* encabeçam a lista de avanços tecnológicos que, na opinião dos gestores das maiores empresas do setor energético, terão o maior impacto em seus respectivos mercados.

No Brasil, as dificuldades observadas nas geradoras que usam recursos hidrelétricos podem fazer com que elas reduzam a participação dessa fonte de energia ao longo das próximas décadas. Isto fica evidente quando de acordo com Ministério de Minas e Energia

---

<sup>1</sup> *Smart Grids*- Redes Inteligentes.

(MME- 2015), para os próximos quinze anos, ou seja, até 2030 a previsão é de que tenhamos uma participação das fontes renováveis, como biomassa, eólica e fotovoltaica na geração de energia, na ordem de 28% a 30%. e uma redução da fonte hídrica em torno de 10%.

Ainda de acordo com MME, com o início desta transição na matriz energética, o custo marginal de expansão de geradores hidrelétricos será crescente, e as fronteiras de expansão continuarão tendo entraves ambientais. Por isto se torna cada vez mais consequente e inevitável a diversificação das fontes de energia em âmbito nacional. Mesmo com a volta dos grandes projetos estruturantes (Santo Antônio, Jirau e Belo Monte), é evidente a divergência sobre questões ambientais e sobre o aumento da exploração do potencial hidrológico com reservatórios ou usinas a fio d'água, como os atuais empreendimentos. Novas tecnologias, como o uso de usinas plataformas, começam a ser viabilizadas; porém, mesmo mantida a base de geração com a fonte hídrica, haverá aumento no uso de outras fontes.

Em consonância a esta tendência mundial de transformação no setor elétrico, em 24/11/2015 a diretoria da Agência Nacional de Energia (ANEEL) aprovou aprimoramentos na Resolução Normativa nº 482/2012, que normatizou a micro e minigeração distribuída e também criou o Sistema de Compensação de Energia Elétrica, permitindo que o consumidor instale pequenos geradores (tais como painéis solares fotovoltaicos e microturbinas eólicas, entre outros) em sua unidade consumidora e troque energia com a distribuidora local com objetivo principal de reduzir o valor da sua fatura de energia elétrica.

De acordo com as novas regras, que começaram a valer a partir de 1º de março de 2016, será permitido o uso de qualquer fonte renovável, além da cogeração qualificada, denominando-se microgeração distribuída a central geradora com potência instalada até 75 quilowatts (KW) e minigeração distribuída aquela com potência acima de 75 KW e menor ou igual a 5 MW (sendo 3 MW para a fonte hídrica), conectadas na rede de distribuição por meio de instalações de unidades consumidoras.

Quando a quantidade de energia gerada em determinado mês for superior à energia consumida naquele período, o consumidor fica com créditos que podem ser utilizados para diminuir a fatura dos meses seguintes. Segundo as novas regras, o prazo de validade dos créditos passou de 36 para 60 meses, sendo que eles podem também ser usados para abater o consumo de unidades consumidoras do mesmo titular situadas em outro local, desde que na área de atendimento de uma mesma distribuidora. Esse tipo de utilização dos créditos foi denominado “autoconsumo remoto”.

Outra inovação da norma diz respeito à possibilidade de instalação de geração distribuída em condomínios (empreendimentos de múltiplas unidades consumidoras). Nessa



configuração, a energia gerada pode ser repartida entre os condôminos em porcentagens definidas pelos próprios consumidores. A ANEEL criou ainda a figura da “geração compartilhada”, possibilitando que diversos interessados se unam em um consórcio ou em uma cooperativa, instalem uma micro ou minigeração distribuída e utilizem a energia gerada para redução das faturas dos consorciados ou cooperados.

Para as empresas que atuam no setor elétrico brasileiro, a atitude em relação às essas mudanças normativas e tecnológicas, citadas anteriormente determinará se a organização fará parte do futuro ou irá engrossar as fileiras de empresas de outros setores cujo modelo de negócios ficou desatualizados por mudanças em tecnologias e no mercado. Sendo assim as empresas, precisarão adotar estratégias capazes de identificar as melhores oportunidades de geração de receita num mercado que passará por importantes alterações.

Sobre estas alterações é essencial ter uma visão estratégica sobre a extensão e velocidade do avanço da geração distribuída no mercado. O crescimento da geração distribuída de energia vai alterar a natureza das redes de distribuição, que passarão a ser muito mais complexas. O modelo das empresas transmissoras e empresas distribuidoras terá de ser remodelado numa era de auto geração, *smart grids* e gerenciamento da demanda na ponta de consumo.

Atualmente, a geração de energia elétrica a partir de fontes alternativas e renováveis constitui uma tendência verificável em diversos países, inclusive com a concessão de incentivos à geração distribuída de pequeno porte.

Os estímulos à geração distribuída (geralmente localizadas próximas aos centros de carga) justificam-se pelos potenciais benefícios que tal modalidade pode proporcionar ao sistema elétrico: a postergação de investimentos em expansão nos sistemas de distribuição e transmissão; o baixo impacto ambiental; a redução no carregamento das redes; a redução de perdas e diversificação da matriz energética, entre outros.

Para o Brasil, a ANEEL fez uma projeção de que até 2024 cerca de 1,2 milhões de unidades consumidoras passem a produzir sua própria energia, totalizando 4,5 giga watts (GW) de potência instalada. Entretanto, desde a publicação da Resolução em 2012 até outubro de 2015, foram instaladas apenas 1.285 centrais geradoras, sendo 1.233 (96%) com a fonte solar fotovoltaica, 31 eólicas, 13 híbridas (solar/eólica), 6 movidas a biogás, 1 a biomassa e 1 hidráulica.

Baseados nos dados acima, este trabalho procura fazer uma análise sobre a inserção da geração fotovoltaica no Brasil - em unidades do grupo B, buscando encontrar a razão pela qual após três anos da publicação da resolução 482/2012, entradas das bandeiras tarifárias e

*smart grid*, ainda é incipiente a micro e minigeração distribuída no Brasil; bem como também apresentar um projeto que contribua para difusão da tecnologia fotovoltaica na região do sul de Minas Gerais.

Para nortear este trabalho algumas hipóteses sobre a baixa adesão da GD na modalidade de mini e micros geradores, foram elencadas e destaca-se entre elas:

- a) Desarticulação *stakeholders*<sup>2</sup> (Concessionárias, Prestadores de serviços, Empresas fornecedoras de equipamentos, Consumidores e etc.);
- b) Elevado custo de implantação da Usina Solar Fotovoltaica (USFV);
- c) Modelo de compensação financeira (*Net metering*<sup>3</sup>);
- d) *Payback*<sup>4</sup> – cultura econômica;
- e) Dificuldade de acesso às informações por parte dos consumidores;
- f) Situação passiva das concessionárias;
- g) Instabilidade de transmissão de dados;
- h) Instabilidade econômica e política;
- i) Obstáculos institucionais e tributários;
- J) Dúvidas quanto aos itens de qualidade de energia elétrica.

É importante também mencionar a justificativa e relevância deste trabalho para a comunidade acadêmica, bem como para os profissionais de engenharia envolvidos.

Abaixo relacionados seguem alguns pontos de relevância:

- a) Mercado promissor- O cenário aponta para a micro e minigeração uma perspectiva extremamente favorável;
- b) Capacitação de profissionais para um novo ramo de atuação (estima-se a criação de até 30 postos a cada 1 MW instalado);
- c) Transformação no modelo de negócios do setor elétrico;
- d) Papel das universidades na viabilização da GD;
- e) Avanço da automação (tele medição) nas unidades consumidoras do grupo B;
- f) Projetos sustentáveis (Social, econômico e ambiental);
- g) Composição da arquitetura do *smart-grid*;
- h) USFV são estáticas, silenciosas, baixo índice de manutenção e modular;
- i) Baixo *payback* energético;

---

<sup>2</sup> *Stakeholders* – Uma pessoa ou grupo que possui participação, investimento ou ações e que possui interesse em uma determinada empresa ou negócio.

<sup>3</sup> *Net Metering* ou Sistema de Compensação de Energia- É a abordagem na qual medidores bidirecionais medem o fluxo de energia em uma unidade consumidora dotada de pequena geração.

<sup>4</sup> *Payback* - Retorno de investimento ou capital investido.

- j) Versatilidade de aplicações arquitetônicas;
- k) USFV fonte de energia alternativa e renovável.

Para que se possam alcançar os objetivos propostos será adotada como metodologia e materiais, o levantamento bibliográfico, fundamentação teórica, estudo da legislação vigente, análise das tendências do mercado mundial e nacional, visita a usinas fotovoltaicas, visita ao centro de tele medição CEMIG, visita ao centro de parametrização de medidores bidirecional, participação de seminários e cursos sobre geração fotovoltaica, pesquisa de campo (acompanhamento de novas instalações na GD), elaboração de projetos e aplicação simuladores (*software*).

No próximo capítulo serão abordados os conceitos de *smart grid*, energia solar, células fotovoltaicas, geração distribuída, geração distribuída fotovoltaica, e sua contextualização no setor elétrico brasileiro, profissionais envolvidos nas instalações e qualificação técnicas necessárias, também serão apresentados alguns aspectos técnicos sobre componentes de uma usina solar fotovoltaica.

## 2 ENERGIA ALTERNATIVA E RENOVÁVEL

### 2.1 *Smart Grid*

Em sua publicação - "Relatório *Smart Grid*" o Ministério de Minas e Energia- MME- (2014), relata que o termo *Smart Grid* foi usado pela primeira vez em 2005 em um artigo escrito por *S. Massoud Amin* e *Bruce F. Wollenberg*, publicado na revista *IEEE P&E*, com o título de "*Toward A Smart Grid*". Neste relatório, menciona-se que existem várias definições para o conceito para *Smart Grid*, mas todas convergem para o uso de elementos digitais e de comunicações nas redes que transportam a energia. Esses elementos possibilitam o envio de uma gama de dados e informação para os centros de controle, onde eles são tratados, auxiliando na operação e controle do sistema como um todo.

Para se colocar em prática tal conceito, algumas transformações devem ser levadas a cabo, como a modernização da infraestrutura, instalação de camadas digitais, como *softwares* e capacidade de processamento de dados, que são a essência da rede inteligente, e mudanças na comercialização, necessárias para ampliar o número de acessantes.

A Companhia Energética de Minas Gerais (CEMIG), em publicação interna (*intranet* – março – 2013) destaca que não há um conceito único de *Smart Grid*, ou redes inteligentes, este conceito difere de acordo com quem o define. Existem alguns especialistas que focam o conceito mais na parte da automação da rede, outros na cadeia de fornecimento de energia, outros ainda na melhoria dos canais de interação e serviços para o consumidor. Em virtude disto é que tal conceituação muda de acordo com as necessidades (reduzir perdas, poluentes, custos operacionais) e com a ótica (financeira, ambiental, entre outras) de seu autor. Ainda segundo a CEMIG, o *U.S. Department of Energy*<sup>5</sup> foi feliz em sua definição ao afirmar que, *Smart Grid* não é uma “coisa”, mas uma visão, a ser completada e, que deve ser modelada de acordo com as particularidades do mercado onde será implantado e levando em consideração as múltiplas perspectivas, tais como tecnológica, ambiental, socioeconômica e político-regulatório.

Este conceito tende a transformar a maneira como as concessionárias gerem seus ativos de rede, se relacionam com seus clientes e com o mercado e a maneira como os últimos se relacionam com as redes de energia elétrica. Em termos práticos o *Smart Grid* permitirá a automação integrada e segura das redes, sistemas de medição, geração e armazenamento

---

5 *U.S. Department of Energy* - Departamento Americano de Energia.

distribuído de energia, de modo a permitir que a rede, através de análises e diagnósticos em tempo real, se reconfigure automaticamente para atender, de forma otimizada, as necessidades da sociedade e do sistema elétrico.

O conceito inclui ainda o gerenciamento pelo lado da demanda que permitirá aos consumidores se beneficiar de tarifas diferenciadas, que variarão de acordo com o horário que a energia é utilizada. Ao adequar seu comportamento de consumo de energia aos horários de tarifas menores, o cliente poderá se beneficiar reduzindo seus gastos com energia.

Tais benefícios podem ainda ser obtidos através da interação com fontes de geração e armazenamento distribuídos de energia, conectados diretamente na rede ou nas unidades consumidoras. Enfim, ganhos sinérgicos serão alcançados através de interações entre diferentes elementos do sistema elétrico tais como medição, dispositivos de rede, fontes de geração e armazenamento de energia e carga. Isto se traduzirá ao consumidor através da oferta de novas tarifas, produtos, serviços e canais de interação.

De acordo com Toledo (2012), independentemente do conceito adotado, o fato é que as concessionárias precisam lidar com desafios do presente e do futuro, tais como:

- a) A inevitável penetração de novas fontes de geração e armazenamento de energia;
- b) A potencial mudança do perfil do cliente de energia elétrica, por exemplo, o advento de consumidores móveis de energia (Veículos elétricos e híbridos recarregáveis);
- c) A necessidade de lidar com a bidirecionalidade energética e de informação, em tempo real, relacionadas a tais tecnologias;
- d) A adequação a metas ligadas à sustentabilidade do planeta e à tendência de cidades e habitats inteligentes;
- e) A tendência de competição no mercado de energia elétrica direta ou indiretamente;
- f) A Resposta à crescente expectativa dos clientes em relação à qualidade do fornecimento de energia.

### 2.1.1 Características do *Smart Grid*

Podem-se citar algumas características das *Smart Grid* como:

- a) Permite a participação do consumidor – os consumidores passam a integrar o sistema de distribuição de rede elétrica na medida em que possuem as informações necessárias para tomar decisões sobre como e quando utilizar certas fontes de energia;
- b) Comporta todo o tipo de gerador e armazenador de energia – *Smart Grid* permitem não só as tradicionais formas de distribuição de energia (centralizadas e de larga escala), mas

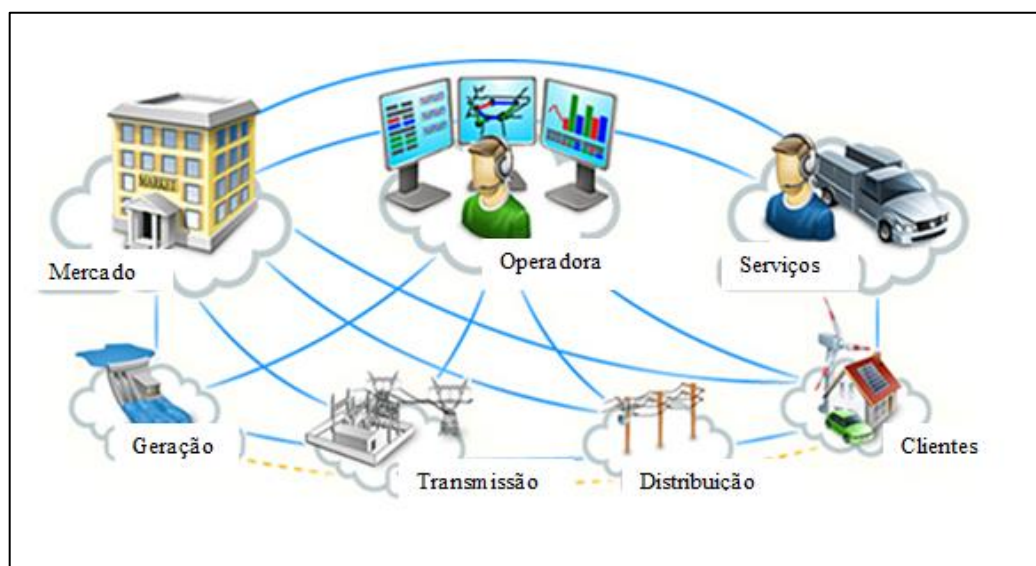
também as novas formas de distribuição de energia que estão surgindo (distribuídos, de pequena escala, e em grande parte utilizando energias alternativas e renováveis);

- c) Permite novos produtos e serviços;
- d) Melhoras nos índices de qualidade de serviço (confiabilidade, continuidade e segurança);
- e) Aperfeiçoa e torna eficiente a utilização de energia;
- f) Automação – controla a distribuição de energia, podendo perceber em tempo real que uma falha está para ocorrer ou acabou de ocorrer. Reconhece a falha e sabe como solucionar alguns tipos de falha de forma automática (DESVENDANDO AS REDES ELÉTRICAS INTELIGENTES, 2012).

### 2.1.2 Arquitetura do *Smart Grid*

A arquitetura das *smart grid* consiste em sete principais blocos: geração, transmissão, distribuição, consumo, operação, mercado e provedor de serviços. Outra possível organização da arquitetura do *smart grid* seriam três grandes núcleos: núcleo de energia, núcleo de comunicação e núcleo de tecnologia da informação. Os dois últimos são os núcleos que formam a base para o núcleo de energia, tornando a rede “inteligente” (GTA UFRJ, 2010).

Figura 01- Arquitetura Smart Grid.



Fonte: UFRJ - Universidade Federal do Rio de Janeiro- (Adaptação), 2014.

O bloco de geração é o responsável pela produção da grande quantidade de eletricidade, gerada a partir de fontes renováveis e não renováveis. O setor de geração também pode armazenar energia para posterior utilização.

O bloco de transmissão é o responsável por transportar a energia através de grandes linhas de transmissão. Esse setor conecta o gerador com os centros onde a energia será distribuída, pelas chamadas subestações.

O bloco de distribuição é o setor que contém as subestações, responsáveis por realizar a distribuição da energia para o consumidor final. Esse é o bloco que tem o dever de conectar os medidores e outros dispositivos inteligentes aos consumidores e ao resto da rede. Também neste bloco é que estão inseridos os micros e minigeradores distribuídos, os quais ocuparão um lugar de destaque nas cidades inteligentes sustentáveis dentro do moderno conceito de redes elétricas inteligentes (REI).

O bloco de clientes é onde a rede se comunica diretamente com o usuário final (casas, apartamentos, edifícios comerciais) através dos medidores inteligentes. O medidor inteligente provê informações sobre o fluxo de energia que está sendo utilizado e permite ao usuário que passa controlar o consumo de energia da forma que achar mais adequada. Ele também informa ao consumidor o preço da eletricidade, que varia durante o dia. Com essa informação, o consumidor pode se planejar para usar certas cargas em horários previamente determinados, (principalmente consumidores com THS<sup>6</sup>).

O bloco de operação gerencia e controla o fluxo de energia elétrica de todos os outros setores. Ele utiliza uma rede de comunicação de duplo sentido para se comunicar com as subestações, com as redes de consumo e com outros dispositivos inteligentes. Dessa forma, esse bloco monitora, controla e supervisiona o status da rede, sendo de grande importância para o processo de tomada de decisão dos operadores de redes e nos processos de auto detecção e auto recuperação.

O bloco de mercado coordena as empresas distribuidoras de energia. Esse bloco possui uma interface com todos os outros blocos e se certifica de que estão coordenados em um ambiente competitivo. Também controla a troca de energia entre o consumidor final e as distribuidoras.

O bloco provedor de serviço controla todas as operações de serviços terceirizados, como por exemplo, um portal de gerenciamento de energia (GTA UFRJ, 2010).

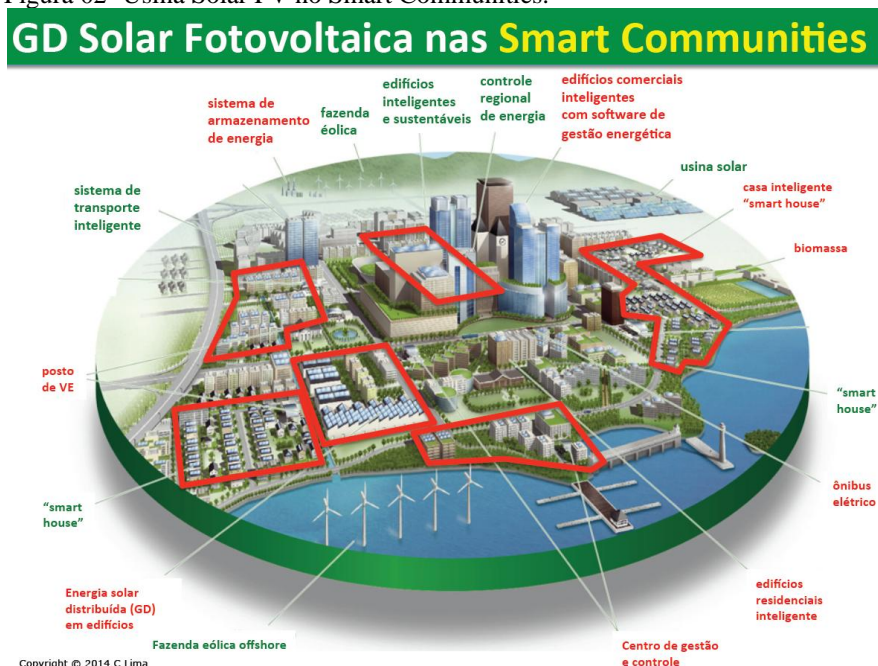
---

6 THS – Tarifa horo sazonal – modalidade tarifária.

### 2.1.3 Sistema Fotovoltaico Inserido na Arquitetura Moderna

Quando olhamos para dentro do bloco da distribuição, logo vemos as instalações das usinas solares fotovoltaicas. E em seguida, vem à pergunta de como tem sido a integração da energia solar fotovoltaica na arquitetura moderna? Esta inquietação surgiu no início da década de 90, quando a energia fotovoltaica começou a ter maior penetração no mercado, e as limitações estéticas desta nova tecnologia foram consideradas um dos grandes obstáculos para a aceitação de arquitetos e usuários. – A resposta para esta pergunta ainda hoje gera certa insegurança; pois a energia fotovoltaica é novidade para grande parte dos arquitetos e engenheiros. Um sistema FV pode ser considerado um elemento de destaque em uma edificação; pode estar integrado de forma sutil, sem que seja percebido; ou ainda pode comprometer negativamente todo o conjunto, quando estiver aplicado de forma inadequada. Sistemas FV integrados a edificações de forma harmônica e com bons resultados de desempenho energético são fundamentais para que haja maior aceitação e difusão de utilização desta tecnologia. No Brasil e no mundo afora existem inúmeros exemplos de tecnologia fotovoltaicas integradas em projetos arquitetônicos. Confirmando a informação anterior, a revista Energia Inteligente (ed.n.º2 agosto/2015) apresenta com destaque o exemplo da capital mineira - Belo Horizonte, que pelo segundo ano consecutivo foi reconhecida pelo seu aproveitamento da luz solar.

Figura 02- Usina Solar FV no Smart Communities.



Fonte: Energia Pura –2014.



Atualmente diferentes alternativas estão surgindo para a melhoria da imagem dos sistemas e sua integração à arquitetura. Seguem alguns exemplos:

- a) Placas fotovoltaicas inseridas em fachadas de edifícios;
- b) Coberturas de estacionamentos;
- c) Telha fotovoltaica de cerâmica;
- d) Células fotovoltaicas montadas sobre vidros.

Figura 03- Telha Solar.



Fonte: Área Industrie Ceramiche - 2014.

Figura 04- Cobertura para Estacionamento.



Fonte: Bright Solar – Cobertura de Estacionamento em Portugal, 2013.

Figura 05- USFV Instalada em Casa de Campo.



Fonte: Energia Pura –2014.

Figura 06- Cobertura de varanda residencial.



