



Universidade Federal de Campina Grande

Centro de Engenharia Elétrica e Informática

Curso de Graduação em Engenharia Elétrica

HUGO MONTEIRO SILVA

**SIMULAÇÃO E ANÁLISE DE VIABILIDADE ECONÔMICA DE
SISTEMAS SOLARES FOTOVOLTAICOS CONECTADOS À
REDE**

Campina Grande, Paraíba
Maio de 2015

HUGO MONTEIRO SILVA

SIMULAÇÃO E ANÁLISE DE VIABILIDADE ECONÔMICA DE
SISTEMAS SOLARES FOTOVOLTAICOS CONECTADOS À
REDE

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

Área de Concentração: Processamento de Energia

Orientador:

Professor Leimar de Oliveira, M. Sc.

Campina Grande, Paraíba
Maio de 2015

HUGO MONTEIRO SILVA

SIMULAÇÃO E ANÁLISE DE VIABILIDADE ECONÔMICA DE
SISTEMAS SOLARES FOTOVOLTAICOS CONECTADOS À
REDE

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

Área de Concentração: Processamento de Energia

Aprovado em / /

Professor Avaliador

Universidade Federal de Campina Grande
Avaliador

Professor Leimar de Oliveira, M. Sc.

Universidade Federal de Campina Grande
Orientador, UFCG

Dedico este trabalho a minha mãe por haver sonhado esse sonho comigo e por sempre haver se realizado no meu sucesso.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus. Minha sabedoria jamais seria suficiente sem suas providências em minha vida.

Agradeço a minha mãe, Maria Luciete, por sempre ter investido em minha educação me permitindo enxergar horizontes maiores.

Ao meu irmão Hiago, Obrigado pela felicidade demonstrada em cada conquista minha.

Ao meu padrasto Maurício. Obrigado por cuidar da minha família enquanto eu precisei estar longe. Você foi o facilitador dos caminhos que eu precisei trilhar.

Ao meu primo, Jucelmo, por toda consideração, todo apoio e todos os aplausos que sempre demonstrou.

A minha namorada, Isabel. Sua paciência e seu carinho me acalentaram nos dias difíceis ao final dessa jornada.

As amigas que fiz através da Universidade e que se eternizaram portões afora. O espaço é curto e injusto para que eu possa citar o nome de todos.

Ao meu companheiro de profissão e amigo Manoel Ramos. Mesmo com o pouco tempo de convivência já me demonstrou toda sua fiabilidade e generosidade.

A BM Engenharia, por acreditar no meu potencial e por abrir suas portas para que eu possa crescer profissionalmente.

Agradeço ao Professor Leimar, fonte de inúmeras soluções que precisei durante os últimos meses na graduação.

Agradeço ao Departamento de Engenharia Elétrica da UFCG pela competência com que conduz nosso curso.

Por fim, agradeço aos meus familiares e amigos que sempre torceram pelo meu sucesso.

“Vamos viver
Temos muito ainda por fazer
Não olhe pra trás
Apenas começamos
O mundo começa agora!
Apenas começamos.”
Renato Russo

RESUMO

O investimento em fontes alternativas de energia elétrica que visam diminuir a dependência mundial por combustíveis fósseis cresce consideravelmente a cada ano. Nesse contexto a energia solar aparece como forte concorrente quando se fala em energia limpa. O Brasil está localizado em uma região favorável ao desenvolvimento desse tipo projeto devido ao alto índice de radiação solar que incide em seu território diariamente. Porém, os custos dos sistemas fotovoltaicos ainda são altos quando comparados com a principal forma de geração de eletricidade no Brasil: a hidrelétrica. Nos últimos anos os incentivos aumentaram ao ponto de que em 17 de Abril de 2012 a Agência Nacional de Energia Elétrica publicou a Resolução Normativa 482, que concede o direito a qualquer cidadão brasileiro de gerar sua própria energia e repassar o excedente para a rede de distribuição, ganhando créditos de energia por isto. Decorrente deste fato, muito se fala nos Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede (SFSCRs) e da viabilidade econômica de sua implantação. Com o auxílio de simuladores e de métodos de análise financeira algumas respostas podem ser dadas e reforçam as discussões sobre o tema.

Palavras-chave: Sistemas Fotovoltaicos, análise econômica, resolução normativa 482, simulador solar.

ABSTRACT

Every year, the investments in alternative sources of energy that aim to reduce the global dependence on fossil fuels increase significantly. In this context, solar energy appears as a strong competitor when it comes to clean energy. Brazil is located in a favorable region for developing this kind of project due to the elevated intensity of solar radiation on its territory. However, the costs of photovoltaic systems are still high in comparison to the main form for generating electricity in Brazil: hydroelectric. In the last few years, the incentives have increased so that in April 17, 2012, the Brazilian Electricity Regulatory Agency published the Resolution 482, which gives any Brazilian citizen the right to generate his own energy and to send the excess back to the distribution network, gaining energy credits by doing so. As consequence, there is a lot of discussion about the On-Grid Photovoltaics Systems and the economic viability of its implementation. By using simulators and financial analysis methods, some answers can be obtained to reinforce the discussions on the issue.

Keywords: Photovoltaic Systems, Economic analysis, Resolution 482, Solar simulator.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1. Estrutura solar.	5
Figura 2. Manchas solares.	5
Figura 3. Ciclo solar.	6
Figura 4. Distribuição percentual da radiação solar que atinge à Terra.	7
Figura 5. Intensidade espectral terrestre.	7
Figura 6. Energia da radiação solar x outras fontes x consumo mundial.	8
Figura 7. Participação das diferentes fontes de energia em 2011.	9
Figura 8. Previsão da matriz energética em 2035.	10
Figura 9. Capacidade instalada de energia elétrica no mundo.	Erro! Indicador não definido.
Figura 10. Insolação média anual no Brasil.	12
Figura 11. Matriz energética brasileira.	13
Figura 12. Capacidade instalada brasileira.	13
Figura 13. Sistema para aquecimento de água com coletor solar plano.	15
Figura 14. Coletores solares concentradores em usina na Califórnia.	16
Figura 15. Evolução da energia solar térmica na última década no Brasil.	16
Figura 16. Capacidade instalada de aquecimento solar no mundo em 2010.	17
Figura 17. Antoine Henri Becquerel.	18
Figura 18. Unidades de um Sistema Fotovoltaico Isolado básico.	19
Figura 19. Sistema Fotovoltaico Conectado à Rede.	20
Figura 20. Potência acumulada instalada de sistemas fotovoltaicos em países no mundo conectados ou não à rede elétrica, em MW.	21
Figura 21. Estrutura das bandas de energia em sólidos.	24
Figura 22. Dopagem em materiais semicondutores.	28
Figura 23: Efeito fotovoltaico.	29
Figura 24. Circuito equivalente da célula solar.	30
Figura 25. Estrutura de um módulo fotovoltaico.	31
Figura 26. Módulo fabricado com silício monocristalino.	31
Figura 27. Curva IxV de módulos fotovoltaicos.	32
Figura 28. Curva IxV em função de diferentes irradiâncias.	33
Figura 29. Curva IxV em função de diferentes temperaturas.	34
Figura 30. Célula solar fabricada com silício monocristalino.	36
Figura 31. Célula de silício policristalino.	36
Figura 32. Estrutura de célula de silício amorfo.	37
Figura 33. Célula solar fabricada com tecnologia de filmes finos.	38
Figura 34. Potencia garantida em módulos fotovoltaicos.	41
Figura 35. Módulo fotovoltaico padrão.	43
Figura 36. Tipos de inversores utilizados em Sistemas Fotovoltaicos.	45
Figura 37. Ponto de Máxima Potência de um gerador fotovoltaico.	47
Figura 38. Sistema Fotovoltaico com técnica de MPPT.	49
Figura 39. Localização geográfica do município de Agrestina.	55
Figura 40. Irradiação no município de Agrestina - PE.	55
Figura 41. Comparação do consumo antes e depois da instalação do Sistema Fotovoltaico 1.	58
Figura 42. Localização geográfica do município de Teresina - PI.	59
Figura 43. Irradiação no município de Teresina - PI.	59
Figura 44. Comparação do consumo antes e depois da instalação do Sistema Fotovoltaico 2.	61

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Capacidade instalada de sistemas fotovoltaicos e potencial solar de Alemanha, Espanha e Brasil.	22
Tabela 2. Valores de energia da banda proibida de materiais semicondutores.....	25
Tabela 3. Eficiência das células de filmes finos.	38
Tabela 4. Dados de irradiação solar no município de Agrestina - PE.	56
Tabela 5. Características do Sistema Fotovoltaico 1.	56
Tabela 6. Consumo elétrico do projeto 1.....	57
Tabela 7. Dados de irradiação solar no município de Teresina – PI.....	60
Tabela 8. Características do Sistema Fotovoltaico 2.	60
Tabela 9. Consumo elétrico do projeto 2.....	61
Tabela 10. Kit Fotovoltaico 3,0 kWp.	62
Tabela 11. Kit Fotovoltaico 2,2 kWp.	62
Tabela 12. Economia gerada pelo projeto 1 em 25 anos.	64
Tabela 13. Valores atuais dos retornos anuais.	65
Tabela 14. Economia gerada pelo projeto 2 em 25 anos.	66
Tabela 15. Valores atuais dos retornos anuais.	67

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS;

AIE - AGENCIA INTERNACIONAL DE ENERGIA;

AIIST - INSTITUTO NACIONAL DE TECNOLOGIA E CIENCIA INDUSTRIAL AVANÇADO DO JAPÃO;

ANEEL – AGENCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA;

CELPE – COMPANHIA ENERGÉTICA DE PERNAMBUCO;

CEPEL – CENTRO DE PESQUISAS DE ENERGIA ELÉTRICA;

CHESF - COMPANHIA HIDRELÉTRICA DO SÃO FRANCISCO;

CO₂ – DIOXIDO DE CARBONO;

CRESESB – CENTRO DE REFERÊNCIA PARA ENERGIA SOLAR E EÓLICA SÉRGIO BRITO;

CTA - CENTRO DE AERONAUTICA;

DOE - DEPARTMENT OF ENERGY;

DSP - DIGITAL SIGNAL PROCESSING;

EVA – ETIL VINIL ACETATO;

IDEAL - INSTITUTO PARA O DESENVOLVIMENTO DE ENERGIAS ALTERNATIVAS NA AMÉRICA LATINA;

IEC - INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION;

INT - INSTITUTO NACIONAL DE TECNOLOGIA;

IPCC - INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE;

MPPT - MAXIMUM POWER POINT TRACKER;

Mwh - MEGA WATT HORA;

OECD - ORGANISATION FOR ECONOMIC CO-OPERATIO AND DEVELOPMENT;

PET - POLITEREFTALATO DE ETILENO;

PRODEEM - PROGRAMA DE DESENVOLVIMENTO ENERGETICO DE ESTADOS E MUNICIPIOS;

SFCR - SISTEMAS FOTOVOLTAICOS CONECTADOS A REDE;

SFI - SISTEMAS FOTOVOLTAICOS ISOLADOS;

KWH – KILO WATT HORA;

TIR – TAXA INTERNA DE RETORNO;

TW - TERA WATT;

Twh - TERA WATT HORA;

UFPE - UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO;

UV – ULTRAVIOLETA;

VFL – VALOR FUTURO LÍQUIDO;

VPL – VALOR PRESENTE LÍQUIDO;

W_p – WATT PICO;

W/m² - WATT POR METRO QUADRADO;

I_{cel} – CORRENTE NA CÉLULA SOLAR [A];
 I_L – CORRENTE FOTOGERADA [A];
 I_s – CORRENTE DE SATURAÇÃO REVERSA DO DIODO [A];
 q – CARGA DO ELÉTRON ($1,6 \times 10^{-19} C$);
 V – TENSÃO APLICADA [V];
 n – FATOR DE IDEALIDADE ($1 \leq n \leq 2$);
 K – CONSTANTE DE BOLTZMANN ($1,38 \times 10^{-23} J/K$);
 T – TEMPERATURA [K];
 I_{ger} – CORRENTE NO MÓDULO FOTOVOLTAICO [A];
 I_{SC} – CORRENTE DE CURTO-CIRCUITO [A];
 I_s – CORRENTE DE SATURAÇÃO REVERSA DO DIODO [A];
 V – TENSÃO APLICADA [V];
 N_s – NÚMERO DE CÉLULAS EM SÉRIE;
 R_s – RESISTÊNCIA-SÉRIE (Ω);
 R_p – RESISTÊNCIA-PARALELO (Ω);
 n – FATOR DE IDEALIDADE ($1 \leq n \leq 2$);
 K – CONSTANTE DE BOLTZMANN ($1,38 \times 10^{-23} J/K$);
 T – TEMPERATURA [K];
 n_i – CONCENTRAÇÃO DE PORTADORES INTRÍNSECOS;
 n – CONCENTRAÇÃO DE ELÉTRONS;
 p – CONCENTRAÇÃO DE LACUNAS;
 K – CONSTANTE DE BOLTZMANN ($1,381 \times 10^{-23}$);
 E_g – ENERGIA DA BANDA PROIBIDA DO MATERIAL;
 T – TEMPERATURA ABSOLUTA (K);
 B – CONSTANTE APROXIMADA PARA OS SEMICONDUTORES ($\sim 10^{39} / CM^6$);
 I – INVESTIMENTO INICIAL;
 FC_t – FLUXO DE CAIXA NO T-ÉSIMO PERÍODO;
 K – CUSTO DO CAPITAL;
 N – PERÍODO CONSIDERADO;
 I – INVESTIMENTO INICIAL;
 RE – RECEITA FIXA OBTIDA EM DETERMINADO PERÍODO.

SUMÁRIO

Agradecimentos	v
Resumo	vii
Abstract	viii
Lista de Ilustrações	ix
Lista de Tabelas	x
Lista de Abreviaturas e Siglas	xi
Sumário	xiii
1 Introdução.....	1
1.1 Objetivos	3
1.2 Estrutura do Trabalho	3
2 Energia Solar Térmica e Fotovoltaica	4
2.1 Radiação Solar	4
2.2 Energia Solar no Mundo	8
2.3 Energia Solar no Brasil	11
2.4 Energia Solar Térmica	14
2.5 Energia Solar Fotovoltaica.....	17
2.5.1 Sistemas fotovoltaicos isolados	18
2.5.2 Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede.....	20
3 Tecnologias Fotovoltaicas	23
3.1 Célula Fotovoltaica	23
3.1.1 Princípio funcional de uma célula fotovoltaica	24
3.2 Geradores Fotovoltaicos	30
3.2.1 Curva característica (IxV) de um módulo fotovoltaico	31
3.3 Materiais Utilizados na Produção de Células Fotovoltaicas	34
3.3.1 Células de Silício Cristalino (c-Si)	34
3.3.2 Células de Silício monocristalino (m-Si).....	35

3.3.3	Células de Silício policristalino (p-Si).....	36
3.3.4	Célula de Silício amorfo	36
3.3.5	Células de filmes finos	38
3.3.6	Outras tecnologias	39
3.4	Garantias de módulos solares.....	41
4	Análise econômica e simulação de projetos fotovoltaicos	41
4.1	Introdução	42
4.2	Componentes de um sistema fotovoltaico.....	42
4.2.1	Módulo Fotovoltaico	42
4.2.2	Inversores	44
4.2.3	Dispositivos seguidores do ponto de máxima potência	47
4.3	Métodos de Análise Econômica.....	49
4.3.1	VPL – Valor Presente Líquido	50
4.3.2	TIR – Taxa interna de retorno	50
4.3.3	VFL – Valor Futuro Líquido	51
4.3.4	Payback.....	51
4.4	Composição da Tarifa de Energia Elétrica.....	51
4.5	Simulador de projetos fotovoltaicos América do Sol.....	52
4.5.1	Características e limitações do simulador solar	53
4.5.2	Projeto 1: análise de um projeto fotovoltaico instalado em Agrestina – PE.....	54
4.5.3	Projeto 2: análise de um projeto fotovoltaico instalado em Teresina – PI.....	58
4.6	Resultados e análise econômica.....	62
4.6.1	Análise econômica do projeto 1	63
4.6.2	Análise econômica do projeto 2	66
5	Conclusão	69
	Bibliografia.....	70

1 INTRODUÇÃO

No decorrer das últimas décadas o consumo de energia elétrica vem aumentando de maneira significativa e o desenvolvimento de fontes renováveis de energia assumiu um papel importante no cenário internacional. Dado que esse crescimento na demanda por energia está diretamente conectado à capacidade econômica de um país, torna-se indispensável o estudo da viabilidade econômica na implantação de sistemas renováveis em comparação com outras fontes de energia consideradas não renováveis.

Dentre as formas consideradas “limpas” de geração de energia elétrica a energia solar possui especial destaque devido a sua abundância na Terra, sobretudo em países como o Brasil, que devido as suas características climáticas apresenta um enorme potencial para o desenvolvimento da energia solar. Além do mais, o impacto ambiental causado pelos sistemas fotovoltaicos é considerado mínimo.

De uma maneira geral, pode-se dizer que praticamente todas as outras fontes de energia são oriundas do Sol. Basta observar as fontes mais comuns e importantes de energia como a hidráulica, biomassa, eólica, combustíveis fósseis e a energia dos oceanos, todas as formas indiretas de energia solar. A evaporação, consequência da atuação da energia solar, dá origem ao ciclo das águas possibilitando o represamento e geração de eletricidade em hidroelétricas. Os ventos que movem as turbinas eólicas e que geram energia são uma manifestação da energia solar já que se formam a partir da conversão da radiação solar em energia cinética. A geração de energia a partir de petróleo, gás e carvão é possível porque o que hoje são os resíduos responsáveis pela formação desses materiais antes foram os seres vivos que obtiveram do Sol recursos necessários para o seu desenvolvimento. O Sol também é responsável por fornecer energia para que materiais orgânicos realizem fotossíntese e que se desenvolvam para que posteriormente sejam transformados em biomassa geradora de energia.

De acordo com o Relatório Especial sobre Fontes Renováveis e Mitigação da Mudança Climática, publicado pelo IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change), a energia solar direta pode ser dividida em cinco grandes blocos: 1) solar passiva, onde está a arquitetura bioclimática; 2) solar ativa, composta por aquecimento e refrigeração solar; 3) solar fotovoltaica, para a produção de energia elétrica; 4) geração

de energia elétrica a partir de concentradores solares térmicos e; 5) um processo inspirado na fotossíntese com a utilização de geradores e que ainda não possui eficácia comprovada. (Pinho, João Tavares; Galdino, Marco Antonio;, 2014) No âmbito da engenharia, as formas de energia solar mais estudadas e aproveitadas são a solar térmica e a fotovoltaica, sendo essa última o tema principal do presente trabalho.

Através dos efeitos da radiação sobre determinados materiais ocorre à conversão direta de energia solar em energia elétrica. Particularmente os materiais semicondutores fabricados a partir de Silício dominam as principais tecnologias aplicadas na produção das células solares – unidade básica do processo de conversão de energia solar em energia elétrica – e dos chamados painéis fotovoltaicos, caracterizados por serem arranjos elétricos em série-paralelo das células solares.

Atualmente são bastante conhecidas duas categorias de sistemas fotovoltaicos: os sistemas isolados e os sistemas conectados à rede elétrica. A grande diferença entre esses dois tipos de sistemas está relacionada à necessidade ou não de um sistema acumulador de cargas, sendo na maioria das vezes utilizado um banco de baterias. Quando o consumo não acompanha à produção de energia gerada por um sistema fotovoltaico a inserção de um banco de baterias é indispensável o que acaba por encarecer ainda mais a instalação desse tipo de sistema. Esse tipo de necessidade ocorre nos sistemas fotovoltaicos isolados muito comuns em zonas onde o acesso à energia elétrica através de linhas de transmissão é difícil. (de O. M. Varella e Maia Gomes, 2009)

No caso dos sistemas conectados à rede elétrica, o consumidor pode utilizar a energia da rede elétrica para suprir sua demanda caso o sistema fotovoltaico não seja suficiente. No Brasil, através da resolução da Aneel de 17 de Abril de 2012, qualquer usuário, sendo pessoa física ou jurídica, pode gerar sua própria energia elétrica e caso haja excedente ele pode ser repassado para a rede de distribuição.

Outro importante componente presente em sistemas fotovoltaicos e comum tanto aos sistemas conectados à rede quanto aos sistemas isolados é o conversor de potência que atua como controlador de carga a fim de extrair a máxima potência do gerador fotovoltaico. Técnicas de monitoramento do ponto de máxima potência dos geradores vêm sendo amplamente estudadas com o intuito de melhorar a eficiência dos sistemas fotovoltaicos, o que implica diretamente na viabilização da sua instalação em termos de investimento.

O presente trabalho, além de apresentar uma visão técnica e econômica acerca da implantação de sistemas fotovoltaicos, analisará as últimas tecnologias e estudos relacionados aos esforços para aumentar a eficiência dos sistemas fotovoltaicos.

