

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

ADRIANO ALIMENA DEL GRANDE

**SISTEMAS FOTOVOLTAICOS PARA GERAÇÃO DE
ENERGIA ELÉTRICA**

Porto Alegre

2013

ADRIANO ALIMENA DEL GRANDE

SISTEMAS FOTOVOLTAICOS PARA GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

Projeto de Diplomação apresentado ao Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para Graduação em Engenharia Elétrica.

ORIENTADOR: Luiz Tiarajú dos Reis Loureiro

Porto Alegre

2013

ADRIANO ALIMENA DEL GRANDE

SISTEMAS FOTOVOLTAICOS PARA GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

Este projeto foi julgado adequado para fazer jus aos créditos da Disciplina de “Projeto de Diplomação”, do Departamento de Engenharia Elétrica e aprovado em sua forma final pelo Orientador e pela Banca Examinadora.

Orientador: _____

Prof. Dr. Luiz Tiarajú dos Reis Loureiro, UFRGS

Doutor pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul – Porto

Alegre, Brasil

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Luiz Tiarajú dos Reis Loureiro, UFRGS

Doutor pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul – Porto Alegre, Brasil

Prof. Dra. Gladis Bordin, UFRGS

Doutora pela Universidade Federal de Santa Catarina – Florianópolis, Brasil

Prof. Dr. Roberto Petry Homrich, UFRGS

Doutor pela Universidade Estadual de Campinas – Campinas, Brasil

Porto Alegre, Julho de 2013.

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho à minha avó Lurdes.

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, José Eduardo e Lúcia, pelo carinho e apoio ao longo destes mais de 5 anos.

Ao meu irmão Thomás e à Elisandra pela ajuda em diversas etapas ao longo do curso.

À minha namorada Julia pelo amor, companheirismo e incentivo deste o primeiro dia ao meu lado.

Às minhas avós, Lurdes e Concília, por toda companhia e ajuda.

Ao meu tio Paulo e à Del Grande Informática e Telecomunicações pelas oportunidades de estágio e trabalho na área que me identifico.

Ao professor Luiz Tiarajú por ter aceitado orientar-me neste trabalho e pela ajuda no estágio obrigatório.

À professora Gladis pela ajuda ao longo deste último semestre.

À família Aloise pela imensa receptividade comigo.

Ao meu grande amigo Julio Groth pelas noites de estudo, companheirismo e churrascos ao longo do curso.

Aos meus amigos de Bento Gonçalves que entenderam a minha distância neste semestre de muito trabalho e projetos.

Ao Michele e Bianca que ajudaram nos 6 meses mais incríveis da minha graduação durante minha estadia na Itália.

À todos que de alguma forma contribuíram para este momento.

RESUMO

Com o aumento das preocupações globais com o meio ambiente, a geração de energia elétrica vem sendo direcionada de maneira a ser produzida por fontes renováveis e com o menor impacto ambiental possível. No Brasil, uma nova realidade no sistema energético ocorreu após as reformas e privatizações dos anos 90 quando o sistema elétrico passou a receber grandes quantias de capital para recuperar décadas de estagnação tecnológica do sistema. A diminuição da desigualdade social e o acesso ao crédito levou o brasileiro a adquirir equipamentos eletroeletrônicos aumentando a carga do sistema elétrico do país e, conseqüentemente, a demanda. O alto custo de investimento e impacto ambiental de usinas hidrelétricas e térmicas em conjunto com a redução de custos e aumento da eficiência de novos sistemas impulsionam a geração de eletricidade por fontes renováveis. Com o presente cenário, este trabalho apresenta um estudo sobre a geração de energia elétrica por sistemas fotovoltaicos, sua evolução no tempo e tecnológicos e um estudo de caso para compreensão dos aspectos técnicos e econômicos de um sistema residencial de pequeno porte na região litorânea do estado do Rio Grande do Sul.

Palavras-chave: painéis fotovoltaicos, geração de energia elétrica, fontes renováveis.

ABSTRACT

The concern about the environment grows constantly and the generation of electrical power is being directioned to be produced by renewable sources with no impact over de nature. In Brazil, the new moment of the energetic system had started after the privatization of the electrical system in the 90 when it received a big quantity of investments to recover decades of no improvements. The reduction of social inequality and access to credit led Brazilian citizens to purchase electronics equipments, increasing the load of the electrical system and the demand. The high investments costs and environmental impact of large hydroelectric and thermal plants together with the costs reduction and increased efficiency of new systems make the electricity generation from renewable sources and lower costs becomes a reality nowadays. On this scenario, this project presents a study about the electric generation by photovoltaic system, its evolution in time and technology, and a study for understanding the technical and economic aspects of a small and domestic system in the coastal region in the state of Rio Grande do Sul.

Keywords: Photovoltaic system, electrical power generation, renewable sources.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	14
1.1 EXPOSIÇÃO DO ASSUNTO	14
1.2 OBJETIVOS	17
1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO.....	17
2. ENERGIA SOLAR	18
2.1 CAPTAÇÃO SOLAR.....	19
2.2 EFEITO FOTOELÉTRICO	20
2.3 CÉLULA FOTOVOLTAICA	21
2.4 CÉLULA FOTOVOLTAICA DE SILÍCIO.....	22
2.5 DOPAGEM DE SEMICONDUTORES	23
2.6 FORMAS DE SILÍCIO UTILIZADAS	24
2.6.1.SILÍCIO MONOCRISTALINO.....	24
2.6.2.SILÍCIO MULTICRISTALINO	25
2.7 FILMES FINOS.....	26
2.8 CARACTERÍSTICAS ELÉTRICAS DA CÉLULA SOLAR	27
2.8.1.TENSÃO DE CIRCUITO ABERTO E CORRENTE DE CURTO-CIRCUITO	27
2.8.2.EQUACIONAMENTO E FATOR DE FORMA.....	29
2.8.3.EFEITO DA TEMPERATURA SOBRE A CURVA CARACTERÍSTICA I – V	30
2.8.4.EFEITO DA INCIDÊNCIA DA RADIAÇÃO SOLAR	31
2.9 EQUACIONAMENTO DE UMA CÉLULA FOTOVOLTAICA.....	32
3. MODELAGEM DE MÓDULOS FOTOVOLTAICOS	34
3.1 COMPARAÇÃO DA CONEXÃO ELÉTRICA DE MÓDULOS FOTOVOLTAICOS .	36
3.2 PARÂMETROS PARA OPERAÇÃO DE GERADORES FOTOVOLTAICOS	37

3.2.1.AVALIAÇÃO DO RECURSO SOLAR.....	38
3.2.3.PERDAS POR REFLEXÃO.....	40
3.2.4.VIDA ÚTIL DE MÓDULOS FOTOVOLTAICOS.....	40
3.2.5.COEFICIENTE DE TEMPERATURA.....	41
3.2.6.EFICIÊNCIA E ÁREA ILUMINADA.....	42
3.3 COMPONENTES DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS.....	43
3.3.1.O SISTEMA INVERSOR.....	43
3.3.2.PROTEÇÃO E ATERRAMENTO.....	47
3.3.3.SISTEMA DE FIXAÇÃO.....	48
3.3.4.CABOS E CONEXÕES.....	49
3.3.5.ARMazenamento de energia.....	49
3.3.6.MONITORAMENTO E IDENTIFICAÇÃO DE FALHAS.....	53
4. APLICAÇÕES DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS.....	55
4.1 SISTEMAS DOMÉSTICOS INTERLIGADOS À REDE DE DISTRIBUIÇÃO (<i>ON-GRID</i>).....	55
4.2 PLANTAS DE GRANDE GERAÇÃO <i>ON-GRID</i>	57
4.3 SISTEMAS PARA ELETRIFICAÇÃO RURAL ISOLADOS (<i>STAND-ALONE</i> OU <i>OFF-GRID</i>).....	58
4.4 SISTEMAS HÍBRIDOS.....	61
5.CENÁRIO BRASILEIRO, EXPECTATIVA DO MERCADO E SUSTENTABILIDADE.....	63
5.1 GERAÇÃO DISTRIBUÍDA DE ENERGIA ELÉTRICA.....	63
5.2 RESOLUÇÃO NORMATIVA 482.....	64
5.3 SISTEMAS FOTOVOLTAICOS INSTALADOS NO BRASIL.....	65
5.4 POTENCIAL ENERGÉTICO BRASILEIRO POR SISTEMAS FOTOVOLTAICOS.....	66
5.5 SITUAÇÃO DO MERCADO DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS.....	67
5.6 EXPECTATIVA DE MERCADO.....	68
5.7 CUSTO DE MÓDULOS FOTOVOLTAICOS.....	69
5.8 SUSTENTABILIDADE.....	69

6. ESTUDO DE CASO	71
6.1 LEVANTAMENTO DE DADOS	71
6.2 CONSUMO DE ENERGIA ELÉTRICA	71
6.3 RADIAÇÃO SOLAR.....	73
6.4 CARACTERÍSTICAS DOS PAINÉIS E INVERSORES.....	75
6.5 ANÁLISE DO POTENCIAL ENERGÉTICO DO PROJETO.....	78
7. CONCLUSÕES	84

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Potencial Efetivo de Amenização de Carga de Sistema PV.	16
Figura 2: Radiação solar global diária – média anual típica (Wh/m ² /dia).....	19
Figura 3: Energia cinética dos fotoelétrons.	21
Figura 4: Célula, módulo e arranjo fotovoltaico.	21
Figura 5: Conversão de energia luminosa em uma célula de Silício.....	22
Figura 6: Estrutura de uma célula solar de silício.	25
Figura 7: Processo produtivo de um Sistema PV.	26
Figura 8: Curva característica I x V de uma célula de silício monocristalino.....	28
Figura 9: Curva característica P x V de uma célula de silício monocristalino.....	28
Figura 10: Parâmetros Ponto de Potência Máxima de uma Célula Solar.....	29
Figura 11: Fator de Forma.	30
Figura 12: Efeito da variação da temperatura na curva característica I x V.....	31
Figura 13: Variação na curva característica I x V com temperatura constante.	32
Figura 14: Circuito de uma célula fotovoltaica ideal.	32
Figura 15: Circuito de uma célula fotovoltaica real.	33
Figura 16: Curva I-V de uma célula fotovoltaica e de um módulo fotovoltaico.....	35
Figura 17: Curva de potência de um módulo fotovoltaico.	36
Figura 18: Conexão em paralelo de 6 módulos fotovoltaicos.	36
Figura 19: Conexão em série de 6 módulos fotovoltaicos.....	37
Figura 20: Diodo de <i>bypass</i> como proteção de células sombreadas.....	40
Figura 21: PMP <i>versus</i> temperatura para diferentes tecnologias.	42
Figura 22: Inversores individuais por módulo fotovoltaico.	44
Figura 23: Inversor centralizado.....	45
Figura 24: Um inversor por <i>string</i>	46
Figura 25: Topologia de um Sistema Fotovoltaico e componentes de proteção.	48
Figura 26: Topologia de um sistema fotovoltaico doméstico.....	50
Figura 27: Sistema de armazenamento CA.	51
Figura 28: Sistema de armazenamento CC.	52
Figura 29: Sistema fotovoltaico <i>on-grid</i>	56
Figura 30: <i>Bavaria Solar Park</i>	57
Figura 31: Configurações de sistemas com um (a) ou vários inversores (b).....	58

Figura 32: Eletrificação rural <i>off-grid</i> na América do Sul.....	60
Figura 33: Atendimento a estação de telecomunicações.	60
Figura 34: Sistema fotovoltaico isolado – Quadro resumo de atendimento a cargas.....	61
Figura 35: Sistema fotovoltaico híbrido – Exemplo de configuração do sistema.	62
Figura 36: Produtividade de energia por um sistema fotovoltaico de 700 W.	63
Figura 37: Curva de carga de um estabelecimento comercial.	64
Figura 38: Expectativa da demanda global de sistemas fotovoltaicos.	67
Figura 39: Os cinco maiores produtores de energia solar.	68
Figura 40: Mapeamento da oportunidade para sistemas fotovoltaicos.	68
Figura 41: Expectativa de preço para sistemas fotovoltaicos ao longo do século atual.	69
Figura 42: Ciclo de vida de um sistema fotovoltaico.	70
Figura 43: Histórico da EPBT para módulos de silício cristalino	70
Figura 44: Variação do consumo médio mensal de 2012.....	73
Figura 45: Curva de radiação solar para Porto Alegre com inclinação igual a latitude.	74
Figura 46: Curva de radiação solar para Porto Alegre com inclinação igual 24°.	74
Figura 47: Análise mensal de consumo diário médio e geração diária média.	80

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Materiais, eficiência e área utilizada.	42
Tabela 2: Capacidade dos sistemas instalados até o ano de 2010.	66
Tabela 3: Consumo médio mensal e diário.	72
Tabela 4. Radiação mensal em kWh/m ² /dia para inclinações de 30° e 24°.	75
Tabela 5: Análise de Painéis Fotovoltaicos.	76
Tabela 6. Análise de Inversores CC/CA.	76
Tabela 7: Estimativa de número de módulos.	77
Tabela 8: Estimativa de número de módulos em série.	78
Tabela 9: Geração mensal analisada para modelos 1, 2 e 3.	79
Tabela 10: Geração mensal analisada para modelos 4 e 5.	79
Tabela 11: Estimativa de custo de módulos fotovoltaicos.	80
Tabela 12: Estimativa de custo para estrutura de fixação.	81
Tabela 13: Estimativa de custo total do projeto.	81
Tabela 14: Avaliação final do projeto.	82

1. INTRODUÇÃO

O sol é a fonte primária e inesgotável de energia de nosso planeta. Dele derivam todos os demais tipos de energia disponíveis – eólica, biomassa, combustíveis fósseis e energia dos oceanos - através da consequência de sua atuação durante longos períodos de tempo para formação do universo atual. A formação terrestre foi influenciada por sua forma de atuação sobre o clima e como consequência formando os combustíveis fósseis, originando os ventos e moldando a natureza. Apenas no final do século XX, a obtenção de energia elétrica a partir de fontes renováveis começou a tomar forma técnica e econômica.

O início da nova necessidade em buscar fontes alternativas geradoras de energia limpa decorreram em função de diversos aspectos, tais como:

- Crescimento da população mundial e consequente aumento do consumo energético;
- Esgotamento em um futuro não tão mais distante dos combustíveis fósseis;
- Impactos ambientais irreversíveis na construção de grandes usinas hidrelétricas;
- Falta de solução sobre o lixo atômico produzido pelas usinas nucleares.

A energia solar pode ser aproveitada de três modos distintos [1]:

- Aquecimento passivo: destinado ao aquecimento natural considerado em projetos arquitetônicos – também classificado como arquitetura bioclimática;
- Térmica: destinada aos sistemas de coletores solares para aquecimento hídrico;
- Fotovoltaica: destinada a geração de eletricidade através da incidência luminosa.

1.1 EXPOSIÇÃO DO ASSUNTO

Da necessidade da geração de energia elétrica para o desenvolvimento mundial, grandes avanços tecnológicos ocorreram possibilitando a construção de grandes plantas com alta capacidade de produção de energia utilizando combustíveis fósseis via usinas termelétricas, a força das águas via usinas hidrelétricas e usinas nucleares. Porém, o primeiro modelo é uma grandeza finita e altamente poluente; o segundo causa um impacto ambiental elevado; o terceiro carece de maior controle - diversos acidentes nucleares ao longo do século passado e o mais recente no Japão em 2011 acabaram por questionar ainda mais este modelo - e gera resíduos atômicos sem solução até o presente. Desta maneira, a necessidade de geração de energia via métodos

alternativos e de baixo impacto tornou-se uma realidade ao mundo inteiro. Embora ainda não substituam por completo os modelos anteriores, as energias renováveis – classificadas como limpas - vêm conquistando espaço no mercado através de incentivos fiscais e aprimoramentos tecnológicos.

O aumento contínuo da demanda por energia em consequência do crescimento da população e da indústria requer maior quantidade geração de energia. Não significa que o modelo tradicional será abandonado por completo, mas a maior parte da energia para atender a esses novos consumidores será proveniente de fontes renováveis. Ou seja, atualmente as energias alternativas atuam como complementares do sistema de energia [2].

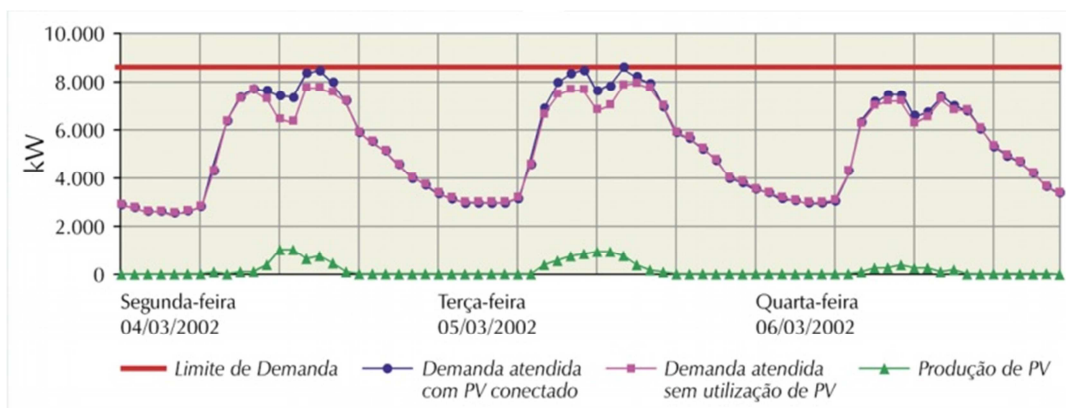
O avanço da indústria de semicondutores desde o século passado proporcionou o aprimoramento de materiais como o Silício, possibilitando o surgimento das células fotovoltaicas, as quais formam, em conjunto, um módulo fotovoltaico. A função básica deste dispositivo é captar a energia solar e convertê-la em energia elétrica por meio do efeito fotoelétrico, também chamado de fotovoltaico. Este tipo de sistema também é denominado Sistema PV, do inglês Photovoltaic, do grego photo que significa luz e voltaic que provém de volt (unidade de potencial elétrico) [3].

O Brasil é um país com um território amplo e com uma posição solar privilegiada. Em consequência da dimensão territorial o aproveitamento das energias alternativas é a única maneira de fornecer energia elétrica para populações localizadas em locais distantes e de difícil acesso, como por exemplo, a região Amazônica. Grande parte desta região é pobre em recursos eólicos e não está interligada ao sistema nacional, sendo que 45% da energia é fornecida por pequenas redes locais que atendem a aproximadamente 3% da população. O potencial da região é aproximadamente quatro vezes o potencial da Alemanha, maior produtor de energia via conversão de energia solar em elétrica [4].

A facilidade de implantação de Sistemas PV na zona urbana é um dos grandes benefícios proporcionados, pois a instalação é simples e utiliza o telhado das edificações. A curva de demanda em regiões comerciais, geralmente nas capitais, apresenta o pico de consumo no período diurno, exatamente o inverso do apresentado por zonas residenciais, as quais apresentam o pico de consumo no período noturno. Desta forma, Sistemas PV projetados para injetar na rede de distribuição a energia produzida no período diurno auxiliam ao atendimento da carga sem a necessidade de

armazenamento, enquanto projetos residenciais necessitam de sistemas de armazenamento para utilização posterior da energia. A Figura 1 apresenta a curva de demanda de uma zona urbana com o efeito de redução de pico através do uso de um pequeno número de módulos fotovoltaicos para auxiliar no atendimento a carga [5].

Figura 1: Potencial Efetivo de Amenização de Carga de Sistema PV.



Fonte: Atlas Brasileiro de Energia Solar [5]

No continente europeu e na América do Norte já existem incentivos para geração de energia elétrica via fontes alternativas que são direcionados aos consumidores residenciais e comerciais. Na Europa a regulamentação incentiva à injeção da energia produzida na rede com venda integral da produção e uso da energia da distribuidora, enquanto nos Estados Unidos o incentivo é para o consumidor ser autossuficiente e comprar apenas a quantidade necessária. Para os próximos anos, o conhecimento sobre sistemas PV será mais difundido e com consequente redução de custos da tecnologia e implantação e preservação do meio ambiente, será atrativo para consumidores e investidores [5].

O Brasil reestruturou sua matriz energética no final dos anos 90 com as privatizações do setor e na década atual é que está ocorrendo um incentivo maior a geração de energia para sustentar o fornecimento para o crescimento do país. Ainda é pouco conhecido o livre comércio de energia elétrica no país [2].

No ano de 2006 foi lançado o Atlas Brasileiro de Energia Solar, o qual faz parte do projeto SWERA (Solar and Wind Energy Resource Assessment – Avaliação das Fontes de Energia Solar e Eólica) [5].

Em abril de 2012 foi divulgado pela ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica) a Resolução Normativa 482, trata das condições para microgeração (potência

instalada inferior a 100 kW) e minigeração (potência instalada entre 100 e 1000 kW) distribuída ao sistema de distribuição. O consumidor assim tem a possibilidade de atuar como produtor, de ao menos uma parcela, da energia que utiliza. Gerando uma quantidade maior de energia do que a demandada, terá até 36 meses para abater em faturas o crédito gerado, além de poder utilizá-lo para quitar uma fatura de energia elétrica de outro recinto de sua titularidade, desde que previamente cadastrado. As fontes consideradas são eólica, solar, biomassa ou cogeração qualificada [6].

1.2 OBJETIVOS

Este trabalho tem por objetivo realizar um estudo sobre o uso de painéis fotovoltaicos para geração de energia elétrica; as vantagens e desvantagens do sistema em termos econômicos e ambientais; os materiais e tecnologia utilizados; os requisitos elétricos, funcionais e estruturais de projeto; e por fim, um estudo de caso analisando a viabilidade técnica e econômica de um projeto utilizando painéis fotovoltaicos interligado à rede de distribuição em uma residência no litoral do Rio Grande do Sul.

1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO

Este trabalho foi dividido nos seguintes capítulos: energia elétrica solar, componentes de sistemas fotovoltaicos, tipos de sistemas, regulamentação e situação de mercado, projeto e simulação e conclusão.

No Capítulo 2 abordam-se as questões relativas à conversão da energia solar em energia elétrica via painéis fotovoltaicos, princípio de funcionamento, evolução e eficiência das células coletoras e tecnologias atuais acerca do assunto.

No Capítulo 3 é realizado um estudo sobre os parâmetros para o correto dimensionamento de sistemas fotovoltaicos, componentes integrantes do sistema e condições para implantação.