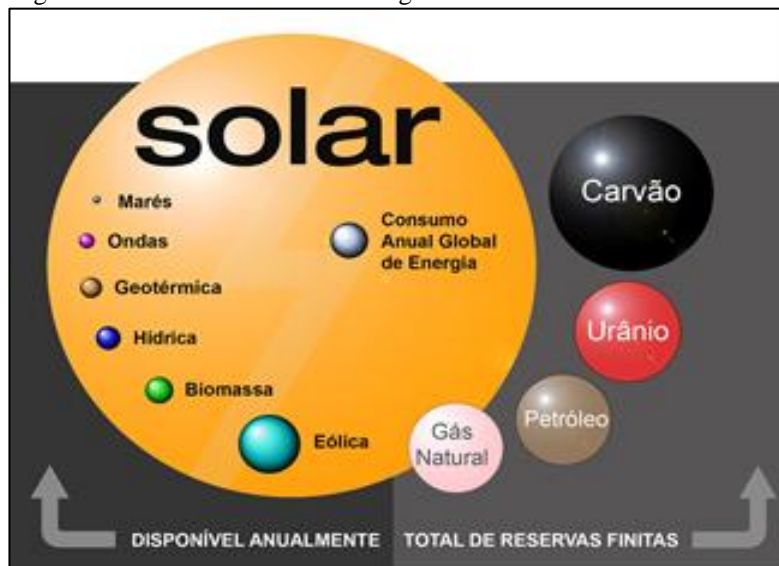
Fonte: SustentArqui-2015.

## 2.2 Energia Solar

De acordo com *Hermann Scheer* (2011) nos cálculos dos astrofísicos, o sistema solar ainda perdurará em torno de quatro e meio bilhões de anos e o com ele o planeta terra e os demais planetas que conhecemos. Trata-se, pois, de período de tempos inimagináveis, nos quais o sol fornecera sua energia à humanidade, aos animais e às plantas. E o faz com esbanjamento de tal magnitude que poderia satisfazer as necessidades energéticas mais exigentes, mesmo que a humanidade, a flora e a fauna se reproduzissem drasticamente. O sol fornece a cada ano quinze mil vezes mais energia do que a consumida pela população mundial em termos comerciais, sem contar a que se armazena de maneira natural, a curto e médio prazo, nas superfícies terrestres, nas águas e na vegetação. Resulta, portanto, absolutamente

errôneo seguir afirmando - inclusive com pretensões científicas - que a demanda energética da humanidade não pode ser suprida apenas utilizando a energia solar.

Figura 07- O sol como fonte de energia.



Fonte: Portal Solar, 2014.

A energia do sol - é a partir da energia do sol que se dá a evaporação, origem do ciclo das águas, que possibilita o represamento e a consequente geração de eletricidade. A radiação solar também produz a circulação atmosférica em larga escala, causando os ventos. Assim, também a energia eólica é uma forma indireta da manifestação da energia solar, uma vez que os ventos se formam a partir da conversão da radiação solar em energia cinética, em função de um balanço diferenciado nas diferentes latitudes entre a radiação solar incidente e a radiação terrestre emitida. Gás natural, carvão e petróleo foram gerados a partir da decomposição orgânica de animais e plantas, que se desenvolveram com a energia gerada pelo sol. Observa-se que são diversas fontes de energia que de alguma forma, tiveram o sol como fonte de energia primária.

A organização científica-política - IPCC<sup>7</sup> (*Intergovernmental Panel on Climate Change*) publicou um relatório especial sobre fontes renováveis de energia e mitigação da mudança climática (*climate change 2014*), no qual classificou a energia solar direta em cinco blocos: 1) Solar passiva, onde se insere a arquitetura bioclimática; 2) Solar ativa, onde inserem o aquecimento e a refrigeração solares; 3) Solar fotovoltaica, para produção de energia elétrica com e sem concentradores; 4) A geração de energia elétrica a partir de

<sup>7</sup> IPCC- É uma organização científico-política criada em 1988 no âmbito das nações unidas pela iniciativa do programa das nações unidas para meio ambiente e da organização meteorológica mundial.

concentradores solares térmicos para altas temperaturas e; 5) Um processo inspirado na fotossíntese através do qual, em um reator alimentado por dióxido de carbono, água e metal ou óxido metálico, exposto à radiação solar, produz-se hidrogênio, oxigênio e monóxido de carbono.

De forma mais simplificada, para fins deste trabalho, pode-se mencionar a energia solar térmica e energia solar fotovoltaica.

Para uma melhor compreensão algumas formas de utilização da energia solar são apresentadas a seguir.

### 2.2.1 Energia Solar Térmica

Em um primeiro momento quando falamos de energia solar térmica, o que nos interessa é a quantidade de energia que um determinado corpo é capaz de absorver, sob a forma de calor, a partir da radiação solar incidente nele. A utilização dessa forma de energia implica não somente em saber captá-la, mas também em como armazená-la. Dentre vários equipamentos existentes, os mais conhecidos com o objetivo específico de se utilizar a energia solar térmica são os coletores solares (MANUAL DE ENGENHARIA FV, 2014).

Os coletores solares são aquecedores de fluidos (líquidos ou gasosos) e são classificados em coletores concentradores e coletores planos, em função da existência ou não de dispositivos de concentração de radiação solar. O fluido aquecido pode ser mantido em reservatórios termicamente isolados até sua aplicação final. Os coletores concentradores estão associados a aplicações em temperaturas superiores a 100°C, podendo alcançar temperaturas de até 400°C sendo utilizados para acionamento de turbinas a vapor e posterior geração de eletricidade. Já os coletores planos são largamente utilizados para aplicações residenciais e comerciais em baixa temperatura (em torno de 60°C), tais como: água aquecida para banho, ar quente para secagem de grãos, aquecimento de piscinas, água aquecida para limpeza em hospitais e hotéis, etc. (MANUAL DE ENGENHARIA FV, 2014).

Os sistemas de aquecimento solar estão consolidados no Brasil, em função de sua tecnologia (simples) e preços competitivos. Conforme dados publicados pela revista SOLBRASIL (ed. abril-junho 2015), em 2014, o parque solar térmico brasileiro atingiu a produção de 7.354 Gwth<sup>8</sup> a partir de uma área total de 11,24 milhões m<sup>2</sup> de coletores solares

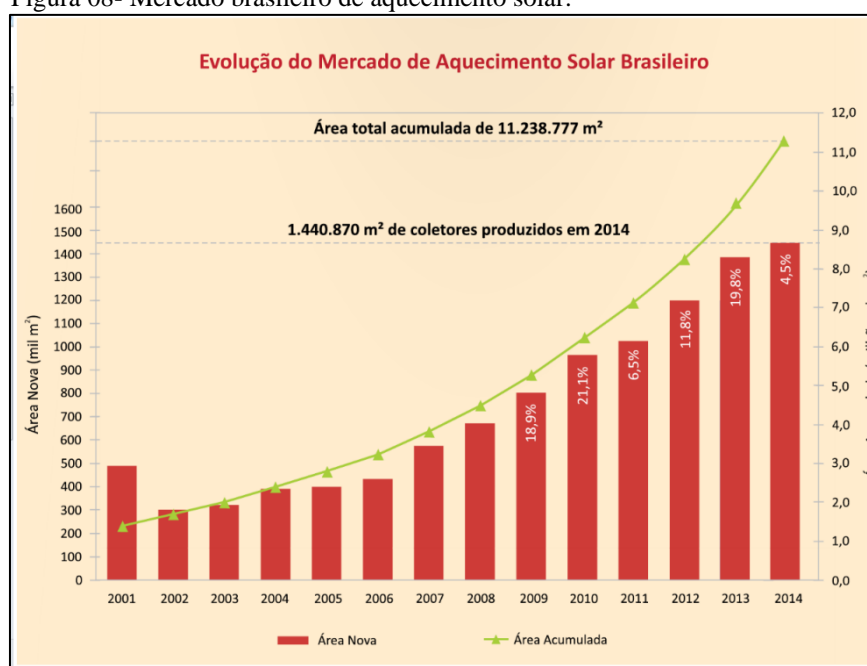
---

<sup>8</sup> Gwth - Giga watt Térmico - Unidade de potência usada para caracterização de equipamentos para resfriamento, como condicionadores de ar, ou aquecimento, como coletores solares, centrais termelétricas ou turbinas.

instalados no país. São 7.354 Gwh que deixam de ser consumidos do sistema elétrico, na medida em que os usuários passam a utilizar a tecnologia solar térmica para aquecimento de água. Considerando o consumo médio residencial de 166 kWh/mês calculado pela Empresa de Pesquisa Energética (EPE), essa quantidade de energia é suficiente para abastecer durante um ano 3,7 milhões de residências – comparável a uma cidade como São Paulo, com 3,9 milhões de moradias (IBGE, 2010).

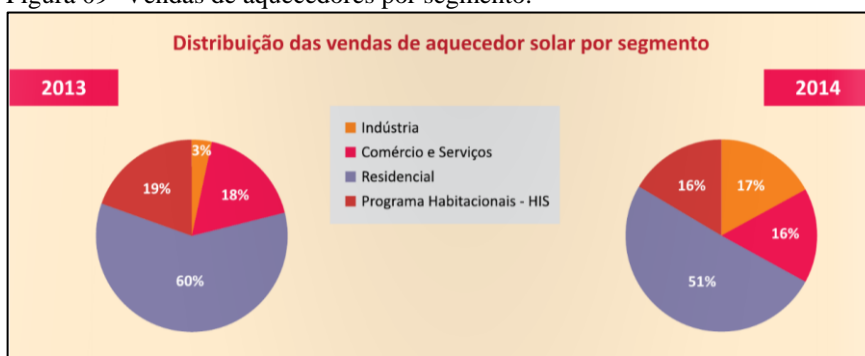
O Departamento Nacional de Aquecimento Solar (DASOL) destaca que em 2014, a produção de coletores para aquecimento solar de água cresceu 4,5%, com a instalação de 1,44 milhão m<sup>2</sup> de placas coletoras no período de 12 meses. Outro dado interessante é que, sendo a energia solar uma fonte limpa, a área acumulada de coletores instalados até 2014 corresponde à geração de energia suficiente para evitar a emissão anual de 2,3 milhões de toneladas equivalentes de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>). Efeito semelhante é obtido com o plantio de 11,54 milhões de árvores. A produção de coletores fechados, usados para fins sanitários, cresceu 4,5% em relação a 2013. Os coletores abertos, normalmente utilizados para aquecimento de piscinas, tiveram crescimento de 3,6%. Chamou a atenção o expressivo crescimento da produção de coletores a vácuo, também usados para fins sanitários: o aumento foi de 60,1%, embora sua participação no mercado seja de apenas 1,1%. Já a produção de reservatórios térmicos teve acréscimo de 57,2%. Foram produzidas 269.207 unidades, com média de 105 litros por metro quadrado.

Figura 08- Mercado brasileiro de aquecimento solar.



Fonte: Dasol, 2015.

Figura 09- Vendas de aquecedores por segmento.



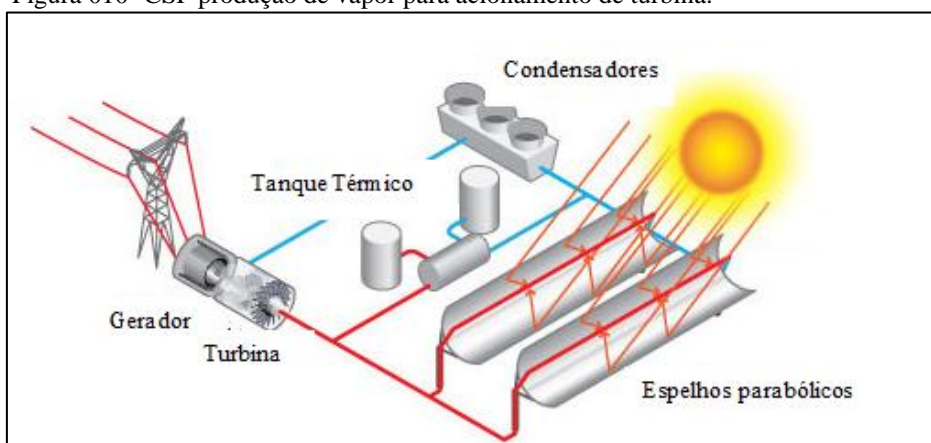
Fonte: Dasol, 2015.

Uma tendência que se observa nessa área, no exterior, é a instalação de grandes sistemas solares integrados para aquecimento de água e ambiente, bem como para refrigeração, além da implantação de sistemas urbanos de aquecimento (*district heating*). Em 2011 foi construída uma planta de 25 MWth para aquecimento de água em Riad, na Arábia Saudita, capaz de atender 40.000 estudantes universitários, constituindo-se na maior planta instalada no mundo para esta finalidade (DASOL, 2015).

Plantas de médio e grande porte utilizando sistemas ópticos (lentes, espelhos) para concentração da radiação solar e aquecimento de fluidos a altas temperaturas são denominados CSP (*Concentrated Solar Power*). Quatro tecnologias CSP são usadas: cilindros parabólicos, torres solares, coletores lineares de Fresnel e concentradores (“discos”) parabólicos. Nas três primeiras tecnologias, normalmente o calor captado é usado na produção de vapor e posterior acionamento de turbinas para fins de geração de energia elétrica. Na última, a energia elétrica é gerada em motores *stirling*<sup>9</sup>. As tecnologias apresentam diferentes níveis de maturidade, variando desde a viabilidade comercial dos cilindros parabólicos – que dominam o mercado com 90% da potência instalada, passando por plantas pilotos comerciais com torres solares, a projetos pilotos com concentradores de Fresnel. As potências destas plantas podem variar de uma dezena de KW, nos sistemas *stirling*, até centenas de MW, em plantas com cilindros parabólicos (DASOL, 2015).

<sup>9</sup> Motores Stirling – Máquinas Térmicas conhecidas por sua eficiência.

Figura 010- CSP produção de vapor para acionamento de turbina.



Fonte: Eco MENA (Adaptação), 2015.

Uma grande vantagem dos sistemas solares térmicos é a possibilidade de serem acoplados a sistemas de armazenamento de calor para uso em outros horários, que não coincidam com a incidência solar. Isso traz uma maior flexibilidade no despacho de energia elétrica, em comparação aos sistemas fotovoltaicos, além de maior eficiência no processo de conversão de energia e de uma gama de aplicações mais amplas. Outra vantagem é a possibilidade de integração como outras aplicações que necessitam de energia térmica.

Um dos grandes desafios que se coloca para o segmento industrial solar térmico é a queda significativa dos preços dos módulos fotovoltaicos, que tornam estes mais competitivos (MANUAL DE ENGENHARIA FV, 2014).

Quanto à energia solar térmica passiva, a arquitetura bioclimática estuda formas de harmonizar as construções ao clima e características locais, pensando no homem que habitará ou trabalhará nesses ambientes, e tirando partido de correntes convectivas naturais e de microclimas criados por vegetação apropriada. Trata-se da adoção de soluções arquitetônicas e urbanísticas adaptadas às condições específicas (clima e hábitos de consumo) de cada lugar, utilizando, para isso, a energia que pode ser diretamente obtida das condições locais e beneficiando-se da luz e do calor provenientes da radiação solar incidente, bem como da ventilação natural. O uso da luz solar, que implica em redução do consumo de energia elétrica para iluminação, condiciona o projeto arquitetônico quanto à sua orientação espacial, quanto às dimensões das janelas e suas propriedades ópticas, altura do teto, etc. Por outro lado, a administração do calor proveniente do sol é conseguida pela alteração da orientação espacial da edificação e pela seleção dos materiais adequados (isolantes ou não, conforme as condições climáticas) para paredes, vedações e coberturas, dentre outros fatores (MANUAL DE ENGENHARIA FV, 2014).

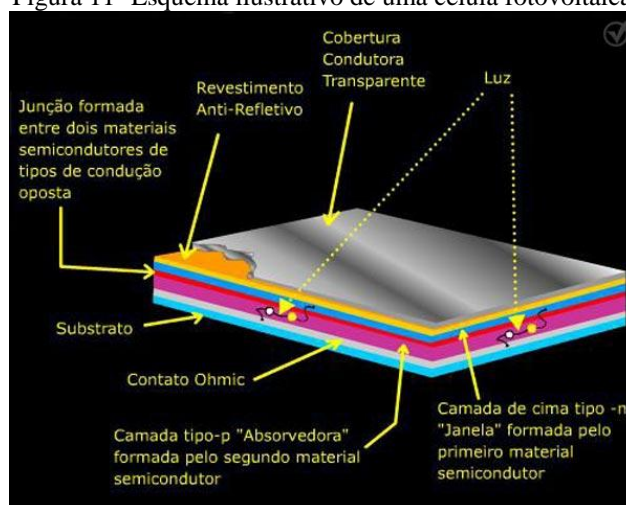
A arquitetura bioclimática não se restringe apenas a características arquitetônicas adequadas (aproveitamento ou bloqueio da luz natural do sol e do calor). Preocupa-se, também com o rendimento dos equipamentos e sistemas que são necessários ao uso da edificação (aquecimento de água, circulação de ar e de água, iluminação, conservação de alimentos. etc.) e com o uso de materiais de conteúdo energético tão baixo quanto possível (MANUAL DE ENGENHARIA FV, 2014).

### 2.2.2 Energia Solar Fotovoltaica

A energia solar fotovoltaica é a energia obtida através da conversão direta da luz em eletricidade (Efeito Fotovoltaico), as células solares fotovoltaicas, também chamadas fotocélulas, são dispositivos eletrônicos fabricados com material semicondutor que convertem diretamente esta luz em eletricidade. O efeito fotovoltaico caracteriza pelo aparecimento de uma diferença de potencial nos extremos de uma estrutura de material semicondutor, a partir da absorção da luz. O efeito de conversão fotovoltaica pode ser obtido em todos os semicondutores, todavia o mais apropriado à conversão da luz solar é aquele que gera o maior produto corrente - tensão para a luz visível uma vez que grande porcentagem da energia transmitida pelos raios solares está dentro da faixa visível do espectro eletromagnético. O sistema compreende o agrupamento de módulos em painéis fotovoltaicos e de outros equipamentos relativamente convencionais, que transformam ou armazenam a energia elétrica de forma a permitir sua utilização nas várias aplicações finais. A célula fotovoltaica que está localizada no módulo é responsável pela conversão da energia solar em energia elétrica, sendo, portanto o dispositivo mais importante de todo o sistema (FÍSICA PARA CIENTISTAS E ENGENHEIROS, 2012).



Figura 11- Esquema ilustrativo de uma célula fotovoltaica.



Fonte: Click e Aprenda, 2013.

Pode se citar como as principais vantagens da energia solar fotovoltaica, a matéria prima inesgotável, não emissão de poluentes durante operação e os sistemas podem ser instalado em qualquer parte do planeta (FÍSICA PARA CIENTISTAS E ENGENHEIROS, 2012).

#### 2.2.2.1 Energia solar fotovoltaica no mundo

O efeito fotovoltaico, primeiramente descoberto por *Edmond Becquerel*<sup>10</sup>, em 1839. Em 1876 foi concebido o primeiro aparato fotovoltaico advindo dos estudos da física do estado sólido e, apenas em 1956, iniciou-se a produção industrial, seguindo o crescimento da área de eletrônica (MANUAL DE ENGENHARIA FV, 2014).

Inicialmente, o desenvolvimento da tecnologia apoiou-se na busca, por empresas do setor de telecomunicações, de fontes de energia para sistemas instalados em localidades remotas. O segundo agente impulsionador foi à chamada "corrida espacial". A célula fotovoltaica era, e continua sendo, o meio mais adequado (menor custo, peso e segurança) para fornecer a quantidade de energia necessária para longos períodos de alimentação de equipamentos eletroeletrônicos no espaço (MANUAL DE ENGENHARIA FV, 2014).

A crise do petróleo de 1973 renovou e ampliou o interesse em aplicações terrestres para a energia solar fotovoltaica. Porém, para tornar economicamente viável essa forma de conversão de energia, seria necessário, naquele momento, reduzir em até 100 vezes o custo de produção das células fotovoltaicas em relação ao custo daquelas células usadas em aplicações espaciais. Adicionalmente, o perfil das empresas envolvidas no setor também foi modificado. Nos Estados Unidos, algumas empresas do petróleo resolveram diversificar seus

<sup>10</sup> Edmund Becquerel (1820-1891) Cientista Francês.

investimentos, incluindo a produção de energia a partir da radiação solar em suas áreas de negócios (MANUAL DE ENGENHARIA FV, 2014).

Em 1978, produção da indústria fotovoltaica no mundo já ultrapassava a marca de 1 MWp/ano<sup>11</sup>. Os Estados Unidos foram líderes mundiais na produção dessa tecnologia durante maior parte da década de 1990. No final dessa década, políticas de governo na Alemanha e no Japão resultaram em aumentos substanciais no desenvolvimento desse mercado. Essas políticas foram impulsionadas, em parte por um forte compromisso com a redução do CO<sub>2</sub>, conforme previsto pelo Protocolo de *Kyoto*, e em parte para desenvolver o mercado de tecnologia para exportação (MANUAL DE ENGENHARIA FV, 2014).

Em 1998, a produção mundial de células fotovoltaicas atingiu a marca de 150 MWp, sendo o silício quase absoluto dentre os materiais utilizados. O grande salto no desenvolvimento do mercado fotovoltaico resultou do rápido aumento da produção chinesa, observado desde 2006. Em 2003, a Ásia não figurava entre os dez maiores fabricantes do mundo, entretanto em 2008, três destes eram da China e um de Taiwan e, em 2009, a China já ocupava a liderança na fabricação de módulos (MANUAL DE ENGENHARIA FV, 2014).

Embora abundante na terra, a energia solar para produção de energia elétrica ainda é pouco utilizada. Nos países desenvolvidos este cenário vem mudando, porque fortes incentivos foram concedidos para a instalação de sistemas fotovoltaicos (MANUAL DE ENGENHARIA FV, 2014).

Figura 12- 1955 A primeira bateria solar.



Fonte: Bell Labs, 1955.

---

<sup>11</sup> Wp (Watt-pico) é a unidade de potência de saída de um gerador fotovoltaico, sob as condições padrão de ensaio.

### 2.2.3 Desenvolvimento da indústria fotovoltaica

Após dois anos de queda, a indústria fotovoltaica (FV) deu sinais de recuperação em 2013, como aponta o relatório da REN 21<sup>12</sup>. Os preços baixos dos módulos continuaram a desafiar a indústria do setor, que teve de se esforçar para se manter competitiva. Mas os custos de produção dos módulos, de um modo geral, também caíram em função da redução de preços dos itens de produção, combinado com os aprimoramentos das tecnologias de produção.

Embora os investimentos em fotovoltaica em 2013 tenham sido menores em relação a 2012 em todo o mundo, a capacidade instalada aumentou impulsionada pela redução dos custos dos sistemas. Tanto que a fotovoltaica se tornou financeiramente competitiva em cerca de 19 países, como estima relatório da REN 21.

Ao longo de 2013, foram produzidos 43 GW de células de silício cristalino e 47 GW de módulos, registrando-se um aumento de 20% em relação a 2012. A capacidade de produção de módulos alcançou aproximadamente 67,6 GW.

A liderança da produção de módulos já esteve com Estados Unidos, Japão e países europeus. Mas, desde 2009, é a China que vem dominando os índices. Em 2013, a Ásia respondeu por 87% da produção mundial do setor, sendo que só a China produziu 67% do total global no ano.