1.1 OBJETIVOS

Esse trabalho tem como objetivo fundamental fazer o estudo, dimensionamento, simulação e projeção da viabilidade econômica na implantação de um sistema solar fotovoltaico. Serão apresentadas as características e funcionalidades dos principais componentes de um sistema solar isolado além de novas tecnologias e ferramentas que podem auxiliar nas discussões sobre o tema.

1.2 ESTRUTURA DO TRABALHO

O presente trabalho está dividido em 6 capítulos. Dos quais, o presente Capítulo, se dedica a introdução sobre o tema que será discutido nos capítulos posteriores e define o objetivo geral do trabalho.

Os Capítulos 2 e 3 são responsáveis pela revisão bibliográfica utilizada no decorrer do trabalho. Sendo o Capítulo 2 o responsável por apresentar os conceitos mais gerais sobre energia solar, tanto a térmica como a fotovoltaica, onde foram tomados como referência trabalhos dedicados exclusivamente ao tema que enriqueceram os conhecimentos que serão utilizados no decorrer dos outros capítulos.

O Capítulo 3 é dedicado às discussões sobre as tecnologias das células fotovoltaicas e seus modelos matemáticos. São apresentadas tecnologias mais utilizadas na indústria atualmente e as promessas que ainda estão em testes de laboratório. Também serão abordados temas sobre a influência da tecnologia escolhida na eficiência do sistema fotovoltaico e apresentará discussões sobre as garantias de módulos fotovoltaicos.

No Capítulo 4 é feita a análise dos dados simulados através do Simulador Solar América do Sol. Não sem antes explicar algumas ferramentas de tomadas de decisão utilizadas no estudo de viabilidade dos projetos.

Finalmente, o Capítulo 5 conterá a conclusão obtida de todo o estudo realizado.

2 ENERGIA SOLAR TÉRMICA E FOTOVOLTAICA

Um dos maiores desafios econômicos da atualidade é a desigualdade entre a energia ofertada e a demandada pela sociedade. Utilizando uma fonte de energia inesgotável, a energia solar é uma alternativa promissora para esse desafio e se apresenta como a energia com menor impacto ambiental em comparação até com outras formas renováveis de energia. A concentração das aplicações da energia solar se estabelece basicamente em dois modos: a energia solar térmica, que com o uso de coletores é amplamente usada no aquecimento de água e a energia solar fotovoltaica, onde os investimentos no desenvolvimento de painéis fotovoltaicos são mais fortes.

2.1 RADIAÇÃO SOLAR

A energia radiante que incide sobre a superfície terrestre além de ser responsável pela manutenção da vida na Terra, quando captada de maneira adequada pode ser transformada em outras formas de energia como a térmica e a elétrica. O fenômeno da radiação consiste na emissão de ondas eletromagnéticas por um corpo com temperatura elevada

A estrutura do Sol, representada na Figura 1, é formada pelas regiões: núcleo, zona radiativa, zona convectiva, fotosfera, cromosfera e coroa. O núcleo central tem uma temperatura de 15 milhões de kelvin e é a região mais densa do Sol. É no núcleo onde através de reações termonucleares ocorre a transformação de energia. Ele está rodeado por uma camada onde está alocada a o que se conhece por zona radiativa. Circundando o núcleo encontra-se o envoltório convectivo.

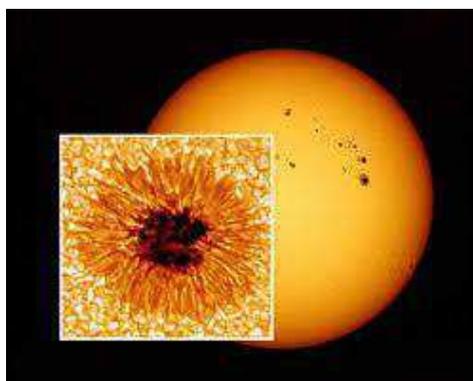
Figura 1. Estrutura solar. (Hetem e Pereira, 2007)



Segundo a Lei de Planck, um espectro contínuo é emitido pelas estrelas e expressa à radiação do corpo negro. No caso do Sol, as linhas de emissões são variáveis devido à temperatura e isso faz do seu espectro de emissão apenas semelhante ao de um corpo negro. A radiação emitida pelas reações termonucleares no núcleo solar é absorvida ao emergir das camadas mais internas para as mais externas, que estão em uma temperatura menor. A fotosfera é a região solar que é fonte da maior parte da radiação visível emitida pelo Sol.

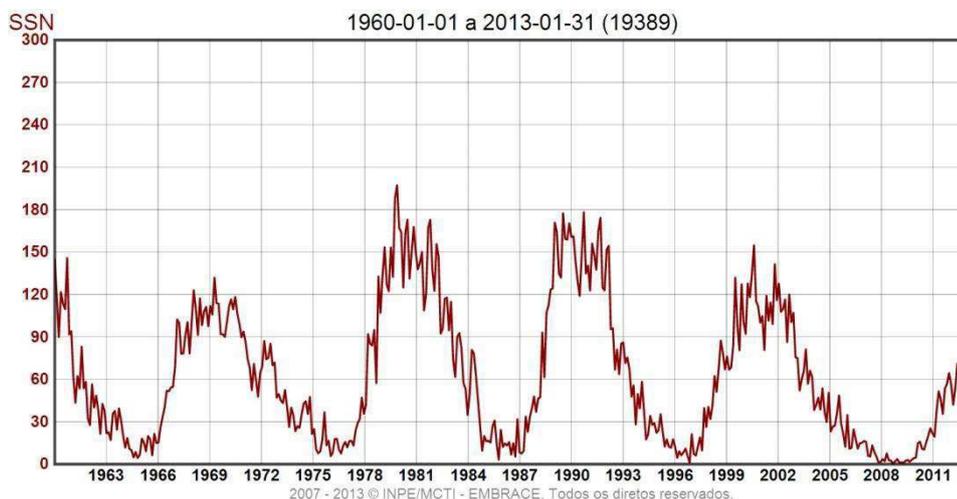
Ao chegar à fotosfera, a absorção da radiação ocorre de maneira seletiva devido aos átomos que a compõem. É na fotosfera que é observado o fenômeno das manchas solares. Essas manchas, que podem ser observadas na Figura 2, são regiões visivelmente mais escuras que foram formadas devido ao intenso campo magnético nessas zonas, de maneira que o transporte através da zona convectiva é inibido tornando a temperatura mais fria que a fotosfera solar.

Figura 2. Manchas solares. (UTFPR, 2012)



A Terra é influenciada pela existência das manchas solares. Através de observações das manchas solares, mais precisamente do seu deslocamento de leste para oeste, é possível determinar o período de rotação diferencial do Sol, pois o período de rotação nos polos solares é maior que no equador solar. As manchas solares também determinam o ciclo do Sol, que é função da rotação e da variação do campo magnético solar. Como dito anteriormente, tais manchas são indicadoras da intensa atividade magnética que existe no sol (0,1 a 0,4 T). Contando a quantidade de manchas presentes na superfície solar, notou-se que esse valor variava em máximos em ciclos de onze anos. Esses ciclos provocam alterações na irradiação emitida pelo Sol e que atinge a superfície da Terra provocando mudanças na atmosfera. (Hetem e Pereira, 2007).

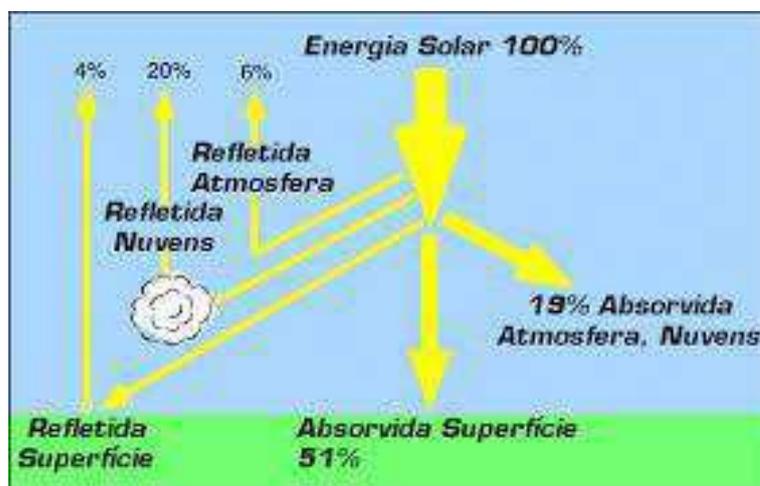
Figura 3. Ciclo solar. (Qualidade Online, 2012)



Nas regiões mais externas da atmosfera solar, os átomos e íons tornam-se excitados por colisão, devido às altas temperaturas, e quando retornam ao seu estado fundamental liberam energia na forma de linhas de emissão. Apenas uma parte mínima da radiação emitida pelo Sol atinge a superfície terrestre por conta da distância entre eles. Isso acontece porque ao atingir a atmosfera terrestre, devido ao efeito estufa, a radiação solar pode ser refletida, absorvida ou sofrer dispersão. Com a Figura 4, pode-se observar a distribuição percentual da radiação solar.

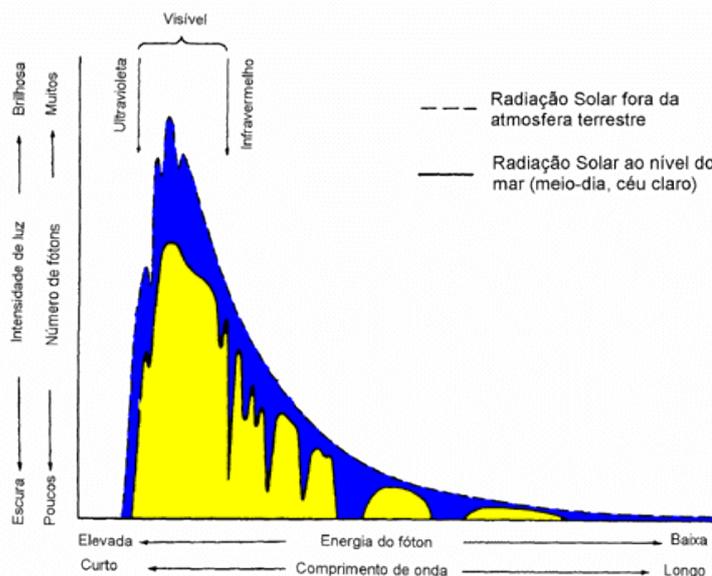
Figura 4. Distribuição percentual da radiação solar que atinge à Terra.

(Electronica-pt, 2010)



A forma como a radiação solar atinge a superfície terrestre está dividida da seguinte maneira: cerca de 55% da radiação são raios infravermelhos, 42% são radiações que apresentam espectro dentro dos limites de visibilidade (luz) e 3% na forma de raios ultravioletas (UV). As informações sobre a qualidade da radiação incidente na superfície terrestre são mostradas na Figura 5.

Figura 5. Intensidade espectral terrestre. (CRESESB, 2015)



Quando referenciado em termos do fluxo de potência, o termo radiação solar passa a ser denominado de irradiância solar, que é uma unidade mais específica. Em

termos de energia por unidade de área a radiação solar é dita irradiação solar, denominação bastante utilizada ao falar em sistemas fotovoltaicos. A unidade de irradiância solar é W/m^2 . Define-se a constante solar como o valor da irradiância solar que é medida quando incide num plano perpendicular à direção de propagação e tem o valor de $1,367 W/m^2$. Sendo o raio médio da Terra de 6371 km, sendo a irradiância incidindo sobre a área terrestre projetada em um plano, a potência total devido à radiação emitida pelo Sol que chega à superfície terrestre é de aproximadamente 174 mil TW. Dessa quantidade, cerca de 51% chega efetivamente à superfície terrestre, sendo o restante refletido pela atmosfera.

De acordo com dados de 2011, o consumo mundial de energia ficou em torno de 143 mil TWh. Dessa maneira, em duas horas de energia solar recebida na superfície terrestre, resultando em 177,5 mil TWh, a demanda mundial média de energia seria suprida. A Figura 6 compara o valor da energia oriunda da radiação solar incidente na superfície terrestre com o poder energético de outras formas de energia e os dados do consumo de energia em 2005. (Instituto Superior Técnico, 2004)

Figura 6. Energia da radiação solar x outras fontes x consumo mundial.
(Instituto Superior Técnico, 2004)



2.2 ENERGIA SOLAR NO MUNDO

A busca pela independência energética em relação a fontes de geração de energia não renováveis vem sendo um desafio constante da indústria mundial. Atualmente a oferta de energia mundial é formada majoritariamente por combustíveis fósseis, destacando-se o petróleo, o gás natural e o carvão. Em 1973, o mundo assistiu à

crise do petróleo devido aos embates com os países do Oriente Médio, donos de maior parte da produção do combustível. A crise foi responsável por um crescimento no interesse mundial pela energia solar, o que foi determinante para o desenvolvimento de novos equipamentos que se modernizaram nos dias de hoje. Nesse contexto o aproveitamento da energia solar como fonte alternativa na geração de energia passou a ter papel de destaque nas pautas de investimentos dos governos das principais economias do mundo. Na Figura 7 é mostrado como a matriz energética mundial está disposta atualmente e a Figura 8, a previsão para o ano 2035, segundo a Agência Internacional de Energia (AIE). Percebe-se que as energias primárias têm um peso significativo nessa distribuição, ressaltando a participação dos hidrocarbonetos e a ínfima parcela das energias renováveis, onde está inserida a energia solar. Apesar de, num futuro próximo, o cenário não mudar muito, a participação das energias renováveis tende a crescer. (Altino Ventura Filho, 2009)

Figura 7. Participação das diferentes fontes de energia em 2011 (Repsol, 2012).

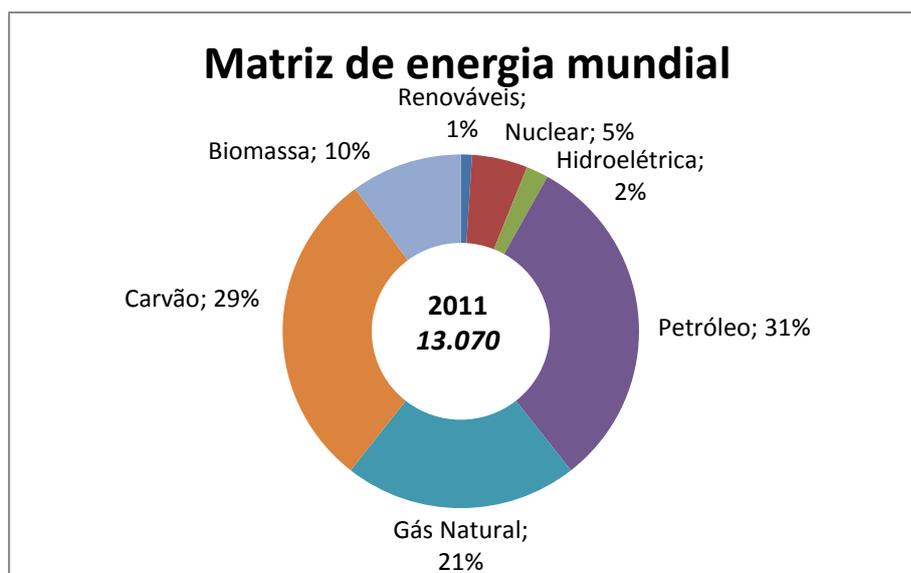
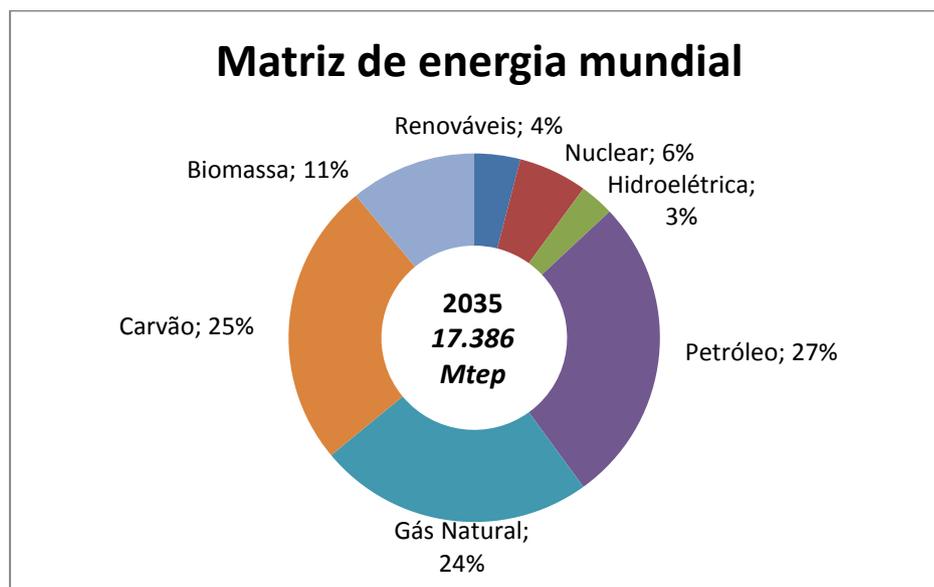


Figura 8. Previsão da matriz energética em 2035 (Repsol, 2012).



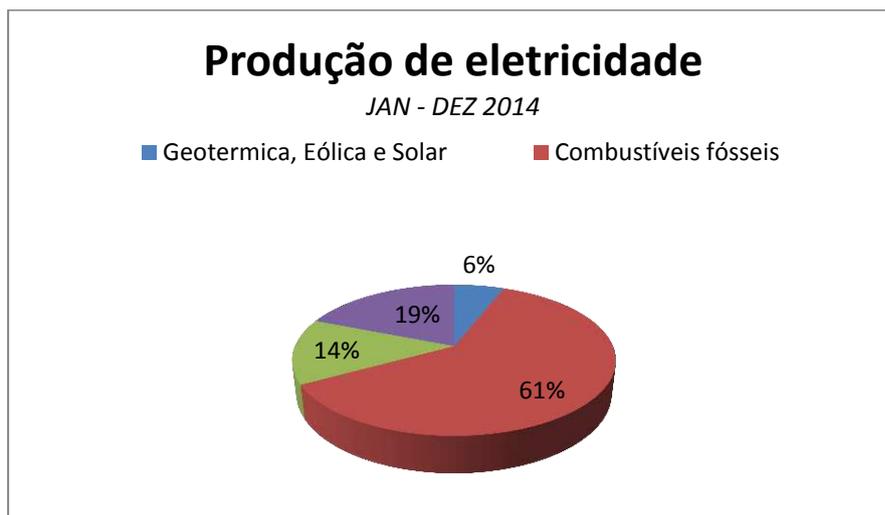
Ao passo que os temas ambientais criam cada vez mais força, a energia solar aparece como uma alternativa perfeita aos impactos que outras formas de energia provocam no meio ambiente. (Repsol, 2012)

Embora a energia solar ainda seja pouco utilizada para a produção de energia elétrica, os países desenvolvidos já a olham sob outras perspectivas. Diversos países já fornecem incentivos para que sistemas de geração a partir de energia solar sejam montados por pequenos consumidores e até por indústrias de grande porte. Em Israel, por exemplo, 70% das casas têm placas coletoras para o aquecimento de água. Com projetos mais arrojados, Japão, Alemanha e Estados Unidos já desenvolvem veículos movidos à energia solar. No caso alemão, o investimento é massivo. Desde 2000 o governo oferece subsídio para o cidadão que desejar instalar uma placa solar em sua residência e permite que o excedente seja vendido a preços competitivos. Segundo o diretor de um comitê de energia renovável alemão, no dia 26 de Maio de 2012 a Alemanha registrou uma produção de 22 gigawatts de potência usando a luz solar. Esse valor corresponde a uma produção 50% maior que a produção de Itaipú, por exemplo.

Quando o tema é a geração de energia elétrica em particular, vem havendo uma diminuição na participação dos combustíveis fósseis na matriz de produção de energia elétrica mundial. Muito disso é resultado dos esforços por energias limpas e pelo endurecimento nas leis ambientais o que obriga as grandes corporações a investir cada vez mais em outras formas de produção a fim de reduzir a dependência por fontes não

renováveis. Na Figura 9 está ilustrada a produção de energia elétrica em relação às fontes de energia de acordo com os dados do relatório da AIE para o ano de 2014 nos países que fazem parte da Organização para Cooperação e Desenvolvimento Econômico (*Organisation for Economic Co-operation and Development - OECD*). É possível observar a forte presença da produção de energia elétrica a partir de combustíveis fósseis, dos quais o carvão mineral é a principal fonte de energia.

Figura 9. Capacidade instalada de energia elétrica no mundo (Repsol, 2012).