No Capítulo 4 trata-se dos tipos de sistemas fotovoltaicos e suas características.

No Capítulo 5 trata-se do potencial brasileiro, Resolução 482 e expectativa do mercado mundial de sistemas fotovoltaicos.

No Capítulo 6 é realizado um estudo de caso sobre a viabilidade de um sistema fotovoltaico interligado à rede de distribuição em uma residência no litoral do Rio Grande do Sul.

No Capítulo 7 são apresentadas as conclusões do trabalho.

2. ENERGIA SOLAR

Já é comum haver coletores solares no topo de edificações visando o aquecimento de água para uso doméstico através da energia solar. Mais popular, mas menos utilizados em função do alto custo e pouco conhecimento técnico, os painéis fotovoltaicos têm a função de captar esta energia e convertê-la em energia elétrica. Contudo, com a Resolução Normativa 482, aumento da eficiência das células solares e diminuição de custos para implementação este cenário tende a se modificar em um período curto de tempo [5].

A Terra descreve uma órbita elíptica ao redor do sol com inclinação de aproximadamente $23,5^\circ$ em relação ao plano do Equador, a qual é responsável pelas estações do ano e diferentes elevações do sol o que dificulta o cálculo da posição solar para um determinado período. A duração do dia é função da latitude e da estação do ano. A trajetória do sol varia ao longo dos meses [3].

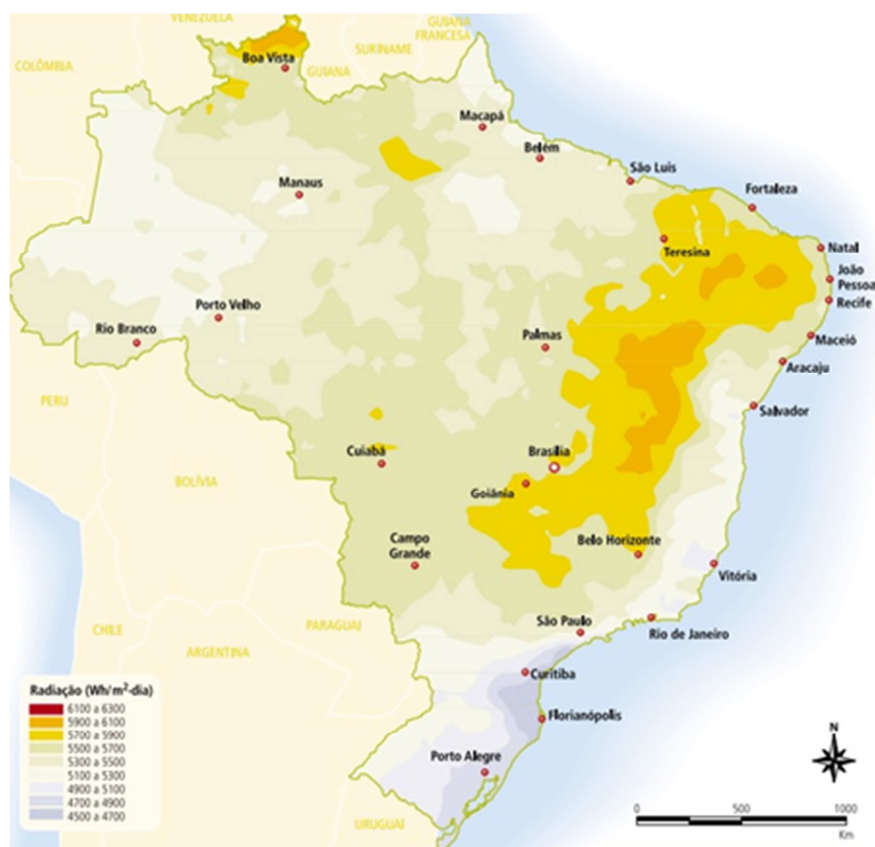
Dados recentes da Organização Mundial Meteorológica (WMO – World Meteorological Organization) indicam 1367 W/m^2 para a radiação terrestre, mas apenas uma fração atinge a superfície terrestre devido à reflexão e absorção dos raios na atmosfera. Para sistemas de captação solar com materiais posicionados de maneira inclinada haverá um terceiro componente de reflexão do entorno por obstáculos naturais ou artificiais [3].

Os sistemas fotovoltaicos fixos instalados no hemisfério sul devem ser orientados para o norte geográfico com inclinação próxima da latitude do local em relação à horizontal. Esta configuração visa receber melhor a radiação solar ao longo do ano. Para sistemas em regiões de baixa latitude deve-se manter uma pequena inclinação para drenagem da água das chuvas que acumularia na superfície externa dos coletores prejudicando a eficiência da superfície coletora [7].

Para sistemas fixos, mapas de radiação são suficientes para o dimensionamento de um sistema fotovoltaico. Para sistemas de captação com rastreamento solar ou simulações com valores instantâneos deve-se utilizar softwares que utilizam cálculos de astronomia de posição e dados de registros solarimétricos [3].

No Brasil há um número reduzido de equipamentos capaz de medir a radiação global. Isto dificulta o dimensionamento de projetos pela falta de dados dos recursos solares. A Figura 2 apresenta o mapa da radiação solar média diária no Brasil [5].

Figura 2: Radiação solar global diária – média anual típica ($\text{Wh}/\text{m}^2/\text{dia}$).



Fonte: Atlas de Irradiação Solar no Brasil [5].

2.1 CAPTAÇÃO SOLAR

O método de captura da energia solar é classificado como direto pelo fato de ocorrer apenas uma transformação para estar disponível para o uso geral na forma de energia elétrica. A conversão é realizada pelo efeito fotoelétrico que possibilita gerar energia útil [3].

A captação da luz solar é realizada por módulos ou placas fotovoltaicas, os quais são constituídos por um conjunto de células fotovoltaicas. Em sua grande maioria, são fabricadas a partir do Silício, segundo elemento mais abundante na crosta terrestre com aproximadamente 27% de participação, mas o alto custo dos painéis se deve ao fato de ser necessário um grau de pureza em torno de 99,99%. Em geral, é encontrado na forma de sílica e materiais silicatados, tais como alumínio, magnésio e ferro. Há diversas pesquisas sobre a utilização de diversas formas de Silício e outros semicondutores para a fabricação de módulos fotovoltaicos eficientes e viáveis economicamente [8].

2.2 EFEITO FOTOELÉTRICO

O princípio de funcionamento de uma célula fotovoltaica é baseado no efeito fotoelétrico, também denominado efeito fotovoltaico, no qual a energia luminosa é absorvida por elétrons do material. Este fenômeno foi descrito pela primeira vez em 1839, pelo físico francês Edmund Becquerel. Ele observou que uma pequena corrente elétrica era gerada quando certos materiais eram expostos à luz trabalhando com células eletrolíticas. Em 1905 Albert Einstein descreveu a natureza da luz e do efeito fotoelétrico. Ele observou que o efeito fotoelétrico era somente possível se a energia da onda eletromagnética estivesse contida em pequenos pacotes de energia chamados posteriormente, em 1926 por Gilbert Lewis, de fótons [9].

A partir da física quântica as ondas luminosas passaram a ser classificadas então como onda-partícula e a energia do feixe luminoso não estava espalhada e sim presente nos fótons. A energia incidente sobre o metal é absorvida por alguns elétrons – chamados de fotoelétrons - e reaparece como energia cinética [9].

A energia de um fóton é dada por hf , onde h é a Constante de Planck e f a frequência da luz. Os fótons de uma mesma frequência f possuem a mesma energia enquanto aumentando a intensidade da luz apenas aumenta o número de fótons do feixe [9].

A função trabalho, como mostra a Equação (1), de um determinado metal é definido a energia crítica para o elétron ser emitido da superfície. Quanto maior a função trabalho mais energia é necessária para o elétron ser emitido [9].

$$\Phi = h * f_o \quad (1)$$

De acordo com Einstein o efeito fotoelétrico de um determinado metal deve obedecer a Equação (2). A Figura 3 apresenta a incidência da energia luminosa no material e consequente absorção desta pelos fotoelétrons que entram em movimento [9].

$$h * f = K * E_{m\acute{a}x} + \Phi \quad (2)$$

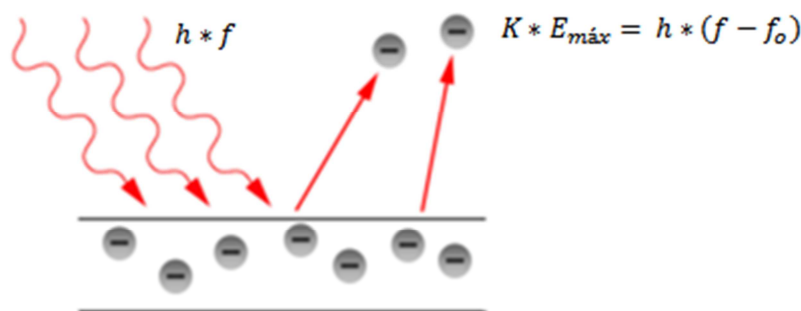
Onde:

- $h * f$ é a energia do fóton;
- $K * E_{m\acute{a}x}$ é a energia máxima do fotoelétron;
- Φ é a energia mínima para um elétron deixar o metal.

Substituindo a equação (2) em (1) obtém-se a Equação (3) [7].

$$\begin{aligned}
 h * f &= K * E_{m\acute{a}x} + h * f_o \\
 K * E_{m\acute{a}x} &= h * f - h * f_o \\
 K * E_{m\acute{a}x} &= h * (f - f_o)
 \end{aligned}
 \tag{3}$$

Figura 3: Energia cinética dos fotoelétrons.



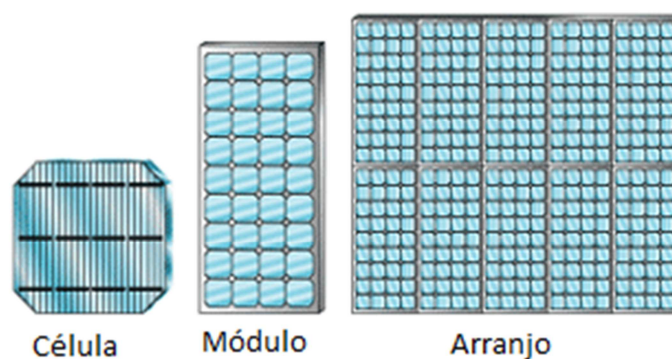
Fonte: http://www.physicsforums.com/library.php?do=view_item&itemid=30

(Adaptado)

2.3 CÉLULA FOTOVOLTAICA

A célula fotovoltaica é a unidade básica dos módulos fotovoltaicos. São dispositivos semicondutores fotossensíveis capazes de converter energia luminosa em energia elétrica através do efeito fotoelétrico descrito no item 2.2 e geralmente são construídas a partir de silício, mas novas tecnologias como filmes-finos, mas que ainda carecem de maior produção em larga escala para competir economicamente. Um conjunto de células forma um módulo que em conjunto forma um arranjo ou painel e são ilustrados na Figura 4. O conjunto de painéis é denominado array [10].

Figura 4: Célula, módulo e arranjo fotovoltaico.



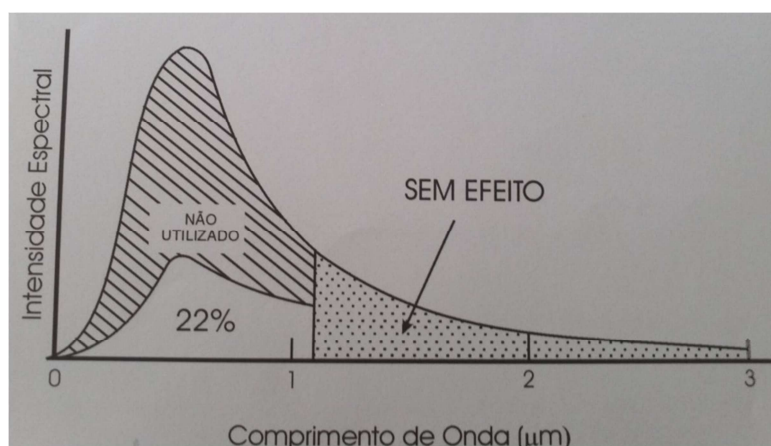
Fonte: U.S. Department of Energy [10]. (Adaptado)

Quando a energia luminosa incide na célula solar uma parcela é refletida, uma a atravessa e outra é absorvida. Isto significa que a nível atômico apenas uma parte desta energia é transferida aos elétrons através dos fótons incidentes permitindo que eles se movimentem livremente na estrutura atômica do material [10].

Quando um fóton colide com um elétron, este recebe a energia em forma de energia cinética para mover-se dentro da estrutura molecular do metal deixando um espaço no seu átomo de origem deixando um espaço vago chamado de lacuna. O elétron em movimento é denominado portador livre [10].

Como limitações para transformação de luz em eletricidade, apenas uma faixa do feixe luminoso, com comprimento de onda na ordem de $1\mu\text{m}$, é capaz de excitar os elétrons – Figura 5. Outro fator é que cada fóton consegue excitar apenas um elétron e a energia excedente a necessária para excitar um elétron não é aproveitada, gerando apenas calor e ocasionando perdas para o material [3].

Figura 5: Conversão de energia luminosa em uma célula de Silício.



Fonte: Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos [3].

A operação do sistema fotovoltaico opera também em dias nublados em função da reflexão da luz solar nas nuvens, podendo resultar em maior produção energética do que em dias de céu limpo [1].

2.4 CÉLULA FOTOVOLTAICA DE SILÍCIO

Quando uma quantidade de energia é direcionada para o silício puro apenas alguns poucos portadores livres conseguirão absorver a energia dos fótons deixando um espaço livre, classificado como buraco ou lacuna, ao saltar da camada de valência para a

camada condutora. Isto ocorre por que o silício é um elemento da família dos semicondutores que na sua forma pura não são bons condutores. A energia dos fótons variam com o comprimento de onda, estando em geral entre 0,5 e 2,9eV, enquanto a energia para excitar o elétron de uma célula fotovoltaica de silício é na faixa de 1,1eV [10].

Apesar de silício ser abundante na natureza, para produção de células fotovoltaicas ele deve possuir uma pureza na ordem de 99,999% o que torna seu custo mais elevado, além de difícil fabricação e baixa eficiência para métodos de fabricação em larga escala [10].

2.5 DOPAGEM DE SEMICONDUTORES

A teoria atômica de Bohr expõe que elétrons orbitam em torno do núcleo em órbitas distintas, as quais são relacionadas com níveis distintos de energia. A última camada é chamada banda de valência enquanto a anterior de banda de condução. Quando os átomos de silício são reunidos para formar um cristal, por ser tetravalente – quatro elétrons na camada de valência – irá realizar quatro ligação extras para completar a banda [11].

Um elétron de valência recebe energia de um fóton suficiente para romper a ligação com o átomo tornando-se livre dentro do cristal. Os portadores livres, como são denominados os elétrons em movimento - surgem devido à agitação térmica nos semicondutores. Os elétrons absorvem energia e se movimentam da camada de valência para a camada de condução. Porém, em um semicondutor puro, como o cristal de silício, serão poucos elétrons entrando em movimento que a corrente elétrica gerada será desprezível [3].

A dopagem de um material semicondutor é realizada com adição de uma pequena quantidade de outro elemento, classificado como impureza, alterando as propriedades elétricas do semicondutor tornando-o melhor condutor de eletricidade. A adição desta impureza é classificada como dopagem [10].

Elemento dopantes podem ser tipo n ou tipo p. O tipo n resulta em carga negativa, pois haverá elétrons livres no novo cristal presentes na banda de condução. O mais conhecido dos dopantes tipo n é o fósforo. Enquanto tipo p resulta em carga positiva, criando lacunas (buracos) para onde os portadores livres que serão atraídos para a banda de valência. O mais conhecido deste dopante é o boro [10].

A célula consiste de duas camadas de semicondutor. Uma com tratamento de dopagem tipo N e outra com tipo P. Os portadores livres da camada tipo N irão em direção as lacunas na camada tipo P pela ação do campo elétrico que surge entre a junção das duas camadas e mantém o fluxo de cargas gerando corrente elétrica. Esta corrente será proporcional a intensidade luminosa incidente [1].

O rendimento da célula solar é medido em função da eficiência em transformar a luz em energia. Tipicamente, as fabricadas a partir de silício alcançam em torno de 17% de eficiência, ou seja, apenas um sexto sobre o total da incidência. O aumento da eficiência da célula solar é o principal requisito dos Sistemas PV a ser melhorado pela indústria do setor para maior disseminação da tecnologia [1].

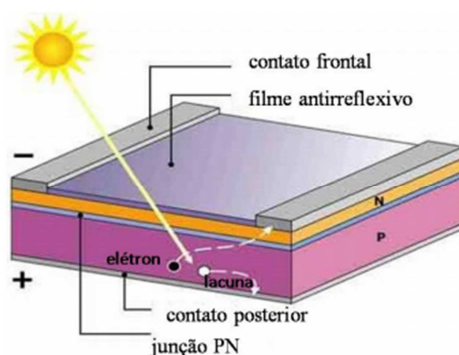
2.6 FORMAS DE SILÍCIO UTILIZADAS

2.6.1. SILÍCIO MONOCRISTALINO

Esta tecnologia é dominada pela indústria mundial de semicondutores, sendo a mesma utilizada na fabricação de circuitos integrados, possibilitando alta confiabilidade do produto. Teoricamente o limite de conversão é aproximadamente de 27% da luz solar incidente, porém comercialmente são encontrados módulos com eficiência de 12 a 17% [10].

O processo de fabricação funde o silício a temperaturas na faixa de 1400 °C com um grau de pureza na faixa de 99,99%. Etapas complementares como crescimento do monocristal, corte de lâminas por diamante, dopagem química e interconexão de células em série tornam o custo do processo muito elevado e, conseqüentemente, afetando o custo do módulo final ao consumidor. A Figura 6 demonstra a estrutura de uma célula de silício cristalino [12].

Figura 6: Estrutura de uma célula solar de silício.



Fonte: Tecnologia Fotovoltaica em Filmes Finos [12].

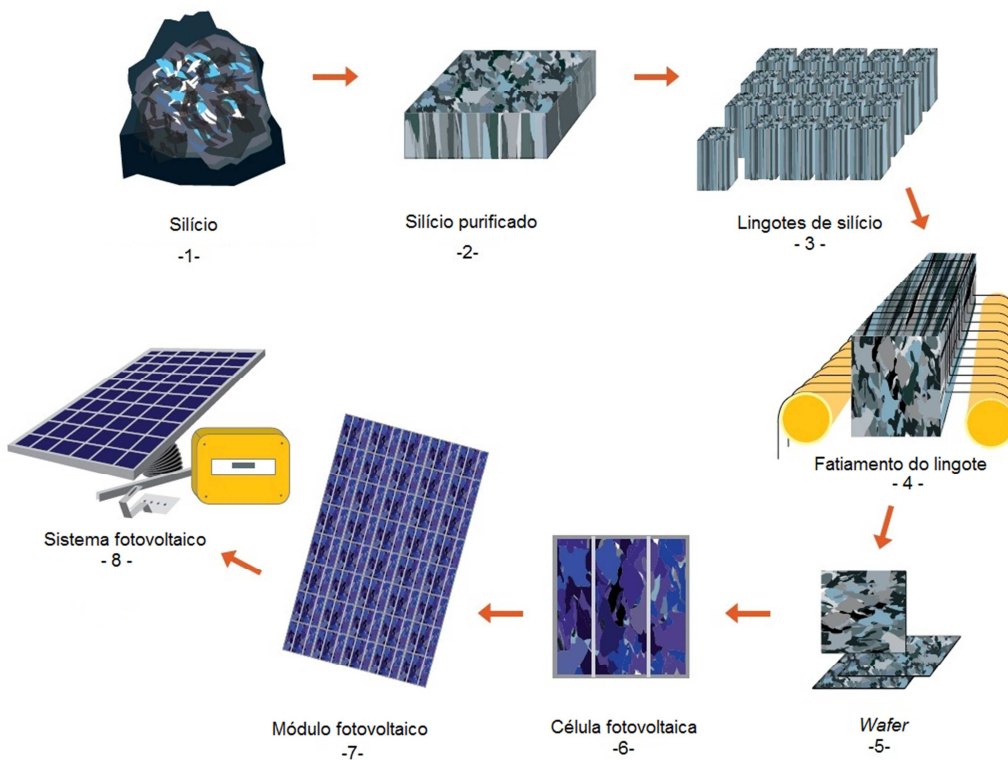
2.6.2. SILÍCIO MULTICRISTALINO

A tecnologia de módulos fotovoltaicos a partir de silício multicristalino (policristalino) apresenta uma eficiência levemente inferior a tecnologia a partir de silício monocristalino devido à exigência mais branda quanto a pureza do silício na faixa de 98%. O material é fundido e posteriormente solidificado direcionalmente para formar as células [12].

Este processo requer uma quantidade significativamente menor de energia para produção em comparação com a célula monocristalina pela menor complexidade produtiva, sendo um método mais viável economicamente [10].

Em conjunto com a indústria de silício monocristalino esta tecnologia representa 90% do mercado atual. A Figura 7 ilustra o processo de fabricação de módulo fotovoltaico [1].

Figura 7: Processo produtivo de um Sistema PV.



Fonte: EPIA: Photovoltaic energy – Electricity from the sun [1]. (Adaptado)

Onde na Figura 7 os números significam:

1. Matéria-prima para fabricação (silício);
2. Silício purificado em forma de lingote;
3. Divisão em lingotes menores;
4. Fatiamento do lingote em lâminas de espessura micrométrica;
5. Após ser fatiado tem-se o *wafer* de silício – 300 μm ;
6. Construção da célula solar;
7. União das células formando o módulo fotovoltaico e
8. Sistema fotovoltaico posicionado pronto para gerar energia.

2.7 FILMES FINOS

A células de filmes finos são resultados de estudos em busca de alternativas ao uso de células de silício mono e policristalino. A técnica utiliza além do silício amorfo (a-Si) outros semicondutores, tais como telureto de cádmio (CdTe) e arseneto de gálio (GaAs) [10].

Estes materiais são fabricados pelo depósito de material em camadas extremamente finas, tais como vidro, plástico e aço inoxidável [1].