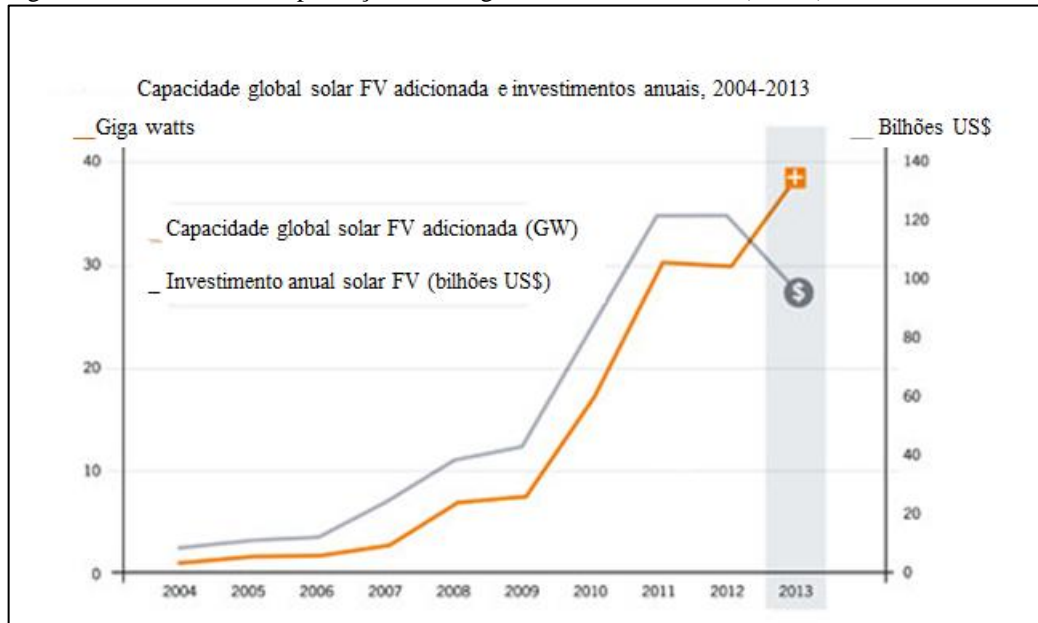
A competição no mercado aumentou com o crescimento de fornecedores, o que exigiu esforços até de empresas grandes para se manterem na ativa.

Apesar disso, novos modelos de negócios e opções de financiamento continuam a emergir. No início de 2014, por exemplo, como aponta relatório da REN 21, a plataforma *online* voltada para investimentos em projetos solares, *Mosaic*, financiou mais de US\$ 5 milhões em projetos. Novas propostas da área estão surgindo também na América Latina, incluindo a venda de eletricidade fotovoltaica no mercado livre, com plantas solares sendo construídas no Chile e no México.

---

12 REN 21 - Renewable Energy Policy Network for the 21st Century. É uma rede global de políticas sobre energias renováveis.

Figura 13- Crescimento da produção de energia SFV x Investimento (custos).

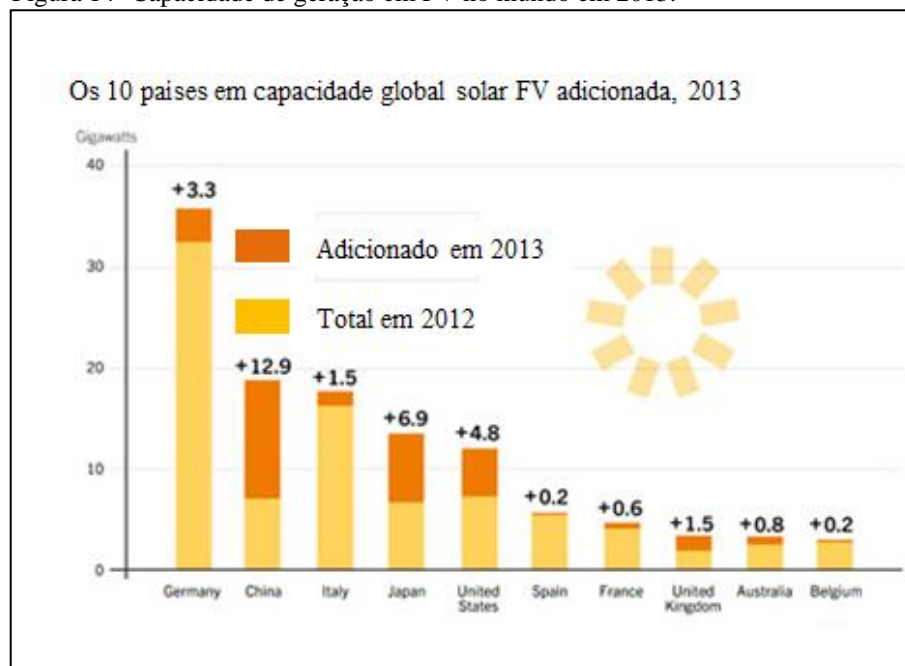


Fonte: Solaris (Adaptação), 2014.

### 2.2.3.1 Europa

A Europa ainda é referência mundial quando se fala de capacidade instalada. De acordo com relatório da Associação de Indústrias Fotovoltaicas Europeias, a região contava com 81,3 GW instalados no final de 2013, representando 59% da capacidade fotovoltaica (FV) acumulada no mundo (IDEAL, 2014).

Figura 14- Capacidade de geração em FV no mundo em 2013.



Fonte: Solaris (Adaptação), 2014.

Mesmo assim, o desenvolvimento no setor caiu no território europeu, em uma comparação com os anos anteriores. Os 10,4 GW instalados em 2013 representam metade do índice de 2011.

A procura por energia FV reduziu em muitos países da região em função das políticas públicas e dos impostos, decepcionando investidores. O mercado alemão, por exemplo, caiu do primeiro para o quarto lugar mundial, com o crescimento de 3,3 GW depois de três anos registrando crescimento em torno de 7,6 GW, de acordo com o Relatório Estado Global das Renováveis 2014. De qualquer maneira, a geração de energia FV continua crescendo, com a Alemanha seguindo à frente desse mercado.

Com a instalação de pelo menos 1,5 GW em 2013, o Reino Unido emerge como a região com o mercado mais fortalecido para projetos de larga escala, atraindo investimentos de toda a Europa. Outros líderes do mercado europeu no ano foram Itália (com 1,5 GW), seguida por Romênia (1,1GW) e Grécia (1GW).

Mesmo se mantendo entre os líderes, a Itália registrou queda de mercado, o que também ocorreu na Bélgica, Dinamarca e França.

Mas essa fonte renovável tem atendido a uma fatia significativa da demanda, alcançando cerca de 7,8% da demanda de eletricidade anual na Itália; 6% na Grécia e 5% na Alemanha (IDEAL 2014).

### 2.2.3.2 Ásia e Oceania

Em 2013, a Ásia instalou 22,7 GW, totalizando 42 GW de sistemas FV em operação na região. De acordo com o relatório da REN 21, a China foi o país asiático que mais se destacou no setor.

Sozinha, a China foi a responsável por quase um terço de todas as instalações globais, acrescentando cerca de 12,9 GW em FV. Com esse índice, o país praticamente triplicou sua capacidade instalada, atingindo um total de 20 GW.

A quantidade de instalações chega a desafiar questões de conexão elétrica no país segundo relatório da REN 21, a maior parte das instalações chinesas está concentrada em províncias longe dos grandes centros e consistem em projetos de larga escala. Mesmo assim, também por incentivos do governo, o interesse por projetos em menor escala tem crescido no país.

Com 6,9 GW entrando em operação em 2013, a capacidade instalada do Japão também deu um salto em 2013, fazendo o país chegar a 13,6 GW. A maior parte dos sistemas

japoneses se concentra nos telhados, abrindo esse tipo de mercado para os construtores. No entanto, como aponta o relatório da REN 21, projetos de grande porte também têm se desenvolvido no território japonês.

Na Oceania, o destaque fica por conta da Austrália, que atingiu a marca de 1.000.000 de telhados solares, ainda segundo a REN 21. Em comparação com 2007, quando a região contava com apenas 8 mil telhados FV, é possível notar o grande impulso no setor. Buscando a redução das contas de luz, os australianos apostaram na eletricidade solar a tal ponto que, em 2013, as instalações nos telhados operavam em 14% das residências australianas (IDEAL, 2014).

#### 2.2.3.3 América do Norte

Junto com a Ásia e a União Europeia, a América do Norte foi uma das principais regiões em instalações fotovoltaicas (FV) no mundo em 2013.

O maior crescimento registrado na América do Norte ocorreu nos Estados Unidos, o terceiro maior mercado mundial em 2013. As instalações dos EUA cresceram quase 41% em relação a 2012, passando de 4,8 GW para um total de 12,1 GW. A queda dos preços e as opções de financiamento contribuíram para alavancar o setor.

As instalações em residências tiveram o maior crescimento de mercado no país, em uma comparação com 2012. Já os sistemas FV de grande escala instalados no solo representaram 80% das novas instalações. Contribuíram para esse processo investimentos na área solar para a redução de custos de energia (IDEAL, 2014).

#### 2.2.3.4 Energia solar fotovoltaica no Brasil

O Território brasileiro recebe elevados índices de irradiação solares quando comparado aos demais países do mundo, onde a tecnologia fotovoltaica é utilizada em larga escala para produção de energia elétrica. Verifica-se, entretanto, que o avanço tecnológico fotovoltaico no Brasil tem atravessado momento de altos e baixos (MANUAL DE ENGENHARIA FV, 2014).

Na década de 50 iniciou-se no Instituto Nacional de tecnologia (INT) e no Centro Tecnológico da Aeronáutica (CTA) o desenvolvimento de módulos FV- Sendo também realizado em 1958 o primeiro simpósio brasileiro de energia solar. Foi na Universidade de São Paulo que houve o início do desenvolvimento de células fotovoltaicas de silício cristalino e teve por base a microeletrônica. As atividades foram concentradas nos lingotes de silício

monocristalino (Si-Cz), que utilizados para fabricação de células FV, atingiram a confecção de dispositivos com eficiência de 12,5%.

O Instituto Militar de Engenharia (IME) na década de 70 iniciou com colaboração internacional o desenvolvimento de tecnologias de filmes finos. Nesta época foi montada um linha completa de produção de células FV de sulfeto de cobre e sulfeto de cádmio com dimensões de 5 x 5 cm. Destaque para os resultados obtidos na produção de módulos FV de 30 x 30 cm com eficiência de 5%.

Ainda na década de 70, o desenvolvimento tecnológico no Brasil, no setor de energia solar FV, iniciado duas décadas antes, equiparava-se ao que ocorria nos países de vanguarda no mundo, incentivado pela crise mundial de petróleo. No final dos anos 70 e início dos anos 80, duas fábricas de módulos FV de silício cristalino foram construídas no país. Porém, nos anos 80, vários grupos de pesquisa direcionaram os seus trabalhos para outras áreas, devido à falta de incentivos, e as fábricas reduziram a sua produção significativamente, ou foram extintas. Atualmente há poucas fábricas de encapsulamento de módulos FV em funcionamento no Brasil

A Associação Brasileira de Energia Solar (ABENS) foi criada em 1978 e possuía escritórios regionais em vários estados brasileiros. Porém uma década mais tarde, as atividades foram interrompidas temporariamente. Muitos anos depois, com aumento do número de especialistas e das atividades de pesquisa no país, iniciou-se, durante o II SNESF - Simpósio Nacional de Energia Solar Fotovoltaica, ocorrido em 2005 no Cepel, uma discussão entre pesquisadores atuantes na área, para reorganização da ABENS- fato este que ocorreu já em 2006.

Nos anos 80 e 90 houve o desenvolvimento, em escala de laboratório e piloto, de várias tecnologias relacionadas à purificação de silício para uso em células FV e à fabricação destas células, em várias universidades e centros de pesquisa públicos, bem como em empresas privadas.

No início dos anos 90, células FV de silício cristalino foram desenvolvidas para serem testadas no primeiro satélite brasileiro. Atualmente o Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), estão sendo testadas e usadas células de tripla junção, para aplicações espaciais (MANUAL DE ENGENHARIA FV, 2014).

No final dos anos 90, iniciou-se o desenvolvimento de células FV de CdS/CdTe e de silício amorfo hidrogenado em vários centros de pesquisa, sendo obtidas eficiências da ordem de 6% e 7% respectivamente. Mais recentemente, na década atual, células FV sensibilizadas por corantes e em materiais orgânicos também estão sendo desenvolvidas em universidades e

centros de pesquisa, como o Instituto de Química da Universidade de São Paulo e o Laboratório de Nanotecnologia e Energia Solar da UNICAMP, com eficiência de 2%.

Nos anos 90, a difusão da tecnologia FV no Brasil ficou defasada em relação ao que ocorria na Alemanha, Japão e outros países europeus onde os incentivos estavam direcionados ao desenvolvimento tecnológico e industrial e, principalmente, para aplicações associadas ao uso da energia solar em residências.

Em 1994, o Centro de Referência para Energias Solar e Eólica Sergio de Salvo Brito (Cresesb) foi criado por meio de um convênio entre o Centro de Pesquisas de Energia Elétrica (Cepel) da Eletrobrás e o Ministério de Minas e Energia (MME), com o apoio do Ministério da Ciência e Tecnologia (MCT). As principais atividades do Cresesb destinam-se ao apoio de programas do Governo Federal, divulgação de informações, edições de publicações, realização de cursos e manutenção de biblioteca especializada, sendo, assim um instrumento para difusão de conhecimento técnico e qualificado nas áreas de energia solar e eólica.

No século XXI, com o avanço industrial na fabricação de células e módulos FV, verificado principalmente na China, e o aumento do número de instalações de sistema FV na modalidade on-gride, o Brasil não conseguiu acompanhar a evolução que estava ocorrendo no mundo. Em 2001, entretanto, uma iniciativa do Governo Federal, caracterizada pela criação do Fundo Setorial de Energia, resultou em um crescimento das atividades de P&D em energia solar FV e na formação de grupos de pesquisas e programas de pós-graduação.

Atualmente, no Brasil há laboratórios e equipes especialistas em universidades públicas e privadas, centros de pesquisa e empresas, atuando no desenvolvimento de tecnologias de purificação do silício, células de módulos FV, inversores e controladores de carga, bem como no estudo de aplicações dessas tecnologias. Porém, ainda não foi atingido o nível de aperfeiçoamento tecnológico dos países desenvolvidos nesta área e, portanto, esforços devem ainda ser realizados por todos os atores do setor (MANUAL DE ENGENHARIA FV, 2014).

No que concerne às ações efetivas para o aproveitamento da energia FV, foram instalados diversos sistemas FV isolados e sistemas híbridos para o fornecimento de energia em ilhas e localidades afastadas da rede elétrica em todo o território nacional. Em 1994, o Governo Federal, criou um programa para promover a eletrificação rural, baseado principalmente nos sistemas FV, denominados Programa de Desenvolvimento Energético de Estados e Municípios (Prodeem), envolvendo universidades, centros de pesquisas, secretarias de energia e concessionárias federais e estaduais, através do qual foram adquiridos mais de 8.500 sistemas FV (MANUAL DE ENGENHARIA FV, 2014).



No ano de 2002, a ANEEL iniciou estudos para estabelecimento de regulamentação das especificações técnicas necessárias à instalação dos Sistemas Individuais de Geração de Energia Elétrica com Fontes Intermitentes (SIGFIs), destinados ao fornecimento de energia elétrica aos consumidores isolados da rede elétrica de distribuição, que resultou na publicação da Resolução Normativa nº 83/2004, posteriormente revogada e substituída pela Resolução Normativa nº 493/2012, a qual regulamenta também o fornecimento de energia por meio dos microssistemas isolados de geração e distribuição de energia elétrica (ANEEL, 2014).

O Comitê Brasileiro de Eletricidade da ABNT criou um grupo técnico sobre sistemas FV que foi responsável pela elaboração, entre outras, das Normas NBR 16149 Sistemas Fotovoltaicos (FV)- Características da interface de conexão com a rede elétrica de distribuição e NBR 16150 Sistemas Fotovoltaico (FV) - Características da interface de conexão com a rede elétrica de distribuição - procedimento de ensaio de conformidade, com base nas normas IEC. Em dezembro de 2013, a norma "Sistemas Fotovoltaicos conectados à rede - Requisitos mínimos para documentação, ensaios de comissionamento, inspeção e avaliação de desempenho" foi submetida à consulta pública (ANEEL, 2014).

Os primeiros sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica foram instalados no Brasil no final dos anos 90 em concessionárias de energia elétrica, universidades e centros de pesquisas. A Chesf foi pioneira nesta área ao instalar um sistema fotovoltaico de 11 Kwp em 1995, em sua sede em Recife, PE (MANUAL DE ENGENHARIA FV, 2014).

A Regulamentação para sistemas fotovoltaicos conectados à rede de distribuição, associados a unidades consumidoras, foi definida em 2012 pela ANEEL, a partir da publicação da Resolução Normativa nº 482/2012, que trata da micro e minigeração distribuída. A regulamentação prevê o sistema de compensação de energia elétrica, de acordo com o qual é feito um balanço entre a energia consumida e a gerada na unidade consumidora (modelo *net metering*) (ANEEL, 2014).

Em novembro de 2013 ocorreu o primeiro Leilão de Energia (A-3) cujos empreendimentos de geração fotovoltaicos - com potência igual ou superior a 5MW - foram habilitados pelo EPE. O leilão foi destinado à compra de energia de novos empreendimentos de geração eólica, solar e termoelétrica a biomassa ou gás natural em ciclo combinado, pra início de suprimento a partir de janeiro de 2016, com custo marginal de referência de R\$ 126,00 MW/h. Entretanto nenhum empreendimento fotovoltaico, nem usinas térmicas a biomassa ou pequenas centrais hidrelétricas apresentou proposta contemplando este valor, de forma que todos os projetos contratados foram plantas eólicas, totalizando 867,6 MW de capacidade e preço médio final de R\$ 124,43 MW/h (ANEEL, 2014).

O 1º Leilão de Energia de Reserva (LER) de 2016 previsto para 29 de julho já credenciou 428 projetos, sendo destes 295 somente de energia solar. De acordo com o Ministério de Minas e Energia (MME), ao todo os projetos somam uma oferta de 10.195 megawatts de potência instalada.

### 2.3 Células Fotovoltaicas

Como citado no item 2.2.2.1, efeito fotovoltaico descoberto em 1839 pelo físico Francês *Edmond Becquerel*- verificando que quando uma solução ácida era submetida à incidência de luz, aparecia uma diferença de potencial entre os eletrodos imersos nesta solução. Já em 1876 os cientistas *W. G. Adams e R. E. Day* observaram o mesmo efeito em um dispositivo de estado sólido fabricado em selênio. Os primeiros dispositivos que podem ser chamados de células fotovoltaicas ou até então células solares foram fabricadas em selênio no ano de 1883 por *C. E. Frits*. Em 1950 com os avanços tecnológicos na área de semicondutores, foi desenvolvido pelo laboratório *Bell* – nos Estados Unidos, a primeira célula fotovoltaica. Estas células tinha uma eficiência de 6%, potência de 5 mW e área de 2cm<sup>2</sup>, o que para época foi um grande avanço (UNIVERSO DA FÍSICA, 2008).

Os avanços tecnológicos do atual século e a produção em larga escala das células fotovoltaicas, fez com que o valor de venda de uma célula de um watt-pico (potência nas condições- padrão de ensaio) caísse de US\$ 150,00 na década de 70 para os atuais 0,65US\$/Wp nos Estados Unidos e aproximadamente 3R\$/Wp no Brasil.

As principais tecnologias aplicadas na produção de células e módulos fotovoltaicos são classificadas em três gerações. A primeira geração é dividida em duas cadeias produtiva: silício monocristalino (m-Si) e silício policristalino (p-Si), que representam mais de 85% do mercado, por ser considerada uma tecnologia consolidada e confiável, e por possuir a melhor eficiência comercialmente disponível (MANUAL DE ENGENHARIA FV, 2014).

A segunda geração, comercialmente denominada de filmes finos, é dividida em três cadeias produtivas: silício amorfo (a-Si), disseleneto de cobre e índio (CIS) ou disseleneto de cobre, índio e gálio (CIGS) e telureto de cádmio (CdTE). Esta geração apresenta menor eficiência do que a primeira e tem uma modesta participação do mercado, competindo como a tecnologia c-Si. Existem dificuldades associadas à disponibilidade dos materiais, vida útil, rendimento das células e, no caso do cádmio, sua toxicidade, que retardam a sua utilização em maior escala (MANUAL DE ENGENHARIA FV, 2014).

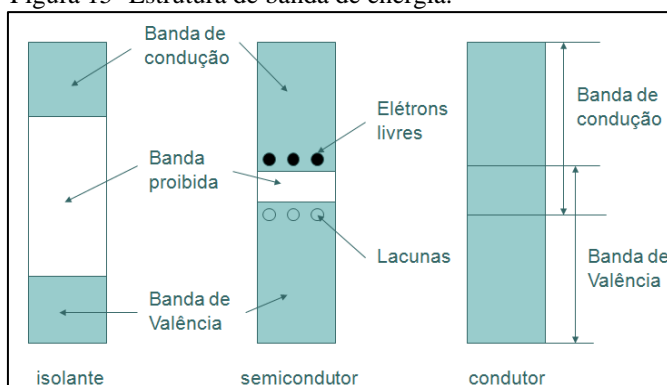
A terceira geração, ainda em fase de Pesquisa e Desenvolvimento (P&D), testes e produção em pequena escala, é dividida em três cadeias produtivas: célula fotovoltaica multijunção e célula fotovoltaica para concentração (*CPV – Concentrated Photovoltaics*), células sensibilizadas por corante (*DSSC – Dye-Sensitized Solar Cell*) e células orgânicas ou poliméricas (*OPV – Organic Photovoltaics*). A tecnologia *CPV*, por exemplo, demonstrou ter um potencial para produção de módulos com altas eficiências, embora o seu custo ainda não seja competitivo com as tecnologias que atualmente dominam o mercado. No Brasil foi inaugurada (Nov./ 2015) em Belo Horizonte a fábrica da *Sunew*, empresa mineira criada para produzir e comercializar esta mais moderna tecnologia no mundo para a produção de energia solar fotovoltaica. No processo de fabricação a técnica aplicada de forma inovadora e versátil se baseia na produção de energia a partir de filmes fotovoltaicos orgânicos impressos, feitos de plástico, leves, transparentes e flexíveis (MANUAL DE ENGENHARIA FV, 2014).

### 2.3.1 Princípio de Funcionamento das Células Fotovoltaicas

Na natureza existem materiais classificados com semicondutores, que se caracterizam por possuírem uma banda de valência totalmente preenchida por elétrons e uma banda de condução vazia (isto é: sem elétrons) na temperatura de zero absoluto ( $0^\circ K$ ). Assim sendo, um semicondutor comporta-se com um isolante a  $0^\circ K$ .

A separação entre as duas bandas de energia permitidas dos materiais semicondutores, denominada de banda proibida (*gap*) e representada por  $E_g$ , pode atingir até 3 eV (*elétron volt*), diferenciando estes materiais considerados isolantes, onde a banda proibida supera este valor (DISPOSITIVOS ELETRÔNICOS E TEORIA DE CIRCUITOS, 2008).

Figura 15- Estrutura de banda de energia.



Fonte: A eletrônica, 2012.