De acordo com pesquisas realizadas recentemente pelo DOE – *Department of Energy* – dos Estados Unidos, a previsão para o cenário energético mundial não vai mudar significativamente nos próximos 20 ou 30 anos. Porém, mesmo que pequena, haverá uma redução na produção de energia elétrica a partir de combustíveis fósseis e há um aumento da participação das fontes renováveis, em torno de 10% a 15%. (International Energy Agency, 2014)

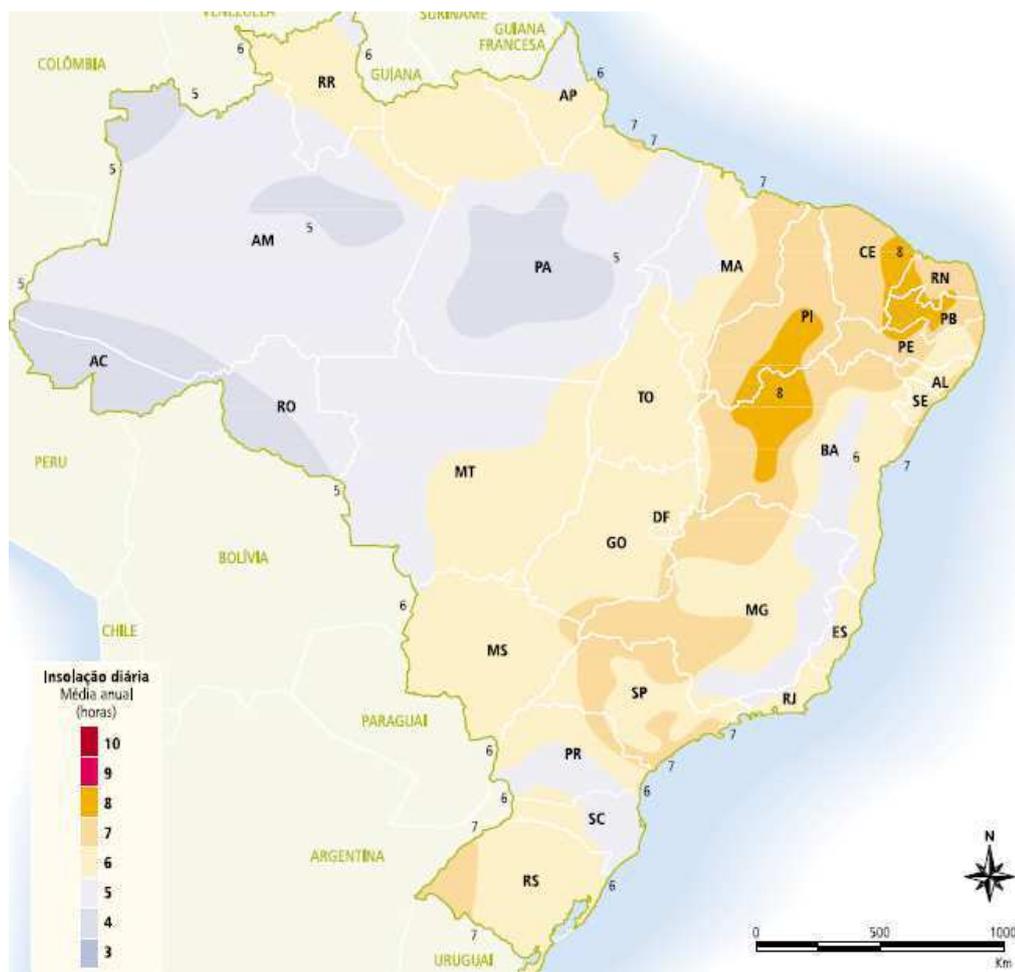
2.3 ENERGIA SOLAR NO BRASIL

A localização brasileira permite que o país disponha de um alto potencial para a geração de eletricidade por meio da energia solar. A média anual de insolação que o Brasil recebe é elevada quando comparada com outros países do mundo, sobretudo os europeus, onde o investimento em produção de energia elétrica a partir de energia solar é muito grande. O país tem experimentado um crescimento nas pesquisas, gerando mais

energia a partir do sol. O Instituto Nacional de Tecnologia (INT) e o Centro de Aeronáutica (CTA), já desenvolvem módulos fotovoltaicos desde a década de 50.

Na Figura 10 é possível perceber que a quantidade de horas de sol que o Brasil recebe é grande, o que faz do território brasileiro um potencial local para investimentos na área de energia solar.

Figura 10. Insolação média anual no Brasil (Chigerú Tiba, 2000).



O Brasil tem em sua matriz energética uma quantidade considerável de energia dita como limpa e renovável. Segundo (Altino Ventura Filho, 2009) cerca de 45% da matriz energética brasileira é composta por fontes renováveis de energia. Porém, a grande participação no percentual das fontes renováveis fica por conta das hidroelétricas. As políticas públicas para o incentivo do desenvolvimento da energia solar em território tupiniquim ainda são tímidas. De acordo com (Melo, 2014) anualmente o Brasil é receptor de 10^8 MWh de energia. Esse valor é 50 mil vezes maior do que o consumo anual nacional de eletricidade. A Figura 11 traz a matriz energética

brasileira em 2013 de acordo com a participação das diferentes fontes de energia. É notável a dependência que o país ainda tem de fontes não renováveis de energia, já que o petróleo e seus derivados possuem a maior fatia da produção de energia, seguidos pela Biomassa, com grande participação da cana-de-açúcar.

Figura 11. Matriz energética brasileira (FDC, 2013).

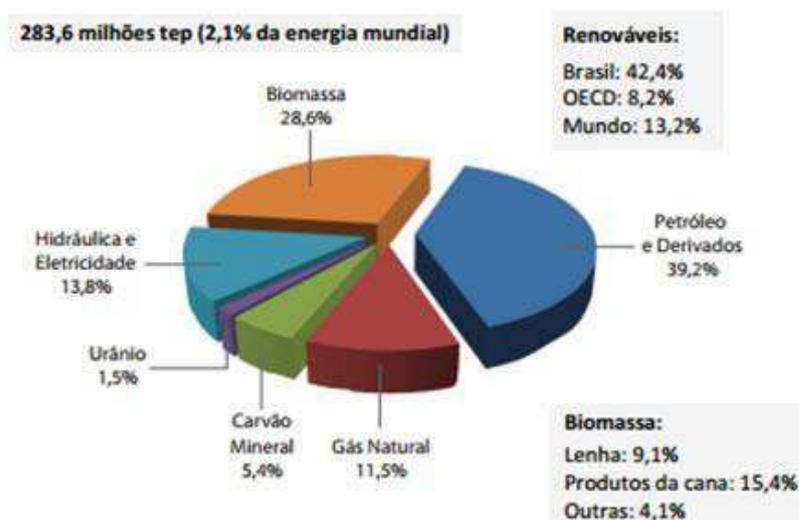
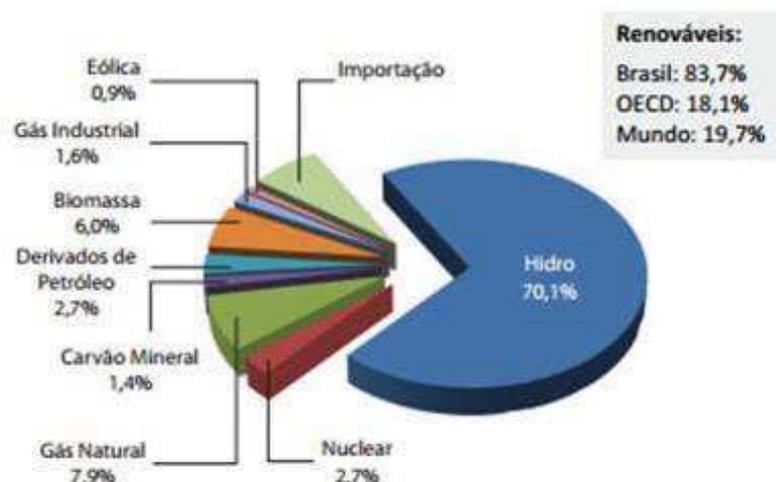


Figura 12. Capacidade instalada brasileira (FDC, 2013).



Os dados de 2013 da capacidade instalada brasileira, Figura 12, ainda trazem outro fato importante: o percentual de energia solar utilizado para a geração de energia elétrica foi tão baixo nesse ano que nem aparece no gráfico. Isso mostra a importância dos investimentos no setor para que esse padrão seja revertido.

Pesquisas importantes vêm sendo realizadas ao longo dos anos com o intuito de que o aproveitamento dessa disponibilidade solar que o Brasil tem seja mais efetivo. Dentre as mais importantes vale ressaltar a iniciativa da Universidade Federal de Pernambuco (UFPE) em parceria com a Companhia Hidrelétrica do São Francisco (CHESF) e com o Centro de Referência Brito (CRESESB) que desenvolveram o Atlas Solarimétrico do Brasil (2000), apresentando uma estimativa da radiação solar incidente no país analisando os dados em estações solarimétricas de vários pontos do país. Os resultados foram obtidos através de interpolação e extrapolação desses dados.

Programas de incentivo são propostos no país, porém o que foi feito até agora não tem sido suficiente para garantir o desenvolvimento de um mercado para este tipo de aplicação, já que faltam políticas públicas específicas de longo prazo. O que de verdade existe é um estímulo fiscal para a aquisição de alguns equipamentos que fazem parte de um sistema fotovoltaico. (Chigerú Tiba, 2000)

2.4 ENERGIA SOLAR TÉRMICA

A energia solar térmica provavelmente é uma das formas mais simplificadas de aproveitamento solar para fins de geração de eletricidade. Os sistemas que utilizam esse tipo de configuração também recebem o nome de sistemas de aquecimento solar ativo e o interesse dessas aplicações se concentra na quantidade de energia que um corpo é capaz de absorver na forma de calor. As aplicações desses sistemas ocorrem principalmente por meio de duas configurações: com o uso de coletores planos ou de coletores concentradores. Um coletor solar nada mais é do que um aquecedor de fluido, podendo esse ser líquido ou gasoso. Normalmente também faz parte do sistema um reservatório responsável por armazenar o fluido aquecido até que seja totalmente utilizado.

No caso dos coletores solares planos, a principal aplicação é para o aquecimento de água de residências e edificações, porém, já se encontram sistemas com coletores planos em prédios públicos também. Nessas configurações, os coletores são alocados nos tetos das residências normalmente e aquecem água a uma temperatura em torno de 70°C, a depender da localização geográfica. A Figura 13 exemplifica um coletor solar plano.

Figura 13. Sistema para aquecimento de água com coletor solar plano (Mundo Educação, 2014).



Para temperaturas superiores a 100°C são utilizados os coletores concentradores. Esses coletores captam a energia solar incidente em uma área grande e a concentram numa área muito menor utilizando uma superfície refletora com forma parabólica, podendo a temperatura atingir quantidades superiores a 400°C . Essa configuração é utilizada principalmente para o acionamento de motores a vapor para posterior geração de energia elétrica. A grande desvantagem se encontra na calibração desses sistemas, uma vez que é necessário focalizar os coletores com o uso de dispositivos adicionais.

Países desenvolvidos vêm investindo bastantes em sistemas para o aquecimento de água. Um exemplo é o sistema com coletores parabólicos instalado no final da década de 80 no sul da Califórnia. Nove sistemas foram instalados com potências que variava entre 14 MW e 80 MW, sendo a potencia total instalada alcançando 354 MW. Nesse caso os sistemas são híbridos e têm gerado eletricidade com custos entre US\$ 90 e US\$ 280 por MWh. Folhas circulares de filme plástico têm substituindo os pesados espelhos dos coletores com a finalidade de aumentar a eficiência de conversão e reduzir os custos (ANEEL, 2005). A Figura 14 ilustra a presença de coletores concentradores no sistema instalado na Califórnia.

Figura 14. Coletores solares concentradores em usina na Califórnia. (ANEEL, 2005)



De acordo com (Rede de Políticas de Energia Renováveis para o Século XXI, 2012) no mundo, quando se contabilizou apenas a potência instalada para aquecimento de água o valor atingiu GW no final de 2011. Segundo a mesma fonte, mais de 200 milhões de residências no mundo usam coletores solares para aquecimento de água. No caso brasileiro, a área em uso com coletores solares atingiu 8,49 milhões de m², superando 5,7 GW. É importante destacar que apenas em 2012, houve um crescimento de 1,15 milhão de m². Na Figura 15, observa-se como o mercado brasileiro evoluiu no setor de aquecimento solar na última década. Na Figura 16, é apresentada a capacidade instalada total de energia solar para aquecimento no mundo em 2010.

Figura 15. Evolução da energia solar térmica na última década no Brasil. (Pinho, João Tavares; Galdino, Marco Antonio;, 2014)

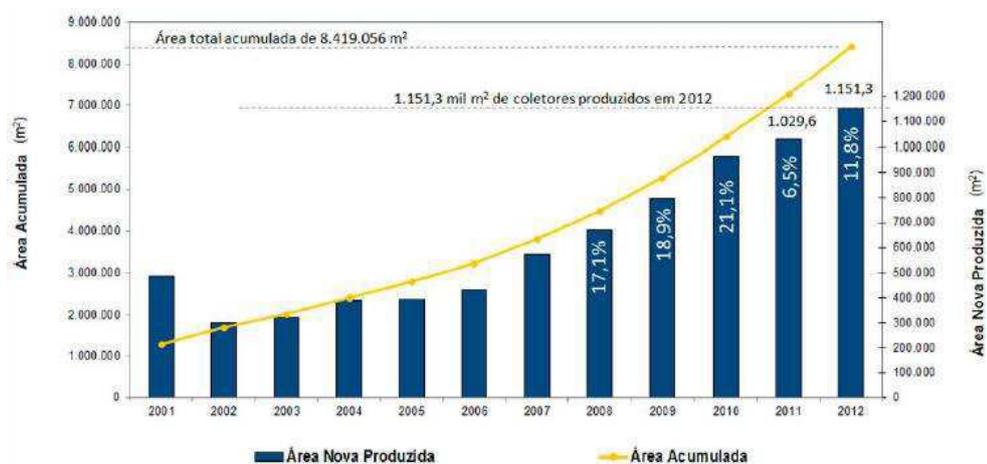
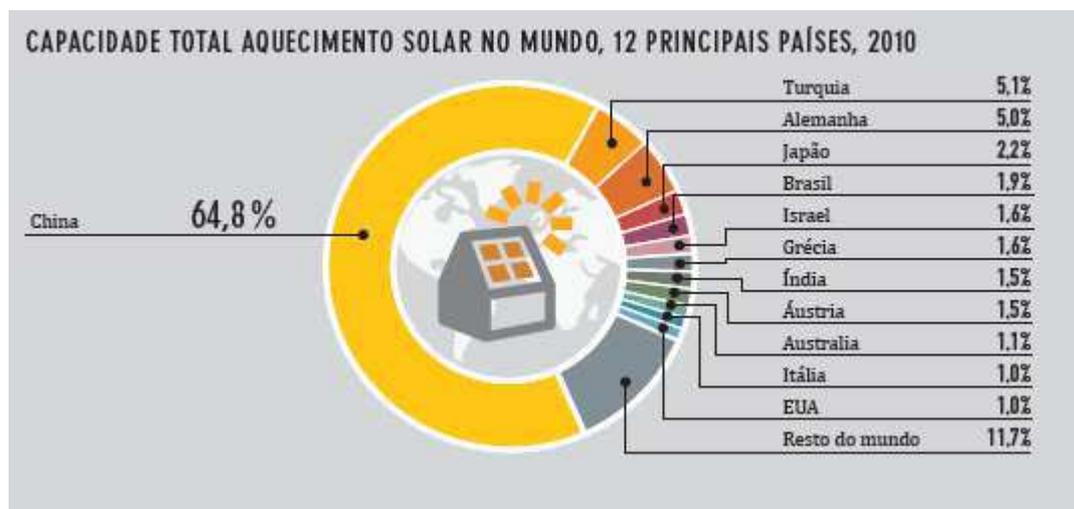


Figura 16. Capacidade instalada de aquecimento solar no mundo em 2010.
(Rede de Políticas de Energia Renováveis para o Século XXI, 2012)

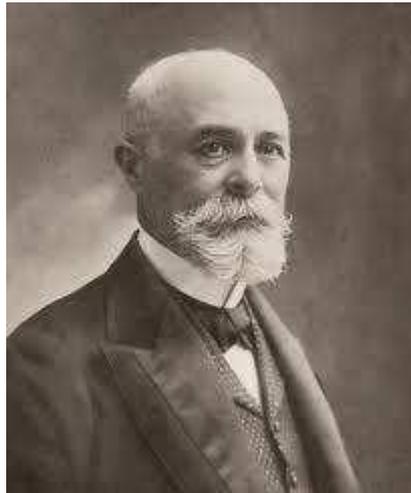


2.5 ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA

A energia solar fotovoltaica está vinculada ao aproveitamento da radiação solar para a geração de energia elétrica. Essa conversão é realizada através de painéis fotovoltaicos fabricados a partir de materiais especiais, que ao receberem a incidência de calor e luz convertem essa energia em energia elétrica.

Na presença de luz os elétrons absorvem energia e em alguns materiais essa excitação causada pela absorção de energia é responsável pelo efeito fotovoltaico. Esse efeito foi descoberto em 1839 pelo físico francês Antoine Henri Becquerel, que ao iluminar uma solução ácida percebeu o surgimento de uma diferença de potencial entre os eletrodos que estavam imersos na solução. Os primeiros dispositivos a utilizar o efeito fotoelétrico datam de 1883 e foram desenvolvidos por C.E. Frits e fabricados com selênio. Com o advento dos dispositivos semicondutores em 1950 as primeiras células fotovoltaicas foram fabricadas nos Laboratórios Bell, nos Estados Unidos. Na época, a eficiência de conversão alcançada foi algo em torno de 6%.

Figura 17. Antoine Henri Becquerel. (Melo, 2014)



O preço da produção de energia a partir de células fotovoltaicas também evoluiu com o passar do tempo. Para se ter uma ideia, no início da década de 70 um watt-pico, que é a unidade padrão de potência nas condições de ensaio, era vendido por US\$ 150 nos Estados Unidos e Europa. Já no final de 2013, em grande escala, o preço do Wp atingiu 0,60 €/Wp. (de O. M. Varella e Maia Gomes, 2009)

Existem duas configurações principais na utilização de sistemas fotovoltaicos. A primeira delas está relacionada aos sistemas isolados, que necessitam de um acumulador para a energia gerada. A segunda categoria, amplamente estudada e com mais investimento no seu desenvolvimento, refere-se aos sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica, nesse caso, o uso de um sistema acumulador é dispensado.

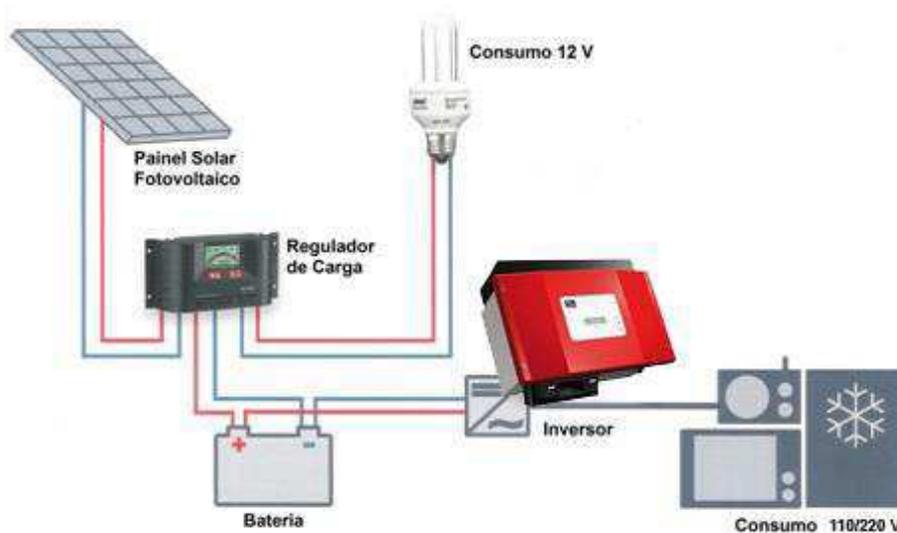
2.5.1 SISTEMAS FOTOVOLTAICOS ISOLADOS

Esse tipo de configuração atende principalmente localidades isoladas, onde a rede elétrica não conseguiu chegar e é utilizado principalmente para iluminação e refrigeração residencial, bem como para cargas com baixo consumo de energia. É comum observar nessa configuração a presença de outras fontes de energia trabalhando em conjunto com a geração fotovoltaica, nesse caso os sistemas são conhecidos como sistemas híbridos.

Como dito anteriormente, Sistemas Fotovoltaicos Isolados (SFI), híbridos ou não, necessitam de um sistema de armazenamento da energia gerada. Normalmente esse armazenamento é feito através de um banco de baterias responsável por suprir a energia demandada quando a geração fotovoltaica não está disponível (período noturno ou de

ausência de sol). Além do sistema de armazenamento, os SFI também possuem unidades responsáveis pelo controle e pelo condicionamento da potência gerada compostas por um inversor e um controlador de carga. A Figura 18 ilustra a configuração de um SFI.

Figura 18. Unidades de um Sistema Fotovoltaico Isolado básico. (Viridian, 2012).



No Brasil, os SFI passam a ser economicamente viáveis em locais onde a expansão da rede elétrica se torna muito cara para que haja o atendimento do consumidor, é o caso de residências rurais onde a necessidade é apenas de iluminação básica e poucos aparelhos domésticos. Mais expressivo é o uso de SFIs para bombeamento de água por meio de programas institucionais que abastecem comunidades rurais localizadas em zonas remotas.