Esta tecnologia visa utilizar uma menor quantidade de material reduzindo o processo e custo de fabricação almejando um preço competitivo e acessível no mercado. Enquanto as células mono e policristalinas possuem na faixa de 300 a 400 μm , os filmes finos são fabricados na faixa de 1 μm . Entretanto, a fabricação em larga escala de painéis fotovoltaicos através de filmes finos ainda é incerta pela utilização de materiais de difícil aquisição [12].

2.8 CARACTERÍSTICAS ELÉTRICAS DA CÉLULA SOLAR

Os parâmetros da célula solar são determinantes para que se possa selecionar o módulo apropriado para o sistema projetado. Geralmente, a potência dos módulos é fornecida em potência de pico expressa por W_p . Os principais conceitos necessários são a potência máxima, P_m , a tensão elétrica de potência máxima, V_{mp} , a corrente de potência máxima, I_{pm} , tensão de circuito aberto e corrente de curto-circuito [3].

2.8.1. TENSÃO DE CIRCUITO ABERTO E CORRENTE DE CURTO-CIRCUITO

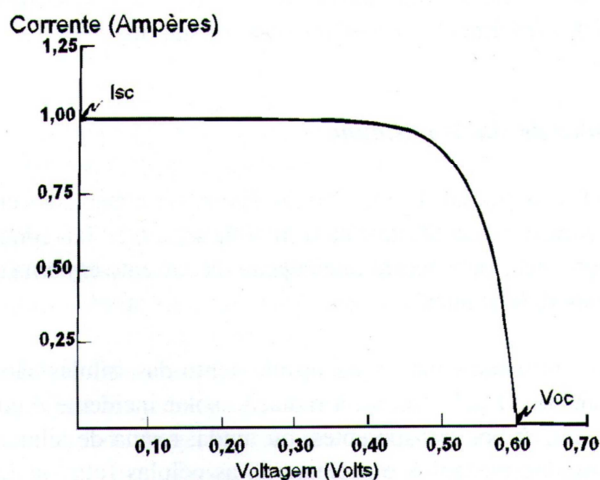
Quando o módulo é posicionado a receber radiação solar, mas não está conectado a uma carga externa a corrente não flui e pode-se medir a tensão entre os terminais positivo e negativo. Esta medida é denominada tensão de circuito aberto, V_{oc} , e fornece a tensão elétrica máxima produzida pelo dispositivo [13].

O segundo ensaio é realizado conectando os terminais do módulo em curto-circuito. Haverá corrente fluindo enquanto a tensão sobre os terminais é nula. Esta corrente é denominada corrente de curto-circuito, I_{sc} [13].

Realizando medições com uma carga variável conectada aos terminais é possível coletar dados para plotar a curva característica $I \times V$, mostrada na Figura 8. O levantamento da curva está associado à três parâmetros [11]:

- Condições de radiação;
- Temperatura;
- Massa de ar.

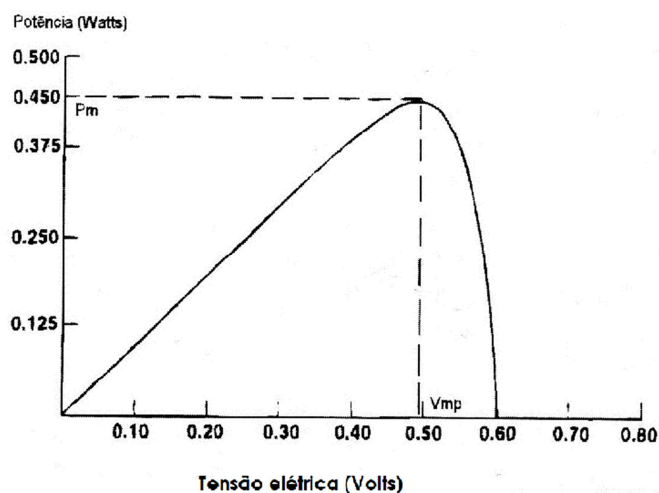
Figura 8: Curva característica I x V de uma célula de silício monocristalino.



Fonte: Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos [3].

Para uma célula, e conseqüentemente, para um módulo, existe somente um valor de tensão o qual a potência extraída é máxima. Este ponto, P_m , corresponde ao produto da tensão V_{mp} e da corrente I_{mp} (2). A Figura 9 ilustra a curva de potência versus tensão.

Figura 9: Curva característica P x V de uma célula de silício monocristalino.

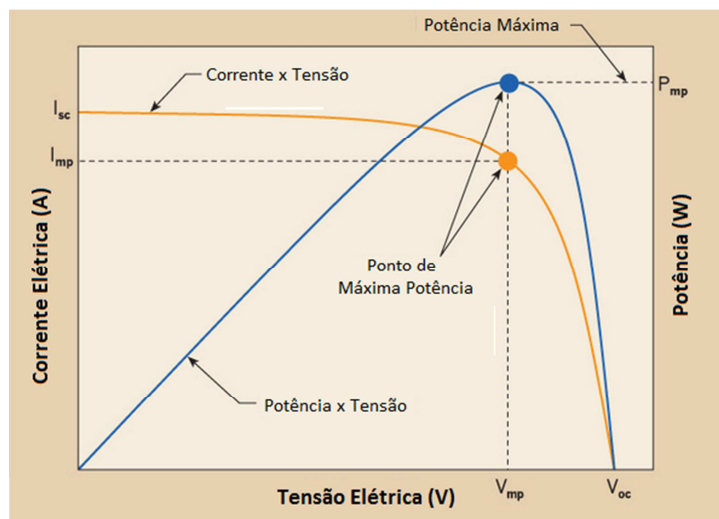


Fonte: Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos [3].

A análise conjunta da curva da Figura 9, onde observa-se o ponto máximo de potência gerada em função da tensão elétrica gerada, com a curva da Figura 8 obtém-se o Ponto de Máxima Potência. O gráfico na Figura 10 apresenta a análise conjunta destes

dois gráficos para identificar os níveis de tensão e corrente do ponto ideal de operação [3].

Figura 10: Parâmetros Ponto de Potência Máxima de uma Célula Solar.



Fonte: Electrical Construction & Maintenance [14]. (Adaptado)

2.8.2. EQUACIONAMENTO E FATOR DE FORMA

A partir do gráfico da curva característica I x V ilustrado na seção anterior, pode-se calcular as equações a seguir [3].

A potência máxima é representada pela Equação (4):

$$P_m = I_{mp} \cdot V_{mp} \quad (4)$$

A eficiência é representada pela Equação [5]:

$$\eta = \frac{I_{mp} \cdot V_{mp}}{A \cdot I_c} = \frac{I_{mp} \cdot V_{mp}}{P_i} \quad (5)$$

Onde: I_c = luz incidente – Potência luminosa incidente (W/m^2)

A = área útil do módulo (m^2)

$P_i = A \times I_c$ = potência de radiação solar incidente

O Fator de Forma, FF, expressa quanto a curva característica I x V se aproxima de um retângulo. Quanto melhor o rendimento, mais próxima da forma retangular será. É a menor área entre corrente de máxima potência e tensão de máxima potência em razão da corrente de curto-circuito, I_{sc} , e da tensão de circuito aberto, V_{oc} , sendo sempre

menor que a unidade e com valores entre 0,7 e 0,8 para células de silício monocristalino e policristalino [3].

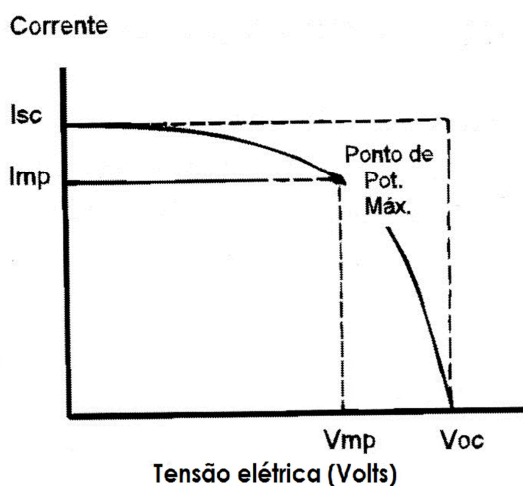
A definição é mostrado na Figura 11 e sua formulação é expressa pela Equação (6) [11]:

$$FF = \frac{I_{mp} \cdot V_{mp}}{I_{sc} \cdot V_{oc}} = \frac{I_{mp} \cdot V_{mp}}{P_i} \quad (6)$$

A eficiência da célula pode ser reescrita simplificado pela Equação 7 em função dos ensaios a vazio e de curto-circuito [11].

$$\eta = \frac{FF \cdot I_{sc} \cdot V_{oc}}{P_i} \quad (7)$$

Figura 11: Fator de Forma.



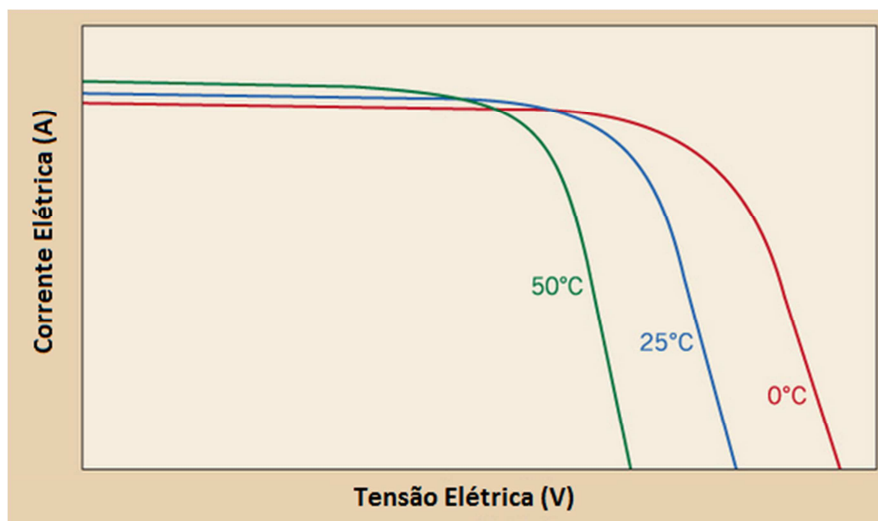
Fonte: Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos [3].

2.8.3. EFEITO DA TEMPERATURA SOBRE A CURVA CARACTERÍSTICA I - V

O aumento de temperatura é ocasionado diretamente pelo aumento da insolação solar tendendo a reduzir a eficiência do módulo. As maiores alterações são nos valores da tensão de circuito aberto que diminui aproximadamente 2 mV para cada grau Celsius de acréscimo na temperatura, enquanto a corrente de curto circuito varia muito pouco, em torno de 0,06% [13].

A Figura 12 mostra diversas curvas I x V para diferentes temperaturas de operação considerando-se a potência de radiação solar incidente constante a 1000 W/m².

Figura 12: Efeito da variação da temperatura na curva característica I x V.



Fonte: Electrical Construction & Maintenance [14]. (Adaptado)

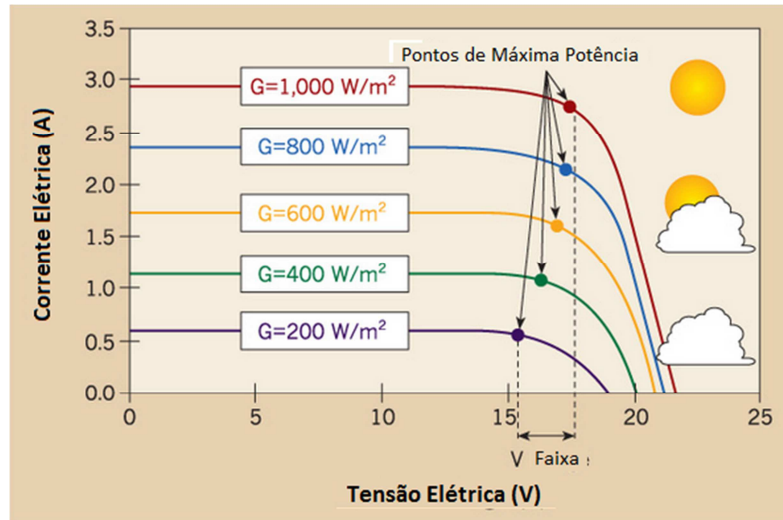
2.8.4. EFEITO DA INCIDÊNCIA DA RADIAÇÃO SOLAR

Um parâmetro importante a ser determinado é a melhor inclinação do módulo fotovoltaico em relação a horizontal, denominada β . Normalmente os sistemas fixos são os mais frequentes, principalmente pelo maior custo de sistemas de seguimento solar e necessidade de manutenções periódicas. A escolha do melhor ângulo depende da latitude local e da demanda projetada [7].

A incidência solar desloca o ponto de corrente de curto-circuito I_{sc} da curva característica, pois altera a quantidade de portadores livres ionizados. A tensão de circuito-aberto não sofre grandes alterações [13].

A Figura 13 ilustra o efeito causado pela variação da intensidade da luz na curva característica I x V.

Figura 13: Variação na curva característica I x V com temperatura constante.

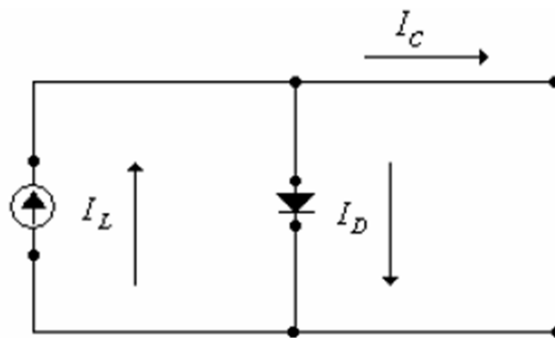


Fonte: Electrical Construction & Maintenance [14]. (Adaptado)

2.9 EQUACIONAMENTO DE UMA CÉLULA FOTOVOLTAICA

A análise de uma célula individual é como uma junção P-N (diodo retificador) e uma fonte de corrente conforme a Figura 14 [13].

Figura 14: Circuito de uma célula fotovoltaica ideal.



Fonte: Análise de desempenho de um gerador fotovoltaico com seguidor azimuthal [13]

A corrente elétrica gerada pela célula através da incidência da radiação solar é representada por I_L ; I_D é a corrente que circula no diodo e I_C é a corrente que circula pela célula conforme a Equação (8) [13].

$$I_C = I_L - I_D \quad (8)$$

I_D é determinada pela Equação (9).

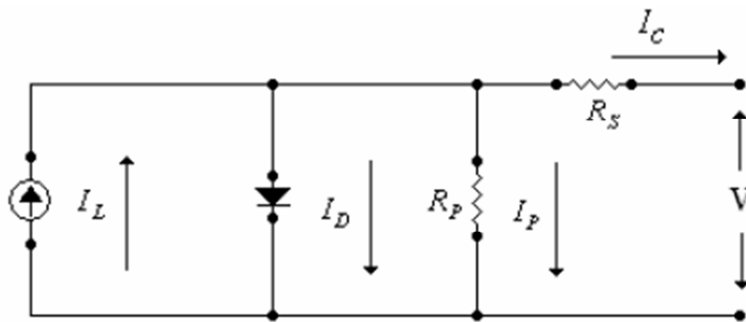
$$I_D = I_o \cdot \left(\exp\left(\frac{eV}{mkT}\right) - 1 \right) \quad (9)$$

Onde:

- I_o é a corrente de saturação reserva;
- e é a carga elétrica do elétron ($1,6 \cdot 10^{-19} C$);
- V é a a tensão elétrica nos terminais da célula;
- m é o fator de idealidade do diodo (entre 1 e 2);
- k é a constante de Boltzmann ($1,38 \cdot 10^{-23} m^2 \cdot kg \cdot s^{-2} \cdot K^{-1}$);
- T é a temperatura absoluta da célula em Kelvin.

Para o modelo real de uma célula fotovoltaica real deve-se considerar a resistência série que representa a resistência da célula (R_s) e a resistência paralela que representa as correntes de fuga (R_p). A Figura 15 ilustra o modelo ideal [13].

Figura 15: Circuito de uma célula fotovoltaica real.



Fonte: Análise de desempenho de um gerador fotovoltaico com seguidor azimuthal [13].

A equação do modelo real é expressa pela Equação (10).

$$I_c = I_L - I_D - I_p \quad (10)$$

A corrente de fuga é expressa pela Equação (11).

$$I_p = \frac{V + I_c \cdot R_s}{R_p} \quad (11)$$

A Equação (10) pode ser reescrita na forma da Equação (12).

$$I_c = I_L - I_o \left\{ \exp\left(\frac{e(V + I_c \cdot R_s)}{mkT}\right) - 1 \right\} - \frac{V + I_c \cdot R_s}{R_p} \quad (12)$$

3. MODELAGEM DE MÓDULOS FOTOVOLTAICOS

Individualmente uma célula fotovoltaica gera tensão de baixo valor nominal, na faixa de 0,6 V. Para atingir a potência necessária são utilizadas combinações de células em série para obtenção das tensões e correntes desejadas para os módulos utilizados no projeto [15].

A combinação de módulos em paralelo oferece maior segurança ao sistema como um todo, pois a tensão elétrica resultante será de baixo valor nominal. Esta forma de arranjo é vantajosa quando uma ou mais células não estiverem sendo iluminadas e assim não afetam o restante da configuração. A desvantagem do modelo é que grandes correntes elétricas são geradas, sendo necessário a utilização de cabos com maior diâmetro, os quais apresentam maiores perdas elétricas por efeito Joule [15].

Quando a associação das células for paralela a tensão elétrica resultante do módulo será igual a tensão gerada por uma célula e a corrente elétrica será a soma das correntes gerado por todas as células conforme as Equações (13) e (14), respectivamente [13].

$$V_{paralela} = V_{c1} = V_{c2} = \dots = V_{cn} \quad (13)$$

$$I_{paralela} = I_{c1} + I_{c2} + \dots + I_{cn} = nI_{cn} \quad (14)$$

Já a combinação de células em série resulta em maior tensão elétrica, mas a corrente elétrica gerada será de baixo valor nominal. Nesta configuração é necessário um menor diâmetro para a fiação elétrica. Como desvantagem da configuração, o sombreamento de uma única célula deve ser considerado, pois ela passa a atuar como uma carga recebendo fluxo de corrente, podendo ocorrer danos permanentes devido ao aquecimento. Outra desvantagem verificada é denominada module mismatch losses, que deriva do fato que as correntes de saída de módulos do mesmo tipo estão dentro uma faixa de incerteza de 5% até 10% [15].

As células são conectadas em série somando a tensão elétrica de cada. As Equações (15) e (16) descrevem a tensão elétrica e a corrente elétrica resultantes da associação de módulos em série, respectivamente [15].

$$V_{série} = V_{c1} + V_{c2} + \dots + V_{cn} = n.V_{cn} \quad (15)$$

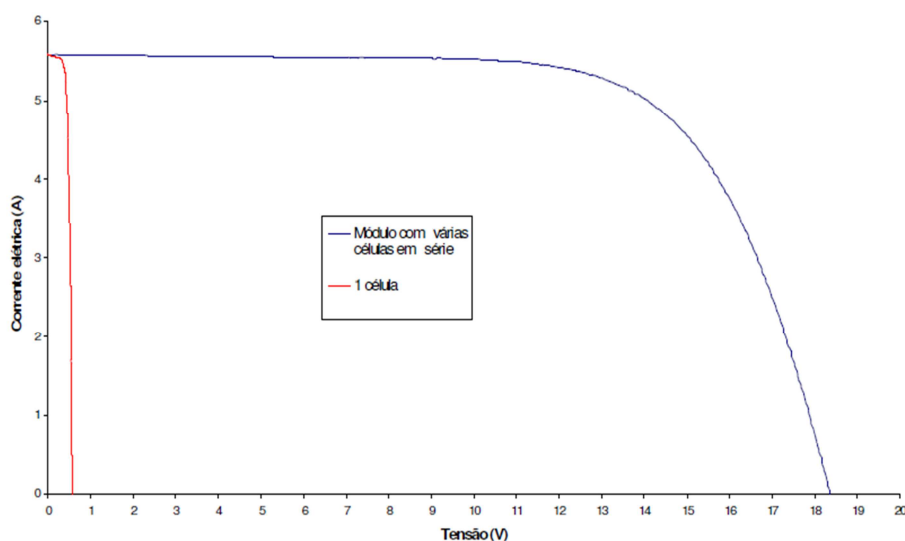
$$I_{série} = I_{c1} = I_{c2} = \dots = I_{cn} \quad (16)$$

A associação em série das células é mais utilizada para obter módulos com tensão elétrica acima de 12 V e facilita o carregamento de baterias com tensões nominais nesta faixa. A Equação (17) define a corrente elétrica e a tensão elétrica do módulo em função do número de células em série (N_s) e em paralelo (N_p), respectivamente [13].

$$I_{módulo} = N_p \cdot \left[I_L - I_o \left\{ \exp \left(\frac{e(V_{módulo} + I_c \cdot R_s)}{N_s \cdot m \cdot k \cdot T} \right) - 1 \right\} - \left(\frac{V_{módulo} + I_c \cdot R_s}{R_p} \right) \right] \quad (17)$$

A Figura 16 ilustra o gráfico de uma célula fotovoltaica e um módulo fotovoltaico com associação de células em série. É perceptível o aumento da tensão elétrica do módulo em relação a célula que apresenta tensão na ordem de 0,6 V. Na prática, para maiores correntes e tensões são realizadas associações mistas de células [13].

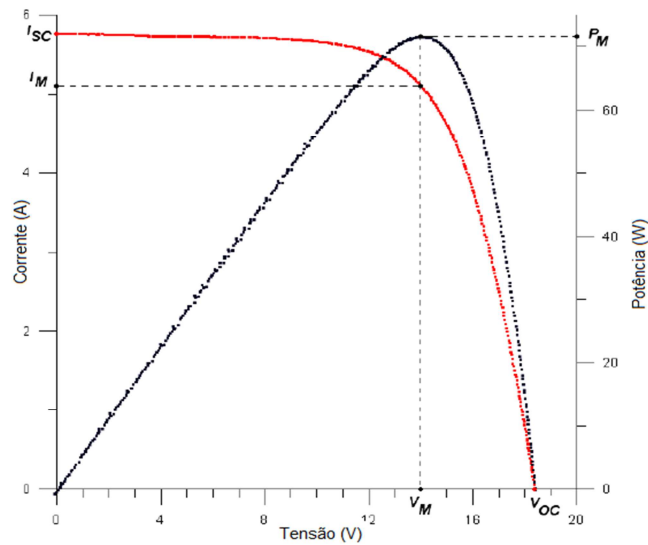
Figura 16: Curva I-V de uma célula fotovoltaica e de um módulo fotovoltaico.