As bandas são, na realidade, compostas por um conjunto de inúmeros valores discretos permitidos de energia bastante próximos, por isso muitas vezes são consideradas com contínuas (FÍSICA PARA CIENTISTAS E ENGENHEIROS, 2012).

Tabela 01 – Bandas  $E_g$  à temperatura de 300° K.

Valores de Tensão $E_g$ (eV)			
Material	$E_g$ (eV)	Material	$E_g$ (eV)
Si	1,12	Gap	2,26
Ge	0,66	CdS	2,42
GaAs	1,43	PbS	0,35
InSb	0,18	PbTe	0,3
InP	1,35	CdTe	1,45

Fonte: Manual geração fotovoltaica (Adaptação), CEPTEL- 2014.

Em função da existência de bandas de energia, uma característica importante dos semicondutores é o aumento da condutividade com a temperatura, proporcionado pela excitação térmica de elétrons da banda de valência para banda de condução, deixando na banda de valência as lacunas, as quais constituem portadores de carga positiva, cuja mobilidade, todavia, é cerca de um terço da dos elétrons na banda de condução. Assim, para temperaturas superiores a 0° K, há sempre no semicondutor um certo número de elétrons ocupando a banda de condução e o mesmo número de lacunas na banda de valência, denominados portadores intrínsecos ( $n_i$ ), cuja concentração pode ser expressa pelas equações 2.1 e 2.2. Para o Si o valor de  $n_i$  citado pela literatura é de  $1,45 \times 10^{10} / \text{cm}^3$  na temperatura de 300° K (FÍSICA PARA CIENTISTAS E ENGENHEIROS, 2012).

$$n_i^2 \cong B \cdot e^{\frac{-E_g}{kT}} \quad (2.1)$$

$$n = p = n_i \quad (2.2)$$

Onde:

$n_i$  - Concentração de portadores intrínsecos;

$n$  - Concentração de portadores negativos (elétrons);

$p$  - Concentração de portadores positivos (lacunas);

$k$  - Constante de Boltzmann ( $1,381 \times 10^{-23} \text{ J/K}$ );

$E_g$  - Energia do *gap* do material (1,22 eV para o silício);

$T$  - Temperatura absoluta (K);

$B$  - Constante aproximada para os semicondutores ( $\sim 10^{39}/\text{cm}^6$ ).

Além da geração térmica, há ainda a possibilidade de geração de portadores por meio de energia de partículas (prótons, nêutrons etc.) que atinjam o material, a chamada ionização por impacto. Mas a propriedade fundamental que permite a fabricação de células fotovoltaicas é a possibilidade de fótons incidentes no material, com energia superior à  $E_g$  do *gap*, também gerarem pares elétron-coluna (FÍSICA PARA CIENTISTAS E ENGENHEIROS, 2012).

A energia de um fóton é associada à cor da luz, de acordo com a equação 2.3.

$$E = h \cdot f \quad (2.3)$$

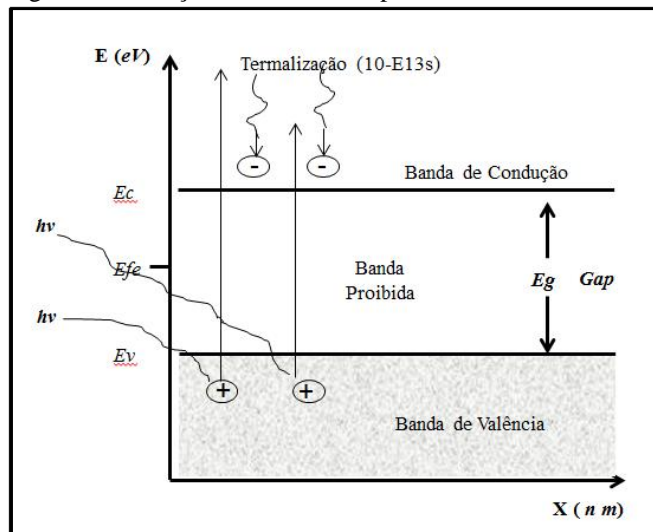
Onde:

$E$  – Energia do fóton (J);

$h$  – Constante de Planck  $6,62 \times 10^{-34}$  (J.S);

$f$  – Frequência da radiação ( $S^{-1}$ ).

Figura 16- Geração elétron-lacuna pela incidência de fótons.



Fonte: Manual geração FV (Adaptação), CEPTEL- 2014.

A absorção de fótons com energia superior ao  $E_g$  resulta a dissipação de energia ( $hf - E_g$ ) como o calor no material, no fenômeno denominado termalização<sup>13</sup>. Conforme mostrado na figura 16, o nível de energia de Fermi ( $E_{fe}$ ) corresponde ao nível médio de energia dos portadores no material, e, para os semicondutores intrínsecos, se situa no meio da banda proibida.  $1\text{eV} = 1,502 \times 10^{-19}$  (FÍSICA PARA CIENTISTAS E ENGENHEIROS, 2012).

<sup>13</sup> A Termalização pode ocorrer também para as lacunas na banda de valência, ou para os elétrons na banda de condução.

Estes elétrons e lacunas fotogerados podem mover-se dentro do material e aumentam sua condutividade elétrica, o que é denominado de efeito fotocondutivo. Este efeito é aproveitado para fabricação de componentes eletrônicos denominados fotocélulas ou fotorresistores – *Light dependente resistor (LDRs)*, no qual a resistência elétrica varia em função da luminosidade incidente. Contudo, para o aproveitamento de corrente e tensão elétricas é necessário aplicar um campo elétrico, a fim de separar os portadores, que se consegue através da chamada junção *pn*. Para construí-la, é necessário introduzir de forma controlada impurezas no semicondutor, ou seja, realizar a dopagem, que consiste na introdução de pequenas quantidades de outros elementos, denominados impurezas ou dopantes, que mudam drasticamente as propriedades elétricas do material intrínseco (material sem dopagem, denominado de tipo *i*).

Para compreensão dos conceitos básicos descreve-se aqui uma célula fotovoltaica monojunção de silício (Si), que é o material semicondutor mais usado na fabricação de células e cujas propriedades são apresentadas no quadro 01- (MANUAL DE ENGENHARIA FV, 2014).

Quadro 1 – Propriedades do silício à temp. de 300° K e baixas concentração de dopantes

Átomo de Silício	
Propriedades do Silício	6
Número atômico (Z)	14
Configuração eletrônica	1 S <sup>2</sup> 2S <sup>2</sup> 2p 3S <sup>3</sup> 3p <sup>2</sup>
Valência	4
Estrutura Cristalina	CFC
Bandgap (Eg)	1,12 eV
Distância interatômica (a)	5,4 Å
Ponto de Fusão	1.420° C
Constante dielétrica ( $\epsilon / \epsilon_s$ )	11,8
Concentração intrínseca de portadores (ni)	1,5 x 10 <sup>10</sup> / cm <sup>3</sup>
Mobilidade dos elétrons	1.350 cm <sup>2</sup> /V.s
Mobilidade das lacunas	480 cm <sup>2</sup> /s
Coefficiente de difusão de elétrons (Dn)	35 cm <sup>2</sup> /s
Coefficiente de difusão de Lacunas (Dp)	12,5 cm <sup>2</sup> /s

Fonte: Manual geração fotovoltaica (Adaptação), CEPTEL- 2014.

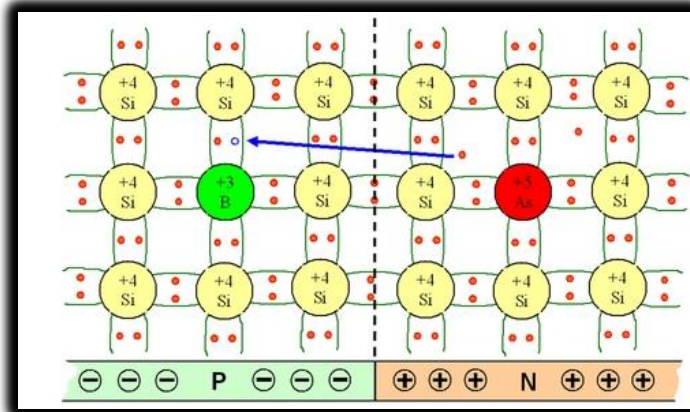
Os átomos de Si são tetravalentes, ou seja, caracterizam-se por possuírem 4 elétrons de valência que formam ligações covalentes com os átomos vizinhos, resultando em 8 elétrons compartilhados por cada átomo, constituindo uma rede cristalina.

Ao se introduzir nesta estrutura um átomo pentavalente, como, por exemplo, o fósforo (P), haverá um elétron em excesso fracamente ligado a seu átomo de origem, uma vez que ocupa um nível de energia no interior da banda proibida apenas  $\approx 0,044$  eV abaixo do limite

inferior da banda de condução. Como sua energia de ligação é muito baixa, na temperatura ambiente a energia térmica é suficiente para libertar este elétron fazendo com que salte para a banda de condução, deixando seu átomo de origem como uma carga positiva. Além do fósforo (*P*), podem ainda ser usados arsênio (*As*) e antimônio (*Sb*), que são chamados de impurezas doadoras de elétrons, ou dopantes tipo *n* ou ainda, impurezas tipo *n*. O nível de *Fermi* para semiconductor tipo *n* localiza-se acima do ponto médio da banda proibida, próximo à banda de condução (DISPOSITIVOS ELETRÔNICOS E TEORIA DE CIRCUITOS, 2008).

Se, por outro lado, na rede cristalina for introduzido um átomo trivalente, como o boro (*B*), haverá a falta de um elétron para completar as ligações com os átomos de Si da rede. Esta falta de um elétron é denominada lacuna ou buraco e ocupa um nível de energia no interior da banda proibida apenas  $\approx 0,045 \text{ eV}$  acima do limite superior da banda de valência. Na temperatura ambiente a energia térmica de um elétron de uma ligação vizinha é suficiente para fazê-lo passar a esta posição, correspondendo ao movimento da lacuna no sentido inverso, tornando o átomo uma carga fixa negativa. Além do boro (*B*), podem ser usados alumínio (*Al*), gálio (*Ga*) e índio (*In*), denominados impurezas aceitadoras de elétrons ou dopantes tipo *p*. No semiconductor tipo *p*, o nível de *Fermi* fica abaixo do ponto médio da banda proibida, próximo à banda de condução (DISPOSITIVOS ELETRÔNICOS E TEORIA DE CIRCUITOS, 2008).

Figura 17- Níveis de energia em materiais semicondutores tipo pn.



Fonte: Manual geração fotovoltaica (Adaptação), CEPTEL- 2014.

Na temperatura ambiente existe energia térmica suficiente para que praticamente todos os elétrons em excesso dos átomos de Fósforo (*P*) estejam livres, bem como para que todas as lacunas criadas pelos átomos de Boro (*B*) possam se deslocar. Usualmente a dopagem do tipo *p* é feita numa concentração ( $N_a$ ) de  $\approx 1:10^7$ , ou seja um átomo de Boro para 10 milhões de átomo de Si. Já na concentração dos átomos de Fósforo ( $N_d$ ) na dopagem tipo *n* é muito

superior, atingindo  $\approx 1:10^3$ . As concentrações dos dopantes ( $N_a$  e  $N_d$ ) são deliberadamente feitas várias ordens de grandeza superiores às dos portadores intrínsecos na temperatura ambiente, de forma a criar regiões com predominância de cargas livres negativas ou positivas, denominadas, respectivamente, regiões do tipo  $p$  e tipo  $n$  (DISPOSITIVOS ELETRÔNICOS E TEORIA DE CIRCUITOS, 2008).

Por isso, na região tipo  $n$ , os portadores negativos (elétrons) são denominados portadores majoritários, cuja concentração é aproximadamente igual à concentração do dopante ( $N_d$ ), enquanto que ali as lacunas são portadores minoritários. Neste caso, valem as equações (2.4) e (2.5):

$$n \approx Nd \quad (2.4)$$

$$p \cong \frac{n_i^2}{nd} \quad (2.5)$$

Onde:

$n_i$  - Concentração de portadores intrínsecos;

$n$  - Concentração de portadores negativos (elétrons);

$p$  - Concentração de portadores positivos (lacunas);

$n_d$  - Concentração do dopante tipo  $n$ .

Para a região tipo  $p$ , a situação dos portadores se inverte, de forma análoga.

Por outro lado, se numa metade de uma lâmina de Si inicialmente puro forem introduzidos átomos de  $B$  e na outra metade átomos de  $P$ , será então formada a junção  $pn$ , conforme figura 16, o que é a estrutura típica de um diodo retificador semiconductor.

Na interface entre os dois tipos de dopagem, o excesso de elétrons da região  $n$  se difunde para a região  $p$ , dando origem a uma região com cargas elétricas positivas fixas no lado  $n$ , que são íons  $P^+$ , pois os átomos de fósforo perdem um elétron. Os elétrons que passam do lado  $n$  para o lado  $p$  encontram as lacunas, fazendo com que esta região fique com cargas negativas fixas, que são íons  $B^-$ , pois os átomos de  $B$  recebem um elétron. Estas correntes de difusão de portadores de carga não continuam indefinidamente, porque o excesso de cargas positivas e negativas na junção das regiões  $n$  e  $p$  produz um campo elétrico que impede a passagem de elétrons do lado  $n$  para o lado  $p$ , assim como impede a passagem de lacunas da região  $p$  para a  $n$  (DISPOSITIVOS ELETRÔNICOS E TEORIA DE CIRCUITOS, 2008).



Estabelecido o equilíbrio, forma-se uma zona com cargas positivas e negativas, denominadas de zona de carga espacial ou zona de depleção, gerando um campo elétrico na junção  $pn$  e uma barreira de potencial. A zona de depleção recebe este nome por lá praticamente não existirem portadores, ou seja,  $n \approx 0$  e  $p \approx 0$ .

Através da junção  $pn$  no escuro, sem tensão externa de polarização, existe um corrente de portadores gerados termicamente que se anula, num estado de equilíbrio dinâmico, de acordo com o conjunto de equações 2.6. A corrente pode ser dividida em duas partes, corrente de deriva ( $i_D$ ) e corrente de difusão ( $i_d$ ) conforme pode-se visualizar na figura 18.

A primeira parte é a corrente de deriva ( $i_D$ ), que é a corrente de portadores que se movem por efeito do campo elétrico das regiões em que são minoritários para as regiões em que são majoritários. Esta corrente tem duas componentes: a corrente de lacunas que se movem do lado  $n$  para o lado  $p$  ( $I_{Dp}$ ) e corrente de elétrons que se movem do lado  $p$  para o lado  $n$  ( $I_{Dn}$ ).

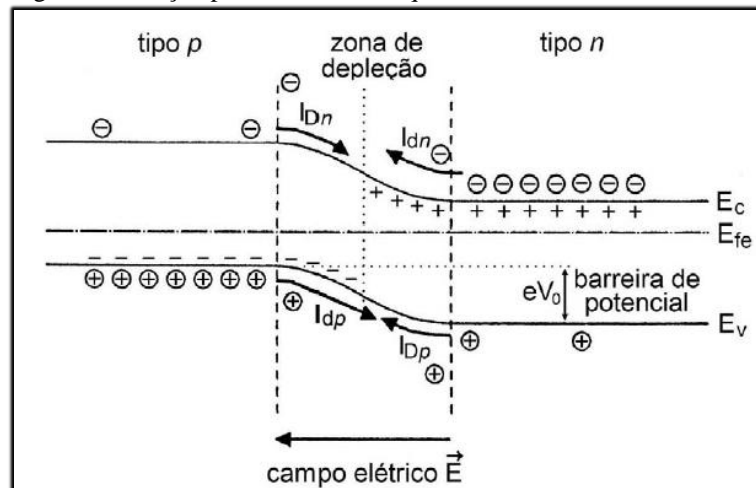
A outra parte é a corrente de difusão ( $I_d$ ), resultante da diferença de concentrações de elétrons e lacunas nos dois lados da junção  $pn$ . As componentes são: correntes de lacunas do lado  $p$  para o lado  $n$  ( $i_{dp}$ ) e a corrente de elétrons do lado  $n$  para o lado  $p$  ( $i_{dn}$ ). Estes portadores se deslocam por difusão das regiões em que são majoritários para as em que são minoritários, onde se recombinam.

$$i_D = i_{Dp} + i_{Dn} \quad I_d = i_{dn} + i_{dp} \quad i = I_D = I_d = 0 \quad (2.6)$$

A barreira de potencial que surge na junção  $pn$  também pode ser visualizada na figura 15, correspondendo a uma energia  $qV_0$  onde  $V_0$  é a diferença de potencial e  $q$  é a carga fundamental (carga do elétron).

A diferença de potencial entre as regiões  $p$  e  $n$  pode ser entendida como resultado das diferenças no nível de *Fermi* ( $E_{fe}$ ) nos dois materiais. Quando estes materiais entram em contato, a situação de equilíbrio é alcançada quando os níveis de *Fermi* se igualam o que ocorre pelo fluxo inicial de portadores e pelo estabelecimento do campo elétrico e da diferença de potencial, que é a responsável por impelir a corrente fotogerada (DISPOSITIVOS ELETRÔNICOS E TEORIA DE CIRCUITOS, 2008).

Figura 18- Junção pn no escuro em equilíbrio térmico.



Fonte: Manual geração fotovoltaica (Adaptação), CEPTEL- 2014.

A diferença de potencial na junção pn sem polarização externa (em equilíbrio), em função da temperatura, pode ser calculada pela equação 2.7.

$$V_0(T) \approx \frac{k.T}{q} \cdot \ln\left(\frac{N_d \cdot N_a}{n_i^2}\right) \quad (2.7)$$

Onde:

$V_0(T)$  – Diferença de potencial na junção;

$n_i$  - Concentração de portadores intrínsecos no material;

$N_d$  - Concentração dopante tipo  $n$ ;

$N_a$  - Concentração dopante tipo  $p$ ;

$q$  – Carga do elétron ( $1,6 \times 10^{-19}$  C);

$k$  – Constante de *Boltzmann* ( $1,38 \times 10^{-23}$  J/K);

$T$  – Temperatura absoluta (K).

Na prática, para se obter a junção pn da célula parte-se, por exemplo, de uma lâmina de silício cristalino já previamente dopada, em sua fabricação, com átomos do tipo  $p$  e se introduzem átomos do tipo  $n$ , de forma a compensar a região previamente dopada e obter um região tipo  $n$  na lâmina (por isso a maior concentração do dopante tipo  $n$ ). Isto é feito na prática por meio da introdução do material em um forno a alta temperatura contendo um composto de Fósforo em forma gasosa. Da mesma maneira, também se pode formar a junção pn em uma lâmina de silício tipo  $n$ , com introdução posterior de átomos tipo  $p$ .

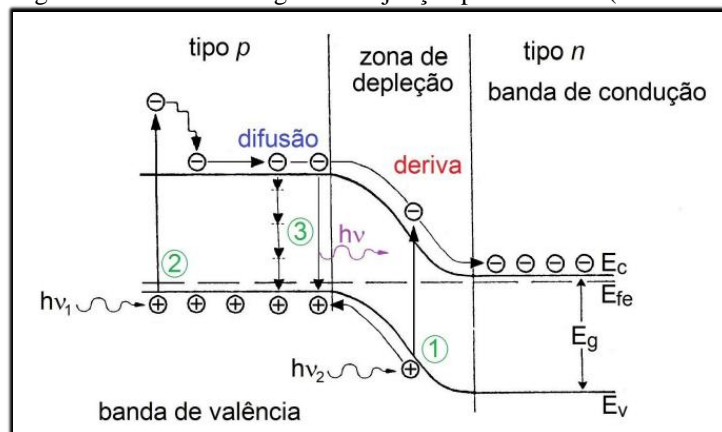
Se um material semiconductor dotado de uma junção pn for exposto a fótons com energia maior que a do *gap* ( $E_f > E_g$ ), então ocorrerá a fotogeração de pares elétron-lacuna, da mesma

forma como já explicado para o material intrínseco. Porém, se tais portadores de carga forem gerados no interior da região de carga espacial, então serão separados pelo campo elétrico, sendo os elétrons acelerados para o lado  $n$  e as lacunas para o lado  $p$ , gerando assim uma corrente elétrica (também de deriva) através da junção no sentido da região  $n$  para a região  $p$ . Observe-se que esta corrente fotogerada  $I_L$  tem sentido inverso à corrente de polarização direta de um diodo e tem duas componentes (elétrons e lacunas). O processo de absorção de fótons da junção  $pn$  e corrente fotogerada podem ser observados na figura 19.

Porém, se os portadores de carga forem fotogerados fora da zona de carga espacial, então os portadores minoritários, isto é, lacunas em região tipo  $n$  e elétrons na região tipo  $p$ , deverão ter um tempo de vida ou comprimento de difusão mínimo para eventualmente alcançarem a junção  $pn$  e serem coletados, sem que ocorra recombinação, contribuindo assim também para a  $I_L$ .

A recombinação pode ser direta, também chamada banda a banda, na qual o elétron volta diretamente da banda de valência à banda de condução. Neste caso, a energia pode ser emitida sob a forma de fóton, na chamada recombinação irradiante (mostrada em cor lilás na figura 19, que é o efeito utilizado para fabricação de *LEDs*, emitindo, as células de  $c$ -*Si*, radiação de baixíssima intensidade na faixa de 950 nm a 1250 nm). A recombinação indireta, por outro lado, é feita com o elétron passando por níveis de energia intermediários introduzidos no interior da banda proibida por defeitos na estrutura cristalina (DISPOSITIVOS ELETRÔNICOS E TEORIA DE CIRCUITOS, 2008).

Figura 19- Corrente fotogerada na junção  $pn$  iluminada (célula FV).



Fonte: Manual geração fotovoltaica (Adaptação), CEPTEL- 2014.

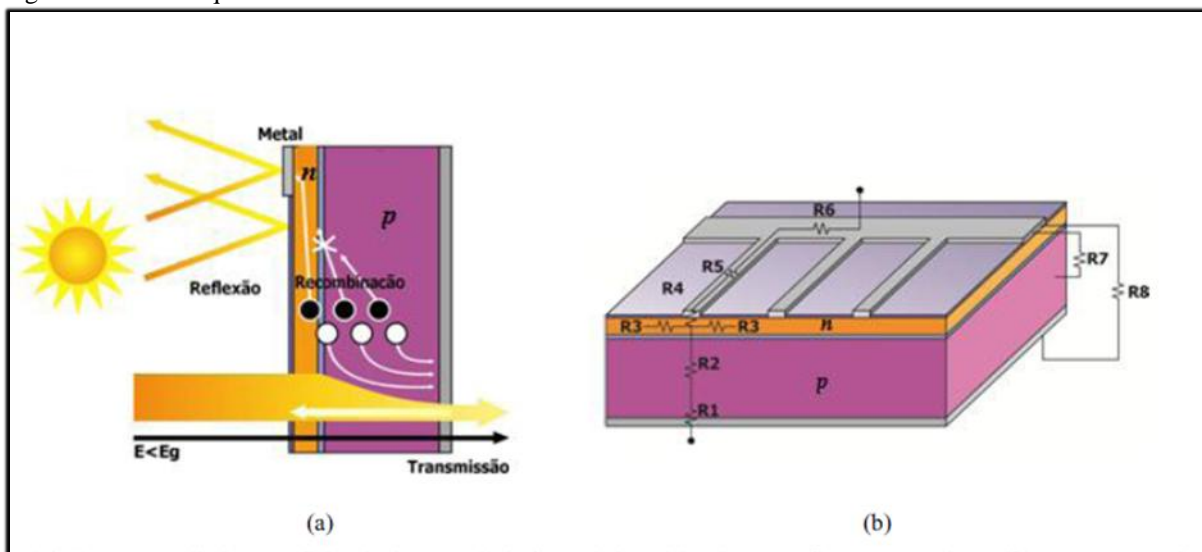
Esta separação dos portadores de carga pela junção  $pn$  dá origem ao efeito fotovoltaico, que é a conversão de energia luminosa em energia elétrica associada a uma corrente elétrica e uma diferença de potencial. Este efeito na verdade ocorre em qualquer diodo semiconductor

que for exposto à radiação, portanto, as células fotovoltaicas podem ser entendidas essencialmente como diodos de grande área otimizados para o aproveitamento do efeito fotovoltaico.