Números de 2002 do relatório desenvolvido por *Winorck International – Brazil* indicam que mais de 40 mil sistemas fotovoltaicos autônomos foram instalados no Brasil com finalidade de abastecer zonas remotas do país. A viabilização desses sistemas acontece pelo incentivo das concessionárias à pesquisa e instalação de tais sistemas através de centros de pesquisas estaduais e municipais. O Governo Federal incentiva à instalação de sistemas fotovoltaicos isolados através do Programa Luz no Campo.

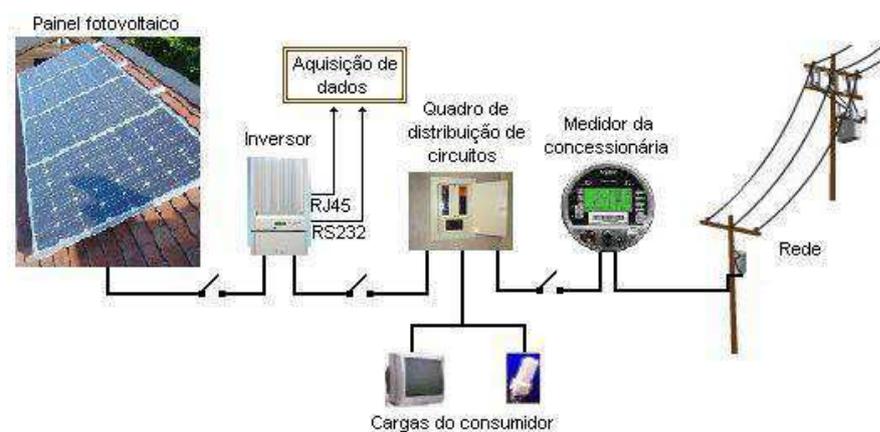
O Programa de Desenvolvimento Energético de Estados e Municípios (PRODEEM) tem instalado cada vez mais sistemas isolados em comunidades isoladas. Dados de 2001 revelam que na última década do milênio passado o PRODEEM foi responsável por cerca de 25% da capacidade instalada de sistema fotovoltaicos no Brasil, quando a capacidade total girava em torno de 20MW. (de O. M. Varella e Maia Gomes, 2009)

2.5.2 SISTEMAS FOTOVOLTAICOS CONECTADOS À REDE

Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede (SFCR) é a tecnologia que mais apresenta crescimento e redução de custos. Em 2030 prevê-se que a energia gerada por esses sistemas poderá competir com a geração de energia elétrica convencional, com as tarifas sendo cada vez mais reduzidas.

Esses sistemas se caracterizam pela ausência da unidade acumuladora da energia gerada. Em outras palavras, a energia produzida pelo gerador fotovoltaico que não é utilizada pelas cargas, é entregue diretamente à rede da concessionária de energia. Nesse sentido, um dispositivo importante dessa configuração é o inversor de frequência, que vai transformar a corrente contínua gerada pelo efeito fotovoltaico em corrente alternada de modo que não degrade a qualidade do sistema elétrico ao qual o sistema está interligado.

Figura 19. Sistema Fotovoltaico Conectado à Rede (Solenerg).



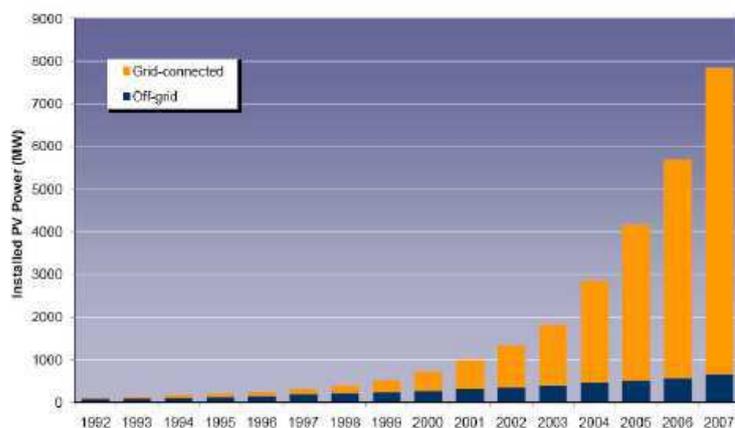
Duas formas de conexão diferenciam os SFCRs. A primeira é caracterizada pela geração fotovoltaica de energia elétrica para um determinado consumidor que, caso necessite, pode utilizar à rede elétrica convencional para suprir sua demanda. Quando a

geração de energia for maior que sua necessidade, ele pode vender o excedente à concessionária de energia elétrica. Sistemas desse tipo são conhecidos como Sistemas Fotovoltaicos Distribuídos Conectados à Rede Elétrica. Tais sistemas podem ser instalados de maneira integrada a uma edificação, perto do centro de consumo não necessitando de áreas extras para sua instalação.

A outra maneira de conexão diz respeito aos Sistemas Fotovoltaicos Centralizados Conectados à Rede Elétrica. São estações centralizadas de energia e não estão associadas a um cliente em particular e são instalados a certa distância do ponto final de consumo.

Os sistemas fotovoltaicos no mundo têm experimentado uma queda nos custos dos materiais que os compõem. Segundo (de O. M. Varella e Maia Gomes, 2009), a capacidade instalada passou de 110 MWp em 1993 para 7.841 MWp em 2007, porém observa-se uma concentração dessa capacidade em quatro países: Alemanha, Japão, EUA e Espanha, acumulando cerca de 93% da capacidade instalada mundial. Estima-se que os custos cairão ao ponto de transformar a energia gerada através de sistemas fotovoltaicos competitiva em relação às tarifas que hoje praticam as concessionárias de energia elétrica convencional. A Figura 20 apresenta a evolução dos sistemas fotovoltaicos no mundo até 2007.

Figura 20. Potência acumulada instalada de sistemas fotovoltaicos em países no mundo conectados ou não à rede elétrica, em MW. (de O. M. Varella e Maia Gomes, 2009)



No Brasil e no mundo, a geração fotovoltaica ainda é considerada um fenômeno novo. As principais aplicações no país são relativas à telecomunicação, à eletrificação rural, aos serviços públicos e ao bombeamento de água. Porém, o potencial de irradiação solar brasileiro é duas vezes maior que o potencial da Alemanha, que é o país

líder nessa tecnologia. A Tabela 1 mostra a comparação da capacidade instalada de sistemas fotovoltaicos e do potencial solar entre Alemanha, Espanha e Brasil com dados de 2009. É possível observar o pouco aproveitamento do potencial solar brasileiro.

Tabela 1. Capacidade instalada de sistemas fotovoltaicos e potencial solar de Alemanha, Espanha e Brasil. (de O. M. Varella e Maia Gomes, 2009)

	Alemanha	Espanha	Brasil
Capacidade Instalada (MW)	3.800	451	0,152
Potencial (KWh/m ² .ano)	900	1800	1950

Através da Resolução Normativa 482 da Aneel, publicada em 17 de Abril de 2012, qualquer cidadão brasileiro pode gerar sua própria energia e repassar o excedente para a rede de distribuição. Tal Resolução é considerada um grande avanço no que diz respeito aos sistemas distribuídos no país, que a cada ano ganha mais força.

3 TECNOLOGIAS FOTOVOLTAICAS

A transformação direta de eletricidade a partir da luz solar é feita através das células solares. No processo de construção dessas células solares, que também são conhecidas como células fotovoltaicas, são utilizados materiais semicondutores como o silício, o arsenieto de gálio, teluriato de cádmio ou disseleniuto de cobre e de índio, sendo as células fabricadas com silício as mais utilizadas atualmente.

3.1 CÉLULA FOTOVOLTAICA

A unidade fundamental para a produção de energia elétrica a partir da energia solar é a célula fotovoltaica ou célula solar. A produção industrial desses equipamentos iniciou-se em 1956, com o desenvolvimento da microeletrônica, e de lá até os dias de hoje muito tem sido feito com o intuito de aumentar a eficiência na geração de energia elétrica a partir dos efeitos fotovoltaicos.

O primeiro papel importante das células fotovoltaicas foi na indústria espacial, o que foi fundamental para o incentivo no estudo de novas tecnologias para o aprimoramento do processo de fabricação das células: a eficiência aumentou e o peso diminuiu. Em 1973, com a crise do petróleo, outro impulso foi dado no contexto das energias solar fotovoltaicas. Com crise energética as economias mais fortes do mundo decidiram que as aplicações das células fotovoltaicas e da energia fotovoltaica no geral não deveria se restringir apenas a programas espaciais, senão também no meio terrestre para suprir o fornecimento de energia à população.

Nos dias de hoje já é possível ver aplicações de sistemas fotovoltaicos em vários projetos sociais, principalmente para o suprimento de energia em áreas remotas. Destacam-se a facilidade de instalação, o baixo custo de manutenção e a vida útil longa como fatores preponderantes na decisão do uso desse tipo de tecnologia frente a outras tecnologias renováveis.

Dentre as tecnologias que foram desenvolvidas nos últimos 60 anos para a produção de células fotovoltaicas, as fabricadas com lâminas de silício cristalino são as

mais utilizadas no mercado atualmente. Mais adiante detalhar-se-á mais sobre os tipos de materiais utilizados na produção de células solares.

3.1.1 PRINCIPIO FUNCIONAL DE UMA CÉLULA FOTOVOLTAICA

As células solares, como dito anteriormente, são construídas a partir de material semicondutor. Esses materiais apresentam características intermediárias entre um condutor e um isolante. Observando a tabela periódica, é possível identificar os materiais semicondutores nos grupos 14 a 16, entre eles estão o Carbono (C), Silício (Si), Germânio (Ge), Arsênio (As), Fósforo (P), Selênio (Se) e Telúrio (Te). Os materiais semicondutores apresentam uma banda de valência totalmente preenchida por elétrons e uma banda de condução sem elétrons no zero absoluto, ou seja, a 0 K um semicondutor se comporta como um material isolante.

O que caracteriza um material em condutor, isolante ou semicondutor é a sua banda de energia. Na Figura 21 é possível ver a estrutura da banda de energia para os materiais isolantes, condutores e semicondutores, respectivamente.

Figura 21. Estrutura das bandas de energia em sólidos. (Pinho, João Tavares; Galdino, Marco Antonio;, 2014)

Bandas de Energia



a) isolante b) condutor c) semicondutor

Entre a banda de valência e a banda de condução existe um espaço chamado de banda proibida (ou *gap*). No caso dos isolantes, os elétrons têm seus níveis de energia na banda de valência e é necessária uma energia muito grande para que a banda proibida

seja vencida, atingindo a banda de condução, onde os níveis de energia permitem que os elétrons se libertem do átomo (elétrons livres) e passem a conduzir.

Nos condutores, as bandas de valência e de condução estão sobrepostas, de maneira que à temperatura ambiente elétrons da banda de valência podem atingir níveis de energia correspondente à banda de condução e na presença de um campo elétrico se deslocam produzindo uma corrente elétrica. (GEOCITIES)

Os materiais semicondutores, por sua vez, possuem uma largura de banda proibida relativamente pequena, com valores menores que 3 eV. Tomando como exemplo o silício, amplamente utilizado na indústria eletrônica e na fabricação de células solares, a energia necessária para que a banda proibida seja vencida à temperatura de 0 K é de 1,21 eV. Quando em temperatura ambiente, não é possível quem elétron passe da banda de valência para a banda de condução, porém, com o aumento da temperatura é possível que alguns elétrons sejam transportados para a banda de condução na presença de um campo elétrico externo e o material passa a ser ligeiramente condutor, ou seja, ele se torna um semicondutor. A Tabela 2 mostra valores da banda proibida E_g para alguns materiais semicondutores. (Pinho, João Tavares; Galdino, Marco Antonio;, 2014)

Tabela 2. Valores de energia da banda proibida de materiais semicondutores. (Pinho, João Tavares; Galdino, Marco Antonio;, 2014)

Material	Grupo	E_g (eV)
Si	Elemento	1,12
Ge	Elemento	0,66
GaAs	III – V	1,43
InSb	III – V	0,18
InP	III – V	1,35
GaP	III – V	2,26
CdS	II – IV	2,42
PbS	II – IV	0,35
PbTe	II – IV	0,30
CdTe	II – IV	1,45

Anteriormente foi dito que um material semiconductor tem sua condutividade aumentada devido ao aumento da temperatura, que proporciona uma excitação térmica nos elétrons e esses são capazes de deixar a banda de valência e atingir a banda de condução. Quando isso ocorre, na banda de valência são deixadas lacunas, que também são portadores de cargas, porém com uma mobilidade cerca de um terço menor que a dos elétrons na banda de condução. O número de elétrons que ocupa a banda de condução é igual ao número de lacunas que são deixadas na banda de valência, em temperaturas acima de 0 K. Esses são os denominados portadores intrínsecos e sua concentração é dada pelas equações abaixo. Considere como exemplo o átomo de Si, que tem uma concentração de portadores intrínsecos, n_i , de $1,45 \times 10^{10}/\text{cm}^3$ a 300 K.

$$n_i^2 = B \cdot e^{-\frac{E_g}{kT}} \quad (1)$$

$$n = p = n_i \quad (2)$$

Definindo:

n_i – concentração de portadores intrínsecos;

n – concentração de elétrons;

p – concentração de lacunas;

k – constante de Boltzmann ($1,381 \times 10^{-23}$)

E_g – Energia da banda proibida do material.

T – Temperatura absoluta (K)

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

Portadores também podem ser gerados devido à energia cinética de partículas que atingem o material, fenômeno conhecido como ionização por impacto. Dessa maneira, fótons incidentes no material semiconductor, com energia superior à energia da banda proibida podem gerar pares elétron-lacuna, caracterizando o efeito fotoelétrico. Sabe-se da literatura que a energia de um fóton está associada à cor da luz:

$$E_f = h \cdot f \quad (3)$$

Onde:

E_f – energia do fóton (J);

h - constante de Planck (J.s);

f – frequência da luz (Hz).

A presença desses elétrons e lacunas gerados devido ao impacto de fótons no material aumenta sua condutividade elétrica (efeito fotocondutivo). A condução no que ocorre nos materiais semicondutores devido à temperatura e à incidência de fótons é chamada de autocondução. Para gerar energia, a autocondução não é suficiente. Nesse caso, os átomos dos semicondutores precisam passar por um processo industrial que insere elétrons livres em sua estrutura, que são conhecidos como condutores extrínsecos. Tal processo é denominado dopagem de semicondutores. (Nascimento, 2004)

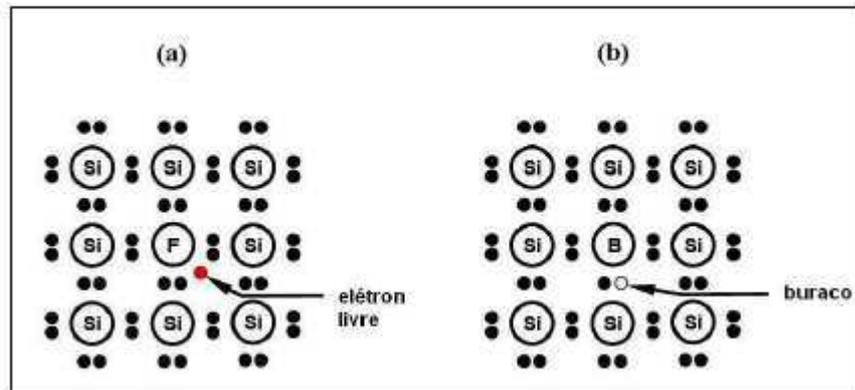
Cada átomo de silício contém quatro elétrons na camada de valência e compartilham esses elétrons através de ligações covalentes. Essa configuração forma um retículo cristalino que não conduz eletricidade.

A dopagem transforma o semicondutor em um bom condutor de eletricidade modificando a estrutura atômica do cristal, acrescentando ou retirando elétrons dele. O processo de dopagem pode ser de duas maneiras: utilizando substâncias pentavalentes ou trivalentes.

Quando um átomo de silício é substituído por um elemento pentavalente (com cinco elétrons na camada de valência), como o fósforo (P) ou o arsênio (As), por exemplo, um dos elétrons do elemento pentavalente não forma ligação covalente com o átomo de silício e conseguem romper facilmente sua ligação com o núcleo pentavalente na presença de uma pequena quantidade de energia. Nesse caso, o átomo pentavalente é denominado doador e esses materiais que transportam cargas através de elétrons são chamados de materiais do tipo-n.

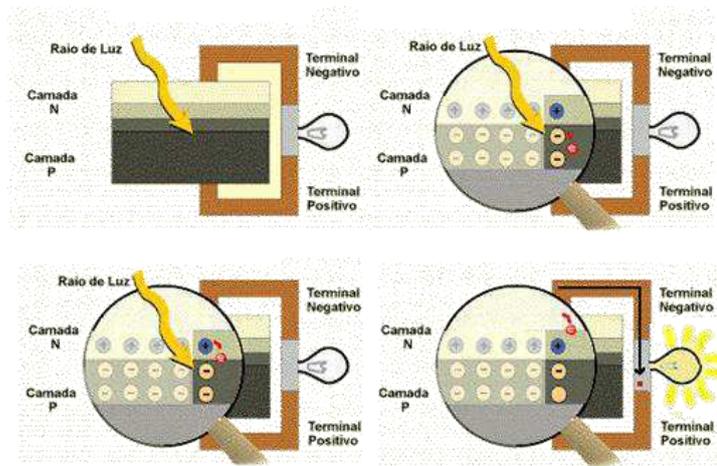
Quando o átomo substituto do silício é um átomo trivalente, um dos elétrons do silício não formará ligação covalente, fazendo surgir uma lacuna ou ausência de elétron na formação das ligações. É o que acontece quando o átomo utilizado na dopagem é o boro (B), por exemplo. Essa lacuna gerada pode ser ocupada por outro elétron, que deixará uma lacuna no seu lugar de origem e o transporte de carga acontecerá por meio das lacunas. O material formado nesse processo é dito material tipo-p. A Figura 22 ilustra os dois processos de dopagem descritos.

Figura 22. Dopagem em materiais semicondutores. (Rocha, 2008)



Uma célula solar é composta de uma fina camada de material do tipo-n e com outra camada mais espessa de material do tipo-p. Quando unidas, essas camadas formam um campo elétrico devido aos elétrons do material tipo-n que sofrem difusão em direção ao material tipo-p. Esse campo elétrico impede que essa corrente por difusão continue indefinidamente. No equilíbrio, uma zona de depleção – onde o número de portadores de carga é praticamente nulo - é formada na junção pn e passa a existir um campo elétrico e uma diferença de potencial nessa região. Quando uma junção do tipo pn é exposta à luz, os fótons são absorvidos pelos elétrons. Ao absorverem essa energia, os elétrons são libertados e passam a transportar cargas orientadas pelo campo elétrico da junção pn, ou seja, os elétrons partem da camada tipo-p para a camada tipo-n. Conectando um condutor externo da camada negativa à positiva, enquanto houver luz incidente, um fluxo de elétrons ou uma corrente elétrica existirá. Essa sequência de fenômenos descreve o efeito fotovoltaico aproveitado por células solares. Na Figura 23 pode-se ver uma sequência de ilustrações que culmina na geração de eletricidade a partir da incidência de luz em um material semicondutor. (Rocha, 2008)

Figura 23: Efeito fotovoltaico (CRESEB, 2014).

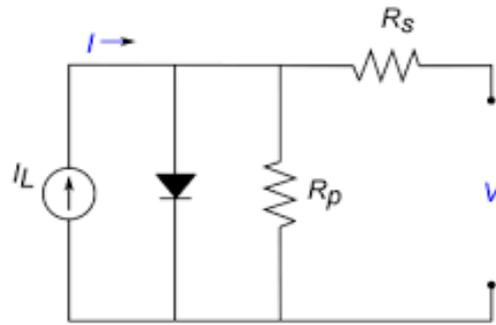


O fluxo de corrente elétrica produzido por uma célula solar é proporcional à intensidade de irradiação solar incidente sobre sua superfície. Quando não está sob os efeitos da luz do sol, uma célula solar pode ser vista como um diodo semiconductor. Dessa maneira, a intensidade da corrente que a atravessa é a soma da corrente que atravessa um diodo, dada pela equação de Shockley, com a soma da parcela fotoelétrica gerada, como mostra a equação 4:

$$I_{cel} = I_L - I_D = I_L - I_S \left(e^{\frac{qV}{nKT}} - 1 \right) \quad (4)$$

O circuito equivalente de uma célula solar é mostrado na Figura 24. Nessa figura o diodo representa a participação da junção pn na falta de incidência de luz. A resistência-série R_s representa a queda de tensão quando os condutores migram da região tipo-p para a região tipo-n através do condutor externo. O valor dessa resistência é da ordem de miliohms. A resistência-paralelo R_p descreve a corrente de fuga inversa. Essas resistências têm influência na forma da curva I-V da célula solar, contribuindo na eficiência da célula. (Buhler, 2007)

Figura 24. Circuito equivalente da célula solar. (Buhler, 2007).