Fonte: Análise de desempenho de um gerador fotovoltaico com seguidor azimutal [13].

O Ponto de Máxima Potência é obtido por equipamentos seguidores de máxima potência, os quais monitoram o funcionamento dos módulos e os polarizam de forma a operarem no ponto de maior produção de energia. A Figura 17 ilustra este procedimento para um módulo, semelhante à Figura 10 que representa o ponto de máxima potência para uma célula [13].

Figura 17: Curva de potência de um módulo fotovoltaico.



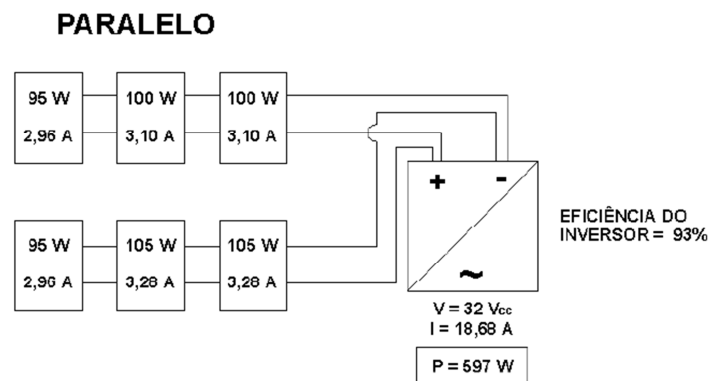
Fonte: Análise de desempenho de um gerador fotovoltaico com seguidor azimutal [13].

3.1 COMPARAÇÃO DA CONEXÃO ELÉTRICA DE MÓDULOS FOTOVOLTAICOS

É possível realizar uma análise simplificada da eficiência energética de uma pequena instalação de sistemas fotovoltaicos para compreender as perdas da conexão em série em relação a conexão em paralelo. Comparando as conexões em paralelo e em série onde cada módulo possui como característica $100 W_p$ de potência e 32 V por módulo [15].

Na conexão em paralelo, Figura 18, conforme as equações 13 e 14 obtém-se 32 V para tensão elétrica e 18,68 A para corrente elétrica, sendo o produto $V \times I$ a potência resultante 597 W.

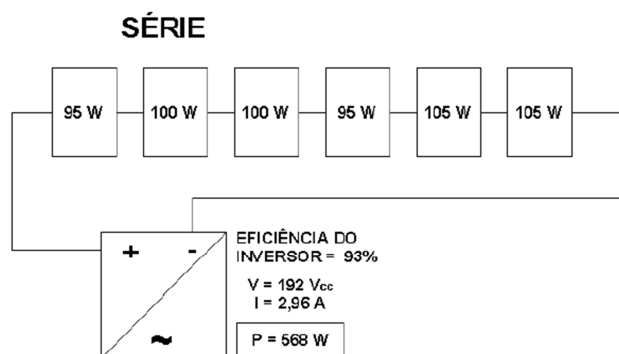
Figura 18: Conexão em paralelo de 6 módulos fotovoltaicos.



Fonte: Edifícios solares fotovoltaicos [15].

Na conexão em série dos módulos, Figura 19, conforme as equações 15 e 16 têm-se como tensão elétrica total 192 V e a corrente elétrica é limitada ao módulo de menor valor – neste caso 2,96 A – e o produto $V \times I$ resulta em 568 W.

Figura 19: Conexão em série de 6 módulos fotovoltaicos.



Fonte: Edifícios solares fotovoltaicos [15].

No exemplo, apesar de utilizados módulos idênticos, a conexão em paralelo possibilita, neste caso, um rendimento 5% superior a conexão em série devido as perdas pela não homogeneidade entre a potência máxima dos módulos individuais. No item 3 esse não homogeneidade foi classificada como *module mismatch losses* [15].

A configuração mista - série e paralelo - com n módulos conectados em série (*strings*) para atingir a tensão de projeto e após conectados em paralelo ao sistema inversor – neste caso, sem transformador - para conversão de CC para CA é utilizada para sistemas de potência nominal superior a 1 kW_p [15].

3.2 PARÂMETROS PARA OPERAÇÃO DE GERADORES FOTOVOLTAICOS

A performance de um sistema fotovoltaico é determinada por parâmetros que afetam diretamente seu rendimento. Radiação solar, temperatura dos painéis, sombreamento parcial, descasamento entre painéis de um mesmo *string*, resistência dos condutores e estado de limpeza dos painéis são os principais parâmetros que influenciam na performance do sistema gerador fotovoltaico [15].

3.2.1. AVALIAÇÃO DO RECURSO SOLAR

Para avaliar o grau de confiabilidade do sistema projetado para geração de energia elétrica gerada é necessário quantificar a radiação solar incidente sobre os painéis fotovoltaicos. A radiação solar é dependente fundamentalmente da localização geográfica de onde o sistema é instalado [15].

Para sistemas fotovoltaicos fixos a medição da radiação total é suficiente para análise de um projeto, enquanto para sistemas equipados com equipamentos de seguimento solar necessitam de informações mais detalhadas como a componente direta e difusa da radiação solar em um plano pré-estabelecido e reflexão causada pela vegetação e edificações existentes ao redor do sistema [3].

Para sistemas fixos a inclinação e orientação dos painéis são determinadas, como regra geral, pela latitude local e idealmente a superfície deve ser voltada para o Equador. Porém, uma grande variedade de orientações são possíveis para atingir um grau de incidência superior a 95% da radiação máxima disponível para superfícies livres de obstáculos. Ou seja, para sistemas fixos não existe apenas uma configuração ótima, havendo liberdade para instalar o sistema de acordo com as condições existentes no local [15].

A performance ótima é obtida considerando que não há sobreposição sobre qualquer painel e esta questão é considerada crítica. Como as células de um painel são conectadas em série, uma queda de rendimento de apenas uma célula influencia no rendimento de todo o painel e, conseqüentemente, do módulo [15].

É disponibilizado pelo Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio de Salvo Brito o cálculo da radiação sobre o plano inclinado em função da latitude e longitude local através do programa SunData. O programa fornece dados para comparar três configurações possíveis de um sistema fotovoltaico: a radiação solar sobre o plano horizontal, sobre o ângulo igual a latitude e sobre o ângulo que apresenta a maior média anual de radiação. Deve-se atentar que a análise é realizada sem contabilizar possíveis efeitos de sombreamento sobre a localização fornecida. Posteriormente o programa é utilizado para análise de viabilidade de um pequeno sistema fotovoltaico residencial no Capítulo 6 [16].

3.2.2 PROTEÇÃO CONTRA SOMBREAMENTO E FALTA DE IRRADIAÇÃO SOLAR

Como uma célula é capaz de gerar uma diferença de potencial em torno de 0,6 V, um conjunto é conectado em série para gerar um módulo e obter maior tensão elétrica. Porém, a conexão em série de células fotovoltaicas tornam o módulo extremamente sensível a sombreamento e pouca radiação incidente [17].

Nestas condições desfavoráveis uma ou mais células deixam de atuar como geradoras de energia, passando a consumi-la atuando como uma carga restringindo a eficiência do sistema. Dependendo do período de tempo em que atuam como carga o aquecimento excessivo gerado pode danificar as células permanentemente. Este aquecimento é classificado como hot spot, sendo também verificado quando os módulos de um sistema possuem características elétricas diferentes [15].

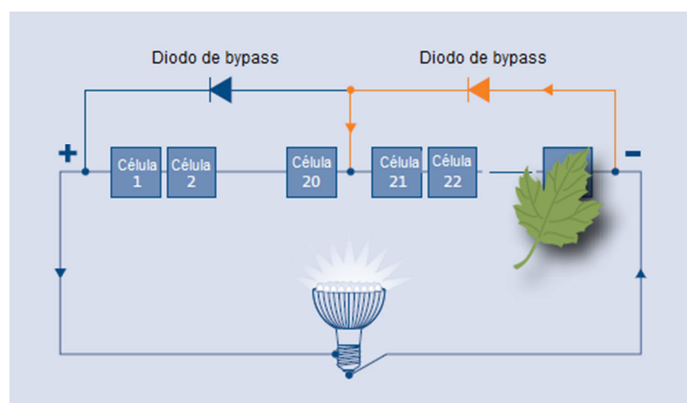
Para evitar que o fluxo de corrente danifique o sistema são utilizados diodos de bypass, também denominados diodos de passo, com a função de evitar que a célula ou módulo de pior rendimento afete o desempenho das demais. A desvantagem da utilização deste componente é uma pequena queda no rendimento do módulo [3].

Idealmente cada célula deveria ser equipada com um diodo de bypass, mas por falta de espaço físico isto não é possível. Um módulo é composto entre 60 e 72 células e cada diodo protege de 20 a 24 células. Quando atua, o diodo de bypass funciona como um curto circuito sobre a série de células sombreadas permitindo que o fluxo de corrente elétrica não danifique e tão pouco seja interrompido pela ruptura das mesmas [17].

Os módulos fabricados a partir de filmes finos são menos afetados pelas perdas por sombreamento do que módulos tradicionais de silício. Por esta razão, em projetos em que preliminarmente já seja possível prever perdas por operação em alta temperatura decorrente de possíveis sombras os módulos de silício cristalino já deixam de ser utilizados [17].

A Figura 20 ilustra o diodo de bypass como proteção de 20 células fotovoltaicas conectadas em série.

Figura 20. Diodo de *bypass* como proteção de células sombreadas.



Fonte: Inverter, Storage and PV System Technology [17]. (Adaptado)

3.2.3. PERDAS POR REFLEXÃO

As perdas causadas pela reflexão da superfície dos módulos devem ser consideradas na análise do projeto. Atualmente já são comercializados painéis com materiais com propriedades anti-reflexo, mas esta vantagem funcional ocasiona um aumento considerável no custo [17].

Este problema é frequente em instalações do tipo fixa, enquanto sistemas fotovoltaicos com seguidor solar a dois eixos apresentam resultados satisfatórios reduzindo perdas por reflexão. No entanto, há o incremento do custo do sistema seguidor de movimento e do custo de manutenção, podendo até mesmo inviabilizar o projeto [17].

3.2.4. VIDA ÚTIL DE MÓDULOS FOTOVOLTAICOS

Quando instalados em ambientes em que o processo corrosivo não é agressivo como em zonas litorâneas o envelhecimento dos módulos fotovoltaicos ocorre de forma lenta atingindo uma vida útil de 20 ou mais anos, sendo 30 anos o período mais comum ofertado pelos fabricantes em condições normais de utilização [17].

Para sistemas fixos nas proximidades do Equador – latitude aproximadamente nula – deve se considerar uma pequena inclinação para evitar o acúmulo de água sobre o módulo. A manutenção visando aumentar a vida útil do sistema mantendo a eficiência de conversão energética consiste em evitar o acúmulo de impurezas que possam a vir

danificar e sombrear os módulos causando pontos de *hot spots* como mencionado no item 3.2.2 [7].

Contudo o processo de envelhecimento não ocorre apenas pela instalação estar submetida as interpéries do ambiente externo. A ocorrência de picos de tensão e correntes de fuga podem danificar, dependendo da intensidade e duração, permanentemente o sistema. O aterramento do polo negativo do sistema e cabeamento elétrico são itens importantes para evitar perdas e risco elétricos do sistema [17].

3.2.5. COEFICIENTE DE TEMPERATURA

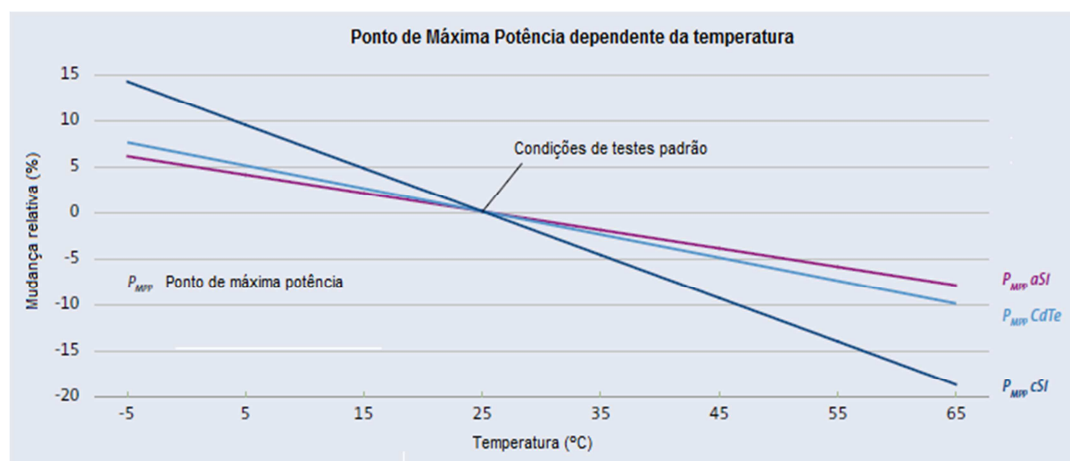
A radiação solar gera aumento de temperatura dos módulos fotovoltaicos que alcançam, em condições acima do normal, cerca de 70°C. Por este motivo é importante garantir que o ar possa circular da parte iluminada para a parte traseira resfriando o módulo [17].

O coeficiente térmico de corrente é positivo e de dimensão desprezível. Deste modo, a corrente elétrica não será significativamente alterada com a variação da temperatura do módulo. O coeficiente térmico de tensão é negativo e de dimensão não desprezível. Como a potência gerada é o produto da tensão e da corrente elétrica, o coeficiente térmico de potência também é negativo, ou seja, a temperatura do módulo é inversamente proporcional a potência gerada [17].

Um módulo de silício monocristalino sob condições padrões, 25°C, possui potência nominal de saída de 200 Wp e coeficiente térmico de -0,5%/°C. Isto significa que um aumento de 10°C diminui a potência gerada do módulo em 5%, ou seja, 190 Wp; enquanto uma diminuição de 10°C acarreta em um aumento de 10% na potência gerada, ou seja, 220 Wp [16].

Para módulos de filmes-finos o coeficiente de temperatura típico é considerado -0,3%/°C. A Figura 21 apresenta as curvas de máxima potência para módulos de silício cristalino, amorfo e de Telureto de Cádmio em função da temperatura. Pelo gráfico é visível a maior sensibilidade em módulo do módulo de silício cristalino em relação ao amorfa e filme-fino apresentado. A condição padrão de teste de um módulo fotovoltaico ocorre a 25°C com intensidade de radiação de 1000 W/m² a uma massa de ar de 1,5 [17].

A massa de ar é função da temperatura e vapor de água do ambiente e é classificada de acordo com a latitude e origem – marítima ou continental [18].

Figura 21: PMP *versus* temperatura para diferentes tecnologias.

Fonte: Inverter, Storage and PV System Technology [17]. (Adaptado)

3.2.6. EFICIÊNCIA E ÁREA ILUMINADA

As propriedades elétricas do módulo dependem do tipo de material do qual é fabricado. Um fator considerado além da eficiência dos materiais é a área útil disponível para a execução do projeto [17].

A comparação entre os diversos materiais é feita para geração de 1 kWp e conseqüentemente, módulos com maior eficiência necessitarão menor área para instalação. Enquanto módulos de silício cristalino necessitam de 5 a 9 m² para gerar em condições normais 1 kWp, módulos de filmes-finos requerem entre 8 e 20 m². Estes, além de maior área necessária, possuem estruturas de fixação com custo mais elevado, por isso será importante a produção em larga escala para ser economicamente vantajoso utilizar esta tecnologia em detrimento do silício cristalino. A Tabela 1 expõe a área necessária em função da eficiência de diversos materiais [17].

Tabela 1: Materiais, eficiência e área utilizada.

Material	Eficiência	Área necessária para gerar 1 kWp
Silício monocristalino	13 – 19 %	5 – 8 m ²
Silício policristalino	11 – 15 %	7 – 9 m ²
Silício microamorfo	8 – 10%	10 -12 m ²
Filmes-finos de telureto de cádmio (CdTe)	9 – 11%	9 – 11 m ²
Silício amorfo	5 – 8%	13 – 20 m ²

Fonte: Inverter, Storage and PV System Technology [17].

No entanto, área necessária acaba por ter um efeito indireto, pois a potência gerada será calculado a partir da análise da demanda, a qual é calculada em kWh. Logo, o custo da instalação do sistema é praticamente o mesmo independentemente da tecnologia utilizada devendo ser considerado com a mesma importância a questão da temperatura [17].

Nos últimos anos os sistemas fotovoltaicos instalados sobre o solo e não sobre edificações vêm ganhando espaço utilizando módulos silício cristalino e também de filmes-finos. Mas com a queda significativa no valor do primeiro novamente diminui a participação do segundo [17].

Enquanto as células de silício cristalino apresentam melhor rendimento absorvendo comprimentos de onda maiores, presentes em dias ensolarados, as células de filmes-finos conseguem captar melhor as ondas curtas e médias do espectro solar, característica de dias nublados, sendo, portanto, a tecnologia preferencial para ambientes com radiação difusa. Também são recomendadas para ambientes onde não é possível a fixação de módulos de silício cristalino na posição ideal – em direção ao norte geográfico se no hemisfério sul – em função de obstáculos que diminuem a radiação [17].

3.3 COMPONENTES DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS

Uma instalação de um sistema fotovoltaico é composta por outros itens além dos painéis solares. Deve-se considerar o sistema de fixação, o inversor CC-CA, disjuntores, cabos elétricos, proteções contra sobretensões e descargas atmosféricas e caixas de conexão, e controlador de carga e banco de baterias quando projetados para sistemas isolados (sem conexão com a rede de distribuição) [15].

3.3.1. O SISTEMA INVERSOR

O inversor é o componente responsável, principalmente, pela conversão da energia gerada pelo sistema fotovoltaico de corrente contínua (CC) para corrente alternada (CA), gerando a tensão elétrica na frequência da rede local, com baixo teor de harmônicos e onda de forma senoidal. Os inversores de última geração são equipados com circuito microprocessados visando otimizar a geração de energia elétrica com rápida atuação sobre a geração dos módulos solares [15].

A tensão elétrica de entrada de um inversor é determinada pelo número de módulos conectados em série formando um *string*, enquanto a corrente elétrica de entrada é determinada pelo número total de *strings*. Para potências inferiores a 4,6 kW podem converter a energia CC em monofásica e a interligação com a rede de distribuição ocorre de maneira direta [17].

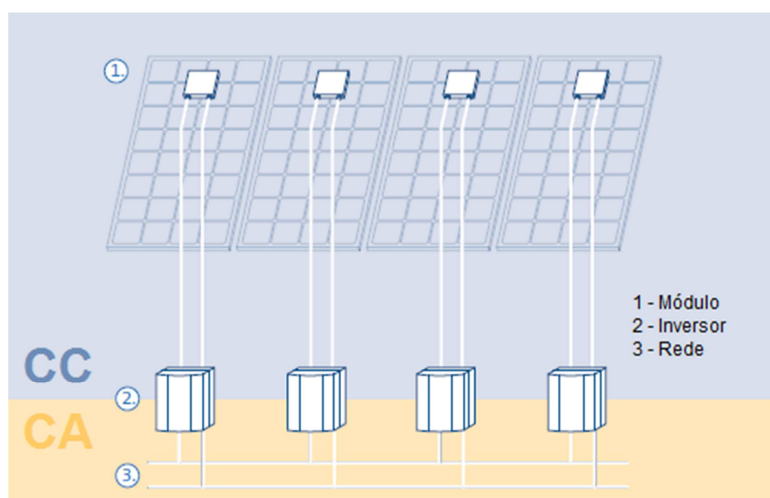
A vida útil não acompanha a dos módulos fotovoltaicos e a operação não apresenta, geralmente, falhas até 10 a 12 anos de utilização. Após este período manutenções usualmente serão necessárias. O local de instalação necessita ser limpo e ventilado, sendo necessário para dissipar o calor gerado na conversão de energia na forma de corrente alternada [17].

3.3.1.1. CONFIGURAÇÕES

Os inversores disponibilizados no mercado apresentam diversas faixas de operação de modo a fornecer diversas configurações possíveis visando otimizar cada projeto individualmente [17].

Uma configuração possível é utilizar um inversor para cada módulo do sistema fotovoltaico ajustando individualmente o ponto de máxima potência. Apesar do maior custo pelo número de inversores há redução de custos com cabeamento e riscos de arco elétrico no lado CC, sendo cada inversor conectado em paralelo no lado CA. Este modelo é utilizado para sistemas com geração entre 3 e 5 kW com consumo local e apresentado na Figura 22 [17].

Figura 22: Inversores individuais por módulo fotovoltaico.

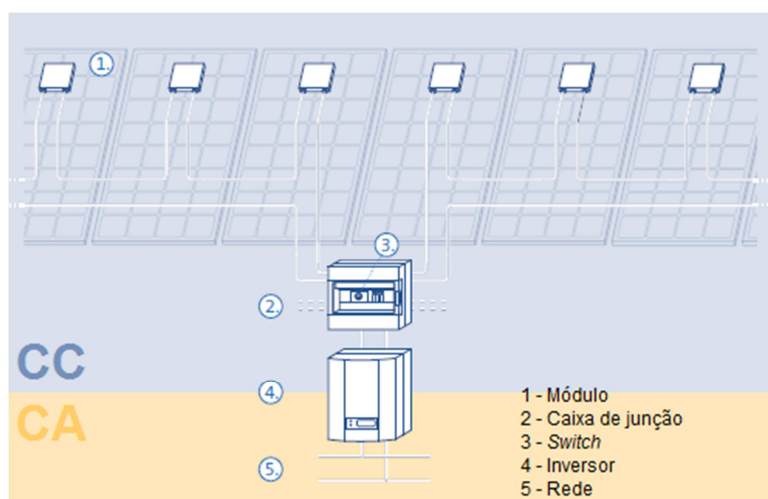


Fonte: Inverter, Storage and PV System Technology [17]. (Adaptado)

Alternativamente, os módulos fotovoltaicos podem ser conectados em série formando *arrays* conectadas a um *switch* que servem como conexão a um inversor central. Esta configuração requer que todos os módulos estejam operando nas mesmas condições, ou seja, sem sombreamento e mesma luminosidade e atende sistemas de pequeno e grande porte [17].

A Figura 23 apresenta o modelo descrito com inversor central.

Figura 23: Inversor centralizado.