Para completar a célula fotovoltaica, são ainda necessários um contato elétrico frontal (malha metálica) na região  $n$ , assim como um contato traseiro na região  $p$ . Se esses contatos forem conectados externamente por meio de um condutor, haverá uma circulação de elétrons. Além do processo de geração de pares de elétron-lacuna, também ocorrem processos de recombinação dos portadores de carga minoritários gerados. A recombinação pode ocorrer tanto na superfície quanto no volume do dispositivo (DISPOSITIVOS ELETRÔNICOS E TEORIA DE CIRCUITOS, 2008).

Os fatores que limitam a eficiência de conversão de uma célula fotovoltaica são: 1) reflexão na superfície frontal; 2) sombra proporcionada pela área da malha metálica na face frontal; 3) absorção nula de fótons e energia menor do que o  $gap$  ( $E_f < E_g$ ); 4) baixa probabilidade de coleta, pela junção  $pn$ , dos portadores de cargas gerados fora da zona de carga espacial; 5) recombinação dos portadores de carga, isto é, o “reencontro” dos elétrons e lacunas em impurezas e efeitos do material e 6) resistência elétrica no dispositivo e nos contatos metal-semicondutor, bem como possíveis caminhos de fuga da corrente elétrica (resistência em paralelo). A figura 19 (a e b) esquematiza os fatores acima citados (MANUAL DE ENGENHARIA FV, 2014).

Figura 20- Fatores que limitam a eficiência de uma célula.



Fonte: Manual geração fotovoltaica (Adaptação), CEPTEL- 2014.

A tabela 02 apresenta a eficiência das melhores células fotovoltaicas fabricadas com diferentes materiais e tecnologias. A máxima eficiência foi obtida com células fotovoltaicas

multijunção, atingindo o valor de 37,7%. Estas células são compostas de elementos dos grupos 13, 14 e 15 da tabela periódica e a combinação dos materiais permite absorver os *fótons* de grande parte do espectro solar. Para células de uma única junção, o limite teórico é da ordem de 30% e as melhores células fotovoltaicas de Si fabricadas em laboratório atingiram a eficiência de 25%.

Tabela 02 – Eficiência das células FV fabricadas em laboratório.

Tecnologia		Eficiência (%)
Silício	Monocristalino	25,0 ± 0,5
	Policristalino	20,4 ± 0,5
	Filmes Finos	20,1 ± 0,4
Composto III A-VA	GaAs (filme fino)	28,8 ± 0,9
	GaAs (policristalino)	18,4 ± 0,5
	InP (monocristalino)	22,1 ± 0,7
Calcogênios Compostos II B-VI A	CIGS ( CuIn <sub>x</sub> Ga(1-x) Se <sub>2</sub> ) (filme fino)	19,6 ± 0,6
	CdTe (filme fino)	18,3 ± 0,5
Silício amorfo / monocristalino	Amorfo (a-Si)	10,1 ± 0,3
	Nanocristalino (nc-Si)	10,1 ± 0,2
Células Sensibilizadas por Corante (DSSC)		11,9 ± 0,4
Células Orgânicas (filme fino)		10,7 ± 0,3
Multijunção	InGaP/GaAS/InGaAs	37,7 ± 1,2
	a-Si/nc-Si/nc-Si (filme fino)	13,4 ± 0,4

Fonte: Manual geração fotovoltaica (Adaptação), CEPTEL- 2014.

### 2.3.2 Características Elétricas das Células Fotovoltaicas

#### 2.3.2.1 Curva I-V

A corrente elétrica em uma célula fotovoltaica pode ser considerada como a soma da corrente de uma junção *pn* no escuro (diodo semiconductor) com a corrente gerada pelos *fótons* absorvidos da radiação solar. Esta corrente em função da tensão no dispositivo, denominada de curva *I-V* ou curva característica, pode ser descrita pela equação (2.8), derivada da equação de *Schockley*, do diodo ideal: (FÍSICA PARA CIENTISTAS E ENGENHEIROS, 2012).

$$I = I_L - I_0 \left[ \exp \left( \frac{qV}{nkT} \right) - 1 \right] \quad (2.8)$$

Onde:

$I_L$  – Corrente fotogerada (A);

$I_0$  – Corrente de saturação reversa do diodo (A);

$n$  - Fator de idealidade do diodo, número adimensional geralmente entre 1 e 2, obtido por ajuste de dados experimentais medidos;

$q$ - Carga do elétron ( $1,602 \times 10^{-19}$  C);

$K$  -Constante de *Boltzmann* ( $1,38 \times 10^{-23}$  J/K);

$T$  - Temperatura absoluta (K).

Por análise da equação 2.8, observa-se que no escuro ( $I_L = 0$ ) a célula fotovoltaica tem um comportamento idêntico ao de um diodo (FÍSICA PARA CIENTISTAS E ENGENHEIROS, 2012).

A corrente de saturação reversa  $I_0$  pode ser calculada teoricamente pela equação (2.9), a partir de propriedades do material e detalhes da construção da junção  $pn$ .  $I_0$  pode ser determinada experimentalmente pela aplicação da tensão  $V_{oc}$  à célula não iluminada (no escuro), ou ainda obtida numericamente por meio de ajuste de uma curva experimental medida (FÍSICA PARA CIENTISTAS E ENGENHEIROS, 2012).

$$I_0 = q * A * n_i^2 * \left( \frac{D_p}{L_p * N_d} + \frac{D_n}{L_n * N_a} \right) \quad (2.9)$$

Onde:

$I_0$  – Corrente de saturação reversa do diodo (A);

$A$  – Área da seção reta da junção (área da célula)

$n_i$  – Concentração de portadores intrínsecos no material;

$N_d, N_a$  – Concentração dos dopantes tipo  $n$  e tipo  $p$ , respectivamente;

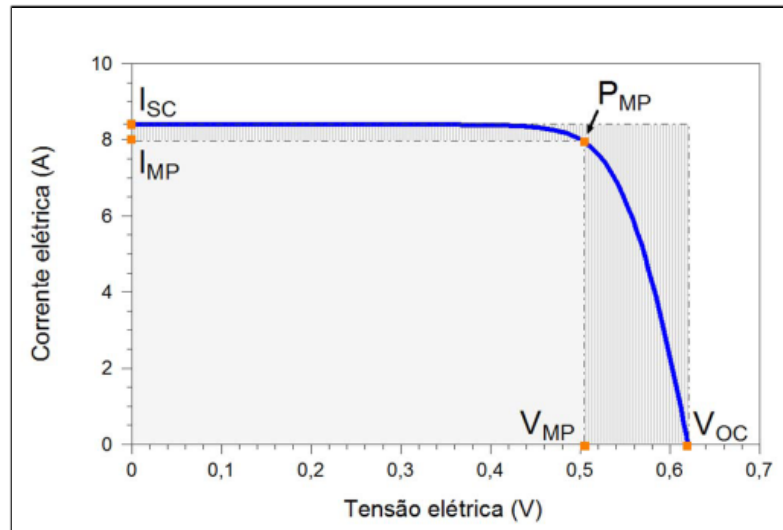
$D_p, D_n$  - Coeficiente de difusão de lacunas e elétrons, respectivamente, no material;

$L_p, L_n$  – Comprimentos de difusão de lacunas e de elétrons;

$q$ - Carga do elétron ( $1,602 \times 10^{-19}$  C).

Na figura 21 apresenta-se a curva  $I$ - $V$  típica de uma célula fotovoltaica de *Si*. Deve-se observar que apesar de ser normalmente apresentada no primeiro quadrante, fisicamente a curva  $I$ - $V$  se situa na realidade no quarto quadrante, por se tratar de um gerador, onde, conforme já explicado, a corrente tem sentido inverso (é negativa).

Figura 21- Curva I-V de uma célula fotovoltaica de Si.



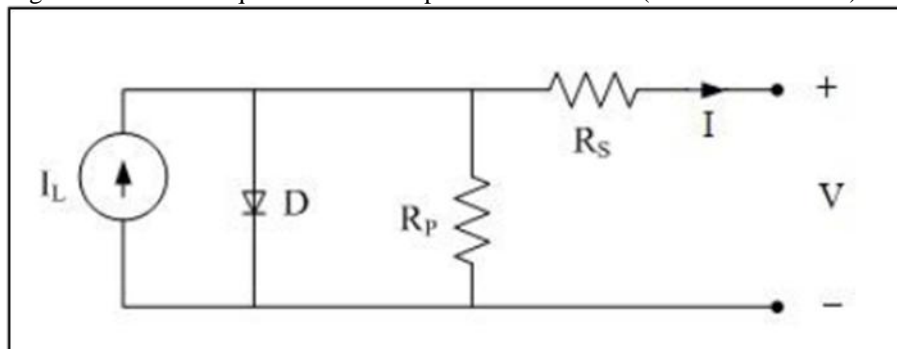
Fonte: Manual geração fotovoltaica (Adaptação), CEPEL- 2014.

Considerando que, conforme discutido anteriormente, em uma célula fotovoltaica há resistência em série devido a: junção metal-semicondutor, malhas metálicas, regiões dopadas etc., assim como resistências em paralelo devido a pontos de curto-circuito na junção *pn*, conforme esquematizado na figura 18 b, a equação da curva característica de uma célula fotovoltaica torna-se:

$$I = I_L - I_0 \left[ \exp \left( \frac{q(V+IR_s)}{nkT} \right) - 1 \right] - \frac{V+IR_s}{R_p} \quad (2.10)$$

Onde  $R_s$  é a resistência em série e  $R_p$  a resistência em paralelo.

Figura 22- Circuito equivalente básico para uma célula FV (modelo com diodo).

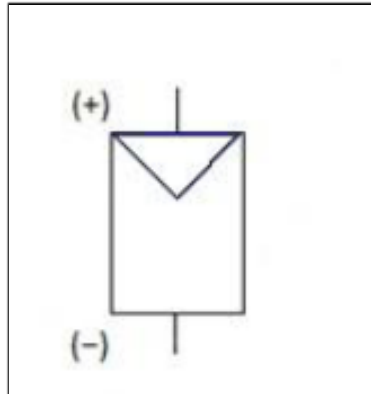


Fonte: Manual geração fotovoltaica (Adaptação), CEPEL- 2014.

Para as células fotovoltaicas de uso terrestre sem concentração da energia solar, a curva  $I$ -  $V$  é medida em condições-padrão de ensaio: irradiância de  $1.000 \text{ W/m}^2$ , espectro solar AM1,5 e temperatura da célula fotovoltaica de  $25^\circ\text{C}$ . Para essa medição, geralmente, utiliza-se um simulador solar e um sistema de medição automatizado.

Segundo a norma NBR 10899, o módulo fotovoltaico é uma unidade básica formada por um conjunto de células fotovoltaicas, interligadas eletricamente e encapsuladas, com o objetivo de gerar energia elétrica (DISPOSITIVOS ELETRÔNICOS E TEORIA DE CIRCUITOS, 2008).

Figura 23- Símbolo do módulo FV.



Fonte: NBR 10899 (Adaptação)- 2014.

### 2.3.2.2 Parâmetros elétricos

A partir da curva  $I$ -  $V$  mostrada na figura 21 podem ser determinados os parâmetros elétricos que caracterizam as células ou módulos fotovoltaicos: tensão de circuito aberto, corrente de curto-circuito, fator de forma e eficiência.

Tensão de circuito aberto ( $V_{oc}$ ): é a tensão entre os terminais de uma célula fotovoltaica quando não há corrente elétrica circulando e é a máxima tensão que uma célula fotovoltaica pode produzir. Pode ser medida diretamente com um voltímetro nos terminais do módulo.  $V_{oc}$  depende da corrente de saturação ( $I_0$ ), da corrente elétrica fotogerada ( $I_L$ ) e da temperatura, de acordo com a equação (2.11) derivada da equação (2.8) (OS SISTEMAS...,BLUE SOL,2014).

$$V_{oc} = \frac{K.T}{q} * \ln \left( \frac{I_L}{I_0} + 1 \right) \quad (2.11)$$

Por depender da corrente de saturação ( $I_0$ ),  $V_{oc}$  está relacionada com a recombinação dos portadores de carga minoritários no dispositivo. O valor de  $V_{oc}$  varia conforme a tecnologia utilizada nas células: c-Si (0,5V – 0,7V), CdTe (0,857V), a-Si (0,886V), DSSC (0,744V),InGaP/GaAs/InGaAs (3,014V) (OS SISTEMAS...,BLUE SOL,2014).

Corrente de curto-circuito ( $I_{SC}$ ): é a máxima corrente que se pode obter e é medida na célula fotovoltaica quando a tensão elétrica em seus terminais é igual à zero. Pode ser medida com um amperímetro curto-circuitando os terminais do módulo.  $I_{SC}$  depende da área da célula



fotovoltaica, da irradiância solar e de sua distribuição espectral, das propriedades ópticas e da probabilidade de coleta dos pares elétron-lacuna formados. A densidade da corrente de curto-circuito ( $J_{SC}$ ) é calculada dividindo-se  $I_{SC}$  pela área do dispositivo. Valores da densidade de corrente variam conforme a tecnologia empregada, tais como: c-Si ( $38 \text{ mA/cm}^2 - 42,7 \text{ mA/cm}^2$ ), CdTe ( $26,95 \text{ mA/cm}^2$ ), a-Si ( $16,75 \text{ mA/cm}^2$ ), InGaP/GaAs/InGaAs ( $14,57 \text{ mA/cm}^2$ ), DSSC ( $22,47 \text{ mA/cm}^2$ ) (OS SISTEMAS...,BLUE SOL,2014).

Fator de Forma ( $FF$ ): é a razão entre máxima potência da célula e o produto da corrente de curto circuito com tensão de circuito aberto. O  $FF$  é definido pela equação (2.12):

$$FF = \frac{V_{MP} I_{MP}}{V_{OC} I_{SC}} \quad (2.12)$$

Quanto menores forem as perdas resistivas (série e paralelo), mais próxima da forma retangular será a curva  $I-V$ .

Eficiência ( $\eta$ ): é o parâmetro que define quão efetivo é o processo de conversão de energia solar em energia elétrica. Representa a relação entre a potência elétrica produzida pela célula fotovoltaica e a potência da energia solar incidente e pode ser definida equação (2.13):

$$\eta = \frac{P_{mp}}{A \cdot G} \cdot 100\% \quad (2.13)$$

onde  $A$  ( $\text{m}^2$ ) é a área da célula e  $G$  ( $\text{W/m}^2$ ) é a irradiância solar incidente. A unidade da potência da célula e do módulo fotovoltaico é o  $W_p$  (watt-pico), que é associada às condições padrão de ensaio *Standart Test Conditions (STC)*.

### 2.3.2.3 Garantias de Módulos Fotovoltaicos

Os módulos FV de c-Si têm geralmente uma garantia contra defeitos de fabricação de 3 a 5 anos, e garantia de rendimento mínimo durante 25 anos. Assim, em caso de defeitos o desempenho insuficiente, cobertos pelo termo de garantia, os módulos fotovoltaicos devem ser substituídos pelo fabricante (OS SISTEMAS...,BLUE SOL,2014).

A degradação da potência de módulos fotovoltaicos de c-Si instalados em campo é entre 0,5% e 1,0% por ano.

Tipicamente é garantida uma potência de pico ( $W_p$ ) mínima de 90% da potência nominal para o período dos 10 a 12 primeiros anos de operação e de 80% por um período de

20 a 25 anos. Mas existem outras formas, como fabricantes que garantem por 5 anos pelo menos 95% da potência nominal, durante 12 anos pelo menos 90%, durante 18 anos pelo menos 85% e durante 25 anos pelo menos 80%. Em mais outra forma de garantia, existem fabricantes que garantem uma depreciação de rendimento anual linear de 0,7-0,8%/ano durante 25 anos (OS SISTEMAS.....,BLUE SOL,2014).

De qualquer forma, é importante saber que o mercado fotovoltaico é muito dinâmico e que há constante evolução técnica e muita renovação de fabricantes, de forma que tais garantias tornam-se bastante questionáveis. Na verdade, constata-se que atualmente existem muito poucos fabricantes de módulos que estão no mercado há mais de 20 anos.

## **2.4 Componentes básicos de sistemas fotovoltaicos**

O sistema compreende o agrupamento de módulos em painéis fotovoltaicos e de outros equipamentos relativamente convencionais, que transformam ou armazenam a energia elétrica para que esta possa ser utilizada facilmente nas várias aplicações finais.

O sistema é normalmente composto por três partes básicas: o arranjo dos módulos, o subsistema de condicionamento de potência, o qual converte a saída do arranjo em potência útil, e as baterias, que têm a função de armazenar a energia elétrica gerada.

A célula solar que está localizada no módulo é o dispositivo mais importante de todo o sistema. É responsável pela conversão da energia solar em energia elétrica.

O subsistema de condicionamento de potência compreende: controlador de carga, inversor, conversor e seguidor do ponto de máxima potência (*MPPT*). Estes são os equipamentos mais importantes que controlam a energia enviada às baterias e aos pontos de consumo (OS SISTEMAS.....,BLUE SOL,2014).

### **2.4.1 Módulo Fotovoltaico**

O módulo fotovoltaico é a unidade básica de todo o sistema. O módulo é composto por células conectadas em arranjos produzindo tensão e corrente suficientes para a utilização da energia(OS SISTEMAS.....,BLUE SOL,2014).

É indispensável o agrupamento em módulos já que uma célula fornece pouca energia elétrica, em uma tensão em torno de 0,4 *Volts* no ponto de máxima potência. A densidade de corrente é da ordem de 30 mA/cm<sup>2</sup>. Adicionalmente a célula apresenta espessura muito reduzida, necessitando de proteção contra esforços mecânicos e fatores ambientais.

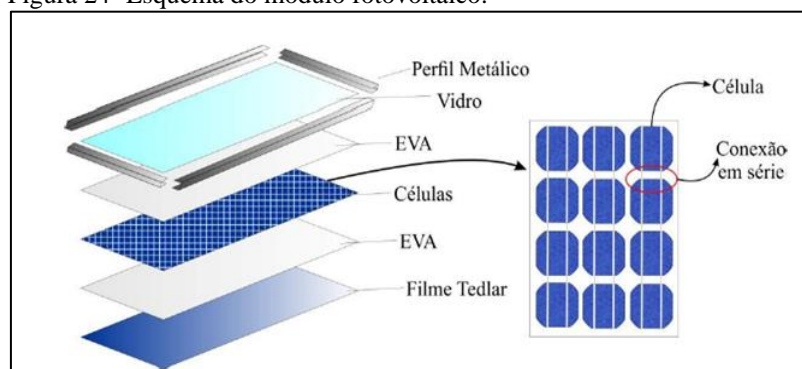
O número de células conectadas em um módulo e seu arranjo, que pode ser série e/ou paralelo, depende da tensão de utilização e da corrente elétrica desejada. Deve ser dada cuidadosa atenção às células a serem reunidas, devido às suas características elétricas. A incompatibilidade destas características leva a módulos “ruins”, porque as células de maior fotocorrente e fotovoltagem dissipam seu excesso de potência nas células de desempenho inferior. Em consequência, a eficiência global do módulo fotovoltaico é reduzida.

O módulo fotovoltaico é o componente unitário do gerador e, dependendo da associação e das características das células em série, são utilizados para carregar baterias e podem ser associados em série para sistemas de 24 V ou 48 V em corrente contínua. Para outras aplicações é comum encontrar módulos com tensões nominais diferentes, com maior ocorrência entre 30 V e 120 V (OS SISTEMAS.....,BLUE SOL,2014).

Para carregar plenamente baterias de chumbo-ácido de 12 V é necessária uma tensão mínima da ordem de 14 V, e os módulos fotovoltaicos devem produzir aproximadamente 16 V, devido ao efeito da temperatura e às perdas que ocorrem nos cabos e nas proteções. Desta forma, um módulo de silício cristalino típico pra esta finalidade tem 36 células conectadas em série, apresentando um valor aproximado de 18 V com tensão de máxima potência e 21 V como tensão de circuito aberto nas condições de ensaio (*STC*). Módulos de outras tecnologias necessitam de diferentes quantidades de células conectadas em série para alcançar estas mesmas tensões(OS SISTEMAS.....,BLUE SOL,2014).

Para montagem dos módulos comercializáveis, (Figura25), cada lado das células é conectado em série através filamentos condutores (que fecham o circuito, tornando a eletricidade gerada aproveitável) e encapsuladas em folhas de acetato de vinil etileno (*EVA*), e então recebem uma cobertura frontal de vidro temperado e uma proteção, na parte posterior, de um filme de fluoreto de polivinila (*PVF*), conhecido como *Tedlar*®. Esse conjunto laminado é montado em um perfil metálico, geralmente alumínio.

Figura 24- Esquema do módulo fotovoltaico.



Fonte: Solaris, 2013.

Figura 25- Módulo FV.



Fonte: Sunsystem, 2014.

Um módulo é geralmente identificado pela sua potência elétrica de pico ( $W_p$ ), mas um conjunto de características compatíveis com a aplicação específica deve ser observado. Assim como nas células, definição da potência pico do módulo fotovoltaico é feita nas condições padrão de ensaio, considerando irradiância solar de  $1.000 \text{ W/m}^2$  sob uma distribuição espectral padrão AM 1,5 e temperatura de célula de  $25 \text{ }^\circ\text{C}$  (OS SISTEMAS....,BLUE SOL,2014).

#### 2.4.2 Tipos de Célula Fotovoltaica

A conversão da energia solar em energia elétrica é obtida utilizando-se material semicondutor como elemento transformador, conhecido como célula fotovoltaica ou célula solar.

Os semicondutores mais apropriados à conversão da luz solar são os mais sensíveis, ou melhor, aqueles que geram o maior produto corrente-tensão para a luz visível, já que a maior parcela de energia fornecida pelos raios do sol está dentro da faixa visível do espectro.

Existe todo um processo para que o material semicondutor se transforme realmente em uma célula fotovoltaica. O que ocorre, de uma maneira geral, é que o semicondutor deve passar por uma etapa de purificação e, em seguida, por uma etapa de dopagem, através da introdução de impurezas, dosadas na quantidade certa. As principais tecnologias que estão disponíveis no mercado foram divididas conforme matéria prima da qual as células fotovoltaicas são fabricadas e são apresentados a seguir (MANUAL DE ENGENHARIA FV, 2014).

#### 2.4.2.1 Silício (Si) Monocristalino

Além de ser a mais antiga tecnologia fotovoltaica, as células de silício monocristalino (m-Si) são também as com as maiores eficiências em aplicações comerciais. Este material é basicamente o mesmo utilizado na fabricação de circuitos integrados para microeletrônica.