3.2 GERADORES FOTOVOLTAICOS

Quando analisamos uma célula de silício, a máxima tensão gerada em circuito aberto nos seus terminais é da ordem de 0,6 V. Para conseguir um fornecimento de tensões maiores, várias células são conectadas em série. Seguindo o mesmo princípio, associam-se células em paralelo para que a corrente fornecida seja maior. As associações em série e em paralelo de células fotovoltaicas dão origem aos módulos fotovoltaicos ou geradores fotovoltaicos. Segundo a norma NBR10899, um módulo fotovoltaico é uma unidade básica formada por um conjunto de células fotovoltaicas, interligadas eletricamente e encapsuladas, com o objetivo de gerar energia elétrica. Com algumas poucas alterações, o modelo matemático do módulo fotovoltaico é descrito na equação 6, levando em consideração as equações 4 e 5.

$$V_T = \frac{N_s n K T}{e} \quad (5)$$

$$I_{ger} = I_{SC} - I_s \left(e^{\frac{V + I_{ger} R_s}{V_T}} - 1 \right) - \frac{V + I_{ger} R_s}{R_p} \quad (6)$$

Diversos outros itens conferem ao módulo fotovoltaico a estrutura necessária para sua operação. Na parte frontal o módulo possui uma camada de *Etil Vinil Acetato* e uma camada de vidro temperado. Já na parte posterior, o módulo conta com uma camada de Tedlar e outra camada de EVA. Todo módulo está envolto em uma moldura normalmente de alumínio, que protege mecanicamente o conjunto. Esses materiais dão ao módulo a rigidez e durabilidade necessária para que ele ofereça um tempo de vida

útil considerável, em média 20 anos, o que é um fator importante tendo em vista o custo do equipamento. A Figura 25 ilustra a estrutura de um módulo fotovoltaico e a Figura 26 traz um módulo fabricado com silício monocristalino.

Figura 25. Estrutura de um módulo fotovoltaico. (Júnior, 2008)

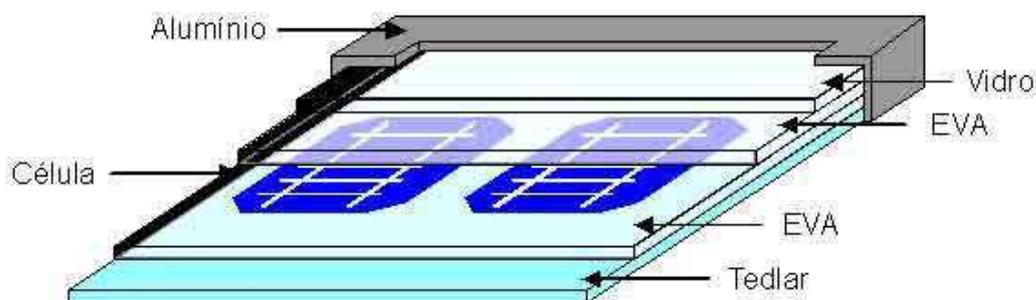


Figura 26. Módulo fabricado com silício monocristalino. solaripercasa.it

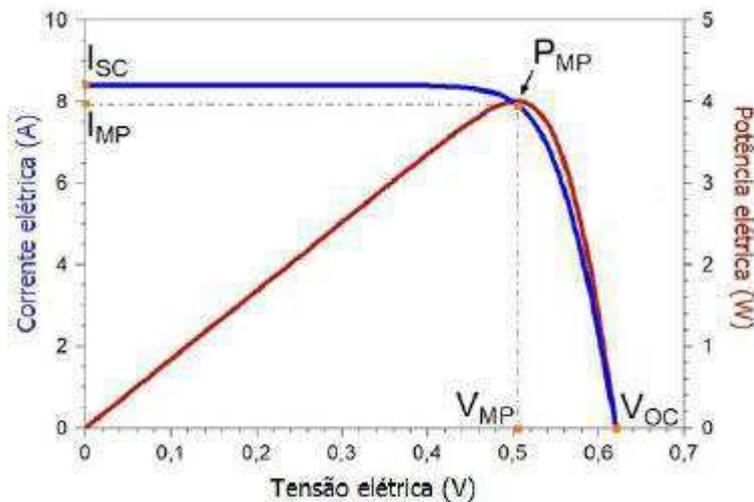


3.2.1 CURVA CARACTERÍSTICA (IxV) DE UM MÓDULO FOTOVOLTAICO

Um ponto de grande relevância no estudo de um módulo fotovoltaico é o conhecimento sua curva característica (curva IxV). Através dessa curva é possível identificar diversos pontos de operação do módulo a fim de obter seu melhor rendimento em diferentes condições de irradiação e temperatura. Essa curva consiste em uma representação matemática da corrente elétrica em função da tensão. Diversos fatores elétricos podem ser determinados a partir da análise da curva característica de um módulo fotovoltaico. Esses fatores tem importância direta no desempenho elétrico do módulo e conseqüentemente na potencia que o mesmo é capaz de fornecer. A determinação da curva IxV é feita por meio de normas específicas que determinam os

valores de temperatura, irradiância, massa de ar e velocidade nos quais os ensaios devem ser realizados. A Figura 27 ilustra o exemplo de uma curva característica e destaca seus principais pontos.

Figura 27. Curva IxV de módulos fotovoltaicos. (Buhler, 2007)



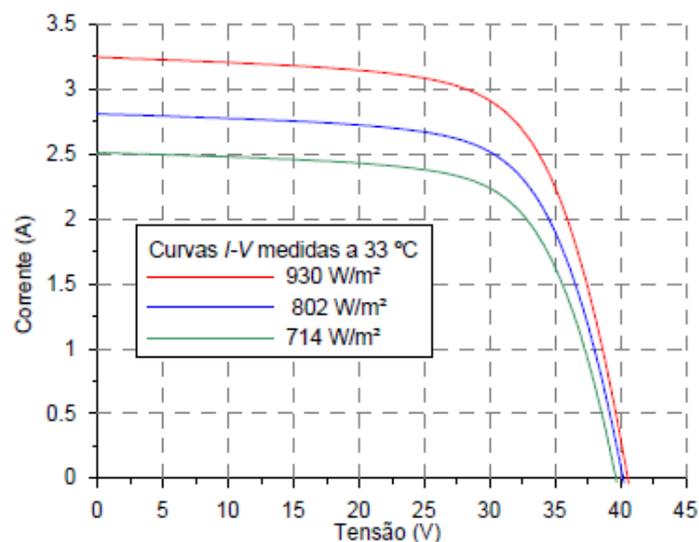
Os parâmetros elétricos que a maioria dos fabricantes fornece levam em consideração a condição padrão de teste definida pela norma IEC 61215, que estabelece o valor de radiação de 1000 W/m^2 a temperatura das células de 25°C . Esses parâmetros são:

- Corrente de curto-circuito (I_{sc}): é a máxima corrente que o módulo fornece e é medida quando a tensão nos seus terminais é nula.
- Tensão de circuito aberto (V_{oc}): é a tensão entre os terminais de um módulo fotovoltaico quando não há corrente circulando, ou seja, quando não existe carga. É também a máxima tensão que o módulo pode fornecer
- Ponto de Máxima Potência (P_{MP}): cada ponto da curva IxV, fazendo o produto tensão versus corrente, se obtém um valor de potência. Considerando determinados valores de temperatura e radiação, existe um valor máximo de potência que corresponde ao produto da tensão de potência máxima e corrente de potência máxima.
- Tensão de Máxima Potência (V_{MP}): tensão no ponto de máxima potência.

- Corrente de Máxima Potência (I_{MP}): corrente no ponto de máxima potência.
- Temperatura Normal de Operação (NOCT): temperatura que o módulo trabalha medida com uma radiação de 800 W/m^2 e temperatura ambiente de 20°C .
- Fator de Forma (FF): parâmetro que varia com os valores das resistências série e paralelo. Matematicamente é a relação entre a máxima potência e o produto da tensão de circuito aberto e a corrente de curto-circuito. Seus valores são dependentes também da tecnologia de fabricação do módulo fotovoltaico.

A corrente elétrica em uma célula fotovoltaica está diretamente relacionada com a irradiância incidente. Quantidades diferentes de irradiância produzem quantidades diferentes de corrente elétrica. Essa variação ocorre de maneira linearmente proporcional, ou seja, quanto maior a irradiância maior será a corrente gerada. A Figura 28 apresenta a curva característica em função de diversos valores de irradiância. Segundo a norma NBR – 1386, a irradiância padrão para a determinação da curva característica é de 1000 W/m^2 . (Instituto Superior Técnico, 2004)

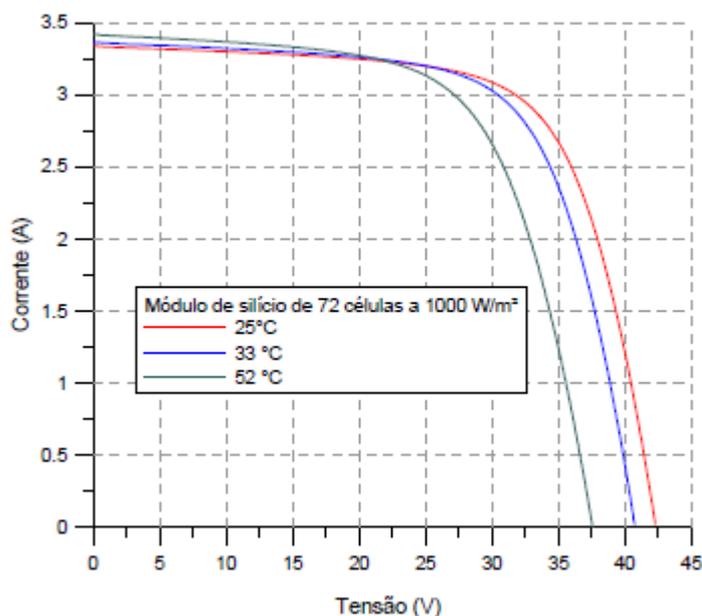
Figura 28. Curva IxV em função de diferentes irradiâncias. (Buhler, 2007)



Da mesma maneira que a irradiância, a temperatura também influi na forma da curva característica de um dispositivo fotovoltaico. Essa influência ocorre mais

profundamente na corrente de curto-circuito, que aumenta ligeiramente com o aumento da temperatura. Isso ocorre porque com o aumento da temperatura há uma diminuição no valor da banda de energia do material. A tensão também sofre variação devido à temperatura. Essa variação se dá de forma linear e o incremento exponencial da corrente de saturação reversa faz com que a tensão decaia. Assim, para maiores valores de temperatura, a tensão diminuirá como mostra a Figura 29. (Rocha, 2008)

Figura 29. Curva IxV em função de diferentes temperaturas. (Buhler, 2007)



3.3 MATERIAIS UTILIZADOS NA PRODUÇÃO DE CÉLULAS

FOTOVOLTAICAS

Atualmente diversas pesquisas buscam desenvolver materiais para a produção de células fotovoltaicas com o intuito de diminuir os custos e aumentar o rendimento na produção de energia elétrica. Dentre os materiais mais utilizados destacam-se as células produzidas a partir de silício cristalino. Outras tecnologias aparecem no âmbito da pesquisa por materiais alternativos. Tais tecnologias serão discutidas a seguir.

3.3.1 CÉLULAS DE SILÍCIO CRISTALINO (C-SI)

O silício é o principal material para a produção de células solares cristalina, sendo responsável por 87,9% do mercado mundial (dados de 2011). O silício utilizado na produção das células tem que ser um silício ultrapuro, que não é encontrado em sua forma natural, ou seja, é necessário passar por um processo industrial até que esteja apto para a produção de células. O silício encontrado na natureza é em forma de dióxido de silício. O primeiro passo para a obtenção do silício puro é a separação do oxigênio presente na molécula do dióxido de silício, resultando no silício grau metalúrgico ou silício impuro (Si-gM), que possui pureza de aproximadamente 98%. Sendo esse número ainda inconveniente para a indústria eletrônica que permite apenas um bilionésimo por cento de impurezas. O silício denominado silício grau solar (Si-gS), silício com pureza de 99,9999% (pureza 6N) é obtido a partir de um processo chamado Siemens modificado. A reação para obtenção de silício grau metalúrgico é descrita abaixo:



Para a produção de células fotovoltaicas a matéria prima pode ser o silício monocristalino (m-Si) ou o silício policristalino (p-Si).

3.3.2 CÉLULAS DE SILÍCIO MONOCRISTALINO (M-SI)

As células de silício monocristalino são obtidas a partir de um processo denominado Czochralski. (Si-Cz). Desse processo resultam cristais únicos redondos com diâmetro de trinta centímetros e vários metros de largura. O processo consiste em submergir o núcleo em um banho de silício fundido com ponto de fusão de 1420°C e retirado do banho enquanto gira lentamente. Depois de esfriar em barras semi-quadradas os cristais redondos únicos são cortados em lâminas de 0,3 mm de diâmetro. A essas pastilhas são adicionadas as impurezas positivas e uma fina camada com impurezas negativas, produzida a partir da fusão de fósforo, é colocada na pastilha. Então, as pastilhas são equipadas com trilhas elétricas e com uma camada anti-reflexão na parte frontal. A eficiência das células produzidas a partir de silício monocristalino utilizando o método de Czochralski gira em torno de 18% apresentando-se como a tecnologia mais antiga e mais eficiente de produção de células. A figura 28 mostra uma célula solar de silício monocristalino.

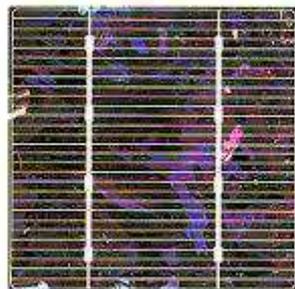
Figura 30. Célula solar fabricada com silício monocristalino. (Instituto Superior Técnico, 2004)



3.3.3 CÉLULAS DE SILÍCIO POLICRISTALINO (P-SI)

Utilizando um processo de fusão das porções de silício puro em moldes especiais é possível produzir células de silício policristalino (p-Si). Diversos cristais são fundidos e depois solidificados para a formação das células. Esse processo não permite a organização dos átomos em um único cristal, formando uma camada de junção entre os vários cristais. Tal camada é responsável pela diminuição da eficiência dessas células ao compará-las com as produzidas utilizando silício monocristalino. A eficiência desse tipo de células é de cerca de 15% o que implica em menores custos na produção e na venda dos painéis formados com essas células.

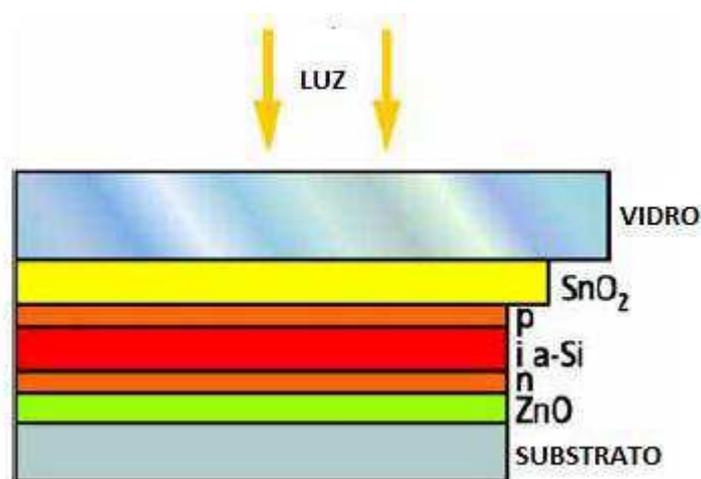
Figura 31. Célula de silício policristalino.



3.3.4 CÉLULA DE SILÍCIO AMORFO

Diferentemente do silício cristalino, o silício amorfo é caracterizado por não ter uma estrutura regular na formação do seu cristal. Como consequência dessas irregularidades há a formação de ligações livres com participação de hidrogênio até que ocorra uma saturação da molécula. O processo de criação do silício amorfo hidrogenado (a-Si:H) passa por um reator termoplástico onde uma vaporização química de Silano Gasoso (SiH_4) ocorre em temperaturas relativamente baixas, cerca de 250°C . Essa vaporização cria camadas finas de silício que são depositadas em superfície metálica para formar a célula fotovoltaica de silício amorfo. Entre as camadas dopadas *p* e *n* é inserida uma camada intrínseca pura *i*. Esse procedimento é necessário para que os portadores de cargas possam existir por um tempo maior. Dessa maneira, as camadas *p* e *n* são responsáveis pelo aparecimento de um campo elétrico que separa os portadores de carga. Com a deposição das camadas finas de silício na parte superior do metal ou vidro a estrutura passa a ter uma estrutura *p-i-n* (Figura 30). Essa pilha de células também pode ser feita de maneira inversa, formando uma estrutura *n-i-p* o que permite a construção de módulos fotovoltaicos sobre qualquer tipo de substrato.

Figura 32. Estrutura de célula de silício amorfo. (Instituto Superior Técnico, 2004)



Em relação à eficiência na conversão de eletricidade, as células formadas com o uso de silício amorfo têm números baixos, cerca de 8%. Além do mais, nos primeiros doze meses de funcionamento essa eficiência tende a diminuir devido à degradação provocada pela incidência da luz solar. Para contrariar esse efeito, tecnologias com células multi-junções foram desenvolvidas. Nesse caso, as células são formadas por duas ou três estruturas *p-i-n*, que podem ser otimizadas para diferentes espectros da luz solar incidente.

3.3.5 CÉLULAS DE FILMES FINOS

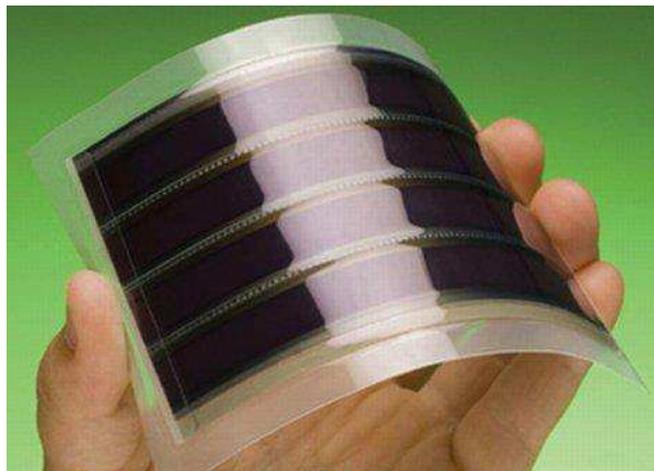
Como consequência dos esforços para diminuir os custos na fabricação de células fotovoltaicas as células de filmes finos são investigadas com grande afinco. Atualmente três tipos de materiais dominam a fabricação de módulos fotovoltaicos com a tecnologia de filmes finos: o silício amorfo (a-Si), o disseleneto de cobre-indio (CIS) e o telureto de cádmio (CdTe). A eficiência das células fabricadas com esses materiais pode ser vista na tabela 3.

Tabela 3. Eficiência das células de filmes finos. (de O. M. Varella e Maia Gomes, 2009)

Tipo de material	Eficiência da célula
Silício amorfo (a-Si)	5% - 9,5%
Disseleneto de cobre-indio (CIS)	7% - 19,2%
Telureto de cádmio (CdTe)	8% - 16,5%

Essa tecnologia domina cerca de 12% da produção mundial de células fotovoltaicas. A grande vantagem da produção utilizando essa tecnologia consiste no alto poder de absorção óptica desses materiais quando comparados com o silício cristalino. Finas camadas de material semicondutor são depositadas sucessivamente em um substrato, que na maioria dos casos é um vidro. Os filmes semicondutores podem possuir espessuras menores que 0,001 mm. Dessa maneira, a produção de células de filmes finos requer menos material e menos energia, tendo em vista que a temperatura para a produção varia entre 200°C e 500°C, fazendo dessa tecnologia uma concorrente promissora no futuro da produção de células fotovoltaicas. Além do mais, a alta capacidade de automação da produção em larga escala contribui significativamente para a redução dos custos. As células de filmes finos também têm a vantagem de poder ser produzidas sobre diversas superfícies, inclusive em superfícies flexíveis. A figura 31 ilustra uma dessas células.

Figura 33. Célula solar fabricada com tecnologia de filmes finos. (New Home, 2014)



3.3.6 OUTRAS TECNOLOGIAS

Várias outras tecnologias vêm sendo pesquisadas para a produção de células fotovoltaicas. A produção ainda está em fase de testes mas muitas já aparecem como alternativas promissoras, sempre tentando contribuir para a minimização dos custos e a melhoria da eficiência.