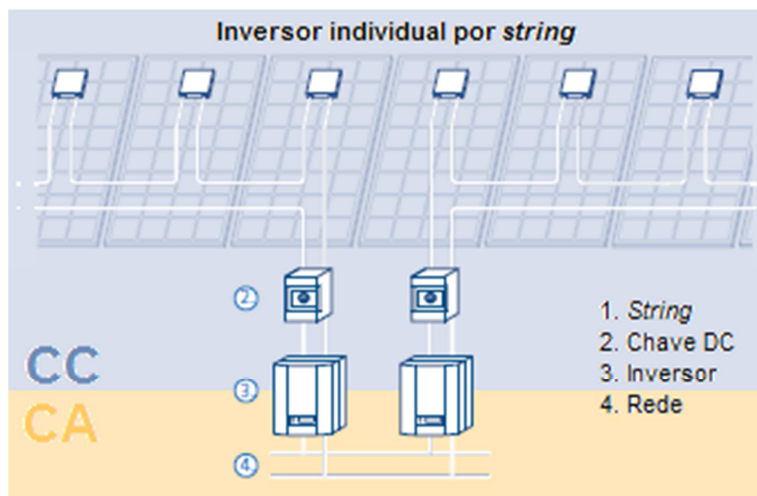


Fonte: Inverter, Storage and PV System Technology [17]. (Adaptado)

A terceira configuração possível possibilita controlar o ponto de máxima potência de cada módulo sem conexão com os demais, ou seja, fornando *strings* independentes. Deste modo, em caso da iluminação não ser idêntica a todos os módulos, o inversor destinado a ele atua independente dos demais otimizando a geração [17].

O modelo é apresentado na Figura 24.

Figura 24: Um inversor por *string*.



Fonte: *Inverter, Storage and PV System Technology [17].* (Adaptado)

3.3.1.2. LOCALIZADOR AUTOMÁTICO DO PONTO DE MÁXIMA POTÊNCIA

Como a potência gerada pelo sistema fotovoltaico é função da radiação solar e da temperatura, o inversor atua como localizador automático do ponto de máxima potência dos módulos fotovoltaicos visando otimizar a geração de energia elétrica no lado CC e convertendo para o lado CA tensão elétrica com magnitude e frequência idêntica a da rede. A atuação é instantânea visando maximizar a eficiência do sistema o máximo possível [17].

3.3.1.3. MONITORAMENTO E CORREÇÃO DE FATOR DE POTÊNCIA

O inversor atua monitorando a eficiência do sistema permitindo aos sistemas modernos coletar e armazenar informações em tempo real. Em caso de necessidade de correção do fator de potência da energia da rede o inversor atua alimentando a rede com potência reativa melhorando a qualidade da energia da rede a estabilizando da forma mais rápida possível [15].

3.3.1.4. DIMENSIONAMENTO DO SISTEMA

A fim de otimizar a geração de energia elétrica o inversor pode ser selecionado com capacidade de converter até 10% inferior a capacidade de geração do sistema. Esta opção apresenta custo mais baixo para localidades com baixa radiação solar com o inversor atuando com carga máxima na maior parte do tempo. A desvantagem ocorre quando períodos de grande insolação ocorrerem sobrecarregando o inversor e desperdiçando a energia gerada [15].

3.3.1.5. OPERAÇÃO AUTOMATIZADA

Como o inversor é programado para monitorar a rede elétrica e não ser controlado por ela o funcionamento é autônomo. Desta forma a atuação em caso de ultrapassar limites de tensão ou frequência seguros o inversor é auto-desconectado da rede. Este conceito é conhecido como ADD (Dispositivo com Desconexão Automática) do inglês *Automatic Disconnection Device* [17].

3.3.1.6. INVERSORES EQUIPADOS COM TRANSFORMADORES

A capacidade do inversor ser equipado com um transformador simplifica o trabalho de elevar a tensão elétrica do gerador fotovoltaico ao nível da tensão elétrica da rede, além de reduzir o custo por não utilizar um inversor e um transformador de maneira separada. Porém, o acoplamento de um transformador ao sistema inversor implica em perdas ôhmicas e magnéticas reduzindo a eficiência do equipamento além do aumento de peso e possível geração de ruído. Em função destas desvantagens, inversores sem transformadores são mais bem aceitos pelos projetistas [17].

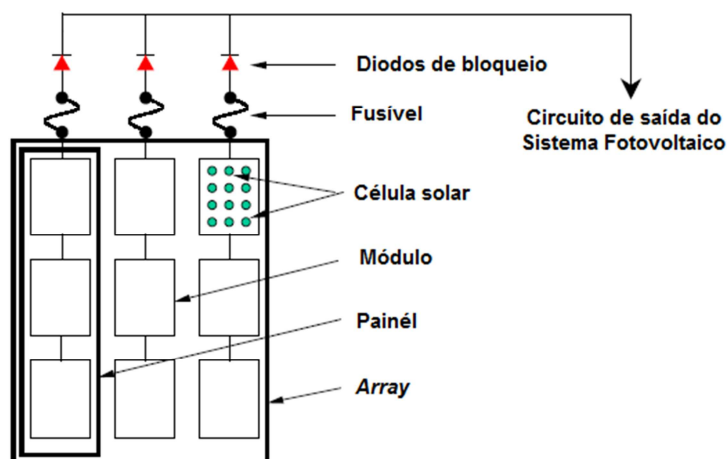
3.3.2. PROTEÇÃO E ATERRAMENTO

A utilização de fusíveis visa proteger os cabos contra sobrecorrentes e sobretensões que possam ocorrer. Além dos diodos de *bypass* descritos no item 3.2.2, diodos de bloqueio são utilizados para evitar a circulação de corrente reversa pelo

sistema. Fusíveis também são instalados entre as baterias e o controlador de carga em caso de sistemas com armazenamento de energia [3].

Os fusíveis e diodos de bloqueio são ilustrados na Figura 25.

Figura 25: Topologia de um Sistema Fotovoltaico e componentes de proteção.



Fonte: *PV Systems and Components* [19]. (Adaptado)

É recomendado que usinas geradoras com potência acima de 10 kW sejam equipadas com para-raios. Em caso de já existência de um sistema de proteção contra descargas atmosféricas, o sistema fotovoltaico pode ser interligado a este sem necessidade de um novo sistema de proteção exclusivo a ele. A proteção dos módulos fotovoltaicos contra descargas atmosféricas deve ser extremamente eficiente, pois um arco elétrico em corrente contínua não se extingue como em corrente alternada quando a curva senoidal cruza o eixo zero, podendo ocasionar danos ao sistema e provocar até mesmo incêndio [17].

3.3.3. SISTEMA DE FIXAÇÃO

O sistema de fixação deve, além de suportar o sistema fotovoltaico que atua como uma carga mecânica, suportar a força do vento, expansões e contrações térmicas ao longo da vida útil do sistema [15].

3.3.4. CABOS E CONEXÕES

Um número considerável de conexões elétricas são necessárias para conectar módulos, *arrays*, *strings*, inversores, baterias e qualquer outro dispositivo intermediário, podendo inclusive utilizar cabos com comprimentos consideráveis. Deve-se atentar para a utilização de cabos e conexões seguras evitando falhas, perdas e acidentes. Visando eliminar acidentes por curto-circuito ou falhas de aterramento deve-se atentar para a correta identificação dos polos positivo e negativo [17].

O cabeamento pode ser dividido em lado CC e lado CA. No primeiro são necessário apenas cabos individuais com apenas um núcleo cada. Após o inversor, lado CA, o cabeamento terá três cabos individuais de núcleo único em caso de ligação monofásica e cinco em caso de ligação de trifásica. Os cabos destinados a sistemas fotovoltaicos devem ser resistentes a radiação ultravioleta, resistentes a ação da água e a altas temperaturas, admitindo gerar perdas de no máximo 1% [17].

3.3.5. ARMAZENAMENTO DE ENERGIA

O sistema de armazenamento apresenta duas funções importantes. A primeira é armazenar energia para utilização em um período posterior ao gerado, enquanto para sistemas interligados à rede de distribuição o sistema de armazenamento receber a energia excedente da rede ocasionada em momentos de baixo consumo auxiliando a estabilidade do sistema de distribuição. Porém, um sistema de armazenamento possui custo elevado e por este motivo é importante que a energia produzida seja para consumo imediato [17].

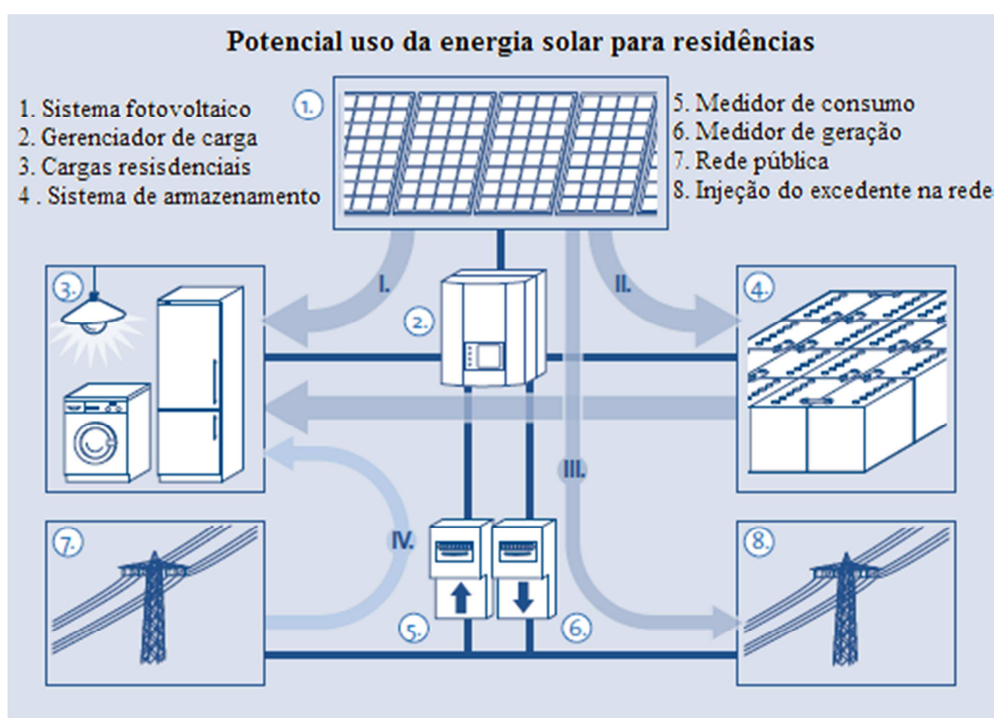
Os sistemas fotovoltaicos conectado à rede de distribuição apenas injetarão energia nesta quando a capacidade de armazenamento do sistema estiver em nível máximo, incentivando o auto-consumo da energia gerada. A tendência por este modelo se dá através da diferença de preço entre a energia gerada e a energia da rede, a qual tende aumentar visando estimular a auto-suficiência energética [17].

Como forma de armazenar energia as baterias são os equipamentos mais utilizados para este fim. A trajetória da energia convertida de energia solar para energia elétrica para posterior conversão em energia química apresenta perdas consideráveis, mas como vantagem permite que a energia seja armazenada por um longo período de tempo. Outros sistemas de armazenamento apresentam capacidade de armazenar

maiores quantidades de energia, porém apresentam-se como tecnologias de alto custo sendo pouco presentes no mercado [17].

A Figura 26 apresenta um pequeno sistema fotovoltaico residencial com sistema de armazenamento e interligado à rede de distribuição. O medidor representado pelo número 5 é utilizado para medir a geração de energia elétrica consumida da rede de distribuição e o medidor representado pelo número 6 é utilizado para medir a quantidade de energia solar injetada na rede de distribuição gerando créditos energéticos ou financeiros [17].

Figura 26: Topologia de um sistema fotovoltaico doméstico.



Fonte: Inverter, Storage and PV System Technology [17]. (Adaptado)

3.3.1.7. BATERIAS

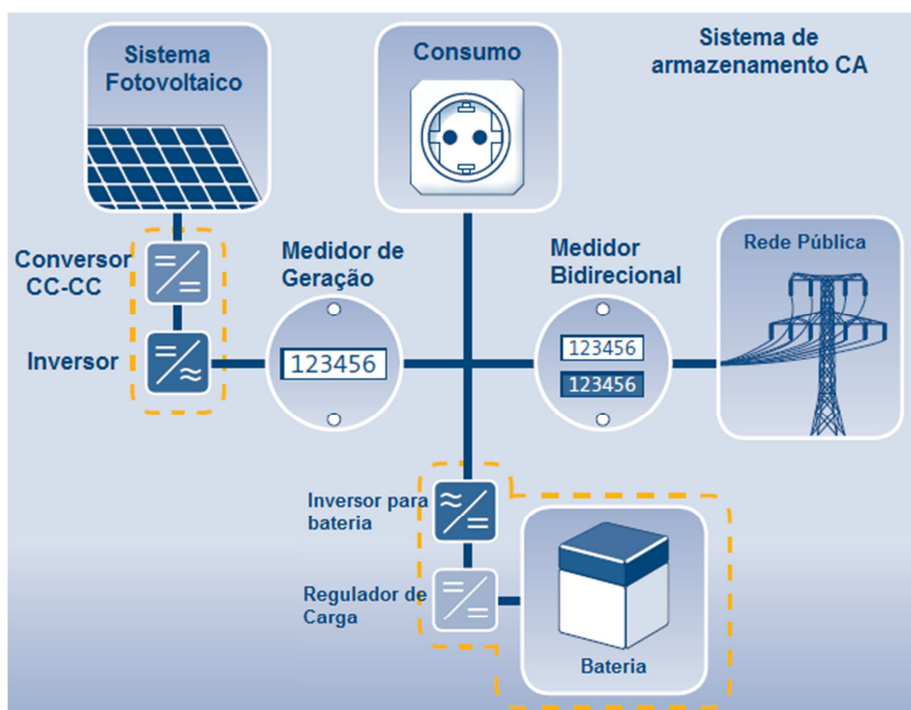
As baterias são dispositivos capazes de armazenar instantaneamente a energia disponível através de reações químicas. Apresentam como principal desvantagem o fenômeno de auto-descarga que ocorre de maneira lenta, não permitindo longos períodos de armazenamento. A vida útil é limitada ao ciclo de vida, ou seja, há um número limitado de vezes que as baterias tradicionais podem ser recarregadas. Devem ser protegidas contra sobretensões e um dispositivo controlador de carga atua

impedindo a descarga abaixo de um valor mínimo que se ultrapassado impede a recarga da mesma [17].

As baterias de menor custo utilizam ácido chumbo, porém apresentam baixa vida útil com aproximadamente 2000 ciclos. As mais utilizadas são de ion-lítio que apresentam maior ciclo de vida útil, podendo atingir até 20 anos, ou seja, aproximadamente 7000 recargas. Como principais vantagens apresentam baixo nível de auto-descarga e carregamento rápido em função de suportar altas correntes elétricas, apresentado-se ideal para o uso em sistemas domésticos. Como desvantagem apresenta custo elevado. Uma maior produção em massa deste tipo de bateria tornaria os valores comerciais mais atraentes [17].

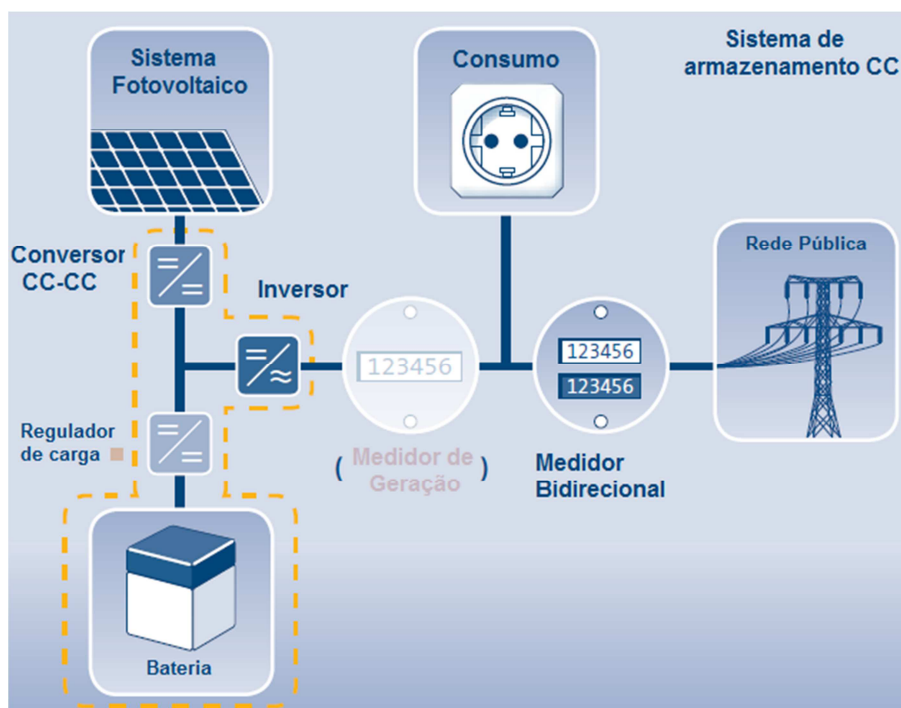
Há duas possibilidades para instalar um sistema de armazenamento. O primeiro é denominado sistema de armazenamento CA. Consiste em instalar as baterias após o inversor CC-CA do sistema fotovoltaico e utiliza um outro inversor, CA-CC, e um regulador de carga conforme ilustrado na Figura 27, permitindo ser carregado pela rede pública absorvendo energia em caso de excesso atuando para estabilizar o sistema de distribuição. O segundo é denominado sistema de armazenamento CC. A energia é armazenada antes de ser convertida para CA conforme ilustra a Figura 28. Este segundo modelo apresenta menor custo e maior eficiência [17].

Figura 27: Sistema de armazenamento CA.



Fonte: Inverter, Storage and PV System Technology [17]. (Adaptado)

Figura 28: Sistema de armazenamento CC.



Fonte: Inverter, Storage and PV System Technology [17]. (Adaptado)

Por apresentar um custo elevado, os projetos devem considerar a utilização a energia solar no local da geração, classificado como geração descentralizada. A capacidade de armazenamento deve ser superior a capacidade de geração do sistema fotovoltaico. Uma pequena planta para gerar 4 kW ao ano considerando um consumo de 4000 kWh necessita uma capacidade de armazenamento mínimo de 6 a 7 kWh em função de incertezas meteorológicas [17].

Para plantas geradoras de grande porte, na faixa de 1 MW, um sistema de baterias é necessário para compensar variações inesperadas. É considerado seguro um sistema que seja capaz de armazenar ao menos 25% da capacidade da planta, suportando o sistema no período de baixa geração. Neste caso as baterias de íon-lítio são utilizadas pela característica de rápida resposta através de uma rápida descarga de energia [17].

Idealmente a vida útil das baterias deveria ser tão longa quanto dos módulos, ou seja, no mínimo 20 anos, mas as tecnologias atuais atingem aproximadamente 10 anos. O custo de uma bateria de íon-lítio é de aproximadamente 500 dólares por kWh para o ano vigente de 2013 no mercado internacional. A maneira para tornar economicamente viável um sistema de armazenamento é mesclar esta com modelos de

menor custo como as baterias de ácido chumbo. Desta maneira, estas são utilizadas para o armazenamento básico de energia, enquanto a bateria de íon-lítio é utilizada nos momentos de pico visando proteger o sistema de armazenamento. Enquanto o custo deste sistema for elevado a escolha do tipo de bateria se dará para a que apresentar maior ciclo de vida útil [17].

3.3.6. MONITORAMENTO E IDENTIFICAÇÃO DE FALHAS

Os sistemas fotovoltaicos necessitam de constante monitoramento para evitar que falhas ocorram e venham a danificar o sistema tornando-o deficitário. Por esta razão, os inversores disponíveis já possuem a capacidade de armazenar, processar e enviar dados para o operador do sistema [17].

Para otimizar a produção energética, uma planta geradora fotovoltaica deve ter a produção monitorada continuamente e comparada com os valores medidos de radiação para verificar a eficiência da geração devido a mudanças meteorológicas imprevisíveis [17].

A radiação solar é medida por piranômetros ou sensores fotovoltaicos. Os primeiros apresentam medições precisas analisando todo o espectro solar. O funcionamento é baseado na absorção de radiação que é proporcional ao calor gerado e a medição é apresentada em termos absolutos em W/m^2 . São instalados em locais onde não há dados meteorológicos para análise de viabilidade de um projeto fotovoltaico, porém, como desvantagem apresentam resposta lenta não detectando rápidas alterações, como por exemplo, uma nuvem passageira. Já os sensores fotovoltaicos são instalados no plano do módulo e expostos a mesma condição meteorológica e são uma alternativa de baixo custo em relação a um piranômetro. Porém, por um sensor ser constituído de células fotovoltaicas, acabam por absorver apenas uma parcela da radiação solar como descrito anteriormente, além das perdas por reflexão e aumento da temperatura [17].

É recomendado que uma planta geradora com capacidade a partir de 100 kWp seja monitorada constantemente. Para geração de potência inferior, como por exemplo, uma residência, dados obtidos por satélites são suficientes para o sistema operar eficientemente e a aquisição de dados ocorre para períodos de 60 minutos e são comparados ao final de um dia inteiro de geração com os valores padrões [17].

É possível realizar uma medição indireta do sistema. Se todos os arranjos (*arrays*) são instalados com a mesma orientação solar, a potência gerada deve ser

praticamente a mesma para todos os módulos, aceitando-se a faixa de incerteza de cada um. Se um painel do arranjo apresentar potência significativamente inferior aos demais, significa que há uma falha no sistema. Este método apresenta-se rápido e eficiente [16].

As falhas podem ser classificadas como falhas de componentes, falhas de instalação e falhas por influências externas [17].

As falhas de componentes são frequentemente causadas pelo sistema inversor e ocorrem devido a falhas na fabricação, envelhecimento ou aquecimento por sobrecarga. As falhas causadas por influências externas geralmente ocorrem sobre os módulos solares. Por ser de longa vida útil, estas falhas começam a ser notáveis no final da vida útil dos mesmos apresentando uma coloração marrom. As falhas de instalação afetam parte do sistema e em geral são identificadas após um longo período, apresentando-se em geral como falhas na isolação do sistema [17].

4. APLICAÇÕES DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS

Os sistemas de geração de energia elétrica através de painéis solares podem ser projetados para atuar de forma isolada, conhecida como *off-grid* ou *stand-alone*, ou conectadas à rede de distribuição, conhecida como *on-grid* ou *grid-connected* [1].