As células são formadas em fatias de um único grande cristal, previamente crescido e laminado. A grande experiência na sua fabricação e pureza do material (Si = 99,99% a 99,9999%) garantem alta confiabilidade do produto e altas eficiências. Enquanto o limite teórico de conversão da luz solar em energia elétrica, para esta tecnologia é de 27%, valores nas faixas de 12 a 16% são encontrados em produtos comerciais. Devido às quantidades de material utilizado e à energia envolvida na sua fabricação, esta tecnologia apresenta sérias barreiras para redução de custos, mesmo em grandes escalas de produção (OS SISTEMAS.....,BLUE SOL,2014)..

Figura 26- Célula fotovoltaica m-Si.



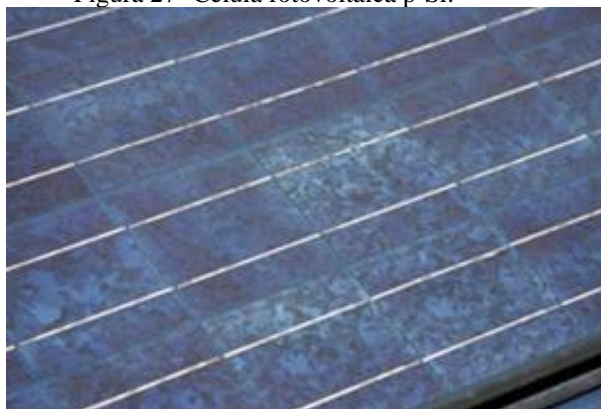
Fonte: América do Sol, 2014.

#### 2.4.2.2 Silício (Si) Multicristalino

Também chamado de Silício (Si) Policristalino; estas células são fabricadas a partir do mesmo material que, ao invés de formar um único grande cristal, é solidificado em forma de um bloco composto de muitos pequenos cristais. A partir deste bloco são obtidas fatias e fabricadas as células. A presença de interfaces entre os vários cristais reduz um pouco a eficiência destas células. Na prática os produtos disponíveis alcançam eficiências muito próximas das oferecidas em células monocristalinas. Neste caso, a quantidade de material por célula é basicamente o mesmo do caso anterior, entretanto, a energia necessária para produzi-las é significativamente reduzida. Tudo isto reflete no custo final das células, que acaba sendo

menor que as monocristalinas, e fez também a tecnologia deter a maior fatia do mercado de módulos solares a um longo período (OS SISTEMAS...,BLUE SOL,2014).

Figura 27- Célula fotovoltaica p-Si.



Fonte: América do Sol, 2014.

#### 2.4.2.3 Filmes Finos

No intuito de buscar formas alternativas de se fabricar células fotovoltaicas, muito trabalho de pesquisa tem sido realizado. Um dos principais campos de investigação é o de células de filmes finos. O objetivo geral é obter uma técnica através da qual seja possível produzir células fotovoltaicas confiáveis, utilizando pouco material semicondutor, obtido de forma passível de produção em larga escala, resultando em custo mais baixo do produto e consequentemente da energia gerada (MANUAL DE ENGENHARIA FV, 2014).

Estes estudos tem se dirigido a diferentes materiais semicondutores e técnicas de deposição destes em camadas finas com espessura de poucos microns. Entre os materiais mais estudados estão o silício amorfo hidrogenado (A-Si:H), o disseleneto de cobre e índio (CIS) e o telureto de cádmio (CdTe).

As células solares de silício amorfo foram a primeira tecnologia de filmes finos desenvolvida, começando a ser empregadas em meados da década de 70. Imediatamente despontaram como uma tecnologia ideal para aplicação em calculadoras, relógios e outros produtos onde o consumo elétrico é baixo (MANUAL DE ENGENHARIA FV, 2014).

As células a-Si são camadas extremamente finas de silício, muitas vezes tendo não mais do que 0,5 micrometros de espessura com uma estrutura amorfa, o que reduz os níveis de eficiência quando comparado com as células cristalinas. Sua eficiência não passa de 6%.

Para fabricá-las, o semicondutor é depositado sobre um substrato (normalmente vidro, ou inox ou alguns plásticos), em processos a plasma (estado gasoso). Então camadas condutoras transparentes são adicionadas para transmitir a corrente elétrica. Um laser é usado

pra dividir a superfície em diversas células, um processo usado para alcançar correntes e voltagens mais adequadas.

#### 2.4.2.4 Diferenciais

Este modo de fabricação permitiu o desenvolvimento de módulos solares flexíveis, inquebráveis, leves, semitransparentes, com superfícies curvas que aumentam a versatilidade na sua aplicação, principalmente em projetos de integração as construções.

Seu custo por metro quadrado é a metade do custo do c-SI, o que por muitas vezes é considerado mais importante quando o intuito é usá-lo como parte do ambiente construído, já que este custo se torna mais importante o preço pago por  $Wp$ .

Outro atrativo da tecnologia é um menor '*energy pay-back time*', que nada mais é do que o tempo de uso necessário para 'pagar' pela energia gasta na fabricação do módulo. Atualmente está em torno de um ano e isto se deve principalmente à energia utilizada na fabricação do substrato de vidro ou aço inox. A potencia necessária para depositar a película delgada de a-Si sobre um substrato é bastante baixa e coincidentemente da mesma ordem de grandeza da energia do sol,  $1 \text{ KW/m}^2$  (MANUAL DE ENGENHARIA FV, 2014).

Um terceiro diferencial desta tecnologia é que ela não apresenta redução na potência com o aumento da temperatura de operação, o que é uma vantagem em países de climas quentes como o Brasil. Em outras tecnologias, o aumento da temperatura ambiente provoca perdas no desempenho dos módulos.

Figura 28- Filmes finos de a-Si.



Fonte: América do Sol, 2014.

#### 2.4.2.5 Silício amorfo

O silício amorfo é responsável pelo maior volume de produtos nesta área embora outros já sejam disponíveis. Não é claro hoje qual das tecnologias em estudo terá maior sucesso no futuro. O que se pode dizer é que todas têm potencialidade de gerar produtos de baixo custo se produzidos em grande escala.

Por outro lado, todas têm ainda obstáculos a serem vencidos antes que possam alcançar uma plena maturidade industrial e atingir o nível de confiança das células cristalinas.

Para o silício amorfo, estes obstáculos estão relacionados principalmente com a estabilidade do material, efeito *Staebler-Wronski*<sup>14</sup>. A degradação normalmente se estabiliza em três meses a partir da exposição à luz, por isso, normalmente os módulos fotovoltaicos de silício amorfo possuem uma potência inicial maior do que a potência nominal. Nos primeiros meses, a produção de energia é maior do que a dimensionada, e depois essa produção vai diminuindo até chegar num patamar esperado, mantendo-se aproximadamente constante. O estudo do mecanismo de degradação vem avançando e tecnologias preventivas já foram desenvolvidas, porém ainda não se alcançou a completa prevenção da degradação do silício amorfo (MANUAL DE ENGENHARIA FV, 2014).

No entanto, este efeito tem sido minimizado através da adoção de células com múltiplas camadas.

#### 2.4.2.6 Células com concentração

Uma possibilidade alternativa é o uso de lentes concentradoras acopladas a células de alta eficiência. Para este uso o próprio silício cristalino e o arseneto de gálio (GaAs) têm sido utilizados na fabricação destas células. A questão aqui é como conseguir sistemas simples e eficientes de focalização de luz e de seguimento do Sol, uma vez que apenas os raios diretos do Sol podem ser concentrados sobre o dispositivo.

#### 2.4.3 Eficiência das Células fotovoltaicas

Eficiência é basicamente quanta energia elétrica a célula fotovoltaica é capaz de produzir por 1m<sup>2</sup> durante 1 hora de funcionamento em condições de laboratório (*STC* = 25°C

---

14 Efeito Staebler-Wronski- fenômeno de degradação induzida pela luz.



– 1000W/m<sup>2</sup> - 1.5AM) Ex: uma célula fotovoltaica de 18% de eficiência consegue produzir em condições de laboratório 180Watts por 1m<sup>2</sup> em 1 hora. Uma de 15% consegue produzir 150 Watts e daí por diante (MANUAL DE ENGENHARIA FV, 2014).

#### 2.4.4 Medidores Bidirecionais

Equipamentos responsáveis para registrar a potência consumida, bem como a potência injetada na rede. Quando associada a uma interface de comunicação remota (Figura 30), possibilitada medições e acompanhamentos remotamente.

Figura 29- Medidor Bidirecional.



Fonte: o autor, 2015.

Figura 30- Interface para comunicação remota.



Fonte: o autor, 2015.

#### 2.4.5 Inversores

O inversor fotovoltaico é o responsável pela interface entre o gerador fotovoltaico e o ponto de conexão da rede da concessionária. O inversor trabalha como fonte de corrente acompanhando a tensão do ponto de conexão. Os inversores empregados em micro e

minigeração são monofásicos, com potências tipicamente de até 5 kW. A constituição de sistemas trifásicos pode ser feita com a colocação de inversores monofásicos em conexão trifásica.

De acordo com ABNT NBR 16149:2013 – Sistemas fotovoltaicos – Características da interface de conexão com a rede elétrica de distribuição, definem os requisitos de qualidade que o inversor deverá identificar:

- a) Tensão;
- b) Frequência;
- c) Cintilação;
- d) Distorção harmônica;
- d) Fator de potência.

O inversor deve ser capaz de identificar desvios dos requisitos e cessar o fornecimento de energia. A tensão e frequência dos inversores devem ser compatíveis com os valores da rede elétrica local contidos no PRODIST.

Como o inversor trabalha tendo como referência a tensão nominal da rede local, o mesmo é programado para que em situações onde ocorra uma sub ou sobre tensão no ponto de conexão, se faça os desligamentos (desconexão) do gerador fotovoltaico (ver tabela 03).

Tabela 03 – Níveis de tensão e tempos de atuação do SFV.

Tensão no ponto comum de conexão (% em relação à $V_{nominal}$ )	Tempo máximo de desligamento
$V < 80\%$	0,4 s
$80\% \leq V \leq 110\%$	Regime normal de operação
$110\% < V$	02, s

O tempo máximo de desligamento refere-se ao tempo entre o evento anormal de tensão e atuação do sistema fotovoltaico (cessar o fornecimento de energia para a rede). O sistema fotovoltaico deve permanecer conectado à rede, a fim de monitorar os parâmetros da rede e permitir a "reconexão" do sistema quando as condições normais forem restabelecidas.

Fonte: Adaptação ABNT NBR 16149, 2013.

Alguns inversores produzem uma forma de onda senoidal em sua saída, livre de distorções, semelhante à forma de onda da energia entregue pela concessionária de energia elétrica, sendo, portanto os mais apropriados para utilização doméstica. Existem também os

inversores que produzem uma onda senoidal modificada em sua saída, são mais baratos, mas podem afetar o funcionamento de alguns equipamentos. Estes inversores reduzem a eficiência de motores e transformadores entre 10% e 20%. Ruídos podem ser ouvidos em alto-falantes ou emitidos por algumas lâmpadas fluorescentes, ventiladores de teto e transformadores. Alguns fornos de micro-ondas podem também emitir algum ruído e aquecer menos os alimentos. TVs e monitores de vídeo de computadores podem mostrar uma “faixa” deslocando-se pela tela.

#### 2.4.6 Sistema de montagem

Sistema de montagem, também chamado de uma estrutura de suporte para os módulos fotovoltaicos é a parte das instalações que fixa os módulos de acordo com as diferentes modalidades. As estruturas de alumínio são as mais utilizadas para a relação qualidade / peso, mas podem ser feitas de aço galvanizado. As instalações padrões são utilizadas para telhados ou coberturas planas e telhados inclinados, para sistemas no solo ou de perfuração para o solo, com âncoras de concreto e em situações especiais, as estruturas são feitas com base na situação de cada empreendimento e sob medida.

Figura 31- Suporte para montagem de painel FV.



Fonte: Energy Team Brasil, 2015.

### 3 GERAÇÃO DISTRIBUÍDA

De acordo com Hermes (2014), a geração elétrica perto do consumidor chegou a ser a regra na primeira metade do século, quando a energia industrial era praticamente toda gerada localmente. A partir da década de 40, no entanto, a geração em centrais de grande porte ficou mais barata, reduzindo o interesse dos consumidores pela GD e, como consequência, o desenvolvimento tecnológico para incentivar esse tipo de geração também parou.

Atualmente verifica-se que existem várias definições para a geração distribuída, e estas mostram uma falta de consenso, no que diz respeito ao tipo e tamanho da tecnologia elegível para GD, bem como no nível de tensão para eventual interconexão da unidade de geração com a rede elétrica. Entretanto, há unanimidade na percepção da GD como recurso flexível de energia quando comparado aos sistemas convencionais.

A despeito de o conceito de geração distribuída apresentar algumas nuances dependendo da localidade, para fins deste trabalho, adota-se a como definição para geração distribuída aquela geração de energia localizada próxima ao consumidor final, cuja instalação objetiva atendimento prioritário a este, podendo ou não gerar excedentes energéticos comercializáveis para além das instalações do consumidor final.

A partir dessa definição, parâmetros como porte da unidade geradora, fonte energética utilizada, grau de impacto ambiental e classificação regulatória, entre outros, não são considerados elementos restritivos para enquadramento ou não de uma instalação geradora de energia. Dentro deste conceito, outro aspecto a destacar é que se considera a geração de energia como um todo, abrangendo eletricidade e outros energéticos.

Outra definição que se adota, é a mencionada no decreto 5.163 de 2004 que define como geradores, incentivados, conectados à rede de distribuição excluindo hidrelétricas com potência superior a 30 MW e termelétricas, cogeração incluída, com eficiência inferior a 75%. Nesta última são excluídos os resíduos e biomassa. Dentro desta abordagem podemos ainda classificar na GD da seguinte forma:

- a) Micro GD – capacidade menor ou igual a 75 kW;
- b) Mini GD ou Pequena escala – capacidade superior a 75 kW e menor ou igual a 5 MW (3MW – hidráulica e 5 MW – outras fontes);

### 3.1 Geração Distribuída Fotovoltaica

Segundo a Empresa de pesquisas energética, em sua nota técnica DEA - 13-14, até o final do século passado, a maioria da capacidade instalada fotovoltaica mundial foi instalada em sistemas isolados. No Brasil não foi diferente, onde se observou aplicações que visavam atender sistemas remotos viabilizados através de programas federais. No entanto, ao longo da última década, com a redução de custos e programas de incentivo, foi possibilitada a inserção em sistemas conectados à rede, de forma que em 2012 cerca de 99% da potência acumulada total correspondia a este tipo de aplicação. Destes, mais de 60% são de sistemas descentralizados. A modalidade desta tecnologia a confere grande possibilidade de aplicação distribuída, principalmente na escala de micro e minigeração para atendimento domiciliar e comercial, devendo ser a principal alternativa para o consumidor que deseje gerar sua própria energia, no horizonte de 2050. Dada à perspectiva do aumento desta modalidade de geração, faz-se necessário estimar sua contribuição ao atendimento da demanda nacional.

A CEMIG (Nov. 2015) destaca que nos próximos anos, existe uma potencial ruptura tecnológica no setor, relacionada ao crescimento da geração solar distribuída. Seus analistas apontam que o cenário favorável ao crescimento da geração solar distribuída indica que a concessionária deveria se posicionar para entrar neste negócio.

#### 3.1.1 Vantagens da Geração Distribuída

Os sistemas solares fotovoltaicos, principalmente aqueles integrados as edificações urbanas e interligados ao sistema de distribuição, oferecem diversas vantagens para o sistema elétrico, muitas das quais relacionadas a custos evitados e que ainda não são considerada ou quantificadas.

Além disto, destaca-se como vantagens para o consumidor:

- a) Redução da conta de luz;
- b) Reforça a segurança energética e elétrica;
- c) Redução dos custos do insumo energia elétrica (para indústria e comércio);
- d) Investimento para instalação do SFV cada vez mais baixo e retorno mais rápido.

Para o meio ambiente:

- a) Aproveitamento do potencial solar no Brasil;
- b) Fonte limpa e renovável;
- c) Baixo impacto ambiental dos projetos;

d) Redução de emissões de gases do efeito estufa.

Para o Setor elétrico:

- a) Geração de emprego e renda ( a cada MW instalado, gera até 30 empregos diretos);
- b) Redução de perdas por transmissão e distribuição de energia;
- c) Redução de investimentos em linhas de transmissão e distribuição;
- d) Aumento da confiabilidade;
- e) Melhor gestão de alocação de recursos;
- f) Aumento da eficiência energética sistêmica;
- g) Aumento das renováveis na matriz energética.

### 3.1.2 Viabilidade econômica da geração distribuída fotovoltaica

No que diz respeito à inserção da geração distribuída fotovoltaica no Brasil, o agente (consumidor final), tem um papel muito importante a ser considerado; pois é sua a decisão pela adoção ou não desta tecnologia. E a decisão por esta adoção é formada por diversos fatores, como custos, conhecimento da tecnologia, conscientização ambiental, entre outros, sendo o primeiro deles o que desempenha papel principal.

A verificação da viabilidade econômica da geração solar fotovoltaica distribuída é realizada comparando-se, ano a ano, o custo nivelado da geração fotovoltaica e a tarifa final da distribuidora local de energia elétrica, assumindo-se como hipótese a manutenção do valor da tarifa em termos reais ao longo do horizonte (EPE, 2012). O custo nivelado, por sua vez, considera parâmetros tais como: custo de investimento inicial, custos de operação e manutenção e capacidade de produção. Como premissa de redução de custos ao longo das próximas décadas, adotam-se como referência as projeções de redução percentual dos custos, segundo IEA (2012), sobre os custos de instalação no Brasil em 2013: R\$ 7,00/Wp para o setor residencial, R\$ 6,5/Wp para o setor comercial e poder público e R\$ 6,0/Wp para o setor industrial.

Tabela 04 – Perspectiva de redução de custos dos SFV (R\$/Wp).

	2013	2020	2030	2040	2050
Residencial	7	4,4	3,2	2,7	2,3
Comercial	6,5	4,2	3	2,5	2,1
Industrial	6	3,4	2,7	2,3	2

Fonte: EPE- DEA 13/14

### 3.2 Geração Distribuída na Legislação Brasileira

A geração distribuída (GD) se apresenta como uma possível, e bem próxima, alternativa ao atual modelo de planejamento da expansão do sistema energético brasileiro, podendo ser uma alternativa de uso mais eficiente de recursos energéticos, econômico-financeiros e ambientais.

Para um entendimento do significado da geração distribuída será apresentado a seguir alguns conceitos utilizados para esse tema.

O decreto nº 5.163/2004<sup>15</sup> define a geração distribuída da seguinte forma:

“Art. 14. Para os fins deste Decreto, considera-se geração distribuída a produção de energia elétrica proveniente de empreendimentos de agentes concessionários, permissionários ou autorizados, incluindo aqueles tratados pelo art. 8º da Lei nº 9.074, de 1995, conectados diretamente no sistema elétrico de distribuição do comprador, exceto aquela proveniente de empreendimento:

I - hidrelétrico com capacidade instalada superior a 30 MW; e

II - termelétrico, inclusive de cogeração, com eficiência energética inferior a setenta e cinco por cento, conforme regulação da ANEEL, a ser estabelecida até dezembro de 2004.

Parágrafo único. “Os empreendimentos termelétricos que utilizem biomassa ou resíduos de processo como combustível não estarão limitados ao percentual de eficiência energética prevista no inciso II do caput.” (Decreto nº 5.163/200413).

O PRODIST<sup>16</sup> define a geração distribuída como, centrais geradoras de energia elétrica, de qualquer potência, com instalações conectadas diretamente no sistema elétrico de distribuição ou através de instalações de consumidores, podendo operar em paralelo ou de forma isolada e despachadas – ou não – pelo ONS.

Inúmeras fontes e tecnologias podem (e devem) ser consideradas no âmbito da geração distribuídas, sejam estas renováveis ou não: solar fotovoltaica, eólica e biomassa, são os principais exemplos de fontes renováveis distribuídas; microturbinas e motogeradores a gás natural, cogeração a gás natural, motores a diesel, são os principais exemplos para fontes não renováveis. Há ainda outras possibilidades como os resíduos de processos industriais como os gases de alto forno nas siderúrgicas e a lixívia na indústria de papel e celulose.

Com o propósito de diminuir as dificuldades para a inserção da geração distribuída de pequeno porte o agente regulador ANEEL através da resolução nº 482/2012 estabeleceu regras, que incluem a microgeração (potência até 100KW), e a minigeração (potência de 100

---

15 Decreto nº 5.163 de 30 de julho de 2004. Regulamenta a comercialização de energia elétrica, o processo de outorga de concessões e de autorizações de geração de energia elétrica, e dá outras providências.

16 PRODIST - Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional. Módulo 1, Resolução Normativa nº 517/2012. 14/12/2012.

KW a 1 MW), e também cria o sistema de compensação de energia – *net metering*<sup>17</sup>, que permite ao consumidor instalar pequenos geradores em sua unidade consumidora e trocar energia com a distribuidora local. As condições do regulamento são válidas para geradores que utilizem fontes incentivadas de energia: hídrica, solar, biomassa, eólica e cogeração qualificada.

Em uma projeção para os próximos 10 anos, destaca-se o relevante papel da geração distribuída no atendimento à demanda de eletricidade: estima-se que esta alternativa de atendimento permite abater em torno de 91 TWh desta demanda.

Deste total, mais de 99% se originam de projetos de co-geração industriais de grande porte, nomeadamente nas indústrias siderúrgica, química, celulose e papel, açúcar e álcool e produção de petróleo e gás natural. Esta categoria de geração distribuída apresenta taxas de crescimento em torno de 6% a.a. neste período, ou seja, a taxas mais elevadas do que o crescimento da demanda total de eletricidade no mesmo período.

Cabe destacar, contudo, que é a geração distribuída de pequeno porte, em especial a geração solar fotovoltaica, que se espera observar as maiores taxas de crescimento em termos de capacidade instalada e energia gerada: em 2023, estima-se que estes sistemas sejam responsáveis por aproximadamente 664 MWp, com uma taxa de crescimento médio de 38% a.a. no horizonte decenal (REN 21).

De acordo com a resolução normativa n° 414/2010, a unidade consumidora de energia elétrica é classificada em dois grupos: A e B. O grupo A (alta tensão) é composto por unidades consumidoras que recebem energia em tensão igual ou superior a 2,3 kilovolts (kV) ou são atendidas a partir de sistema subterrâneo de distribuição em tensão secundária, caracterizado pela tarifa binômica (aplicada ao consumo e à demanda faturável). No grupo A, subdividido em seis subgrupos, geralmente se enquadram indústrias e estabelecimentos comerciais de médio ou grande porte. O grupo B (baixa tensão) é caracterizado por unidades consumidoras atendidas em tensão inferior a 2,3 kV, com tarifa monômica (aplicável apenas ao consumo). Está subdividido em quatro subgrupos. O consumidor do tipo B1 é o residencial. O consumidor rural é chamado de B2, enquanto estabelecimentos comerciais ou industriais de pequeno porte, como por exemplo, uma pastelaria ou uma marcenaria, são classificadas como B3. A iluminação pública é enquadrada no subgrupo B4.