3.3.6.1 CÉLULAS FOTOVOLTAICAS PARA CONCENTRAÇÃO

Essas células utilizam sistemas de concentração que utilizam espelhos ou lentes para aumentar o raio de captação da irradiação solar incidente. Essas tecnologias, conhecida como sistemas fotovoltaicos de concentração (CPV), são desenvolvidas em locais com alto índice de irradiação solar direta. Esses sistemas conseguem alcançar o dobro de eficiência das células fotovoltaicas convencionais, porém, o custo é imensamente maior. Recentemente, o Instituto Nacional de Tecnologia e Ciência Industrial Avançado do Japão (AIST), conseguiu medir 46% de eficiência em um experimento liderado por órgãos franceses e alemães. Linhas de produção vêm sendo construídas para que a nova célula seja produzida em larga escala. Células fotovoltaicas para multijunção. (rechargenews)

Através de um processo chamado epitaxia de fase de vapor de compostos organometálicos, materiais são cuidadosamente escolhidos de maneira a captarem a luz solar em determinada faixa do espectro eletromagnético. Dessa maneira, a célula formada é capaz de absorver com mais eficiência a luz solar, uma vez que a absorve em quase todo o espectro, e produz, assim, uma quantidade maior de corrente elétrica. Essa

tecnologia já é amplamente utilizada em sistemas espaciais, com aplicações em sistemas de abastecimento de satélites. Devido a essa nobre aplicação, os custos de tal tecnologia ainda são desmotivadores. Os materiais mais utilizados na produção desse tipo de células são fosfato de gálio-índio (GaInP), arseneto de gálio (AsGa) e o germânio (Ge). Células fabricadas a partir desse composto podem atingir eficiências maiores que 40%. (wikienergia)

3.3.6.2 CÉLULAS ORGÂNICAS

Células de filmes finos também podem ser produzidas a partir de materiais orgânicos. Esse tipo de tecnologia surgiu no final da década de 90 juntando-se aos esforços para diminuir os custos da geração e eletricidade a partir da luz solar. Os semicondutores orgânicos apresentam baixo custo e o processo que os utilizam como matéria prima acaba sendo mais simplificado. A estrutura desse tipo de célula é constituída por um substrato de vidro ou superfície flexível, um filme condutor transparente, o material orgânico e o contato metálico. A eficiência gira em torno de 4% e é fruto de vários estudos e investigações com o intuito de aumentá-la. Um grande problema enfrentado é o encapsulamento dessas células, uma vez que o oxigênio reage com os elétrons livres e diminui o nível de dopagem do material.

3.3.6.3 CÉLULAS SENSIBILIZADAS POR CORANTE

Essa tecnologia vem sendo desenvolvida desde a década de 80, apesar de que as pesquisas só começaram a se destacar nos últimos dez anos. Esse tipo de tecnologia utiliza óxidos metálicos, TiO_2 (dióxido de titânio), principalmente. Trata-se, na verdade, de um processo eletroquímico e não fotovoltaico, tendo em vista que o funcionamento é devido à absorção de luz pelo corante. Em um filme condutor transparente é depositado uma camada de TiO_2 embebido por um corante que funciona como um eletrólito, então é conectado outro filme condutor transparente e um contato traseiro de platina e vidro. As diferentes cores dos corantes atuam fazendo com que a célula absorva diferentes níveis do espectro da radiação solar. Os corantes utilizados podem ser fabricados a partir de substâncias orgânicas como uva, berinjela, e amora, dentre outros. A eficiência pode chegar a cerca de 10%, porém não de forma contínua e estável, o que inviabiliza a comercialização desse tipo de célula. (Instituto Superior Técnico, 2004)

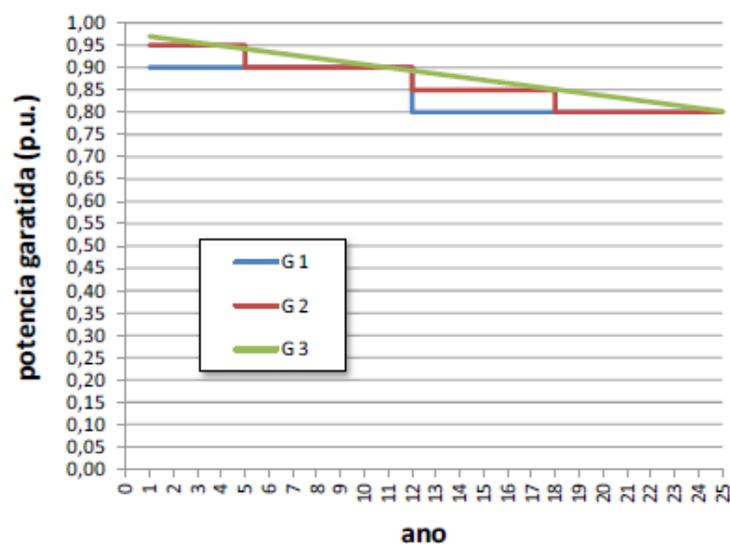
3.4 GARANTIAS DE MÓDULOS SOLARES

As garantias dos módulos fotovoltaicos estão relacionadas ao tempo de vida útil e ao rendimento. A maioria dos fabricantes estipula um tempo de vida útil em torno de 25 anos. No caso dos módulos de c-Si, existe a garantia contra defeitos de fabricação, que varia de 3 a 5 anos. A cada ano estipula-se que existe uma degradação na potência gerada de 0,5% a 1%. Além do mais, nos primeiros dez anos de uso, muitos fabricantes garantem uma potência de pico (Wp) mínima de 90% da potência nominal e de 80% durante o período de 20 a 25 anos, essa é a garantia tipo 1 (G1) na figura abaixo.

Outros fabricantes vão mais longe e garantem 95% da potencia nominal durante os primeiros cinco anos de uso, 90% durante doze anos, 85% durante dezoito anos e durante vinte e cinco anos pelo menos 80%. Essa é a garantia tipo 2 (G2).

A garantia tipo 3 (G3) fala de uma degradação linear anual de 0,7% - 0,8%/ano durante 25 anos.

Figura 34. Potencia garantida em módulos fotovoltaicos. (Pinho, João Tavares; Galdino, Marco Antonio;, 2014)



4 ANÁLISE ECONÔMICA E SIMULAÇÃO DE PROJETOS FOTOVOLTAICOS

4.1 INTRODUÇÃO

O presente capítulo é destinado a apresentar uma visão mais prática da revisão bibliográfica discutida nos capítulos anteriores. Serão apresentados os componentes necessários para a montagem de um sistema fotovoltaico isolado e métodos de análise econômica que posteriormente serão utilizados para a discussão da viabilidade de três projetos fotovoltaicos. Tais projetos serão simulados através do simulador solar América do Sol, software vinculado ao instituto IDEAL – Instituto para o Desenvolvimento de Energias Alternativas na América Latina. Uma organização sem fins lucrativos, criada em 2007, com o objetivo de pesquisar e incentivar o uso de fontes alternativas de energias junto a empresas públicas e privadas da América Latina.

4.2 COMPONENTES DE UM SISTEMA FOTOVOLTAICO

Os componentes de um sistema fotovoltaico podem ser alocados em blocos. O bloco gerador, composto pelos painéis fotovoltaicos e suas diferentes associações com a presença ou não de outras fontes de energia, constituindo os sistemas híbridos, e toda a interligação elétrica e estrutural dos módulos. O bloco de condicionamento de potência, onde estão os conversores, inversores, controladores de carga (no caso de sistemas com armazenamento), dispositivo de proteção e de controle. E, opcionalmente, o bloco de armazenamento, que apresenta os acumuladores elétricos, como os bancos de baterias. (Pinho, João Tavares; Galdino, Marco Antonio;, 2014).

Nesta seção serão discutidos os componentes de um sistema fotovoltaico quando há a conexão direta com a rede elétrica, ou seja, serão abordados apenas componentes dos blocos gerador e de condicionamento de potência. A energia elétrica excedente produzida será transformada em créditos de energia de acordo com a resolução 482 da Aneel. (Agência Nacional de Energia Elétrica - Aneel, 2012)

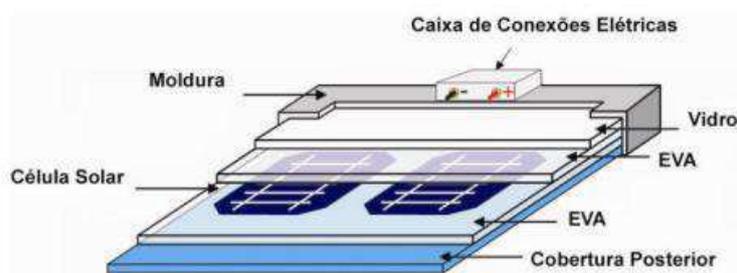
4.2.1 MÓDULO FOTOVOLTAICO

Como já discutido anteriormente, existem vários tipos de tecnologias de fabricação das células fotovoltaicas. Como a tensão em uma célula é pequena, várias delas são interligadas para a construção dos módulos fotovoltaicos ou painéis solares.

Com a finalidade de produzir mais energia por metro quadrado a um custo mais baixo, os painéis solares convencionais são normalmente montados sobre película de vidro e encapsulados com EVA (acetato de vinila). Os módulos standards são compostos por um número de células que varia de 36 a 72 e sua potência típica varia de 50 a 140 Wp. São geralmente retangulares, com células dispostas em quatro fileiras consecutivas, protegidas por uma armação metálica e com dimensões de 1,0 m x 0,5 m.

É por meio dos módulos fotovoltaicos que é possível transformar a radiação solar em eletricidade e esse elemento é a unidade básica de um sistema fotovoltaico. Na Figura é possível ver a formação estrutural de um módulo fotovoltaico padrão.

Figura 35. Módulo fotovoltaico padrão. (Júnior, 2008)



O objetivo da cobertura frontal do módulo fotovoltaico é a sua proteção contra intempéries, forças externas e pequenos choques. O material utilizado para a cobertura frontal e para a cobertura posterior depende da tecnologia utilizada para a fabricação da célula fotovoltaica. São requisitos importantes a transparência, elevada resistência mecânica, resistência dinâmica e resistência a arranhões. O vidro é um material visto comumente em coberturas de painéis solares.

Outro elemento importante do módulo fotovoltaico é o material encapsulante. Esse material é responsável por envolver a célula fotovoltaica e conferi-lhe acoplamento óptico e proteção contra agentes externos que podem degradá-la, como intempéries ambientais. O filme de EVA é o encapsulamento mais utilizado atualmente, capaz de fornecer sustentação estrutural, acoplamento óptico entre a célula e o módulo e isolamento elétrico (Júnior, 2008).

Com a finalidade de promover rigidez mecânica ao módulo acrescentando o mínimo de massa, os suportes de sustentação mais utilizados são os de alumínio. Os materiais plásticos não são recomendados devido ao desgaste quando utilizados por longos períodos e por não suportarem cargas estáticas e esforços dinâmicos. Compostos termoplásticos a base de PET tem surgido como candidatos à substituição do alumínio

combinando excelente desempenho e estabilidade dimensional com alta resistência e firmeza (Júnior, 2008).

O local onde ocorrem as conexões elétricas é a caixa de conexões. É construída com material polimérico resistente e constituída por um circuito elétrico simples com diodos e terminais para soldar as fitas condutoras do módulo. Assim, o módulo pode ser ligado de forma segura e o circuito elétrico tanto externo quanto interno é protegido.

No caso de sistemas conectados à rede, os níveis de tensão desejados dos módulos são variáveis e muitas vezes são necessárias a associação de muitos módulos fotovoltaicos. A automatização da produção dos módulos tem contribuído significativamente para a redução dos custos de instalação de sistemas fotovoltaicos e garantido um alto padrão de qualidade no produto oferecido ao usuário. (Pinho, João Tavares; Galdino, Marco Antonio;, 2014)

4.2.2 INVERSORES

A corrente gerada em um painel fotovoltaico é uma corrente contínua. Tendo em vista que a maioria das cargas que serão alimentadas necessita de corrente alternada, a utilização de um inversor em um sistema fotovoltaico se torna imprescindível. O inversor fornece energia elétrica em corrente alternada a partir de uma fonte de corrente contínua. Essa energia fornecida pelo inversor necessita ter amplitude, frequência e conteúdo harmônico adequado às cargas que serão alimentadas e a tensão de saída deve ser sincronizada com a tensão da rede elétrica, no caso de sistemas conectados à rede. Dessa forma, os inversores utilizados em SFCRs devem atender normas e padrões de segurança e qualidade de energia.

Normalmente, inversores para potências de até 5 kW são monofásico sendo os inversores para aplicações de maiores potência trifásicos. Atualmente os inversores utilizados em sistemas fotovoltaicos são dimensionados levando em consideração a complexidade do sistema e adaptados de forma a aperfeiçoar a geração de energia elétrica para cada aplicação especificamente. Com a evolução da tecnologia e conseqüentemente da eletrônica de potência, já é possível inversores com eficiência de conversão de 99%.

Os inversores são ligados à rede elétrica de forma direta ou através da instalação do serviço elétrico do prédio. Quando a ligação ocorre de maneira direta, a eletricidade gerada pelo sistema é injetada diretamente na rede da concessionária de energia. Se a

instalação ocorre através do acoplamento com o sistema elétrico local, a energia é primeiramente consumida no prédio em questão e o excedente, então, é injetado na rede elétrica.

Os inversores para conexão à rede elétrica podem ser de dois tipos: comutados pela rede e autocomutados. (Instituto Superior Técnico, 2004)

Figura 36. Tipos de inversores utilizados em Sistemas Fotovoltaicos. (Pinho, João Tavares; Galdino, Marco Antonio;, 2014)



4.2.2.1 INVERSORES COMUTADOS PELA REDE

Esse tipo de inversor utiliza o tiristor como elemento semicondutor de chaveamento. O tiristor, uma vez em condução, só assume seu estado de bloqueio quando a corrente que flui através dele for inferior a sua corrente de manutenção de condução. A tensão da rede atua forçando os tiristores a entrar em seu estado de bloqueio, daí o nome de inversores comutados pela rede, pois a comutação de seu estado é realizada com o auxílio da rede elétrica.

Os inversores comutados pela rede normalmente têm uma topologia simples e possuem uma robustez considerável, porém, a alta quantidade de harmônicos que geram compromete à qualidade da tensão e da corrente de saída. Essas características fazem com que o uso desse tipo de inversor necessite a utilização de filtros complexos e caros, o que aumenta as perdas. O avanço da eletrônica de potência fez surgir outros dispositivos de chaveamento como o MOSFET e o IGBT, que fizeram com que os inversores comutados pela rede ficassem restritos a aplicações com potências superiores a 100 kW, como no caso do acionamentos de motores elétricos de grande porte.

4.2.2.2 INVERSORES AUTOCOMUTADOS

Os inversores autocomutados utilizam como dispositivos de comutação: MOSFETs, Transistores de Junção Bipolar, GTOs e IGBTs. A comutação do estado dos dispositivos de chaveamento pode ocorrer em qualquer instante do ciclo, através de um terminal de controle.

Esses tipos de inversores operam o chaveamento de seus dispositivos através de técnicas PWM (modulação por largura de pulso). Dessa maneira, é possível fazer um bom controle de forma de onda e do valor da tensão de saída. Os inversores autocomutados podem ser do tipo fonte de corrente (CSI – *current source inverter*) ou fonte de tensão (VSI – *voltage source inverter*). Essa última configuração é a mais utilizada em sistemas fotovoltaicos e o controle do sistema pode ser feito por tensão ou por corrente, sendo o controle por corrente adotado na maioria dos modelos para SFCRs.

A maioria dos inversores para conexão à rede utilizada no mercado também incorporam funções para o monitoramento e aquisição de dados junto ao sistema fotovoltaico em questão. Dessa maneira, o usuário disponibiliza de informações como: energia diária gerada, estado do equipamento, histórico de falhas, valores instantâneos de potência e tensão c.c. e c.a., também é possível a conexão de sensores externos que exibem informações sobre temperatura, radiação solar, etc. A garantia dos inversores para SFCRs está atualmente em torno de dez anos.

Os parâmetros que devem ser obedecidos pelos inversores para o uso em sistemas fotovoltaicos são estabelecidos pela norma ABNT 16149:2013, que versa sobre características como variação de tensão e frequência, distorção harmônica total (THD), proteção contra ilhamento, fator de potência, etc. (Krenz e Stadler, 2014)

Algumas características são requisitos mínimos quando se trata de inversores autocomutados, para conexão à rede elétrica, dentre elas:

- Alta eficiência de conversão;
- Alta confiabilidade;
- Baixa manutenção;
- Ampla faixa de operação de tensão de entrada;
- Boa regulação na tensão de saída;
- Forma de onda de saída senoidal;
- Baixo conteúdo harmônico;

- Baixa emissão de ruído;
- Baixa emissão de interferência eletromagnética;
- Segurança para pessoas e para a instalação;
- Grau de proteção IP adequando ao tipo de instalação;
- Garantia de fábrica de pelo menos dois anos.

Segundo a norma ANT NBR 16149:2013, um inversor deixa de fornecer energia à rede elétrica quando esta estiver fora das especificações normais de operação de tensão e/ou frequência. No Brasil também já existe uma norma específica para o processo de certificação e procedimentos de ensaio que os laboratórios devem realizar com os inversores chamada ABNT NBR IEC 62116:2012, válida desde 06/04/2012.

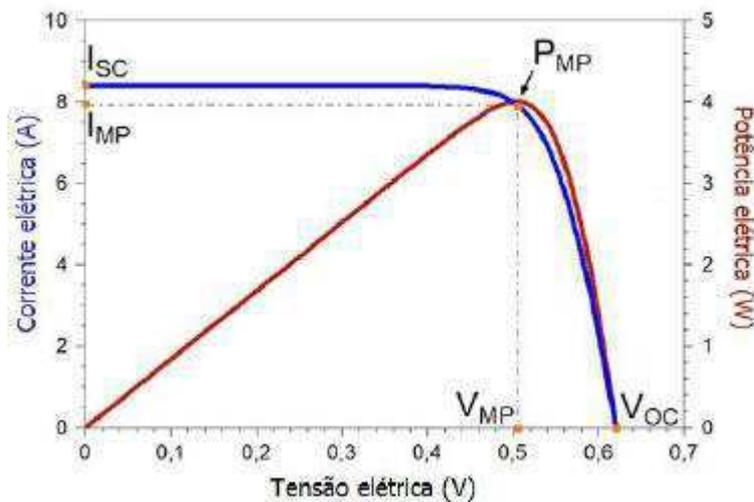
Sendo assim, a legislação vigente já possibilita que os inversores utilizados em SFGRs tenham um ótimo patamar de qualidade, uma vez que os fabricantes são obrigados a segui-la.

4.2.3 DISPOSITIVOS SEGUIDORES DO PONTO DE MÁXIMA POTÊNCIA

Com o objetivo de extrair do painel fotovoltaico a máxima potência que está sendo gerada e conseqüentemente, melhorar o rendimento do sistema, um mecanismo de controle conhecido como seguimento do ponto de máxima potência (*Maximum Power Point Tracker*) é utilizado.

Como já tratado anteriormente, a corrente produzida pelos módulos fotovoltaicos é dependente da quantidade de irradiância solar incidente e a tensão, por sua vez, decresce com o aumento da temperatura, influenciando a potência gerada. Na seção 3.2.1 foram mostrados os principais parâmetros elétricos que os fabricantes de painéis fotovoltaicos fornecem, dentre eles os valores máximos de potência, tensão e corrente, que podem ser visualizados na curva característica do painel. A figura a seguir mostra o ponto de máxima potência (P_{MP}) em uma curva característica genérica. Dessa maneira, é possível definir os valores de tensão e corrente que definem tal ponto.

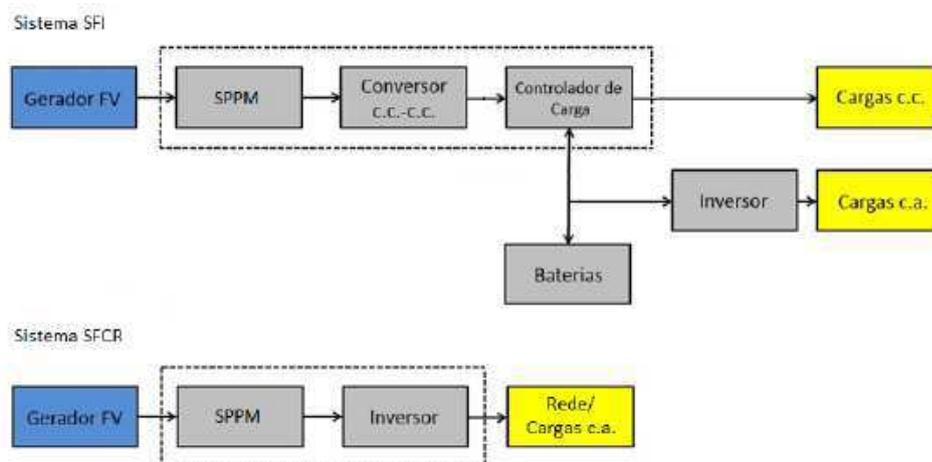
Figura 37. Ponto de Máxima Potência de um gerador fotovoltaico. (Buhler, 2007)



Além da temperatura e da irradiância, fatores externos como sombreamentos provocados por árvores e edificações próximas e sujeiras sobre a superfície dos módulos podem provocar mudanças na curva característica do módulo e consequente diminuição da potência gerada. Nesse sentido, é conveniente que um mecanismo de controle avalie constantemente os valores de tensão e corrente que estão sendo gerados pelo painel fotovoltaico a fim de garantir que o mesmo trabalhe sempre próximo do seu ponto de máxima potência. Tal feito é conseguido através de controladores que utilizam de técnicas de chaveamento para fazer com que o gerador mantenha-se sempre gerando a tensão de máxima potência. Esses controladores normalmente são microprocessadores ou dispositivos de processamento de sinais (DSP – *digital signal processing*).