O sistema será utilizado de maneira isolada em locais distantes dos grandes centros e sem acesso a energia elétrica convencionalmente distribuída. São utilizadas baterias para armazenamento e uso da energia produzida no período noturno. Estes sistemas são comuns em áreas rurais e para fornecer energia a sistemas de telecomunicações em áreas remotas [1].

Os sistemas *on-grid* podem ser projetados tanto para consumir quanto para injetar energia ao sistema de distribuição. Este tipo de projeto pode ser realizado com o objetivo de venda parcial ou venda total da energia produzida [7].

Para sistemas fotovoltaicos com capacidade de geração acima da demanda de energia elétrica é possível direcionar o excedente para a rede de distribuição. Quando a demanda não ultrapassar 70% do potencial do sistema, esta modalidade torna-se vantajosa ao usuário que recebe em créditos energéticos ou financeiro pela energia disponibilizada ao sistema. Este modelo é caracterizado como cessão parcial de energia e possui um custo maior por utilizar banco de baterias para utilizar a energia gerada no período noturno evitando o consumo da energia da rede de distribuição [3].

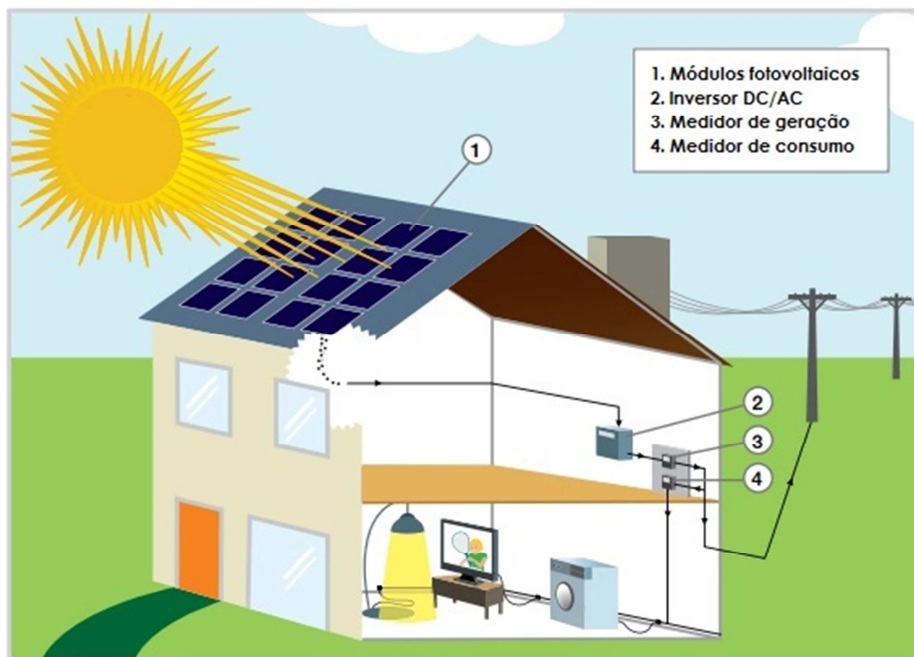
A cessão total de energia caracteriza-se por inserir na rede de distribuição toda energia produzida, caracterizando apenas como venda energética. Neste caso o custo do projeto é menor, pois não há necessidade de armazenamento, mas apenas de um medidor para controle da produção [7].

4.1 SISTEMAS DOMÉSTICOS INTERLIGADOS À REDE DE DISTRIBUIÇÃO (*ON-GRID*)

Esta tipologia de sistema fotovoltaico atualmente é a mais popular nos países desenvolvidos, como Estados Unidos e países europeus. O sistema é instalado geralmente em residências e conectados a rede de distribuição injetando a energia produzida de forma parcial ou total. O usuário vem a consumir energia da distribuidora em momentos de nula produtividade energética em caso de ausência de sistema de armazenamento [1].

A energia gerada pelo sistema fotovoltaico é em forma de corrente contínua – CC – e é necessário o uso de um inversor para conversão para corrente alternada – CA. A Figura 29 apresenta um sistema doméstico conectado à rede de distribuição sem armazenamento de energia. Este tipo de sistema é denominado *on-grid* [1].

Figura 29: Sistema fotovoltaico *on-grid*.



Fonte: *Photovoltaic energy – Energy from the Sun* [1]. (Adaptado)

Algumas vantagens são destacadas para os sistemas interligados à rede de distribuição [20]:

- Energia produzida próximo a carga reduzindo as perdas por transmissão e distribuição;
- Ocupação de uma área já utilizada – o sistema é instalado sobre a residência ou edifício;
- Redução de investimentos em linhas de transmissão e distribuição;
- Para edifícios comerciais o período de maior geração fotovoltaica coincide com o período de maior consumo aliviando o sistema de distribuição.

Fornecendo toda a energia gerada ao sistema de distribuição torna não necessário a utilização de um sistema de armazenamento, reduzindo significativamente o custo do sistema fotovoltaico. A geração de energia próximo ao consumo é denominado geração descentralizada [20].

4.2 PLANTAS DE GRANDE GERAÇÃO *ON-GRID*

Atualmente sistemas fotovoltaicos já são utilizados para geração desde kilowatts até gigawatts e interligados ao sistema de transmissão de energia elétrica. A grande vantagem deste modelo é o aproveitamento do grande espaço disponível ao redor do mundo, tais como estradas, terminais de aeroportos, estação ferroviárias e grandes complexos industriais [1].

O país de maior produção de energia solar instalada é Alemanha com 35 GW instalados. Como mencionado anteriormente, somente o estado brasileiro do Amazonas apresenta um potencial cinco vezes superior em relação de todo o território alemão. Este dado apresenta de forma simplificada o imenso potencial brasileiro em utilizar a energia solar para geração de grande quantidade energética com baixíssimo impacto ambiental, evitando entraves técnicos, políticos e ambientais como os que ocorrem acerca da Usina de Belo Monte [4].

A maior planta de energia solar instalada está localizada na região da Bavaria na Alemanha, conhecido como *Bavaria Solar Park*. A usina foi inaugurada no ano de 2005 e gera 10 MW de energia elétrica com a utilização de 57.600 painéis fotovoltaicos divididos em três sistemas em uma área ocupada de aproximadamente 26 hectares, reduzindo a emissão de 100 mil toneladas de dióxido de carbono e uma geração de 215 milhões de kWh ao longo de 20 anos. Os módulos da usina possuem sistema de seguimento solar que possibilita um aumento de eficiência entre 18 e 35%. Em Guenching e Minihof cada planta gera 1.9 MW e em Muehlhausen, 6.3 MW [21].

A Figura 30 ilustra a vista aérea do parque.

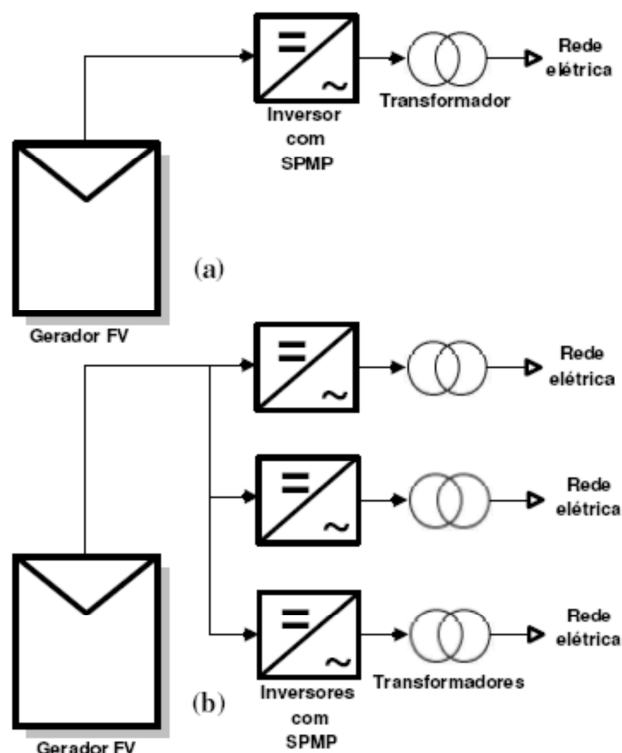
Figura 30: *Bavaria Solar Park*.



Fonte: News, views and contacts from the global power industry [21].

Centrais de grande porte fornecem potência instantaneamente utilizando um ou mais inversores e transformadores. Em geral, os inversores atuais possuem a funcionalidade de monitor a tensão e frequência da rede, sendo automaticamente desconectados em caso de instabilidade na geração do sistema fotovoltaico. Uma possível configuração é ilustrada na Figura 31 [20].

Figura 31: Configurações de sistemas com um (a) ou vários inversores (b).



Fonte: Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede Elétrica [20].

A desvantagem dos sistemas de grande porte consiste em ocupar uma grande área. Deste modo, acabam por serem localizadas distante dos centros de consumo, necessitando do sistema de transmissão, o que acarreta perdas significativas. Porém, apesar de terem potência consideravelmente inferior à grandes centrais hidrelétricas, não havendo nenhum impedimento técnico quanto a confiabilidade destes sistemas [20].

4.3 SISTEMAS PARA ELETRIFICAÇÃO RURAL ISOLADOS (*STAND-ALONE OU OFF-GRID*)

Sistemas isolados atendem localidades remotas e por não existir conexão com a rede de distribuição pública o sistema é conectado a bancos de baterias através de controladores de carga para otimizar o armazenamento e inversores para converter a

energia gerada em CC para CA. Inicialmente esta modalidade apresentava-se como sistemas de pequeno porte que atendiam a demanda de uma ou poucas residências consumidoras. A Figura 32 ilustra o modelo [1].

Além de populações de área rurais é frequente a presença de sistemas solares para atender a demanda de sistemas de telecomunicações instalados em áreas remotas, navegação marítima, sinalização de tráfego veicular, iluminação pública, estações de tratamento de água, entre outros. A utilização de sistemas isolados é economicamente competitiva pelo alto custo de combustíveis fósseis para utilização de geradores à óleo diesel, por evitar altos custos com cabeamento para transportar energia até as regiões remotas de interesse e pela redução contínua do custo de módulos fotovoltaicos [1].

A instalação é simples para atendimento a cargas que atuam com corrente contínua, como, por exemplo, estações de bombeamento de água. No entanto, sistemas elétricos de corrente contínua puro não são possíveis, pois equipamentos alimentados por corrente alternada ainda são consideravelmente menos custosos que equipamentos que utilizam corrente contínua, sendo necessário, portanto, o uso de inversores, os quais também atuam como controladores de carga, para utilização e estabilidade da energia em corrente alternada [17].

As baterias são importantes pois atuam em conjunto com o inversor para estabilizar a rede em momentos de geração diminuta em função da redução da incidência solar. Nuvens passageiras, por exemplo, podem reduzir a geração em até 80% [17].

A Figura 32 apresenta um pequenos sistema isolado na área rural e a Figura 33 apresenta um sistema isolado para alimentar um sistema de telecomunicações distante da rede pública.

Figura 32: Eletrificação rural *off-grid* na América do Sul.



Fonte: *Photovoltaic energy – Energy from the Sun* [1].

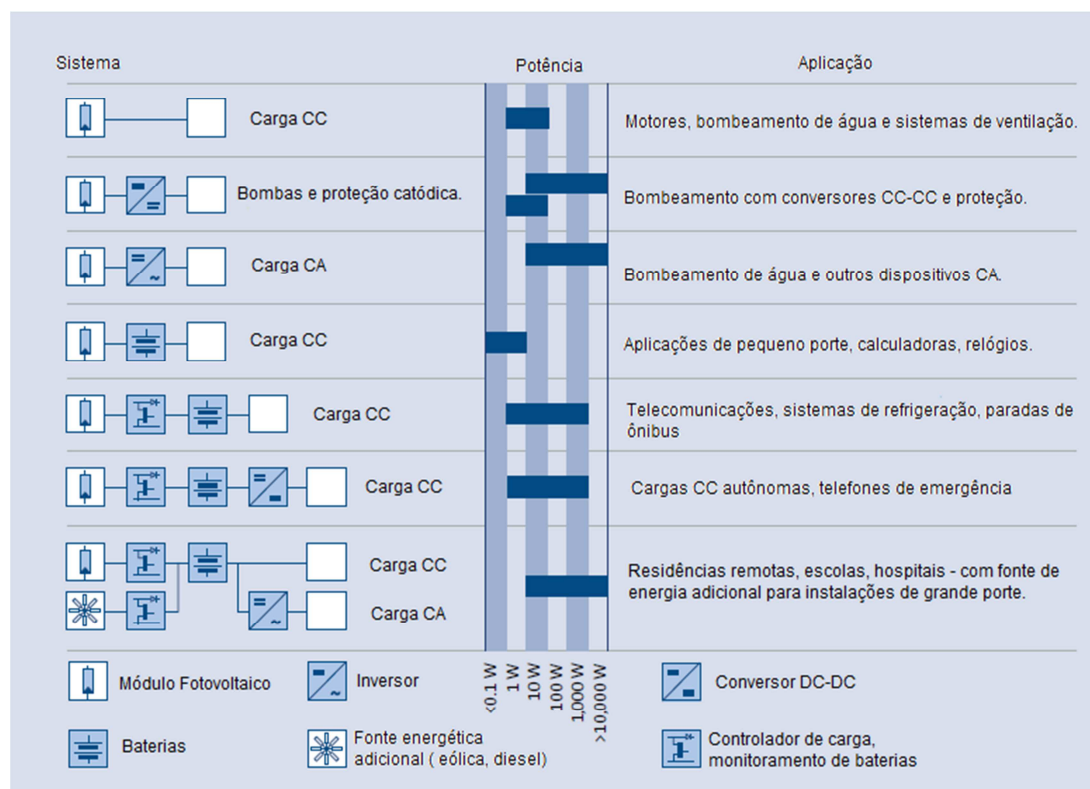
Figura 33: Atendimento a estação de telecomunicações.



Fonte: *Photovoltaic energy – Energy from the Sun* [1].

A Figura 34 apresenta um quadro resumo de possíveis configurações de sistemas fotovoltaicos isolados sem conexão com a rede pública de distribuição. É apresentado sete sistemas distintos com atendimento a cargas alimentadas por CC e CA; com fonte adicionais (sistemas híbridos – item 4.4), com banco de baterias e controladores de carga [17].

Figura 34: Sistema fotovoltaico isolado – Quadro resumo de atendimento a cargas.

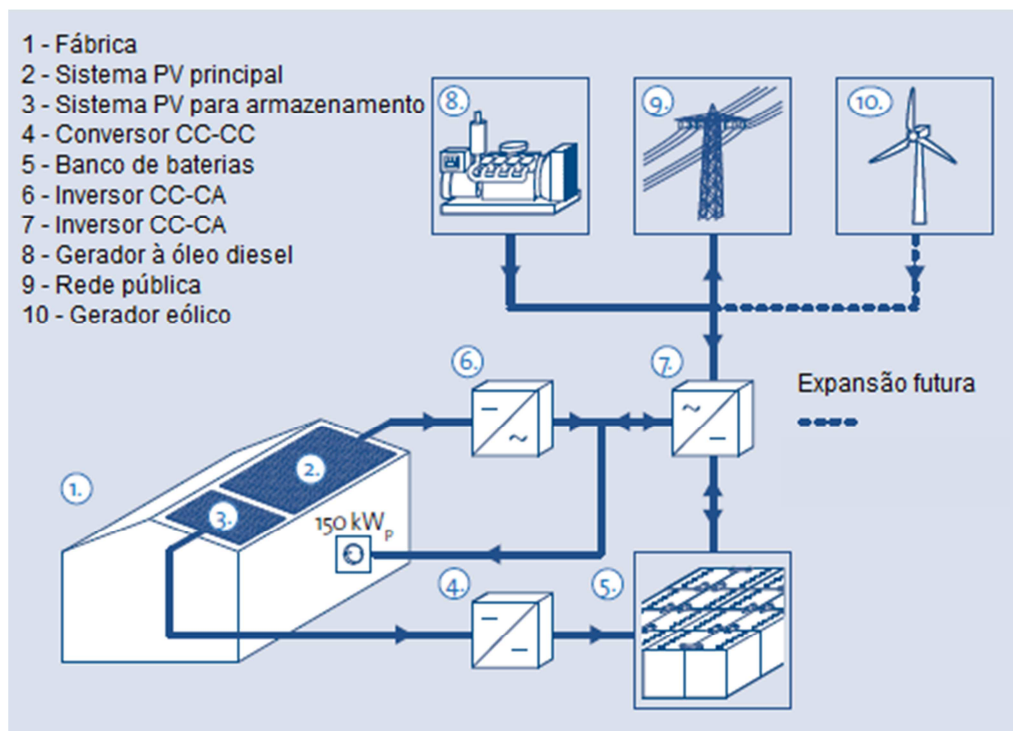


Fonte: Inverter, Storage and PV System Technology [17]. (Adaptado)

4.4 SISTEMAS HÍBRIDOS

Os sistemas fotovoltaicos podem atuar em conjunto com outras fontes geradoras de energia, tais como um gerador de biomassa, uma turbina eólica ou um gerador a óleo diesel, visando alcançar a produção de energia necessária. Os sistemas híbridos podem operar interligados a rede de distribuição (*on-grid*) ou isoladamente (*off-grid*) conforme apresentado na Figura 35. Como as duas fontes atuam de forma complementar a projeção do sistema torna-se mais confiável [1].

Figura 35: Sistema fotovoltaico híbrido – Exemplo de configuração do sistema.



Fonte: Inverter, Storage and PV System Technology [17]. (Adaptado)

Em média, o número de horas com radiação solar para produção de energia não é significativamente alterado de um dia para outro. Porém, quando analisado um período de longo prazo, observa-se uma diferença sazonal entre os meses de verão e inverno. A combinação de sistemas fotovoltaicos e eólicos são complementares e solucionam este problema da sazonalidade [22].

A geração eólica pode variar significativamente de um dia para outro e, assim como sistema fotovoltaicos, apresentam grande variação de energia em função das estações do ano. Estas duas fontes apresentam-se perfeitamente como complementares. Enquanto sistemas fotovoltaicos apresentam maior geração durante o verão, sistemas eólicos apresentam maior produção durante o inverno. Uma análise temporal ainda menor, permite afirmar que a energia solar atinge o auge de produção próximo do meio dia, enquanto a energia eólica atinge seu máximo em horários de menor radiação solar. É esperado que estas duas fontes atuando em conjunto atendam 45% da demanda energética europeia no ano de 2030 [22].

5. CENÁRIO BRASILEIRO, EXPECTATIVA DO MERCADO E SUSTENTABILIDADE

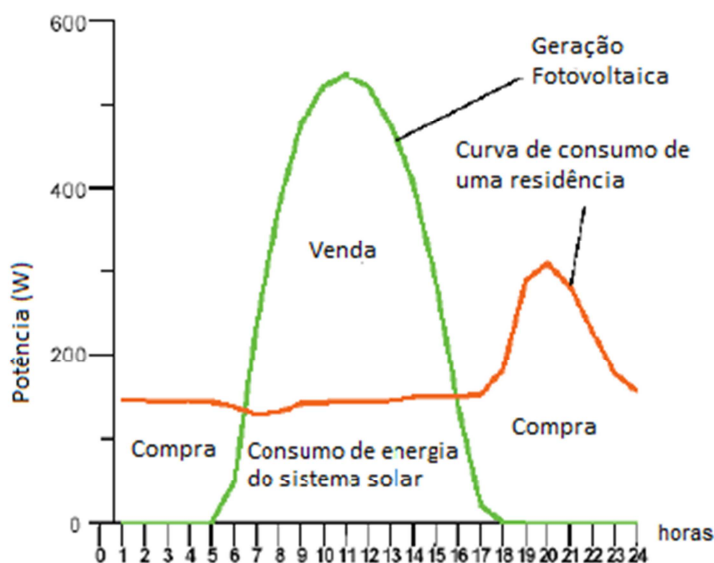
Apesar da grande disponibilidade de recurso solar e área disponível, a geração de energia elétrica por sistemas fotovoltaicos ainda apresenta-se de maneira desprezível no território brasileiro. Porém, com a publicação da Resolução Normativa 482 há uma grande expectativa quanto ao incremento da geração distribuída de energia no Brasil. A Figura 29, presente no item 4.1, apresenta a configuração tradicional de um micro/minigerador doméstico [20].

5.1 GERAÇÃO DISTRIBUÍDA DE ENERGIA ELÉTRICA

A geração distribuída de energia elétrica é dividida em micro e minigeração no Brasil, conforme apresentação no item 5.2. Este termo classifica os pequenos geradores interligados à rede de distribuição, geralmente presentes em pequenas residências e estabelecimentos comerciais [20].

A Figura 36 apresenta a curva de radiação solar e a curva de consumo de uma residência. É observado que no período entre às 18h de um dia e às 5h do dia posterior não há radiação solar e portanto, produção de energia. Neste caso, durante esse intervalo de tempo o estabelecimento utiliza a energia da rede de distribuição [20].

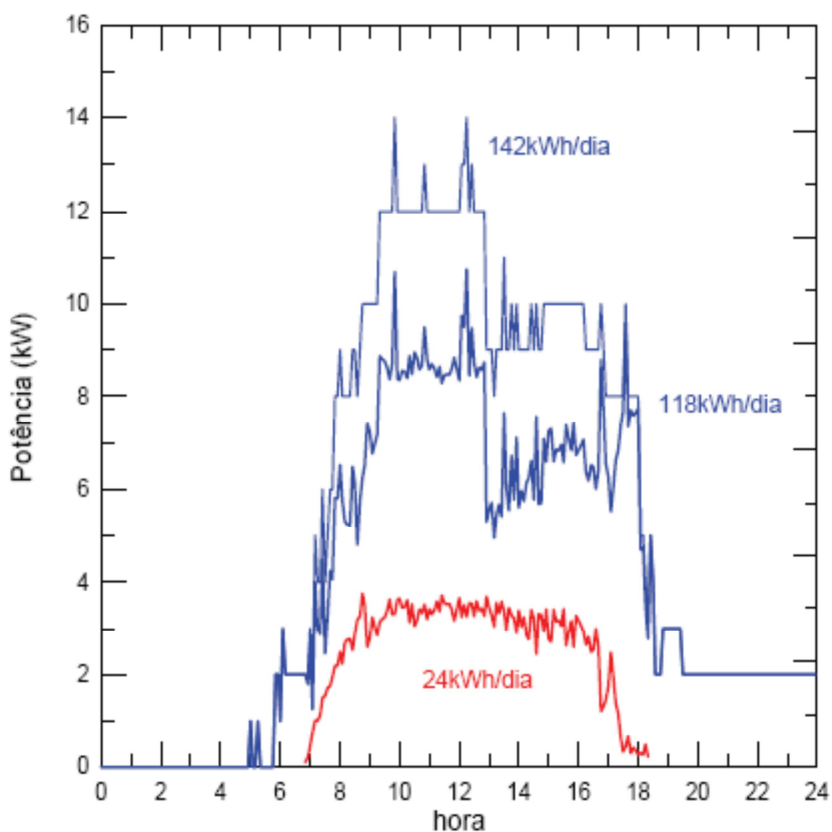
Figura 36: Produtividade de energia por um sistema fotovoltaico de 700 W.