---

<sup>17</sup> Net metering - ou Sistema de Compensação de Energia é a abordagem na qual medidor bidirecional mede o fluxo de energia em uma unidade consumidora dotada de pequena geração.



### 3.2.1 Avanços e Barreiras na Inserção da Geração Distribuída fotovoltaica no Brasil

Os sistemas fotovoltaicos têm experimentado um enorme crescimento ao redor do mundo nos últimos anos. Segundo dados da *European Photovoltaic Industry Association* (EPIA), a capacidade instalada mundial atingiu a marca de 139 GW<sup>p</sup> em 2013, resultando em uma CAGR de 43% entre 2000 e 2013 (EPIA, 2014). Até o início do terceiro milênio, a tecnologia era utilizada majoritariamente em sistemas isolados, enquanto atualmente mais de 95% são sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica (SFCR). Este grande crescimento foi fruto de programas de incentivos à fonte, promovidos por países como Alemanha, Austrália, China, Espanha, EUA, entre outros. Os preços seguiram caminho inverso, caindo significativamente conforme a capacidade instalada aumentava, como reflexo da curva de aprendizagem e dos ganhos de escala.

Em 2012 a EPE<sup>18</sup> publicou a nota técnica intitulada “Análise da Inserção da Geração Solar na Matriz Elétrica Brasileira”, contemplando as principais aplicações da energia solar para geração de eletricidade no Brasil, dando especial enfoque aos SFCR. Os estudos mostraram que a inserção fotovoltaica estaria mais próxima de se realizar naturalmente via geração distribuída, especialmente na autoprodução residencial e comercial, dada a iminência da ocorrência da paridade tarifária, ou seja, a equiparação do custo da energia gerada por um SFCR e as tarifas praticadas pelas distribuidoras. Concomitantemente, em 2012, a Agência nacional de Energia Elétrica (ANEEL) publicou a Resolução Normativa nº 482, posteriormente alterada pela Resolução Normativa nº 517, estabelecendo as condições gerais para micro e minigeração distribuída no país, assim como o sistema de compensação de energia elétrica através do sistema conhecido como net metering.

Segundo dados da *International Energy Agency* (IEA, 2010), os sistemas residenciais e comerciais conectados a rede devem responder, em 2020, por aproximadamente 60% da geração fotovoltaica, enquanto as centrais fotovoltaicas representariam 30% do total, restando 10% em sistemas isolados. Tais estimativas refletem a maior atratividade econômica dos sistemas de pequeno porte ao longo desta década, que devem observar uma queda nos custos de aproximadamente 50% entre 2010 e 2020 (IEA, 2012).

Comparado aos países líderes em capacidade instalada de geração distribuída fotovoltaica urbana, o Brasil possui enorme potencial, por possuir maior incidência solar e por suas tarifas de energia elétrica estarem em patamares parecidos. No entanto, o sistema de net

---

18 EPE - Empresa de pesquisas energéticas.

metering, adotado no Brasil, não oferece a mesma atratividade proporcionada por outros mecanismos empregados inicialmente nos outros países, de forma que sua inserção recaia sobre a capacidade da própria fonte se viabilizar economicamente, se refletindo num prazo maior para a popularização da fonte.

Ainda segundo *International Energy Agency* (IEA, 2010) o Brasil tem como meta atingir 20% de participação de fontes renováveis - além da geração hidráulica - em sua matriz elétrica até 2030. Esta meta foi um dos pontos da Declaração Conjunta Brasil - Estados Unidos sobre Mudança do Clima, realizada em Washington, D.C., no último dia 30 de junho de 2015.

No Balanço Energético Nacional 2015 (BEN-2015), ano-base 2014, elaborado pelo Ministério de Minas e Energia, as energias renováveis corresponderam a 39,4% da oferta interna de energia. Esse percentual é composto por biomassa (15,7%), hidráulica (11,5%), lenha e carvão vegetal (8,1%) e demais energias renováveis, entre elas a solar (4,1%). Sem considerar a hidráulica, as fontes renováveis corresponderam a 27,9% em 2014.

As fontes não renováveis corresponderam a 60,6% da oferta interna, de acordo com o BEN-2015. De hoje a 2030, o Brasil poderá reduzir as energias renováveis de sua matriz energética em até 7,9%, e ainda assim alcançará os 20% declarados em Washington. A soma de outras fontes renováveis, dentre elas a solar, correspondeu a 4,1% da oferta interna de energia. O potencial de geração de energia elétrica a partir de fonte solar, nos próximos 10 anos, é de 2.435MW, com o funcionamento estimado de 795 mil sistemas de geração distribuída, de acordo com o agente regulador a ANEEL. Até janeiro deste ano, apenas 409 sistemas entraram em funcionamento, com capacidade instalada de 4,8MW, resultado insignificante perto dos 134 mil MW da matriz elétrica brasileira.

As principais barreiras identificadas ao aumento de geração de energia solar são: a falta de financiamento para aquisição e instalação de equipamentos de geração solar, e o ICMS incidente sobre a geração desse tipo de energia.

A geração distribuída foi regulada pela ANEEL nos termos da Resolução Normativa nº 482/2012, que estabeleceu 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. Os consumidores de até 100KW (microgeração), ou de até 1MW (minigeração), podem conectar centrais geradoras de energia elétrica que utilizem fontes com base em energia solar na rede de distribuição por meio de instalações de suas unidades.

Um dos princípios gerais da atividade econômica, enunciado no art. 170 da Constituição Federal, é a defesa do meio ambiente, segundo o qual, produtos e serviços, e

seus processos de elaboração e prestação, devem ter tratamento diferenciado conforme o impacto ambiental. Os equipamentos para geração de energia solar e a geração desse tipo de energia enquadram-se como produtos e serviço que causam impactos ambientais positivos. Evitam a emissão de gases de efeito estufa, gerados pela utilização de outras fontes, não renováveis, que poderiam ser consumidas, e podem injetar eletricidade excedente no sistema, aumentando a oferta de energia.

A geração de energia elétrica com base em fonte solar deve ter tratamento diferenciado no financiamento para aquisição e instalação de equipamentos de geração e na forma de tributação dessa energia, com a isenção do ICMS incidente sobre o micro e minigerador.

Nesse sentido, o Conselho de Política Fazendária editou em abril deste ano, o Convênio 16, que autorizou os Estados de Goiás, Pernambuco e São Paulo a conceder isenção do ICMS incidente sobre geração de eletricidade do mini e microgerador, incentivando a energia solar. Em agosto de 2012, Minas Gerais criou regra para desonerar os mini e microgeradores. A adesão dos demais 23 estados da federação ao convênio é fundamental para que o Brasil reduza as emissões de gás de efeito estufa, aumente a atividade econômica representada pela cadeia produtiva de equipamentos do setor, ofereça alternativa aos consumidores sobre o custo da energia, que aumentou 24% em média no país neste ano, e diminua a dependência da geração hidráulica.

De acordo com a nota técnica 19/14 da EPE, acompanhando o desenvolvimento internacional do setor fotovoltaico, o Brasil, mesmo ainda com pequena capacidade instalada, tem buscado superar as barreiras, através de um número de ações, para inserção da fonte na matriz brasileira. O crescimento alavancado nos últimos anos contemplaram ações oriundas de vários agentes, em diversas esferas, destacando-se a regulatória, tributária, normativa, de pesquisa e desenvolvimento, e de fomento econômico.

Um grande avanço conforme mencionado acima, foi o lançamento pelo Ministério de Minas e Energia (MME) em dezembro de 2015, do Programa de Desenvolvimento da Geração Distribuída de Energia Elétrica (ProGD), o programa visa ampliar e aprofundar as ações de estímulos à geração de energia pelos próprios consumidores, com base nas fontes renováveis de energia (em especial a solar fotovoltaica). O Programa pode movimentar pouco mais de R\$ 100 bilhões em investimentos, até 2030. A projeção do potencial (cumulativo até 2030) é de que 2,7 milhões de unidades consumidoras poderão ter energia gerada por elas mesmas, entre residência, comércio, indústrias e no setor agrícola, o que pode resultar em 23.500 MW (48 TWh produzidos) de energia limpa e renovável, o equivalente à metade da

geração da Usina Hidrelétrica de Itaipu. Com isso, o Brasil pode evitar que sejam emitidos 29 milhões de toneladas de CO<sub>2</sub> na atmosfera.

O objetivo do programa é ampliar a GD com fontes renováveis em residências, instalações industriais e comerciais, escolas técnicas e universidades federais, hospitais e edifícios públicos.

### 3.2.1.1 Legislação

De acordo com o MME e sua nota técnica DEA 19/14, o maior avanço para a geração distribuída ocorreu em função da regulação dos mini e microgeradores ao ser publicada a Resolução 482/2012, que viria a ser atualizada pela resolução 517/2012, pela ANEEL. A regulação permite, basicamente, que os consumidores instalem pequenos geradores em suas unidades consumidoras e injetem a energia excedente na rede em troca de créditos, que poderão ser utilizados em um prazo de 36 meses.

A promulgação da resolução 482/2012, a consequente implementação do sistema de compensação de energia elétrica brasileiro e a modificação do PRODIST, criou uma possibilidade regulatória para os micros e minigeradores e removeu a barreira de conexão e contratação. Todavia, não houve nenhum incentivo para estes geradores, excluindo o aumento dos descontos na TUST<sup>19</sup> e TUSD<sup>20</sup> de 50% para 80% nos dez primeiros anos de operação das usinas de fonte solar que entrarem em operação até 2017.

Outro ponto que merece destaque é a modificação da REN 482/2012 pela REN 517/2012, antes do vencimento do prazo de divulgação dos procedimentos de conexão pelas distribuidoras. As modificações instauradas pela REN 517/2012 representaram um retrocesso na remoção de barreiras para inserção de mini e microgeradores. A limitação da capacidade à carga da unidade local e a retirada da possibilidade de compensação em unidades de titularidades diferentes que tenham acordo ou comunhão de interesses tendem a restringir muito os nichos de viabilidade de inserção de mini e micro GD.

Como avanço, em março de 2014 a ANEEL publicou o Despacho n° 720, eximindo microgeradores que se conectam a rede através de inversores de instalarem o Dispositivo de Seccionamento Visível (DSV), uma vez que os inversores *grid-tie* utilizados já possuem mecanismos de proteção anti-ilhamento, dispensando tal dispositivo antes exigido. Essa alteração possibilita uma redução de custo na instalação.

---

19 TUST- Tarifa de uso do sistema de transmissão.

20 TUSD- Tarifa de uso do sistema de distribuição.

Outro avanço significativo na regulamentação da microgeração, foram os aprimoramentos na Resolução Normativa 482/2012 aprovados pela ANEEL em novembro de 2015. Segundo as novas regras, que começaram a valer a partir de 1º de março de 2016, será permitido o uso de qualquer fonte renovável, além da cogeração qualificada, denominando-se microgeração distribuída a central geradora com potência instalada até 75 quilowatts (KW) e minigeração distribuída aquela com potência acima de 75 kW e menor ou igual a 5 MW (sendo 3 MW para a fonte hídrica), conectadas na rede de distribuição por meio de instalações de unidades consumidoras. Quanto ao prazo de validade dos créditos passou de 36 para 60 meses, sendo que eles podem também ser usados para abater o consumo de unidades consumidoras do mesmo titular situadas em outro local, desde que na área de atendimento de uma mesma distribuidora. Destaca-se também como inovação à possibilidade de instalação de geração distribuída em condomínios (empreendimentos de múltiplas unidades consumidoras). Nessa configuração, a energia gerada pode ser repartida entre os condôminos em porcentagens definidas pelos próprios consumidores.

A ANEEL criou ainda a figura da “geração compartilhada”, possibilitando que diversos interessados se unam em um consórcio ou em uma cooperativa, instalem uma micro ou minigeração distribuída e utilizem a energia gerada para redução das faturas dos consorciados ou cooperados.

Com relação aos procedimentos necessários para se conectar a micro ou minigeração distribuída à rede da distribuidora, a ANEEL estabeleceu regras que simplificam o processo: foram instituídos formulários padrão para realização da solicitação de acesso pelo consumidor. O prazo total para a distribuidora conectar usinas de até 75 kW, que era de 82 dias, foi reduzido para 34 dias. Adicionalmente, a partir de janeiro de 2017, os consumidores poderão fazer a solicitação e acompanhar o andamento de seu pedido junto à distribuidora pela internet.

### 3.2.1.2 Fontes de Financiamento

Destaca-se, primeiramente, a criação do Plano de Ação Conjunta Inova Energia, iniciativa da FINEP<sup>21</sup>, BNDES<sup>22</sup> e ANEEL, que, entre outras finalidades, apoia empresas brasileiras no desenvolvimento e domínio tecnológico da cadeia produtiva fotovoltaica (além da termo solar e eólica), englobando desde a purificação de silício em grau solar, wafers e

---

21 FINEP- A Financiadora de Estudos e Projetos, vinculada ao Ministério da Ciência Tecnologia e Inovação.

22 BNDES- Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social.

células derivadas, assim como células de outros materiais e equipamentos de condicionamento de potência utilizados nos sistemas fotovoltaicos, como inversores. O montante de recursos disponibilizados pelas três instituições, para todo o programa, soma R\$ 3 bilhões, para os anos de 2013 a 2016 (MME, 2014).

A empresa de pesquisa energética (2014), dentro da nota técnica, referente a recurso energéticos, menciona que, o BNDES publicou em agosto de 2014 as regras para o credenciamento e apuração de conteúdo local de módulos e sistemas fotovoltaicos, que exige a nacionalização progressiva de componentes e processos específicos ao longo do plano, como a fabricação nacional de células de silício cristalino a partir de 2020. Apesar de o plano ter sido elaborado tendo em vista o próximo Leilão de Energia Reserva, o desenvolvimento da cadeia industrial fotovoltaica no país deve beneficiar a geração distribuída através da redução de custos dos equipamentos ao consumidor final.

O Instituto Ideal, em parceria com o *Grüner Strom Label* (Selo de Eletricidade Verde da Alemanha), lançou em 2013 o Fundo Solar, que oferece apoio financeiro no valor de R\$ 1.000,00 a R\$ 5.000,00 por projeto de microgeração fotovoltaica conectado à rede. O orçamento total do Fundo é de aproximadamente R\$ 65.000,00 na primeira fase do projeto.

Em julho de 2014 a Secretaria de Estado de Indústria e Comércio (SIC) de Goiás lançou o programa “Crédito Produtivo da SIC – Energias Renováveis”, que oferece uma linha especial de crédito voltada para micro e pequenas empresas. A linha financia projetos de sustentabilidade, inclusive geração de energia solar, com taxa de 0,25% ao mês, carência de até 180 dias, prazo de pagamento de até 36 meses, para valores entre R\$ 2 mil e R\$ 25 mil.

No segundo semestre de 2014 foram incluídos aerogeradores e equipamentos de energia fotovoltaica como itens financiáveis através do Construcard, da CAIXA. Com o cartão, é oferecida a possibilidade à pessoa física adquirir os equipamentos de microgeração e quitar o financiamento em até 240 meses, a uma taxa de juros mensal que varia de 1,4% + TR a 2,33% + TR. Ressalta-se que esta linha de crédito não tem nenhum tipo de incentivo ou subsídio do Governo Federal (MME, 2014).

### 3.2.1.3 Normatização e Certificação

No que diz respeito as certificações, o INMETRO publicou em 2011 a portaria nº 004 que define os “Requisitos de Avaliação da Conformidade para Sistemas e Equipamentos para Energia Fotovoltaica”, aplicável para módulos, controladores de carga, inversores e baterias estacionárias de baixa intensidade de descarga. Foi estabelecido que a partir de julho de 2012

os sistemas e equipamentos para energia fotovoltaica deverão ser comercializados, no mercado nacional, somente em conformidade com os Requisitos ora aprovados. Atualmente, são sete laboratórios acreditados pela Coordenação Geral de Acreditação (Cgcre/Inmetro), no entanto, apenas dois estão realizando ensaios em módulos. Com a demanda crescente e a necessidade da atualização anual dos ensaios para cada módulo, a certificação acaba sendo um gargalo para o setor fotovoltaico no Brasil.

A Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) publicou recentemente quatro normas relacionadas ao tema, visando maior segurança e padronização das instalações:

- a) ABNT NBR IEC 62116:2012 - Procedimento de ensaio de anti-ilhamento para inversores e sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica;
- b) ABNT NBR 16149:2013 - Sistemas fotovoltaicos (FV) - Características da interface de conexão com a rede elétrica de distribuição;
- c) ABNT NBR 16150:2013 - Sistemas fotovoltaicos (FV) – Características da interface de conexão com a rede elétrica de distribuição – Procedimento de ensaio de conformidade;
- d) ABNT NBR 16274:2014 - Sistemas fotovoltaicos conectados à rede — Requisitos mínimos para documentação, ensaios de comissionamento, inspeção e avaliação de desempenho.

#### 3.2.1.4 Tributação

Quando ao assunto é tributação, devemos ressaltar que desde 1997 o CONFAZ estabelece através do Convênio ICMS 101/97, que não seja recolhido ICMS de módulos e células fotovoltaicas em nenhum estado da Federação. Porém, esta medida não se estende a outros equipamentos, como inversores e medidores. No aspecto tributário, participa também a União, haja vista que impostos federais (Imposto de Importação, PIS e COFINS) ainda representam valores consideráveis no valor final dos sistemas fotovoltaicos. Neste sentido, tramita o PLS nº 317/2013 que propõe a isenção do IPI sobre dispositivos fotossensíveis semicondutores, incluídas as células fotovoltaicas, mesmo montadas em módulos ou em painéis, entre outros componentes.

Um projeto que se aprovado promoveria de sobremaneira o uso da geração distribuída fotovoltaica no Brasil é o PLS (nº 168/2013) que vem tramitando no Senado, propõe que os projetos de novas edificações de propriedade da União, os sistemas de aquecimento de água e condicionamento de ar deverão prever o uso de fontes renováveis (biomassa, solar,

geotérmica, eólica) para atendimento de, no mínimo, cinquenta por cento das necessidades energéticas para a produção de calor e de frio.

O estado de Minas Gerais aprovou em agosto de 2013 a Lei 20.849, que determina, dentre outras medidas, que o estado deverá desenvolver programas e ações com vistas a estimular o uso da energia solar e atrair investimentos para a implantação de usinas solares. A política pública prevê também que o estado deverá firmar convênios para promover o desenvolvimento tecnológico e capacitar mão de obra para a elaboração, instalação e manutenção de sistemas de energia solar (MME, 2014).

No que diz respeito ao imposto sobre a energia gerada, no dia 05 de abril de 2013, o CONFAZ publicou o Convênio ICMS. Este convênio estabelece a incidência do ICMS sobre o consumo bruto de eletricidade proveniente da distribuidora, antes de qualquer compensação da geração própria. Ou seja, o montante de energia elétrica gerada que não é consumido instantaneamente é exportado à rede de distribuição e, ao ser compensado em outra oportunidade, será tributado. Tal tributação muda à realidade do sistema de compensação de energia elétrica e, conseqüentemente, a competitividade e a perspectiva de penetração da micro e minigeração distribuída, como será visto no decorrer do presente estudo.

Este Convênio tem caráter orientativo, cabendo a cada estado brasileiro publicar sua regulamentação própria para tratar do assunto. No entanto, atualmente apenas Minas Gerais não aplica o Convênio. Nesse estado, através da lei nº 20.824, de 31 de julho de 2013, determinou-se que pelos primeiros cinco anos de geração a base de cálculo do imposto será o consumo líquido (MME,2014).

Durante o lançamento do ProGD, o MME (2015) anunciou ações e medidas de estímulos fiscais que estão em curso destacam-se:

- a) Isenção de ICMS e PIS/COFINS: O consumidor será tributado com o ICMS e PIS/COFINS apenas sobre o saldo da energia que ele receber da distribuidora e não conseguir compensar.
- b) Redução do Imposto de Importação: Até 31 de dezembro de 2016, está reduzida de 14% para 2% a alíquota do Imposto de Importação incidente sobre bens de capital destinados à produção de equipamentos de geração solar fotovoltaica.
- c) Geração Distribuída em Escolas e Hospitais: O BNDES foi autorizado pela Lei nº 13.203, de 8 de dezembro de 2015, a apoiar com recursos a taxas diferenciadas projetos de eficiência energética e de geração distribuída por fontes renováveis em escolas e hospitais públicos.



### 3.2.1.5 Social

Ainda em sua nota técnica 19/14 – Inserção da geração fotovoltaica distribuída no Brasil, o MME relata que o país desenvolveu diversos projetos em energia fotovoltaica para que comunidades instaladas em áreas isoladas conseguissem o acesso à eletricidade. E isto foi possível através de Sistemas Individuais de Geração de Energia Elétrica com Fontes Intermitentes (SIGFI) e, mais recentemente, Microssistemas Isolados de Geração e Distribuição de Energia Elétrica (MIGDI). Com relação aos sistemas conectados à rede, destaca-se o Projeto de Geração de Renda e Energia, localizado na cidade de Juazeiro (BA), realizado pela Brasil Solar e CEF (Fundo Socioambiental CAIXA). Outro destaque foi que em dois condomínios do Programa Minha Casa Minha Vida, foram instalados sistemas fotovoltaicos sobre 1.000 residências, totalizando 2,1 MWp, envolvendo a comunidade local na instalação dos sistemas. Para atingir os objetivos do projeto uma resolução autorizativa específica foi aprovada. A energia gerada pelo projeto abastecerá as áreas comuns dos condomínios e o excedente será comprado pela própria CAIXA. Parte da receita constituirá um fundo para melhorias nos condomínios e o restante, distribuída para os moradores (MME, 2014).

### 3.2.1.6 P&D

Esta área sem dúvidas é a área que deverá ter um grande crescimento. Quando analisamos, ao longo dos últimos anos, verifica-se um crescimento considerável no número de estudos na área de geração fotovoltaica. Universidades, laboratórios e instituições de todas as regiões do país vêm desenvolvendo pesquisas na área, sendo um exemplo disto à variada participação no P&D Estratégico da ANEEL: “Arranjos Técnicos e Comerciais Para Inserção da Geração Solar Fotovoltaica na Matriz Energética Brasileira”. A chamada do programa, P&D 2011, recebeu nada menos de que 18 propostas (17 aprovadas), totalizando um investimento total de R\$ 395,9 milhões em um prazo de três anos, somando uma potência instalada, ao final do período, de aproximadamente 24,6 MWp, envolvendo, diretamente, 96 empresas, 62 instituições e 584 pesquisadores nos projetos (MME,2014).

O conhecimento da disponibilidade do recurso solar é chave para seu devido aproveitamento. Com esta finalidade, os estados de Minas Gerais e São Paulo se destacam na avaliação do potencial solar em seus respectivos territórios, com o lançamento do Atlas

Solarimétrico de Minas Gerais (2012), e em São Paulo publicação (2013) do estudo intitulado “Energia Solar Paulista: Levantamento do Potencial”.

Complementando no quesito P&D, destaca-se, finalmente, que no início de agosto de 2014 foi inaugurado em Campinas o Laboratório de Energia Fotovoltaica Richard Louis Anderson, voltado à pesquisa e desenvolvimento de módulos fotovoltaicos customizados. Esta iniciativa deve ajudar a disseminar o conceito de edifícios integrados, e tem papel importante na difusão da microgeração fotovoltaica (MME, 2014).