A figura 38 mostra como um dispositivo seguidor do ponto de máxima potência é inserido em um sistema fotovoltaico isolado ou conectado à rede.

Figura 38. Sistema Fotovoltaico com técnica de MPPT. (Pinho, João Tavares; Galdino, Marco Antonio;, 2014)



4.3 MÉTODOS DE ANÁLISE ECONÔMICA

Um dos grandes empecilhos para a implantação de sistemas fotovoltaicos no Brasil é o custo. Apesar de terem diminuído bastante, se comparados aos valores de Wp da década de 80, por exemplo, os valores dos painéis solares ainda assustam os que desejam investir na energia solar, principalmente para o consumo individual. Sendo assim, é importante a utilização de ferramentas de engenharia econômica que dão a noção mais exata ao investidor sobre a viabilidade econômica do projeto. Os métodos apresentados a seguir serão utilizados quando da análise econômica dos sistemas que serão simulados posteriormente.

Tais métodos são utilizados para saber se o projeto em questão é capaz de gerar renda econômica, ou em termos de engenharia econômica, fluxo de caixa. Utilizam-se de números e projeções que permitem a visualização do potencial de retorno real do investimento. (de Oliveira Pamplona e Barra Montevechi, 2006)

Para o trabalho em questão, esses métodos serão utilizados com o objetivo de saber se os valores economizados mensalmente ou anualmente após a implantação de um sistema fotovoltaico viabilizam o projeto.

4.3.1 VPL – VALOR PRESENTE LÍQUIDO

O Valor Presente Líquido é um método que se caracteriza pela transferência para o instante atual das variações de caixa esperadas. Ou seja, analisa o impacto de rendimentos futuros com base no valor presente do capital. A análise é feita da seguinte maneira:

- Se o VPL for positivo, o investimento é considerado vantajoso;
- Se o VPL for negativo, o investimento não deverá ser considerado;

Quanto maior for o valor do VPL mais atrativa torna-se a proposta. Matematicamente o VPL é definido da seguinte maneira:

$$VPL = -I + \sum_{t=1}^n \frac{FC_t}{(1+k)^t} \quad (7)$$

Sendo assim, o VPL dirá quanto os futuros pagamentos, somados a um custo inicial, estariam valendo atualmente já que o valor do dinheiro no tempo é variável. Um montante de dinheiro nos dias atuais não terá o mesmo poder de compra em alguns anos.

4.3.2 TIR – TAXA INTERNA DE RETORNO

A TIR mostra o retorno sobre o investimento. Ou seja, corresponde à taxa de lucratividade esperada dos investimentos em um projeto. Diferente do VPL, a TIR não avalia a rentabilidade do projeto, senão encontra uma taxa intrínseca de rendimento. A TIR é uma taxa hipotética que anula o VPL, como mostra a equação a seguir:

$$VPL = -I + \sum_{t=1}^n \frac{FC_t}{(1+TIR)^t} = 0 \quad (8)$$

A análise é feita comparando o valor da TIR com o custo de oportunidade de capital.

- $TIR > k$, projeto viável;
- $TIR < k$, projeto inviável.

Como se pode observar na equação 8, o cálculo da TIR não é analiticamente simples de ser feito, o que exige o uso de ferramentas adequadas como o Excel.

4.3.3 VFL – VALOR FUTURO LÍQUIDO

O valor futuro líquido analisa os valores do fluxo de caixa e do investimento inicial no final do projeto. A equação 9 mostra como o VFL é calculado.

$$VPL = -1(1 + k)^n + \sum_{t=1}^n FC_t(1 + k)^{n-t} \quad (9)$$

A análise é feita da mesma maneira que no VPL. Quanto maior for o VFL mais viável será o investimento.

4.3.4 PAYBACK

O payback é uma técnica de análise de investimento utilizada pra calcular o tempo no qual o investimento inicial e o lucro acumulado oriundo desse investimento se igualam. O payback é calculado utilizando a seguinte equação:

$$PB = \frac{I}{Re} \quad (10)$$

O período utilizado para as receitas fixas pode ser semana, mensal, anual ou qualquer outro intervalo de interesse.

4.4 COMPOSIÇÃO DA TARIFA DE ENERGIA ELÉTRICA

As faturas de energia elétrica têm custos além do consumo da energia propriamente dito. O consumidor paga pela compra de energia, a transmissão e a distribuição, além dos encargos e tributos determinados por lei (federais, estaduais e municipais), destinados ao poder público.

Para manter sua estrutura de atendimento em perfeito funcionamento para que o consumidor possa utilizar a energia no momento em que necessitar, a concessionária cobra um valor mínimo na fatura de eletricidade. A resolução 456/2000 da ANEEL estabeleceu os valores mínimos para cada perfil de unidade consumidora.

No caso de unidades monofásicas, o valor será o correspondente ao pago por 30 kWh, mesmo que não haja consumo. Ou seja, mesmo que o consumo de energia elétrica da rede seja zero, o consumidor paga uma taxa conhecida como custo de disponibilidade, que seria como se ele houvesse consumido 30 kWh.

Dessa maneira, se um Sistema Fotovoltaico Conectado à Rede gera eletricidade ao ponto de que não seja necessária a utilização da energia da concessionária, o consumidor ainda pagará um valor em sua fatura de eletricidade. (ANEEL, 2008)

4.5 SIMULADOR DE PROJETOS FOTOVOLTAICOS AMÉRICA DO SOL

Para fazer o estudo da viabilidade de implantação de sistemas fotovoltaicos, a ferramenta utilizada na simulação será o Simulador Solar América do Sol, mantido pelo Instituto para o Desenvolvimento de Energias Alternativas na América Latina (IDEAL), uma organização sem fins lucrativos criada em 2007 com o propósito de fomentar as energias renováveis junto aos governos, aos parlamentos, no meio acadêmico e empresarial, possibilitando a criação de uma política de integração e desenvolvimento regional que contemple as energias alternativas na matriz energética dos países latino-americanos.

O Simulador Solar é uma ferramenta digital que permite o cálculo da potência de um sistema fotovoltaico (gerador de eletricidade solar) para atender a necessidade energética anual de uma residência, um escritório ou uma indústria. Com o sistema, é possível saber quanto o imóvel deixaria de consumir de energia elétrica, além de o proprietário ter uma noção de quanto espaço precisaria no telhado ou terreno para instalar os módulos solares.

A ferramenta está baseada na nova normativa da ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica) que facilita a conexão à rede de distribuição de mini e microgeradores elétricos a partir de fontes renováveis – Resolução 482/2012. Com ela, o proprietário de um pequeno gerador não precisa consumir toda a energia produzida no momento da geração. A energia poderá ser injetada na rede e, nos meses seguintes, o consumidor receberá créditos em kWh na conta de luz referentes a esta eletricidade gerada, mas não

consumida, através do Sistema de Compensação de Energia criado pela normativa. (América do Sol)

Serão analisados três projetos em cidades distintas, localizadas no Nordeste do Brasil. Com a ajuda de faturas de energia, será feito um levantamento da potência necessária que um sistema fotovoltaico deveria fornecer àquela residência e então será feito um orçamento junto a empresas do setor fotovoltaico para saber o custo dos equipamentos.

Como se trata de um investimento de longo prazo deve-se considerar o valor do capital no tempo através do custo de oportunidade. O custo de oportunidade é um termo usado em economia que se refere ao custo de algo em função de outra oportunidade renunciada, ou de maneira geral, corresponde ao que se deixa de ganhar em uma segunda alternativa por se escolher a primeira.

Sendo assim o investimento pretendido precisará render mais que o custo de oportunidade de capital, caso contrário não se justifica. Como métodos de comparação pode-se usar o investimento em outro projeto, o rendimento em algum fundo de investimento bancário, como a poupança; o rendimento de títulos do tesouro nacional ou outro investimento qualquer.

Para o estudo de viabilidade de sistemas de fotovoltaicos será considerado como custo de capital o rendimento anual da poupança em 2014, sendo esse o custo de oportunidade. Esse meio de comparação foi utilizado por se tratar de um fundo de fácil acesso e com baixo rendimento. Sendo assim se o projeto não for viável em comparação com este tipo de investimento, dificilmente será viável em comparação com outros investimentos.

Segundo dados do jornal online G1(G1) o rendimento anual da poupança em 2014 foi de 4,02 % para investimentos feitos a partir de julho de 2014. Considerando o método de análise VPL, para que o investimento seja viável financeiramente é necessário que os ganhos econômicos recebidos em todo o período de validade do projeto deslocados para o seu início por uma taxa de 4,02% e somados, seja maior que o investimento total do projeto deslocado para o mesmo período de tempo. Caso isso não ocorra o projeto não será viável. Da mesma forma a TIR do projeto precisa ser maior que 4,02%, caso contrário o projeto não se justifica.

4.5.1 CARACTERÍSTICAS E LIMITAÇÕES DO SIMULADOR SOLAR

A simulação considera que os módulos fotovoltaicos instalados estariam voltados para o Norte e com uma inclinação ótima, a qual corresponde à latitude da localização escolhida. Contudo, não considera as condições da vizinhança do local informado pelo usuário para instalar o sistema e que podem levar a uma revisão da produção elétrica devido aos sombreamentos dos módulos, tais como árvores ou edificações próximas. Além disso, o simulador só considera módulos fotovoltaicos fabricados a partir de silício policristalino, a simulação de módulos com outros tipos de tecnologia não é possível.

O Simulador Solar está programado para simular geradores de até 1000 kWp (1 MWp) de potência, visto que este é o limite estabelecido pela resolução normativa 482/2012 da ANEEL para que possam ser conectados à rede de distribuição e participar do sistema de compensação de energia. Além do mais, o Simulador Solar está programado para simular geradores para consumidores do Grupo B (Baixa Tensão) que, segundo a resolução 482/2012 da ANEEL, devem pagar, no mínimo, o valor referente ao custo de disponibilidade.

Os dados de irradiação solar dos municípios podem ser vistos nas tabelas e gráficos correspondentes a cada projeto e foram fornecidos pela simulação, tomando como referência os dados do Atlas Solarimétrico do Brasil. A irradiação difusa apresentada é definida pela radiação solar que alcança a Terra após ter sido dispersada de raios solares diretos por moléculas em suspensão na atmosfera. A irradiação inclinada está relacionada ao fato de que os geradores fotovoltaicos raramente são instalados em posição horizontal e que muitas vezes aproveitam superfícies já existentes como telhados de casas. (Chigerú Tiba, 2000)

Quando o sistema fotovoltaico gerar mais energia que a consumida, esse excedente será transformado em créditos, que irão compensar o consumo nos meses subsequentes. Esse procedimento está previsto na resolução normativa 482/2012 da ANEEL, que criou o sistema de compensação de energia.

4.5.2 PROJETO 1: ANÁLISE DE UM PROJETO FOTOVOLTAICO INSTALADO EM AGRESTINA – PE

4.5.2.1 LOCALIZAÇÃO

O município de Agrestina fica no agreste pernambucano a 154 km de Recife. O município foi escolhido devido à facilidade de acesso a alguns dados que o simulador

necessita para fazer o dimensionamento do sistema fotovoltaico. A empresa responsável pela distribuição de energia elétrica no município é a CELPE (Companhia Energética de Pernambuco), que pertence ao grupo Neoenergia.

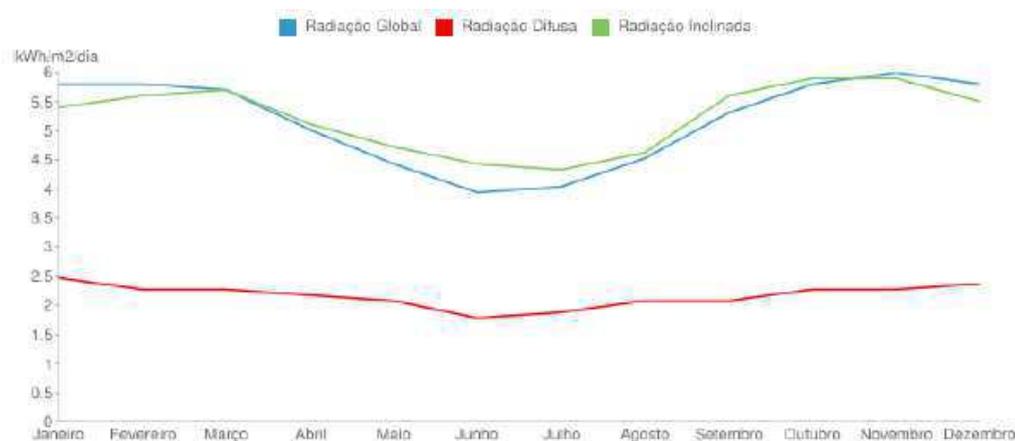
Figura 39. Localização geográfica do município de Agrestina - Simulação América do Sol.



4.5.2.2 DADOS DE IRRADIAÇÃO

A Figura 40 e a Tabela 4 apresentam os dados de irradiação do município de Agrestina.

Figura 40. Irradiação no município de Agrestina – PE.



A radiação, como pode ser visto tanto no gráfico da Figura 40 como na Tabela 4, é medida em kWh/m²/dia, que é definido pela quantidade de radiação em uma hora por metro quadrado captada em uma determinada área na superfície terrestre.

Tabela 4. Dados de irradiação solar no município de Agrestina - PE.

Mês (2014)	Irradiação Global (kWh/m ² /dia)	Irradiação Inclinada (kWh/m ² /dia)	Irradiação Difusa (kWh/m ² /dia)
Janeiro	5,83	5,50	2,47
Fevereiro	5,81	5,70	2,31
Março	5,75	5,73	2,34
Abril	5,06	5,16	2,23
Mai	4,43	4,74	2,08
Junho	4,03	4,43	1,86
Julho	4,12	4,42	1,89
Agosto	4,62	4,72	2,10
Setembro	5,37	5,61	2,14
Outubro	5,90	5,97	2,29
Novembro	6,00	5,97	2,31
Dezembro	5,83	5,60	2,39
Media Anual	5,23	5,27	2,20

4.5.2.3 CARACTERÍSTICAS DO SISTEMA FOTOVOLTAICO

Com base nos dados de consumo elétrico informados e na radiação do município de Agrestina, um sistema fotovoltaico com cerca de 2,3 kWp de potência instalada atenderia a necessidade energética do projeto, segundo a simulação realizada. O sistema proposto geraria em média 2.920 kWh por ano, quantidade que não necessitaria mais ser paga a concessionária de energia elétrica. Além do mais, o sistema evitaria a emissão de 855 kg de dióxido de carbono (CO₂) por ano. A tabela 5 mostra algumas características do sistema projetado.

Tabela 5. Características do Sistema Fotovoltaico 1.

Capacidade do seu sistema (Potência)	2,3 kWp
Área ocupada pelo sistema	De 15 a 19 m ²
Inclinação aproximada dos módulos	9°
Radiação sobre os módulos	35.107 kWh
Rendimento anual	1.270 kWh/kWp
Emissões de CO ₂ evitadas	855 kg/ano
Consumo da rede elétrica anual	840 kWh
Geração fotovoltaica anual	2.920 kWh
Consumo total anual	3.760 kWh

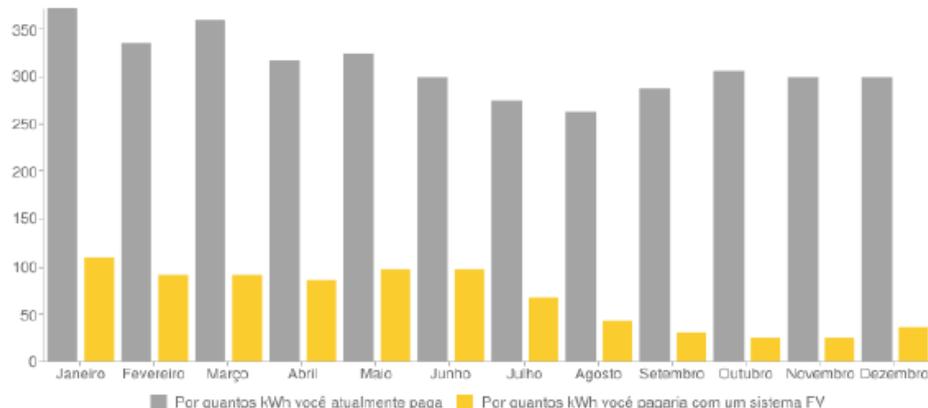
O consumo elétrico é mostrado em detalhes na tabela 6. A primeira coluna mostra a demanda energética em cada mês, de acordo com os dados fornecidos com a fatura de energia do local selecionado. A segunda coluna exibe o quanto dessa energia viria da geração fotovoltaica, e a terceira, o quanto de eletricidade será consumida da rede elétrica. É possível notar que cerca de 78% do total da energia consumida pode ser suprida pelo sistema fotovoltaico projetado, culminando em grande economia.

Tabela 6. Consumo elétrico do projeto 1.

Mês (2014)	Eletricidade Total Consumida (kWh)	Eletricidade FV gerada (kWh)	Eletricidade da rede (kWh)
Janeiro	372,00	257,53	114,47
Fevereiro	340,00	243,22	96,78
Março	360,00	268,30	91,70
Abril	323,00	233,82	89,18
Mai	325,00	221,95	103,05
Junho	300,00	200,74	99,26
Julho	276,00	206,96	69,04
Agosto	266,00	221,01	44,99
Setembro	289,00	254,21	34,79
Outubro	309,00	279,54	29,46
Novembro	300,00	270,52	29,48
Dezembro	300,00	262,21	37,79
Total	3.760,00	2.920,01	839,99

O gráfico apresentado na Figura 41 mostra a comparação entre os kWh pagos sem o sistema fotovoltaico e depois com a inserção do sistema fotovoltaico. Ressaltando que existe um valor mínimo a ser pago na fatura de energia elétrica. Como já mencionado no texto, mesmo que o consumo de energia seja zero, os consumidores residenciais e rurais (Grupo B) devem pagar, mensalmente, pelos custos de disponibilidade que equivale ao valor em reais de 30 kWh.

Figura 41. Comparação do consumo antes e depois da instalação do Sistema Fotovoltaico 1.



Da mesma maneira como realizado para o projeto 1, na cidade de Agrestina – PE, serão realizadas as simulações do projeto 2, supostamente instalados nas cidades de Teresina - PI. A forma como os resultados serão expostos seguirá o modelo apresentado no projeto 1, contemplando as principais informações por meio de figuras e tabelas. A repetição de algumas definições não se fará necessária.

4.5.3 PROJETO 2: ANÁLISE DE UM PROJETO FOTOVOLTAICO INSTALADO EM TERESINA – PI

4.5.3.1 LOCALIZAÇÃO

Teresina é a capital do estado do Piauí com localização $-5,0920^{\circ}$ S, $-42,8038^{\circ}$ O. Baseada na resolução 482 da ANEEL, o estado do Piauí passou a investir massivamente em energia solar e a dar subsídios àqueles que desejam instalar sistemas fotovoltaicos para que tamanho potencial solar que o estado apresenta seja mais bem aproveitado. (Governo do Estado do Piauí)

. A empresa responsável pela distribuição de energia elétrica no município é a CEPISA, que pertence ao grupo Eletrobrás.

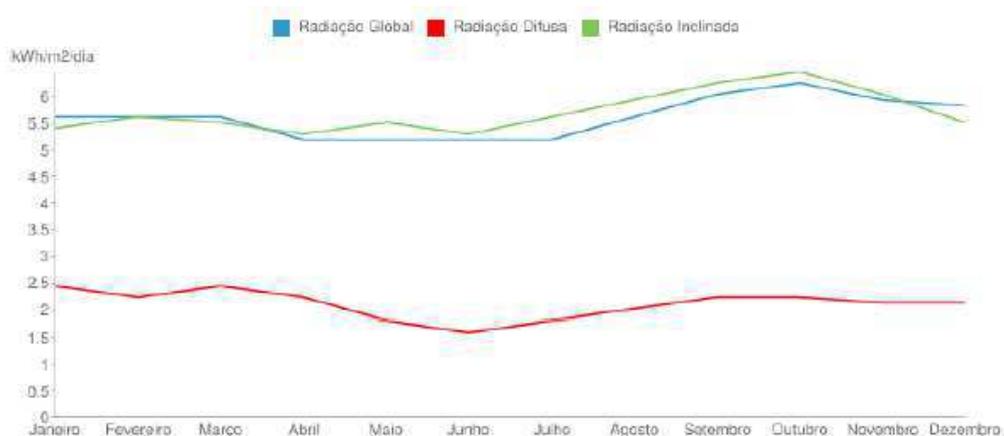
Figura 42. Localização geográfica do município de Teresina - PI.



4.5.3.2 DADOS DE IRRADIAÇÃO

A Figura 43 e a Tabela 7 apresentam os dados de irradiação do município de Teresina.

Figura 43. Irradiação no município de Teresina - PI.



Ao observar os dados da Tabela 7 em comparação aos dados de irradiação no município de Agrestina, é possível notar a maior capacidade para o aproveitamento fotovoltaico no município de Teresina.