Fonte: Sistemas fotovoltaicos conectados a rede elétrica [20].

A Figura 37 apresenta uma curva de carga para um prédio comercial. O período de geração coincide com o período de consumo. A linha vermelha indica a energia produzida pelo sistema fotovoltaico, a linha azul superior indica a energia consumida, a linha azul inferior indica a energia consumida da concessionária [20].

Figura 37: Curva de carga de um estabelecimento comercial.



Fonte: Sistemas fotovoltaicos conectados a rede elétrica [20].

Deste modo, o sistema fotovoltaico atua auxiliando o atendimento a carga do sistema de distribuição.

5.2 RESOLUÇÃO NORMATIVA 482

Com a possibilidade dos consumidores residenciais aumentarem suas receitas através de créditos energéticos ou financeiros, os custos de sistemas fotovoltaicos têm apresentado queda ao longo dos últimos anos. Porém, do ponto de vista técnico, deve-se analisar o impacto destes sistemas integrados à rede de distribuição [6].

No Brasil, a mini e microgeração de energia foi definida pela ANEEL apenas no ano de 2012 e ainda é desconhecida da maior parte da população. A microgeração

distribuída possui potência instalada de até 100 kW, enquanto a mini geração distribuída possui capacidade até 1 MW. A regulação leva em consideração a produção de energia por fonte solar, eólica e biomassa [6].

A resolução possibilita aos usuários a produção de energia elétrica e inserção da mesma na rede de distribuição. No caso brasileiro, não haverá compensação financeira sobre o excedente de energia elétrica produzido pelo micro ou minigerador, mas sim, compensação na forma de créditos de energia. O excedente poderá ser compensado em um prazo máximo de 36 meses [6].

Como o sistema de tarifação de energia no país não é dividido por faixa horária de consumo, a compensação é simples. Na fatura mensal, a distribuidora deverá informar a energia elétrica ativa, isto, é, a diferença entre a energia consumida e a energia injetada [6].

É permitido que o excedente energético de uma unidade consumidora possa ser utilizado para compensar o consumo de outra unidade desde que do mesmo titular e de mesma concessionária de energia [6].

O sistema de medição é de responsabilidade da distribuidora, porém, cabe ao pequeno gerador os custos do equipamento. Compete também ao micro e minigerador a responsabilidade por gerar a energia elétrica no mesmo padrão da energia distribuída sem ocasionar danos ao sistema, podendo neste caso ser desqualificado não tendo direito a qualquer crédito de compensação [6].

5.3 SISTEMAS FOTOVOLTAICOS INSTALADOS NO BRASIL

Com a entrada em vigor da Resolução 482 é esperado um aumento no número de sistemas fotovoltaicos integrados à rede, integrando a matriz energética do país. A Tabela 2 apresenta os sistemas instalados até o ano de 2010. A maioria dos sistemas estão instalados em universidades e companhias de energia elétrica com intuito acadêmico de pesquisa e desenvolvimento [20].

Tabela 2: Capacidade dos sistemas instalados até o ano de 2010.

Sistema	Potência (kWp)	Ano de instalação
Labsolar UFSC	11,00	1995
LSF-IEE-USP	0,75	1998
Labsolar UFSC	1,10	2000
Cepel	16,32	2002
Intercâmbio Eletro Mecânico	3,30	2002
FAE UFPE	2,40	2002
CELESC (Lajes)	1,40	2003
CELESC (Tubarão)	1,40	2003
LSF-IEE-USP	6,00	2003
UFRGS (Eng. Mecânica)	4,80	2004
CEMIG	3,00	2004
LSF-IEE-USP	3,00	2004
Grupo FAE UFPE	1,28	2005
Clínica Harmonia SP	0,90	2005
UFJF	31,70	2006
CEMIG (CEFET)	3,24	2006
CEMIG (PUC-MG)	2,05	2006
CEMIG (Sete Lagoas)	3,00	2006
Casa Eficiente Eletrosul	2,30	2006
Greenpeace SP	2,80	2007
Residência Particular em Recife	1,00	2007
GEDAE UFPA	1,60	2007
LH2 UNICAMP	7,50	2007
Residência Particular em São Paulo	2,90	2008
Solaris	1,04	2008
Zeppini Motor Z	2,40	2008
Zeppini Fundação Estrela	14,70	2008
Eletrosul (Estacionamento)	12,00	2009
Tractebel Hospital Univ. UFSC	2,00	2009
Tractebel Colégio Aplicação	2,00	2009
Tractebel Aeroporto Florianópolis	2,00	2009
Eficiência Máx. Consultoria MG	3,57	2010
Potência Operacional	173,89	

Fonte: Sistemas fotovoltaicos conectados a rede elétrica [20].

5.4 POTENCIAL ENERGÉTICO BRASILEIRO POR SISTEMAS FOTOVOLTAICOS

O Brasil possui um amplo e vasto território que apresenta um potencial da geração de energia elétrica a partir da energia solar superior ao consumo total do país [15].

Pode-se comparar o potencial solar com o potencial eólico. Hipoteticamente, a utilização da área do lago de Itaipu para geração a partir de sistemas fotovoltaicos, corresponderia a aproximadamente 60% do potencial de geração a partir de parques eólicos de todo o Brasil, indicado em 143,5 GW [15].

Estas comparações visam apenas quantificar o enorme potencial brasileiro para geração de energia elétrica com pequeno impacto ambiental.

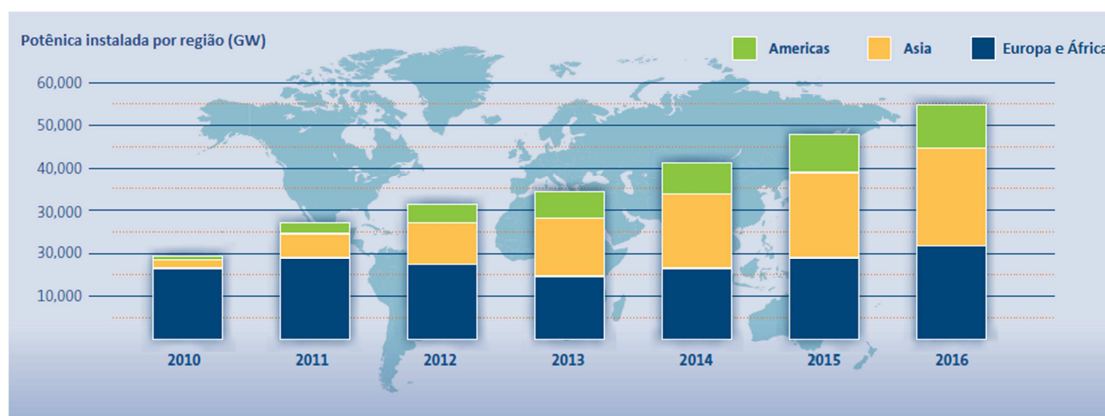
5.5 SITUAÇÃO DO MERCADO DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS

Com exceção do ano de 2008 atingido por uma grave crise financeira global, o mercado de energia solar tem apresentado grande crescimento no mundo todo. A expectativa para 2013 é uma receita de 75 bilhões de dólares [23].

O continente europeu, em 2010, correspondia a 80% do mercado de energia solar. Porém, para 2013 há expectativa que esta parcela seja de 39% com a Ásia se tornando o grande mercado consumidor. Esta situação ocorre pela situação econômica na região europeia e pela crescente demanda energética dos países asiáticos e escassez de recursos naturais para geração de energia via usinas hidrelétricas e térmicas [23].

A Figura 38 apresenta a dados desde 2010 da potência instalada por três regiões sendo possível observar o acelerado crescimento asiático e a expectativa de crescimento para os próximos anos [23].

Figura 38: Expectativa da demanda global de sistemas fotovoltaicos.



Fonte: IHS Market Tracker [23]. (Adaptado).

A Figura 39 apresenta a potência instalada para os 5 maiores produtores em 2012 e a mudança do mercado esperada para o ano de 2013.

Figura 39: Os cinco maiores produtores de energia solar.

2012 MW INSTALADO		2013 MW INSTALADO	
1	 ALEMANHA 8,000	1	 CHINA 6,300
2	 CHINA 5,100	2	 EUA 5,100
3	 EUA 3,600	3	 ALEMANHA 5,000
4	 ITÁLIA 3,500	4	 JAPÃO 3,500
5	 JAPÃO 2,200	5	 ITÁLIA 2,900

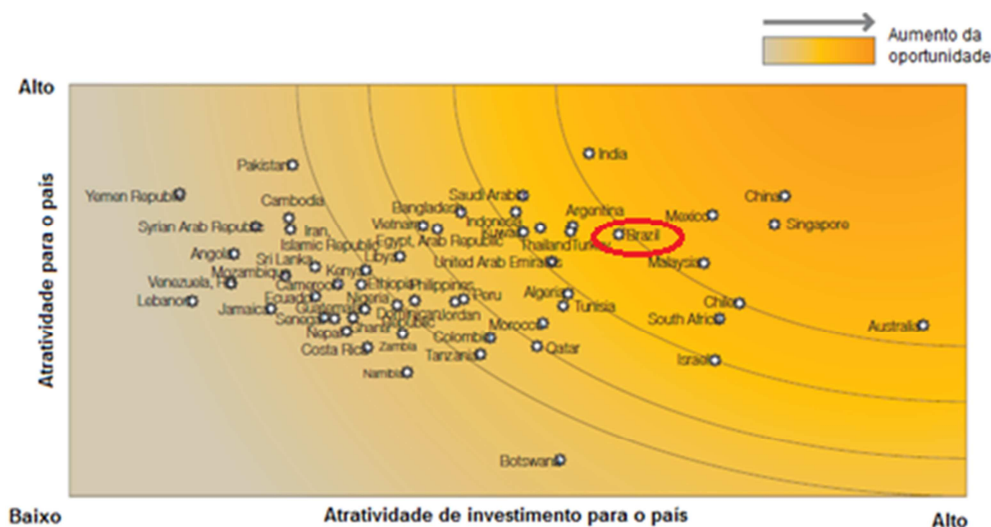
Fonte: IHS Market Tracker [17]. (Adaptado).

5.6 EXPECTATIVA DE MERCADO

Desde o ano de 2010 países como China, Índia e Israel têm apresentado evolução em seus mercados de energia fotovoltaica. Em função da queda acentuada dos preços do sistemas, há uma expectativa de que países como México, Chile, Brasil e África do Sul apresentem crescimento acelerado a partir de 2014 [24].

A Figura 40 apresenta a relação de atratividade para diversos países com potencial para geração de energia elétrica via solar. É facilmente observado que apesar do alto custo de um sistema no Brasil, o país é classificado como um dos mais atrativos para instalação de sistemas fotovoltaicos [24].

Figura 40: Mapeamento da oportunidade para sistemas fotovoltaicos.



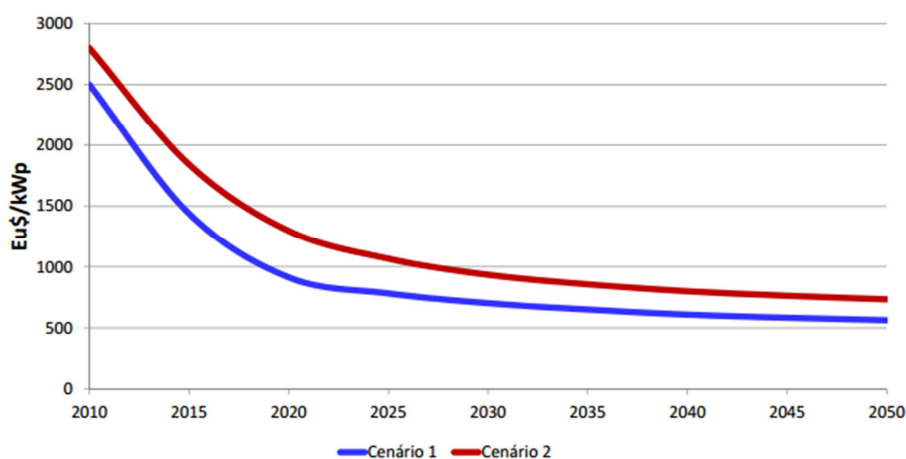
Fonte: EPIA Global Market Outlook for Photovoltaics 2013-2017 [24]. (Adaptado)

5.7 CUSTO DE MÓDULOS FOTOVOLTAICOS

Desde meados do ano de 2011 o preço do silício apresenta queda em seu valor em função da desaceleração do crescimento chinês, maior consumidor do minério. Por consequência, os módulos fotovoltaicos produzidos a partir de células de silício cristalino apresentaram uma queda de 25%. A diminuição no custo do sistema o torna mais atraente para execução de projetos de pequeno e grande porte [23].

Pela entrada dos países asiáticos no mercado de sistemas fotovoltaicos, já representando 60% da produção mundial, é esperado que a produção em larga escala e alta competitividade entre fabricantes reduza ainda mais os preços praticados contribuindo para o crescimento do mercado. A Figura 41 apresenta a curva de preço em Euros por kWp ao longo do tempo, sendo a década atual o momento de maior queda no valor de um sistema para posterior estabilização dos preços. A curva em azul é representado o cenário mais otimista e a curva em vermelho um cenário conservador [24].

Figura 41: Expectativa de preço para sistemas fotovoltaicos ao longo do século atual.



Fonte: EPIA *Global Market Outlook for Photovoltaics 2013-2017* [24].

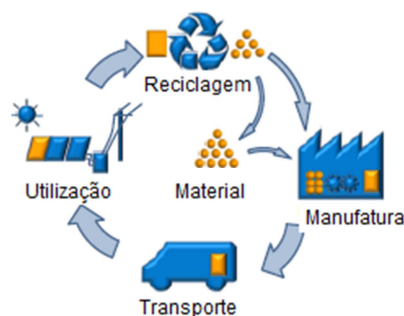
5.8 SUSTENTABILIDADE

O processo de fabricação de um sistema fotovoltaico é avaliado pelo consumo de energia que demanda para ser fabricado. Este critério é denominado Tempo de Recuperação Energética, EPBT, do inglês *Energy Payback Time*, medido em anos. O critério leva em consideração o ciclo completo de vida do sistema, desde o material

como minério até sua reciclagem. O EPBT é determinado pela Equação (18) e ilustrado pela Figura 42 [25].

$$EPBT = \frac{\text{Energia para fabricação}}{\text{Energia gerada/ano}} \quad (18)$$

Figura 42: Ciclo de vida de um sistema fotovoltaico.

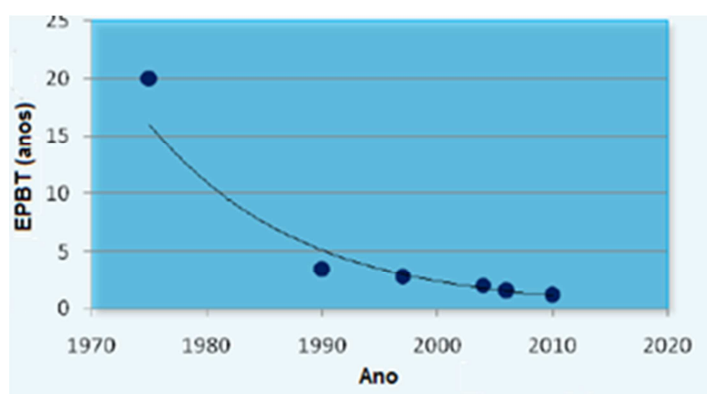


Fonte: *EPIA Sustainability of Photovoltaic Systems – The Energy Pay Back Time* [25].

(Adaptado)

O tempo necessário para o sistema produzir a energia consumida até estar em funcionamento depende da localização e da tecnologia utilizada. No presente momento, este tempo é estimado entre 0,5 e 1,4 anos considerando instalações em solo europeu. A Figura 43 apresenta a evolução do EPBT ao longo dos anos sendo observado a inserção de novas tecnologias que permitem uma redução de seu valor.

Figura 43: Histórico da EPBT para módulos de silício cristalino



Fonte: *EPIA Sustainability of Photovoltaic Systems – The Energy Pay Back Time* [25].

(Adaptado)

6. ESTUDO DE CASO

Após análise teórica sobre os componentes e funcionamento de sistemas fotovoltaicos é realizado um estudo de caso, abordando a viabilidade econômica e energética de um sistema fotovoltaico interligado à rede de distribuição e sem armazenamento de energia.

De acordo com a Resolução 482 da ANEEL, é permitido ao minigerador a utilização por até 36 meses dos créditos energéticos gerados em um determinado período mensal. Por esta razão foi escolhido uma residência no município litorâneo de Xangri-lá, no Rio Grande do Sul. As razões para escolha deste local foram:

- Área disponível em região livre de edifícios e árvores que poderiam causar o efeito de sombreamento;
- Região onde o sistema de distribuição apresenta instabilidade na alta temporada com constantes faltas ao longo do período de novembro à março;
- Aumento considerável do consumo da residência na alta temporada em função da instalação de aparelhos de ar condicionado em quatro cômodos e sistema de irrigação;
- Utilização dos créditos energéticos gerados ao longo do ano no período de maior consumo.

6.1 LEVANTAMENTO DE DADOS

O local escolhido possui o telhado na orientação leste-oeste. A inclinação é praticamente desprezível, podendo-se regular a inclinação dos painéis facilmente.

A área disponível para a instalação é de aproximadamente 165 m² do lado leste e 90 m² do lado oeste. Há uma pequena caixa d'água desconsiderada, pois apenas o topo permanece fora do forro, sendo assim, área igualmente utilizada. O projeto utiliza apenas a área mais a leste.

6.2 CONSUMO DE ENERGIA ELÉTRICA

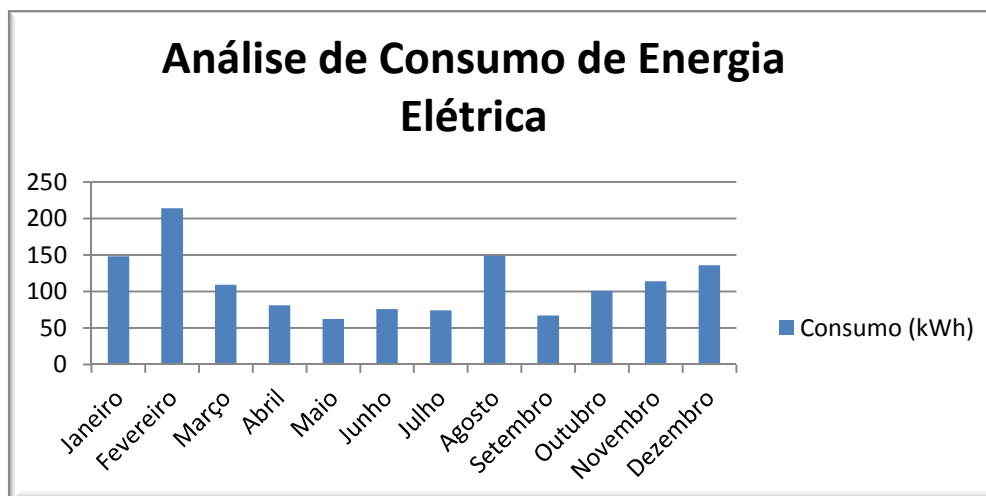
Foi realizado o levantamento mensal e a média diária de consumo de energia elétrica no período de Janeiro de 2012 até Dezembro de 2012, conforme apresentado na Tabela 3. O consumo total anual analisado foi de 1331 kWh e a média mensal foi de 110,92 kWh.

Tabela 3: Consumo médio mensal e diário.

Mês	Consumo (kWh)	Dias	Média Diária (kWh)
Janeiro	148	30	4,93
Fevereiro	214	33	6,48
Março	109	28	3,89
Abril	81	30	2,70
Mai	62	29	2,14
Junho	76	33	2,30
Julho	74	29	2,55
Agosto	149	30	4,97
Setembro	67	32	2,09
Outubro	101	30	3,37
Novembro	114	32	3,56
Dezembro	136	28	4,85
Média	110,92		3,66

De posse dos dados é plotado um gráfico para melhor visualização do consumo. É observado maior consumo no verão – dezembro, janeiro, fevereiro e março – devido a utilização de aparelhos de ar condicionado e chuveiros elétricos com maior consumo no período de alta temporada . O resultado é ilustrado na Figura 44.

Figura 44: Variação do consumo médio mensal de 2012.

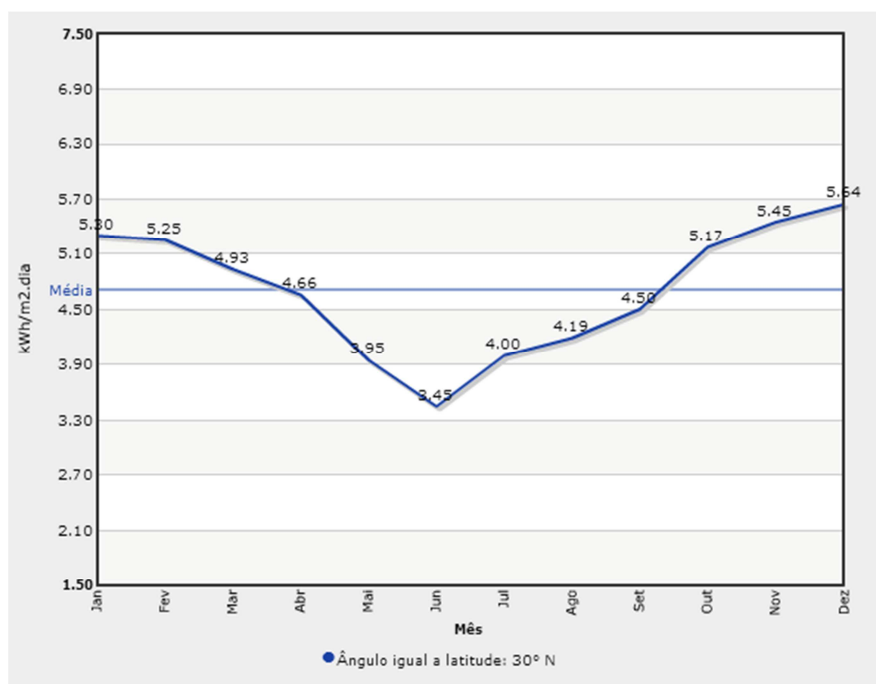


6.3 RADIAÇÃO SOLAR

Para os municípios litorâneos do estado do Rio Grande do Sul não há dados disponíveis na atualidade. Porém, a latitude do município de Xangri-lá é praticamente a mesma apresentada pela capital do estado, Porto Alegre. Enquanto esta apresenta latitude $30,03^\circ$ Sul e Longitude $51,23^\circ$ Oeste, Xangri-lá apresenta latitude $29,78^\circ$ Sul e longitude $50,05^\circ$ Oeste. São utilizados estes dados para desenvolver o estudo.