### **3.3 Potencial e Projeções da geração fotovoltaica distribuída no Brasil**

Embora a geração distribuída, contemplada pela REN 482/2012, não seja limitada ao tipo de instalação ou à classe do consumidor, foi realizado pela EPE, em parceria com a GIZ<sup>23</sup>, um primeiro estudo abrangendo a capacidade de geração total em telhados residenciais, certamente uma das principais aplicações em GD.

Pesquisas envolvendo outros fatores e setores estão sendo desenvolvidas, no entanto, com a análise apresentada pela EPE foi possível chegar a resultados que demonstram o grande potencial brasileiro nesta modalidade de geração.

A ANEEL no seminário sobre geração distribuída, realizada em abril 2014, fez uma projeção de que haja em 2030 – 2,7 milhões unidades ligadas - gerando um total de 4,8 GW.

Desde a publicação da Resolução em 2012 até outubro deste ano, já foram instaladas 1.930 centrais geradoras, sendo 1.852 (96%) com a fonte solar fotovoltaica, 41 eólicas, 18 híbridas (solar/eólica), 6 movidas a biogás, 1 a biomassa e 1 hidráulica.

### **3.4 Profissionais envolvidos na instalação das usinas solares fotovoltaicas**

O Brasil fechou 2015 com uma taxa média de desocupação de desocupação de 6,8%, o que corresponde a 1,7 milhões de pessoas desempregadas (IBGE – Fev. 2016). E para ajudar a diminuir os impactos negativos que este quadro causou, o Governo Federal poderá contar com o setor fotovoltaico. Segundo Rodrigo Lopes Sauaia, presidente executivo da Associação Brasileira de Energia Solar Fotovoltaica (ABSOLAR), a instalação de projetos de energia solar resultará em um “Volume significativo” de novas oportunidades de trabalho.

Até o momento, 4,8 GW em usinas solares estão previstas para serem instaladas no

---

23 (Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit) é a agência de cooperação alemã.

Brasil até 2030 considerando os projetos contratados via leilões de energia de reserva e os projetos que foram viabilizados no mercado livre pelo estado de Pernambuco. Estima-se que para cada megawatt solar instalado sejam criados entre 20 e 30 postos de trabalho (diretos e indiretos), segundo especialistas do mercado consultados pela Agência Canal Energia. Sendo assim, calcula-se que algo entre 60 mil e 99 mil novas oportunidades de trabalho deverão ser criadas com o desenvolvimento do mercado de energia solar brasileiro.

Um ponto de fundamental importância, para que o setor fotovoltaico continue crescendo é que o próprio setor, o governo, escolas técnicas, universidades e entidades que já atuam no mercado, trabalhem juntos para prepararem adequadamente os profissionais envolvidos como USFV, de forma que se tenham profissionais atuando com qualidade e competência nas instalações e projetos das USFV. Dentro desta visão a ABSOLAR, como agente atuante no mercado FV, ainda segundo seu presidente executivo, terá como prioridade a formação de profissionais para atuarem no mercado. Como esta formação demanda certo tempo, ela necessita ser elaborada desde agora para que ela possa ser efetivada a tempo de acompanhar o crescimento do mercado, evitando possíveis entraves na parte dos profissionais.

A postura do governo quanto à formação dos profissionais, deverá ser mais ativa; pois sua participação também será fundamental no processo de formação desta mão de obra. Diferente de alguns outros setores de energia elétrica, o mercado fotovoltaico será geograficamente distribuído. Como consequência disso, será necessário um envolvimento do Governo Federal para que se tenham condições de montar um programa de capacitação profissional que não fique restrito geograficamente, mas que possa ser aplicado em todos os Estados do país de uma forma abrangente.

Quando olhamos com um olhar mais crítico, vemos que a mão de obra fotovoltaica ainda é escassa no Brasil. Historicamente, o uso da energia solar no Brasil vem desde a década de 1980. Entretanto, nas primeiras três décadas as instalações no país se restringiram a sistemas de pequeno porte em áreas remotas, feitas por eletricitistas. Para Roberto Zilles, doutor em Engenharia de Telecomunicações em Sistemas Fotovoltaicos e professor associado do Instituto de Energia e Meio Ambiente da Universidade de São Paulo (IEE-USP), ainda é escasso o número de profissionais formados nas particularidades dos sistemas fotovoltaicos no país. Ele relata que durante a instalação de 0,5 MW na USP foi preciso treinar os profissionais das empresas vencedoras da licitação. “Essas empresas tinham experiência em instalações elétricas, mas não tinham conhecimento das particularidades não tinham conhecimento das particularidades dos sistemas fotovoltaicos”.

De acordo com o presidente da Associação Brasileira de Energia Solar (ABENS)- Roberto Zilles, o Brasil tem profissionais na área elétrica, técnicos de nível médio, engenheiros eletricitas, mas no currículo dessas carreiras são escassas as experiências que se dedicam as particularidades das instalações fotovoltaicas. Ainda de acordo com Roberto Zilles, o primeiro passo é introduzir conteúdo específico sobre os sistemas fotovoltaicos nos cursos técnicos e de graduação no Brasil.

No Brasil existe mão de obra qualificada em instalações elétricas, o que é necessário neste momento é que essa mão de obra se qualifique e tenha contato com as particularidades da fotovoltaica. A crescente da GD terá um papel importante; pois sem dúvidas nenhuma vai impulsionar essa formação de profissionais (Engenheiros, Técnicos, Eletricitas de manutenção, Eletricitas montadores e etc.) que irão atuar no mercado.

Perfil profissional- Faltam cursos de pós-graduação *stricto sensu* – Segundo Hermes José Loschi - professor e pesquisador do Laboratório de Comunicações Visuais da Unicamp – e autor do livro “Compreendendo um Sistema Fotovoltaico: uma abordagem didática conceitual” (Editora Braúna)- o perfil dos profissionais do setor fotovoltaico pode ser dividido em duas categorias: o instalador – que é o profissional capacitado para instalar sistemas FV e o engenheiro de projetos, responsáveis por dimensionar os sistemas. De acordo com o pesquisador a qualidade da mão de obra será determinante para o desempenho dos futuros empreendimentos no país.

No Brasil há uma grande oferta de programas de especialização em energia fotovoltaica, tais como cursos técnicos e práticos, oferecidos por entidades privadas, mas faltam cursos de pós-graduações *stricto sensu*, como programas de mestrado e doutorado na área de energias renováveis.

O mercado solar não se limita em proporcionar apenas oportunidades ao profissional do setor elétrico. Também há uma maior demanda por profissionais da área ambiental, civil, arquitetura, mecânica e até mesmo do comercio exterior, uma vez que há necessidade de importar componentes.

## 4 MÉTODOS E MATERIAIS

Para a análise da inserção da micro e minigeração fotovoltaica distribuída no Brasil, são utilizados conceitos mencionados no capítulo 2, monitoramento on-line de unidades micro e minigeradoras instalados no sistema CEMIG-D, utilização de simuladores, acompanhamento de novas instalações fotovoltaicas, análise de manutenções, participação de congresso e curso para elaboração de projetos.

Após vasto levantamento e exaustiva análise do material bibliográfico, a primeira ação tomada foi à visita técnica a usina FV de pequeno porte - USF Mineirão Com esta visita foram esclarecidos pontos importantes sobre o funcionamento de uma usina solar fotovoltaica de médio porte na modalidade *on-grid*, desempenho de equipamentos, esclarecimento sobre manutenções, monitoramento, bem como as obras de infraestrutura necessária para sua implantação.

### 4.1 USF Mineirão

Para um melhor conhecimento de infraestrutura e funcionamento, foi escolhida a USF do Mineirão, por sua modernidade e desempenho. A Usina Solar Fotovoltaica (USF) do Mineirão, construída pela Cemig em 2014, em parceria com a Minas Arena e o banco alemão *KfW*, é a maior do mundo na cobertura de um estádio e tem capacidade para atender 1.200 residências.

Os módulos solares fotovoltaicos na cobertura do estádio captam a radiação solar e convertem em energia elétrica, em corrente contínua com tensão de 380 volts. Inversores instalados em oito salas técnicas abaixo das arquibancadas transformam a corrente contínua em corrente alternada. A energia é enviada a duas subestações, uma no lado sul e outro no lado norte do Mineirão. Nas subestações, a tensão é elevada para média tensão.

Os investimentos na USF foram de aproximadamente R\$ 10 milhões, sendo que 80% desse valor foi financiado pelo banco alemão *KfW*, por meio de cooperação técnica Brasil-Alemanha. (CEMIG- Informativo 19/11/2015).

#### 4.1.1 Obras de revitalização

Nesta fase do processo fica claro a importância da participação efetiva dos profissionais de arquitetura e engenharia civil, uma vez que foram necessárias obras de revitalização para

receber a instalação dos painéis fotovoltaicos, de forma a preservar a originalidade da fachada do estádio, sendo que esta foi tombada pelo conselho do patrimônio histórico de Belo Horizonte. A energia gerada pela USF Mineirão equivale atualmente ao consumo médio de cerca de 1200 residências. A área utilizada para a instalação dos painéis é de cerca de 9.500 m<sup>2</sup> e a área total do estádio é de aproximadamente 20.000 m<sup>2</sup>. Com 5.910 painéis fotovoltaicos de 240 Watts, totalizando uma potência gerada de 1,42 MWp, o que permite a produção média de energia a ser entregue na rede (energia líquida) de cerca de 1600 MWh/ano.

Figura 32- Fachada da USF Mineirão.



Fonte: CEMIG, 2014.

#### 4.1.2 Sala Técnica dos Inversores – STI

Situado embaixo das arquibancadas superiores, estes equipamentos apresentaram vários problemas de funcionamento. Os equipamentos que ora apresentaram estes defeitos foram substituídos em sistema de garantia pelos fornecedores. Na figura 33 mostra alguns destes inversores.

Figura 33- Inversores.

Módulos inversores.



Fonte: CEMIG, 2014.

#### 4.1.3 Subestação Elevadora

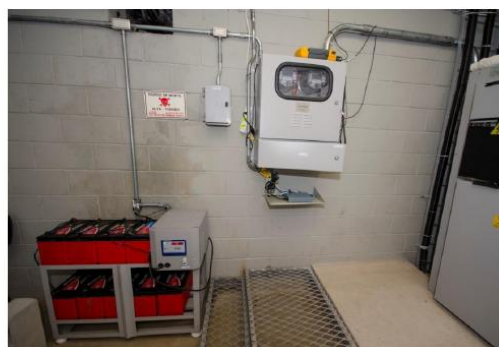
Composto por duas subestações elevadoras, que elevam a tensão industrial de 380 V para a tensão de distribuição de 13,8 KV – cada subestação possui um transformador elevador de 750 KVA, ligado em delta/estrela aterrado. A correção do fator de potência é feita com um banco de capacitores de 6 KVar por subestação. Nas subestações estão também instalados – trafo de aterramento, *nobreak* para serviço auxiliar, sistema de medição de tensão e corrente para proteção, sistema de telecontrole e dispositivos de operação sob carga SF6.

Convém salientar que por medida de segurança existe outro transformador de 750KVA como reserva.

#### 4.1.4 Sala Técnica de conexões - STC

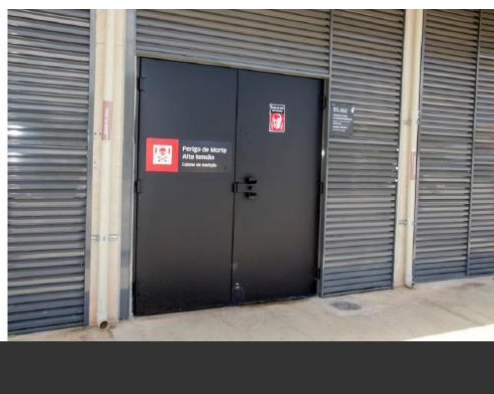
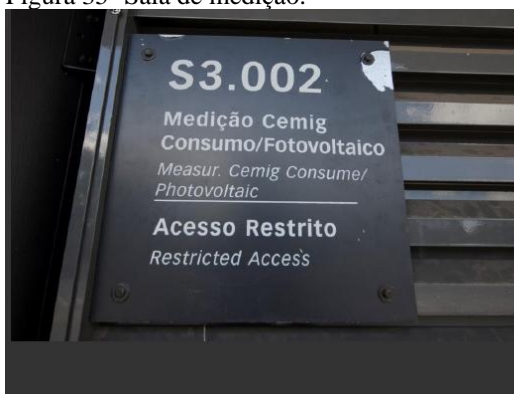
Nas figuras 34 e 35 mostram a sala onde estão instalados os medidores de faturamento que medem a energia que a USF fornece ao sistema da CEMIG-D. Nesta sala também estão instalados equipamentos de proteção e controle.

Figura 34- Medidores de faturamento.



Fonte: CEMIG, 2014.

Figura 35- Sala de medição.



Fonte: CEMIG, 2014.

## 4.2 Acompanhamento de novas conexões

No período de Outubro 2015 a Março 2016, foram acompanhadas 12 novas conexões sendo elas distribuídas da seguinte forma:

- a) Caxambu, Alagoa e Cambuquira - 03 unidades;
- b) Três Corações - 02 unidades;
- c) Varginha - 03 unidades;
- d) Santana da Vargem - 01 unidade;
- e) Elói Mendes- 01 unidade;
- f) Lavras - 02 unidades.

Durante este acompanhamento foram feitas importantes considerações sobre análise dos projetos e identificação do perfil deste novo consumidor.



Figura 36- Representação do Sul e Sudoeste de Minas.



Fonte: Pedal de Minas, 2014.

### 4.3 Histórico de manutenções em USFV ligadas na GD

O estudo da eficiência das células fotovoltaicas é fator determinante para que se consiga uma boa relação custo /benefício. Um dos fatores que apesar de desprezado por muitos autores, pode vir a ser bastante significativo, principalmente em áreas poluídas ou com uma concentração elevada de partículas, é a sujidade na superfície da célula fotovoltaica. Geralmente, esta superfície é recoberta por algum tipo de vidro, geralmente, temperado e de alta transparência. A sujidade nestas superfícies ocasiona a diminuição do rendimento das células fotovoltaicas, o que pode ser bastante significativo, principalmente se atentarmos para a localização e fenômenos atmosféricos. As manutenções preventivas realizadas nas USFV estão basicamente limitadas nas limpezas dos painéis (LEMOS,2016).

Em experiência coordenada pela Renew Energia (empresa brasileira que atua no setor de energia renováveis), foi realizado um teste em suas instalações, que demonstraram quais são os efeitos de não se realizar corretamente a manutenção preventiva e periódica em painéis solares fotovoltaicos.

Historicamente a única ação de manutenção preventiva que deve ser realizada pelo proprietário das USFV ao longo de sua vida útil, é a limpeza periódica dos módulos solares. A periodicidade de execução desta manutenção vai depender do nível de precipitação de partículas poluentes existente na sua região, ou mesmo da ação de animais e pássaros. Atualmente os fabricantes e fornecedores recomendam fazer a limpeza de 4 em 4 meses

utilizando-se apenas água, pano ou algum instrumento de limpeza com cerdas macias e não abrasivas.

Os acúmulos de sujeira nos painéis podem levar a uma queda no rendimento das USFV, que podem chegar à ordem superior a 15%. Além da redução do rendimento, o acúmulo por tempo prolongado de sujeira pode causar manchas, fungos e corrosão nos módulos, reduzindo a sua produtividade e a sua vida útil, que é estimada entre 25 a 30 anos.

Figura 37- Acúmulo de sujeira nos painéis solares.



Fonte: Renew Energia, 2015.

#### **4.4 Curso para elaboração de projetos de USF**

Atualmente o mercado de representantes e empresas instaladoras, é que oferecem capacitação para instaladores e projetista. Na educação formal, ainda existe uma grande carência de cursos de capacitação.

De acordo com a professora Elizabeth Marques Duarte Pereira, do Centro Universitário UNA Belo Horizonte e coordenadora do VI Congresso Brasileiro de Energia Solar (VI. CBENS, 2016) está evidente de que, ainda, precisamos incrementar urgentemente a capacitação de profissionais em energia solar, em seus diferentes níveis de atuação.

#### **4.5 Congresso Brasileiro de Energia Solar (CBENS)**

Realizado no período de 04 a 07 de abril de 2016 (Anexo III), na Escola de Engenharia da UFMG/ Campus da Pampulha, o VI Congresso Brasileiro de Energia Solar (VI CBENS) foi um evento bienal, organizado pela Associação Brasileira de Energia Solar (ABENS), e que

se destinou a pesquisadores, profissionais e estudantes com foco em Energia Solar, contextualizada no campo das Energias Renováveis.

O objetivo principal do congresso foi buscar contribuições de trabalhos tecnológicos e científicos relevantes para o desenvolvimento da energia solar no país, buscando promover o intercâmbio de informações e experiências entre a comunidade científica e tomadores de decisão, financiadores e profissionais atuantes nessa área.

## 5 CONCLUSÃO

Com base nos resultados levantados na pesquisa concluiu-se que:

- a) O fator causador do maior impacto negativo na inserção da geração fotovoltaica distribuída no Brasil é a carência na formação de profissionais de diversas áreas de atuação no mercado de energia fotovoltaica. A falta de um “*know-how*” específico para este mercado leva a incertezas quanto à relação custo-benefício, “*payback*”, qualidade da energia gerada e o modelo de compensação financeira (*net metering*) entre outros.
- b) Por outro lado, o alto custo de implantação das usinas fotovoltaicas também se configura como fator limitador aos investimentos em geração distribuída fotovoltaica. Os produtos e equipamentos utilizados na construção de usinas fotovoltaicas são na sua maioria importados de outros países pela não existência de fabricação nacional, estando sujeitos, portanto às variações cambiais e as barreiras colocadas pelos agentes financeiros (bancos) da União.
- c) Finalmente, a análise também permitiu concluir que outros fatores tais como a instabilidade econômica e política, obstáculos institucionais e tributários além de uma atuação notadamente passiva das concessionárias.

Como resultado prático da elaboração deste trabalho de conclusão de curso, seu autor propõe a criação de um projeto pioneiro na Instituição UNIS assim como no Sul de Minas, denominado "UNISSOLAR®" que tem como pilares a difusão da tecnologia fotovoltaica em nossa instituição, a formação de profissionais nas áreas de engenharia, P&D além da adequação do grupo UNIS a uma nova visão de eficiência energética com base na energia solar fotovoltaica.

## REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL). Cadernos temáticos ANEEL **Micro e Minigeração Distribuída** Sistema de Compensação de Energia Elétrica.2010 Disponível em : <http://www.aneel.gov.br>. Acesso em: 15 mar 2015.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL).2015. Disponível em : <http://www.aneel.gov.br> . Acesso em: 08 nov 2015.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL). **Resolução Normativa nº 410/2010**. Disponível em: <http://www.aneel.gov.br>. Acesso em: 06 jun 2015.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL). **Resolução Normativa nº 482, de abril de 2012**. Disponível em: <http://www.aneel.gov.br>. Acesso em: 06 jun 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 10899 - Julho de 2013**. Disponível em: <http://www.aneel.gov.br>. Acesso em: 15 set 2015.

AMÉRICA DO SOL. **Energia Solar Fotovoltaica no Brasil e no Mundo**. 2014. Disponível em: <http://www.americadosol.org/>- Acesso em: 23 set 2015.

BLUE SOL.2014. **Os Sistemas de Energia Solar Fotovoltaica**. Introdução aos Sistemas Solares. Disponível em: <http://www.blue-sol.com.br> . Acesso em: 21jun 2015.

CENTRAIS ELÉTRICAS BRASILEIRAS S.A (ELETROBRAS).2014 Disponível em: <http://www.elektrobras.com.br> . Acesso em: 11set 2015.

COMPANHIA ENERGÉTICA DE MINAS GERAIS (CEMIG).2015. Disponível em: <http://www.cemig.com.br> . Acesso em: 23 ago 2015.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE AQUECIMENTO SOLAR (DASOL). **Revista Sol Brasil**. São Paulo, nº26, abr/jun .2015-. Disponível em: <http://www.datasolabrava.org.br/informacoes/dados-demercado/>. Acesso em: 23 ago 2015.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). **Nota Técnica DEA 13/14** - Demanda de Energia 2050 - Rio de Janeiro 08/2014.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). **Nota Técnica DEA 19/14** - Inserção da Geração Fotovoltaica Distribuída no Brasil – Condicionantes e Impactos -Rio de Janeiro 10/2014.

GRUPO DE TELEINFORMÁTICA E AUTOMAÇÃO (GTA).2010.UFRJ. Rio de Janeiro, abr.2010. Disponível em: [http://www.gta.ufrj.br/ensino/eel879/trabalhos\\_vf\\_2010\\_2/livia/index.html](http://www.gta.ufrj.br/ensino/eel879/trabalhos_vf_2010_2/livia/index.html)/Acesso em: 17 nov 2015.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE 2014 (IPCC). **Synthesis Report**. 2015. Disponível em: [www.iniciativaverde.org.br/.../relatorio-do-ipcc-e-traduzido-para-o-portugues-](http://www.iniciativaverde.org.br/.../relatorio-do-ipcc-e-traduzido-para-o-portugues-) Acesso em: 04 mar 2015. .

INSTITUTO PARA DESENVOLVIMENTO DE ENERGIAS ALTERNATIVAS NA AMÉRICA LATINA (IDEAL). **O Mercado Brasileiro de Geração Distribuída Fotovoltaica** - Florianópolis (SC) - Ed. 9/2014 .

INSTITUTO PARA DESENVOLVIMENTO DE ENERGIAS ALTERNATIVAS NA AMÉRICA LATINA (IDEAL). **Relatório Sobre a Situação Energias Renováveis e Eficiência Energética** . REN21- Ed. 2014 .

LEMOS, Lucélio Oliveira. **Efeito da Sujidade no Desempenho de Módulos Fotovoltaicos** . Belo Horizonte, 2016. Disponível em: <http://www.abens.com.br> - Acesso em: 15 abr 2016.

LOSCHI, Hermes Jose. **Compreendendo um Sistema Fotovoltaico** . São Paulo, 2014. BARAÚNA. 1ª ed.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA (MME) . **Relatório Smart Grid**. Disponível em: <http://www.mme.gov.br/web/guest/aceso-a-informacao/acoes-e-programas/acoes/energia-eletrica/relatorio-smart-grid>. Acesso em: 10 jun 2015.

PINHO, João Tavares; GALDINO, Marco Antonio. **Manual de Engenharia Fotovoltaica** . Rio de Janeiro ,2014. CRESESB- CEPEL -ed. revista e atualizada.

PwC. **13ª Pesquisa Global de Energia e Serviços Públicos** . 2014 Disponível em: <http://www.pwc.com.br> - Acesso em: 13 out 2015.

SAMPAIO, Jorge Luiz; CALÇADA, Caio Sergio. **Universo da Física 3** . São Paulo,2005. 2ª ed. ATUAL EDITORA.

SCHEER, Hermann. **Economia Solar Global**. Rio de Janeiro, 2011. CRESESB . CEPEL .ed. revista e atualizada.

TOLEDO, Fábio. **Desvendando as Redes Elétricas Inteligentes**. Rio de Janeiro, 2012. BRASPORT.

TIPLER,Paul; MOSCA,Gene. **Física para Cientistas e Engenheiros**. Rio de Janeiro, 2012. 6ª ed. LTC.

VALOR ECONÔMICO (JORNAL).2015. Disponível em: <http://www.valor.com.br/opiniao> - Acesso em: 05 agosto 2015.