Tabela 7. Dados de irradiação solar no município de Teresina – PI.

Mês (2014)	Irradiação Global (kWh/m ² /dia)	Irradiação Inclinada (kWh/m ² /dia)	Irradiação Difusa (kWh/m ² /dia)
Janeiro	5,63	5,45	2,50
Fevereiro	5,64	5,63	2,25
Março	5,63	5,57	2,52
Abril	5,26	5,32	2,30
Mai	5,27	5,58	1,87
Junho	5,27	5,40	1,65
Julho	5,25	5,71	1,84
Agosto	5,60	5,95	2,03
6,13	6,26	2,23	2,14
Outubro	6,29	6,47	2,23
Novembro	5,99	6,08	2,20
Dezembro	5,87	5,57	2,21
Media Anual	5,66	5,73	2,17

4.5.3.3 CARACTERÍSTICAS DO SISTEMA FOTOVOLTAICO

De acordo com a simulação realizada, um sistema fotovoltaico de cerca 1,6 kWp de potência instalada atenderia a demanda energética da residência. A Tabela 8 mostra as características do sistema fotovoltaico proposto. Na Tabela 9 é possível ver como seria o consumo elétrico do projeto.

Tabela 8. Características do Sistema Fotovoltaico 2.

Capacidade do seu sistema (Potência)	1,6 kWp
Área ocupada pelo sistema	De 10 a 14 m ²
Inclinação aproximada dos módulos	6°
Radiação sobre os módulos	24.291 kWh
Rendimento anual	1.379 kWh/kWp
Emissões de CO ₂ evitadas	649 kg/ano
Consumo da rede elétrica anual	730 kWh
Geração fotovoltaica anual	2.207 kWh
Consumo total anual	2.937 kWh

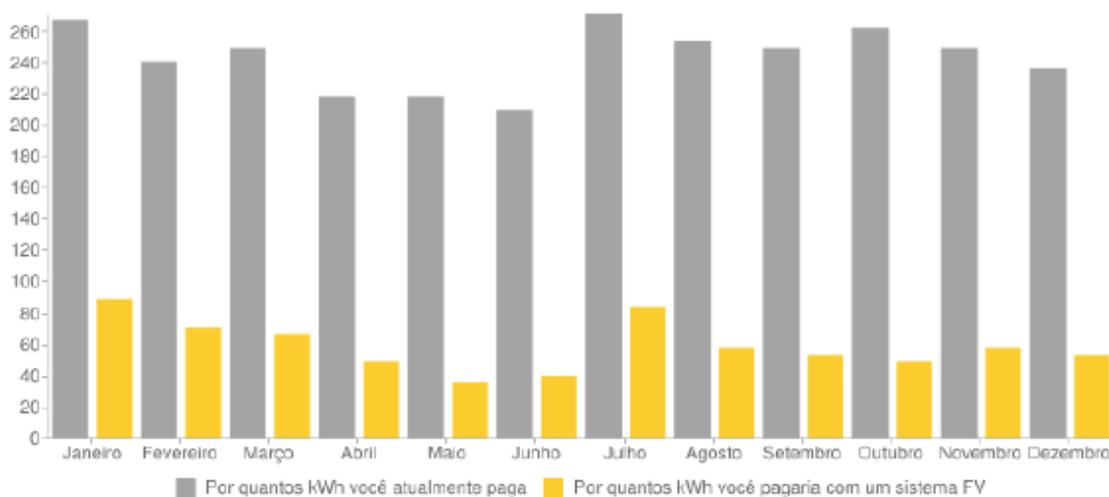
A análise da Tabela 9 corrobora a ideia de que Teresina possui um grande potencial para a implantação de sistemas fotovoltaicos. O sistema simulado, se implantado, seria responsável pela geração de 75% do total do consumo de energia elétrica. Sendo a compra de eletricidade da rede ficando em trono de 730,28 kWh.

Tabela 9. Consumo elétrico do projeto 2.

Mês (2014)	Eletricidade Total Consumida (kWh)	Eletricidade FV gerada (kWh)	Eletricidade da rede (kWh)
Janeiro	267,00	177,52	89,48
Fevereiro	240,00	167,12	72,88
Março	249,00	181,43	67,57
Abril	221,00	167,70	53,30
Mai	221,00	167,70	53,30
Junho	211,00	170,22	40,78
Julho	271,00	185,99	85,01
Agosto	255,00	193,81	61,19
Setembro	251,00	197,33	53,67
Outubro	263,00	210,75	52,25
Novembro	250,00	191,66	58,34
Dezembro	238,00	181,43	56,57
Total	2.937,00	2.206,72	730,28

A comparação do consumo elétrico pago antes e depois da inserção do sistema fotovoltaico é mostrada na Figura 44. Em todos os meses a diferença é marcante, mesmo nos meses correspondentes ao inverno a economia na compra de energia elétrica da concessionária se mostra bastante vantajosa.

Figura 44. Comparação do consumo antes e depois da instalação do Sistema Fotovoltaico 2.



4.6 RESULTADOS E ANALISE ECONÔMICA

Para a realização desse trabalho foram utilizados o simulador solar América do Sol para a idealização dos projetos fotovoltaicos nas cidades determinadas e a ferramenta de cálculo Excel, para o cálculo de VPL, Payback e TIR responsáveis pela análise econômica dos projetos.

Com base nos resultados obtidos com o simulador, foi feita a busca de um fornecedor de sistemas fotovoltaicos para que fosse possível ter uma ideia mais real a respeito dos custos dos projetos. Esses valores serão analisados através das ferramentas de engenharia econômica já mencionadas com o intuito de decidir se o projeto seria favorável ou não.

O fornecedor que se dispôs a fazer o orçamento é foi a RSTA ELETRÔNICOS, com sede em Minas Gerais. Foram requisitados orçamentos para os sistemas dos projetos 1 e 2, ou seja, para 2,3 kWp e 1,6 kWp, respectivamente. Porém, além desses valores serem aproximados, os Kits Fotovoltaicos disponíveis operam com valores de 3 kWp e 2,2 kWp, que são projetos padrão apresentados pelo revendedor. Dessa maneira, para a simulação na cidade de Agrestina, o sistema que será supostamente implantado será o de 3 kWp e para a cidade de Teresina será o de 2,2 kWp.

As tabelas 10 e 11 apresentam as características e os custos dos sistemas fotovoltaicos apresentados pela RSTA ELETRONICOS. (RSTA)

Tabela 10. Kit Fotovoltaico 3,0 kWp. (RSTA Eletronicos, 2013)

Equipamento	Preço R\$
10 Módulos de 290 W	12.262,98
01 Inversor bifásico 110/220 V	8.856,60
01 Conjunto instalação (suporte e cabos)	1.597,48
Total	22.253,49

Tabela 11. Kit Fotovoltaico 2,2 kWp. (RSTA Eletronicos, 2013)

Equipamento	Preço R\$
08 Módulos de 290 W	9.810,39
01 Inversor bifásico 110/220 V	9.598,17
01 Conjunto instalação (suporte e cabos)	1.277,98
Total	20.315,92

4.6.1 ANÁLISE ECONÔMICA DO PROJETO 1

Para o projeto 1, simulado na cidade de Agrestina – PE, o sistema fotovoltaico necessário a suprir a demanda seria de 2,3 kWp, aproximadamente. Como explicado no item anterior, esse valor será arredondado para 3,0 kWp devido a disponibilidade do fornecedor. Sendo assim, o valor do sistema que deveria ser instalado é de R\$ 22.253,49. Esse valor já inclui a mão de obra de instalação.

Considerando os dados da tabela 5, observa-se que a geração fotovoltaica do sistema 1 corresponde a 2.920 kWh anuais. A tarifa de energia praticada pela CELPE no ano de 2015 é de R\$ 0,489. Considerando um acréscimo anual de 5% na tarifa e tendo em vista que o tempo de vida útil de um painel solar gira em torno de 25 anos, sendo esse o tempo total do projeto, a economia anual que o projeto geraria caso fosse instalado pode ser vista na tabela 12. Para o cálculo do VPL, é necessário saber quanto os retornos anuais valem na data inicial do projeto. Esses valores foram calculados e são apresentados na tabela 13.

Tabela 12. Economia gerada pelo projeto 1 em 25 anos.

Ano	Tarifa (R\$/kWh)	Economia Anual
2016	0,489	1.427,88
2017	0,513	1.499,27
2018	0,539	1.574,24
2019	0,566	1.652,95
2020	0,594	1.735,60
2021	0,624	1.822,38
2022	0,655	1.913,50
2023	0,688	2.009,17
2024	0,722	2.109,63
2025	0,759	2.215,11
2026	0,797	2.325,87
2027	0,836	2.442,16
2028	0,878	2.564,27
2029	0,922	2.692,48
2030	0,968	2.827,10
2031	1,017	2.968,46
2032	1,067	3.116,88
2033	1,121	3.272,73
2034	1,177	3.436,36
2035	1,236	3.608,18
2036	1,297	3.788,59
2037	1,362	3.978,02
2038	1,430	4.176,92
2039	1,502	4.385,77
2040	1,577	4.605,06
	Total	68.148,57

Tabela 13. Valores atuais dos retornos anuais.

Ano	Valor atual do dinheiro (R\$)
2016	1.372,70
2017	1.385,63
2018	1.398,68
2019	1.411,86
2020	1.425,16
2021	1.438,59
2022	1.452,14
2023	1.465,82
2024	1.479,63
2025	1.493,57
2026	1.507,65
2027	1.521,85
2028	1.536,19
2029	1.550,66
2030	1.565,27
2031	1.580,02
2032	1.594,90
2033	1.609,93
2034	1.625,10
2035	1.640,41
2036	1.655,86
2037	1.671,46
2038	1.687,21
2039	1.703,10
2040	1.719,15
Total	38.492,55

Dessa maneira, com os dados da Tabela 13, procede-se com o cálculo do VPL:

$$VPL = -22.253,49 + 38.492,55 = R\$ 16.239,06$$

Como o resultado obtido é positivo, significa que o projeto é viável analisando do ponto de vista do VPL, sendo o tempo de vida útil do projeto de 25 anos. Para dar mais certeza à viabilidade obtida com o VPL, a taxa interna de retorno será apresentada a seguir.

A taxa interna de retorno (TIR) é de 9%. Ao ser comparada com a taxa de atratividade escolhida, que no caso foi a taxa de juros da poupança no ano de 2014, cujo valor foi de 4,02%, a TIR mostra que o projeto é economicamente atrativo.

Para saber em quanto tempo o investimento feito será recuperado calcula-se o PayBack, que soma os fluxos de caixa nos períodos e informa em quanto tempo esse

acumulo irá se igualar ao investimento inicial. Caso o projeto 1 fosse instalado na cidade de Agrestina, o investidor levaria 11 anos e 9 meses para recuperar o capital investido no projeto.

4.6.2 ANÁLISE ECONÔMICA DO PROJETO 2

O projeto 2 foi simulado para a cidade de Teresina – PI e os dados do sistema fotovoltaico que supostamente seria instalado pode ser visto na tabela 11. A CEPISA, do grupo Eletrobrás, é a responsável pela distribuição de energia no estado e a tarifa é de R\$ 0,671. Assim, considerando também um acréscimo de 5% ao ano na tarifa e a economia que segundo a simulação seria de 2.207 kWh por ano, para um tempo de vida útil de 25 anos, a economia anual em reais que o projeto geraria é exposta na Tabela 14.

Tabela 14. Economia gerada pelo projeto 2 em 25 anos.

Ano	Tarifa (R\$/kWh)	Economia Anual
2016	0,671	1.480,90
2017	0,705	2.057,29
2018	0,740	2.160,15
2019	0,777	2.268,16
2020	0,816	2.381,57
2021	0,856	2.500,64
2022	0,899	2.625,68
2023	0,944	2.756,96
2024	0,991	2.894,81
2025	1,041	3.039,55
2026	1,093	3.191,53
2027	1,148	3.351,10
2028	1,205	3.518,66
2029	1,265	3.694,59
2030	1,329	3.879,32
2031	1,395	4.073,29
2032	1,465	4.276,95
2033	1,538	4.490,80
2034	1,615	4.715,34
2035	1,696	4.951,10
2036	1,780	5.198,66
2037	1,869	5.458,59
2038	1,963	5.731,52
2039	2,061	6.018,10
2040	2,164	6.319,00
	Total	93.034,24

Da mesma maneira que no projeto 1, os retornos anuais foram deslocados para a data inicial do projeto, como apresenta a Tabela 15. Nesse ponto já se observa que para o mesmo intervalo de tempo, o projeto 2 apresenta um retorno total maior que o projeto 1. Isso mostra que o tamanho do sistema não tem relação com a economia alcançada. O projeto 2 utiliza um sistema com potência menor e que custa menos ao investidor, porém, seu retorno se apresenta mais satisfatório que o projeto 1.

Tabela 15. Valores atuais dos retornos anuais.

Ano	Valor atual do dinheiro (R\$)
2016	1.423,67
2017	1.901,35
2018	1.919,26
2019	1.937,34
2020	1.955,59
2021	1.974,02
2022	1.992,61
2023	2.011,39
2024	2.030,34
2025	2.049,47
2026	2.068,77
2027	2.088,26
2028	2.107,94
2029	2.127,80
2030	2.147,84
2031	2.168,08
2032	2.188,51
2033	2.209,12
2034	2.229,94
2035	2.250,95
2036	2.272,15
2037	2.293,56
2038	2.315,17
2039	2.336,98
2040	2.359,00
Total	52.359,09

Com os dados da Tabela 15 é feito o cálculo do VPL como segue:

$$VPL = -20.315,92 + 52.359,09 = R\$ 32.043,17$$

Como definido anteriormente, quanto maior for o VPL mais viável se torna o projeto. Ao comparar o VPL do projeto 1 com o do projeto 2, nota-se que o último é quase o dobro do primeiro, o que significa dizer que o investimento em Teresina tem um poder de atração maior para os investidores.

Da mesma maneira, o cálculo da taxa interna de retorno (TIR) foi realizado para analisar se o projeto é viável. O valor encontrado foi de 13%, um valor mais de três vezes maior que o custo de oportunidade escolhido. Sob a análise da TIR, o projeto 2 também é economicamente atraente.

O tempo de retorno do capital investido no caso do projeto 2 é de 8 anos e 9 meses. Considerando o tempo de vida útil do investimento, que gira em torno de 25 anos, o Payback do projeto 2 também se mostra adequado.

5 CONCLUSÃO

O presente trabalho contemplou aspectos técnicos e econômicos relacionados à implantação de sistemas fotovoltaicos conectados à rede. Diversas tecnologias de fabricação de células fotovoltaicas, e, por conseguinte, de painéis fotovoltaicos vêm sendo analisadas, porém, o mercado restringe-se ainda ao uso do silício como material mais utilizado na fabricação de painéis.

Com as simulações dos sistemas fotovoltaicos através do simulador América do Sol foi possível projetar qual o tamanho dos sistemas que atenderiam às demandas nas localidades escolhidas. Além do mais, ter tido um orçamento real de um fornecedor deixou a ideia do investimento mais concreta.

Do ponto de vista de análise econômica, tanto o projeto realizado para a cidade de Agrestina – PE como para a de Teresina – PI mostrou-se viável. No primeiro caso, o VPL calculado foi de R\$ 16.293,06 e a TIR foi de 9%, caracterizando a viabilidade do projeto. O tempo de retorno do investimento girou em torno de 12 anos. Para Teresina, o VPL foi ainda maior atingindo o valor de R\$ 32.043,17 e a TIR sendo igual a 13%, mais que triplicando o custo de oportunidade escolhido que foi a poupança com 4,02%. O tempo de retorno do investimento em Teresina foi de 8 anos e 9 meses, considerando um tempo não tão grande tendo em vista o tempo de vida útil do investimento que é de cerca de 25 anos.

Comparando os dois projetos, é possível observar que Teresina proporciona mais adequação à instalação de projetos fotovoltaicos, potencial que começa a ser bastante explorado pelo governo local, porém, não significa que o investimento em Agrestina trará prejuízo.

As análises feitas aqui tornam-se importante porque o alto investimento em projetos fotovoltaicos ainda assusta investidores, no entanto foi possível observar que eles começam a ser viáveis economicamente e que o comprador desse tipo de energia tem em mãos uma energia de qualidade e que fere o meio ambiente minimamente, fatos que ainda não são levados em conta durante a tomada de decisão.

BIBLIOGRAFIA

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA - ANEEL. **Resolução Normativa N° 482**. 3ª. ed. Brasília - DF: Aneel, 2012.

ALTINO VENTURA FILHO. **O Brasil no Contexto Energético Mundial**. Brasília. 2009.

AMÉRICA DO SOL. Simulador Solar América do Sol. **América do Sol**. Disponível em: <<http://www.americadosol.org/simulador-solar/>>. Acesso em: 11 Maio 2015.

ANEEL. Energia Solar. In: _____ **Atlas de Energia Elétrica**. Brasília: ANEEL, 2005. p. 29 - 45.

ANEEL. **Por dentro da conta de luz**. Brasília. 2008.

BUHLER, A. J. **Determinação de Parâmetros Fotovoltaicos a partir de Ensaios de Curvas Características sem Iluminação**. Porto Alegre. 2007.

CAMPOS, E. L. F. **Construção de um caracterizador de curvas de painéis solares utilizando um conversor boost**. Viçosa. 2013.

CHIGERÚ TIBA. **Atlas Solarimétrico do Brasil**. Recife. 2000.

DE O. M. VARELLA, F. K.; MAIA GOMES, R. D. **Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede Elétrica no Brasil: Panorama da Atual Legislação**. Campinas. 2009.

DE OLIVEIRA PAMPLONA, E.; BARRA MONTEVECHI, J. A. **Engenharia Econômica I**. [S.l.]: [s.n.], 2006.

GALDINO, M. A. **Análise de custos históricos de sistemas fotovoltaicos no Brasil**. V Conferência Latino-Americana da ISES. São Paulo: CEPTEL. 2012.

GEOCITIES. BANDAS DE ENERGIA. **GEOCITIES.WS**. Disponível em: <<http://www.geocities.ws/jcc5003/oqueebandadeenergia.html>>. Acesso em: 20 Abril 2015.

GOVERNO DO ESTADO DO PIAUÍ. Portal do Governo do Estado do Piauí. **Piauí Governo do Estado**. Disponível em: <<http://www.piaui.pi.gov.br/noticias/index/categoria/3/id/17904>>. Acesso em: 13 Maio 2015.

HETEM, G.; PEREIRA, J. O Sol. In: _____ **Observatório Virtuais - Fundamentos de Astronomia**. [S.l.]: VITAE, 2007. p. 11.

INSTITUTO SUPERIOR TÉCNICO. **Energia Fotovoltaica - Manual Sobre Tecnologias, Projetos e Instalação**. Portugal: ALTENER, 2004.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCE. **Monthly Electricity Statistics**. [S.l.]. 2014.

JÚNIOR, S. L. D. R. S. **Análise de Materiais e técnicas de Encapsulamento de Módulos Fotovoltaicos**. Porto Alegre. 2008.

KRENZ, P.; STADLER, I. **Análise sobre a instalação do Dispositivo de Seccionamento Visível (DSV) na microgeração**. [S.l.]. 2014.

LOUDAL, V. **Análise de Viabilidade Técnica e Econômica de um Microsistema Eólico Conectado à rede Elétrica**. Campina Grande. 2015.

MELO, L. S. D. **Sistema Solar Fotovoltaico Conectado à Rede Elétrica: Estudo de Caso**. Campina Grande. 2014.

NASCIMENTO, C. A. D. **Princípio de Funcionamento da Célula Fotovoltaica**. Lavras. 2004.

PINHO, JOÃO TAVARES; GALDINO, MARCO ANTONIO. **Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos**. Rio de Janeiro: CEPEL - CRESESB, 2014.

RECHARGENEWS. Recharge Brasil. **rechargenews**. Disponível em: <<http://www.rechargenews.com/brasil/article1385488.ece>>. Acesso em: 01 Maio 2015.

REDE DE POLÍTICAS DE ENERGIA RENOVÁVEIS PARA O SÉCULO XXI. **Renováveis 2012 Relatório da Situação Global**. Paris. 2012.

REPSOL. Matriz Energética Mundial. **Repsol**, 2012. Disponível em: <https://www.repsol.com/pt_pt/corporacion/conocer-repsol/contexto-energetico/matriz-energetica-mundial/>. Acesso em: 18 Abril 2015.

ROCHA, T. **Efeito das Resistências Internas na Resposta de Aglomerados Auto-Reconfiguráveis de Células Solares Fotovoltaicas**. Belo Horizonte. 2008.

RSTA. RSTA. **Relé Solar de Transferência Automática**. Disponível em: <<http://rstaeletronicos.com.br/>>. Acesso em: 11 Maio 2015.

WIKIENERGIA. Célula Fotovoltaica Multijunção. **wikienergia.pt**. Disponível em: <http://www.wikienergia.pt/~edp/index.php?title=C%C3%A9lula_fotovoltaica_multijun%C3%A7%C3%A3o>. Acesso em: 01 Maio 2015.