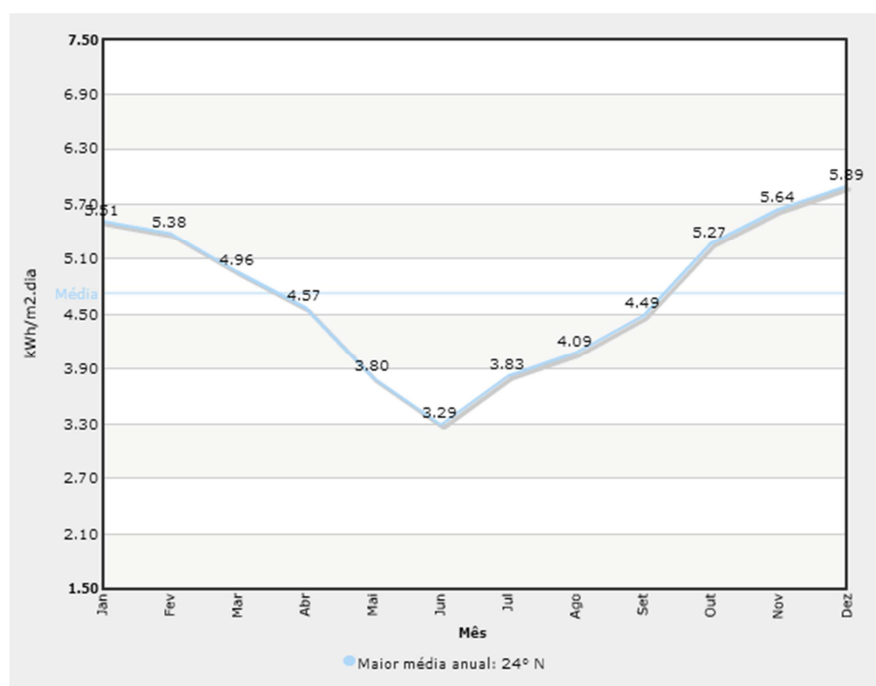
Conforme citado no item 3.2.1 o *software* SunData disponibiliza as informações sobre a radiação solar conforme a latitude e longitude fornecidos pelo projetista. A Figura 45 apresenta a curva de radiação solar para uma inclinação dos painéis com o ângulo igual a latitude local, enquanto a Figura 46 apresenta a curva para a inclinação de 24° que apresenta a maior média anual.

Figura 45: Curva de radiação solar para Porto Alegre com inclinação igual a latitude.



Fonte: SunData [16].

Figura 46: Curva de radiação solar para Porto Alegre com inclinação igual 24°.



Fonte: SunData [16].

A Tabela 4 apresenta os dados apresentados pelas Figuras 38 e 39, bem como a média anual e o valor Delta, representado pela maior diferença de radiação ocorrida no período.

Tabela 4. Radiação mensal em kWh/m²/dia para inclinações de 30° e 24°.

Mês	30°	24°
Janeiro	5,30	5,51
Fevereiro	5,25	5,38
Março	4,93	4,96
Abril	4,66	4,57
Mai	3,95	3,80
Junho	3,45	3,29
Julho	4,00	3,83
Agosto	4,19	4,09
Setembro	4,50	4,49
Outubro	5,17	5,27
Novembro	5,45	5,64
Dezembro	5,64	5,89
Média	4,71	4,73
Delta	2,20	2,60

6.4 CARACTERÍSTICAS DOS PAINÉIS E INVERSORES

Foram analisados cinco modelos de painéis fotovoltaicos disponíveis no mercado. Os modelos englobam a tecnologia de silício policristalino e foram escolhidos pela disponibilidade de obtenção de valores e informações técnicas. A Tabela 5 apresenta as características dos painéis pesquisados.

Tabela 5: Análise de Painéis Fotovoltaicos.

Características	Placas				
	Modelo 1	Modelo 2	Modelo 3	Modelo 4	Modelo 5
Fabricante	Solaris	Suntech	Atersa	Jetion	Jetion
Modelo	S55P	STP085D-12/BEA	A95M	JT140PFe	ST235PCe
Tipo de célula	Si Policristalino	Si Policristalino	Si Policristalino	Si Policristalino	Si Policristalino
Potência Nominal	55 W	85 W	95 W	140 W	235 W
Tensão a Máx. Pot.	18,2 V	17,8 V	17,76 V	18,3 V	30,5 V
Peso	5,7 kg	12 kg	9,5 kg	12 kg	22,5 kg
Comprimento	0,87 m	1,195 m	1,224 m	1,482 m	1,665 m
Largura	0,510 m	0,541 m	0,542 m	0,676 m	0,992 m
Espessura	35 mm	30 mm	35 mm	40 mm	40 mm
Área	0,44 m ²	0,65 m ²	0,66 m ²	1,00 m ²	1,65 m ²
Eficiência do Painel	13,7%	13,10%	14,32%	14%	14,30%

Fonte: Neo Solar Energia [24].

Foram pesquisados dois modelos de inversores que apresentavam a característica de seguidor de máxima potência. As características são apresentadas na Tabela 6.

Tabela 6. Análise de Inversores CC/CA.

Características	Modelo 1	Modelo 2
Fabricante	i-Energy	SMA
Modelo	GT260	Sunny Boy 1200
Corrente Máx. Entrada	10 A	12,6 A
Eficiência Máxima	94%	92,1%
Tensão Mín. de Entrada CC	25	100 V
Tensão de Saída CA	220 V	180-265 V

Fonte: Neo Solar Energia [24].

O primeiro modelo atua como micro-inversor, sendo necessário uma unidade para cada módulo. Desta modo apresenta flexibilidade de projeto, podendo ser ampliado conforme a necessidade, além de vida útil em torno de 20 anos, acima das expectativas. O segundo modelo atua como inversor centralizado, sendo necessário uma maior tensão gerada por cada painel e oferece menor flexibilidade para ampliação do projeto, além de uma vida útil em torno de 13 anos.

A Equação 19 fornece o número aproximado de módulos fotovoltaicos para o projeto.

$$n = \frac{E}{G \cdot \eta \cdot A} \quad (19)$$

Onde:

- n é o número de painéis;
- E é o consumo médio diário em kWh;
- G é a radiação média diária em kWh/m²/dia;
- η é a eficiência do módulo;
- A é a área do módulo em m².

Porém, a Equação (18) não considera variações de temperatura de operação dos módulos, a eficiência do inversor utilizado e perdas por cabeamento e conectores. Portanto, a estimativa propõe um consumo diário médio 25% superior ao medido, visando proporcionar uma margem de segurança ao projeto. O resultado é apresentado na Tabela 7.

Tabela 7: Estimativa de número de módulos.

Consumo Médio Diário Anual (kWh)	Radiação Média (kWh/m ² /dia)	Alternativas de geração									
		1		2		3		4		5	
		Nº	Área (m ²)	Nº	Área (m ²)	Nº	Área (m ²)	Nº	Área (m ²)	Nº	Área (m ²)
4,575	4,73	16,05	7,06	11,36	7,38	10,23	6,75	6,91	6,91	4,74	7,82

Levando em consideração a tensão mínima de entrada do inversor como 120 V, onde 20 V são margem de segurança do projeto, pode-se estimar a quantidade de módulos em série para obter o valor mínimo necessário. A aproximação é realizada pela Equação 20.

$$n_{serie} = \frac{V_{ccmín}}{n} \quad (20)$$

Onde:

- $V_{ccmín}$ é a tensão mínima de entrada do inversor utilizado em Volts;
- n é o número de módulos determinado na Equação (19).

A Tabela 8 apresenta o cálculo da Equação (20) para os cinco modelos pesquisados.

Tabela 8: Estimativa de número de módulos em série.

Nº de painéis em série				
1	2	3	4	5
n	n	n	n	n
6,59	6,74	6,76	6,56	3,93

Com os resultados obtidos é possível determinar a configuração para cada módulo. A aproximação considera o número mínimo calculado e apresentado na Tabela 6.

O modelo 1 é aproximado para 1 arranjo com 2 painéis formado por 8 módulos em série.

O modelo 2 é aproximado para 2 arranjos com 2 painéis formados por 7 módulos em série.

O módulo 3 é aproximado para 2 arranjos com 2 painéis formados por 7 módulos em série.

O modelo 4 é aproximado para 1 arranjo com 1 painel formado por 8 módulos em série.

O modelo 5 é aproximado para 1 arranjo com 1 painel formado por 4 módulos em série.

6.5 ANÁLISE DO POTENCIAL ENERGÉTICO DO PROJETO

Com o número de módulos determinado para cada modelo, utilizando novamente a Equação (18) é estimado a potência diária gerada em kWh. A Tabela 9 e a Tabela 10 apresentam a geração do sistema em kWh por mês e o percentual comparado ao consumo médio diário, além da área utilizado exclusivamente pelos módulos.

Tabela 9: Geração mensal analisada para modelos 1, 2 e 3.

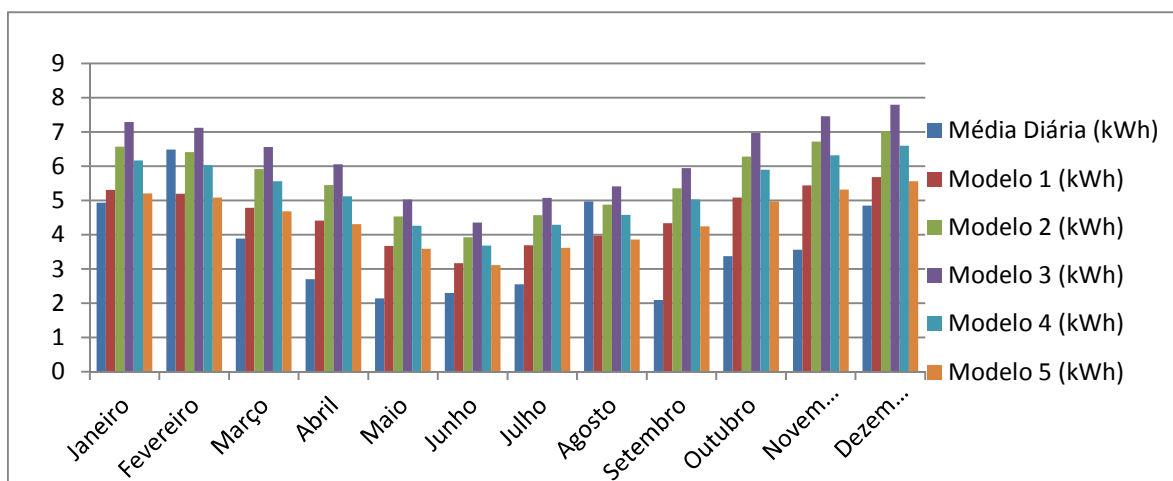
Mês	Consumo Médio Diário (kWh)	Radiação Média (kWh/m ² /dia)	Modelo 1		Modelo 2		Modelo 3	
			Área (m ²)	7,04	Área (m ²)	9,1	Área (m ²)	9,24
			Pot Gerada	(%)	Pot Gerada	(%)	Pot Gerada	(%)
Janeiro	4,93	5,51	5,31	107,79	6,57	133,23	7,29	147,88
Fevereiro	6,48	5,38	5,19	80,08	6,41	98,97	7,12	109,86
Março	3,89	4,96	4,78	122,98	5,91	152,00	6,56	168,71
Abril	2,7	4,57	4,41	163,25	5,45	201,77	6,05	223,96
Mai	2,14	3,8	3,67	171,26	4,53	211,68	5,03	234,96
Junho	2,3	3,29	3,17	137,96	3,92	170,52	4,35	189,27
Julho	2,55	3,83	3,69	144,86	4,57	179,05	5,07	198,73
Agosto	4,97	4,09	3,94	79,37	4,88	98,10	5,41	108,89
Setembro	2,09	4,49	4,33	207,20	5,35	256,10	5,94	284,26
Outubro	3,37	5,27	5,08	150,83	6,28	186,42	6,97	206,92
Novembro	3,56	5,64	5,44	152,80	6,72	188,86	7,46	209,63
Dezembro	4,85	5,89	5,68	117,13	7,02	144,77	7,79	160,69
Média	3,66	4,73	4,56	124,64	5,64	154,06	6,26	171,00

Tabela 10: Geração mensal analisada para modelos 4 e 5.

Mês	Consumo Médio Diário (kWh)	Radiação Média (kWh/m ² /dia)	Modelo 4		Modelo 5	
			Área (m ²)	8	Área (m ²)	6,6
			Pot Gerada	(%)	Pot Gerada	(%)
Janeiro	4,93	5,51	6,17	125,18	5,20	105,48
Fevereiro	6,48	5,38	6,03	92,99	5,08	78,36
Março	3,89	4,96	5,56	142,81	4,68	120,34
Abril	2,7	4,57	5,12	189,57	4,31	159,75
Mai	2,14	3,8	4,26	198,88	3,59	167,59
Junho	2,3	3,29	3,68	160,21	3,11	135,00
Julho	2,55	3,83	4,29	168,22	3,61	141,76
Agosto	4,97	4,09	4,58	92,17	3,86	77,67
Setembro	2,09	4,49	5,03	240,61	4,24	202,76
Outubro	3,37	5,27	5,90	175,15	4,97	147,59
Novembro	3,56	5,64	6,32	177,44	5,32	149,52
Dezembro	4,85	5,89	6,60	136,02	5,56	114,62
Média	3,66	4,73	5,30	144,74	4,46	121,97

A Figura 47 apresenta o gráfico gerado comparando o consumo e a geração solar das alternativas propostas.

Figura 47: Análise mensal de consumo diário médio e geração diária média.



A partir da análise da potência média gerada diariamente considerando a radiação diária média para cada mês do ano verifica-se que o modelo de módulos 1 e 5 mantiveram sua produção energética em torno de 25% além do consumo, valor muito próximo a margem utilizada para a simulação do projeto. Enquanto, os modelos 2, 3 e 4 apresentaram-se bem acima da margem de segurança. É possível verificar que a área ocupada para este projeto, por ser de pequeno porte e pela disponibilidade de espaço não se torna um problema.

Deste modo, avalia-se o custo de cada projeto e a análise é apresentada na Tabela 11.

Tabela 11: Estimativa de custo de módulos fotovoltaicos.

	Modelo 1	Modelo 2	Modelo 3	Modelo 4	Modelo 5
Custo Unitário (R\$)	429,00	799,00	899,00	789,00	1.249,00
Custo Total (R\$)	6.864,00	11.186,00	12.586,00	6.312,00	4.996,00

Fonte: Neo Solar Energia [24].

Analisando as necessidades do projeto a continuidade é dada pelos modelos 1, 4 e 5, visto que os modelos 2 e 3 apresentam valores consideravelmente acima dos demais.

A estrutura de fixação é fornecida para fixar até 5 ou até 10 módulos. Deste modo, o modelo 1 implicará em adquirir um kit extra para utilização de apenas 1 módulo. Como o modelo 4 utiliza 8 módulos, há possibilidade de dois módulos extras

virem a ser instalados posteriormente, enquanto o modelo 5 utiliza 4 módulos havendo possibilidade de instalar mais um módulo futuramente. Vale atentar que o custo é de um produto padrão, sendo que os suportes podem ser adquiridos com um valor consideravelmente inferior, porém, mantém-se a análise como uma forma de obter o maior custo possível do projeto.

O custo da estrutura fixadores é apresentado na Tabela 12.

Tabela 12: Estimativa de custo para estrutura de fixação.

Fixação	Custo (R\$)
Até 5 módulos	2.400,00
Até 10 módulos	4.700,00

Fonte: Neo Solar Energia [24].

Deste modo, o modelo escolhido é o modelo 5 com o micro-inversor modelo 1. Desta forma cada módulo atua com um inversor independente.

A Tabela 13 apresenta o custo total dos 4 módulos, 4 micro-inversores e sistema de fixação.

Tabela 13: Estimativa de custo total do projeto.

Item	Quantidade	Custo unitário (R\$)	Total (R\$)
Módulo	4	1.249,00	4.996,00
Micro-inversor	4	1.299,00	5.196,00
Estrutura de fixação	1	2.400,00	2.400,00
TOTAL			12.592,00

Fonte: Neo Solar Energia [24].

Porém, os valores apresentados são considerados para a aquisição individual do material. Em contato com a comercializadora, o kit composto pelos módulos, micro-inversores e cabeamento é inferior, sendo orçado em R\$ 9.323,00 e o sistema de fixação em R\$ 950,00, totalizando R\$10.273,00 [24].

Considerando que o consumo de energia da residência se mantenha constante ao longo da vida útil do sistema, em torno de 20 anos quando os módulos apresentam queda de 20% da capacidade, gera-se a Tabela 14, considerando o custo do kWh em junho de 2013 e, desconsiderando-se as correções em seu valor ao longo do tempo.

Também não são considerados a inflação do período, visto que as alternativas de investimentos na atualidade a superam.

Tabela 14: Avaliação final do projeto.

Estrutura atual		
	kWh	R\$
Consumo Anual	1332	546,12
Consumo 20 anos	26640	10.922,40
R\$/kWh	0,41	
Sistema Fotovoltaico Projetado		
Custo do Sistema		10.273,00
Potencial do Sistema mensal	138,38	55,51
Potencial 20 anos	33.211,20	13.322,05
Economia		2.399,65
Diferença percentual		21,96%

Pela análise final, observa-se que com os valores atuais, o investimento necessário para um pequeno residencial localizado na área litorânea do Rio Grande do Sul encontra-se em um etapa onde o preço do sistema inicia uma fase onde apresenta-se levemente vantajoso sendo possível alcançar a auto-suficiência. Uma análise mais ampla deve contemplar os seguintes requisitos:

- Tendência do valor do kWh pago à distribuidora, enquanto na análise realizada o valor foi considerado constante;
- Estimativa da inflação no período para análise do capital investido, pois o sistema apresenta uma rentabilidade ainda pequena para o período analisado;
- Estimativa do custo de manutenção, visto que este sistema de pequeno porte por ser localizado em uma residência de fácil acesso apresentará um custo baixo pela sua simplicidade;
- O preço dos módulos fotovoltaicos tem diminuído ano-a-ano, aumentando a viabilidade econômica do projeto;
- O custo dos inversores devem sofrer um decréscimo pelo aumento de sua comercialização e produção em larga escala para uso em sistemas solares;
- Levantamento da variação da temperatura do local, visto que a eficiência do sistema depende de sua variação.

Os módulos utilizados possuem diodos de *bypass*, dispensando a necessidade de um custo adicional para o projeto. O inversor utilizado possui seguidor de ponto de máxima potência para otimização da geração.

Desta forma, atesta-se a viabilidade climática e crescente viabilidade econômica, porém esta ainda apresenta-se pouco atrativa ao investidor. Esta questão apresentar-se-á mais atraente com o estímulo aos sistemas fotovoltaicos para geração distribuída. Atualmente, há pouca mão-de-obra disponível o que torna o estudo de viabilidade e posterior instalação de custo elevado.

O surgimento de novas tecnologias com possibilidade de fabricação em larga escala e aumento da vida útil dos componentes do sistema tendem a disseminar os sistemas fotovoltaicos no Brasil atuando como micro e minigeradores distribuídos.

7. CONCLUSÕES

Como observado ao longo deste trabalho, os sistemas fotovoltaicos já são uma realidade nos países de primeiro mundo, enquanto no Brasil ainda não há uma política de incentivo aos sistemas de pequeno porte como sistemas residenciais visando a geração distribuída. Com a diminuição do custos dos componentes destes sistemas espera-se uma maior atratividade para o pequeno investidor. Mas, até o momento o último Plano Decenal de Expansão de Energia, PDE 2021, não contempla o uso de energia solar na matriz energética brasileira.

Em relação aos impactos ambientais de um sistema fotovoltaico observa-se que não há impecilhos tanto para projetos na área rural quanto na área urbana. A preocupação em torno do local de instalação é quanto a área utilizada recebe de luminosidade diariamente considerando os obstáculos naturais e artificiais que possam causar sombreamento e reflexão da radiação solar sobre o sistema diminuindo sua eficiência.

Quanto aos aspectos econômicos, analisados através do estudo de caso, observou-se que os sistemas fotovoltaicos residenciais de pequeno porte ainda não apresentam uma grande taxa de atratividade ao pequeno investidor. Os principais componentes do projeto, painéis solares e inversores, não são produzidos no país, o que contribui para o elevado custo devido a alta taxa tributária incidente sobre produtos importados.

Quanto aos critérios técnicos, o território brasileiro apresenta excelentes condições solares além de uma grande área disponível podendo vir a possuir usinas de grande porte fora das áreas urbanas. Os sistemas fotovoltaicos apresentam produção energética no período diurno coincidindo com o período do pico da demanda de energia que vem se deslocando do período noturno em função da maior utilização de eletricidade pelo aumento do número de estabelecimentos comerciais nos grandes centros. Deste modo os sistemas apresentam-se como um forte auxílio aos sistemas de distribuição já sobrecarregados na maioria das capitais no país e, conseqüentemente, aliviando o sistema de transmissão.

Como formas de incentivo aos pequenos sistemas, o país pode investir na fabricação de painéis solares visto a enorme reserva de silício disponível no território nacional e diversas universidades, principalmente, as públicas, que já possuem amplo conhecimento sobre energia solar em sistemas de pequeno porte presentes em suas

instalações para pesquisa e desenvolvimento. Outra alternativa é a redução da elevada tributação sobre os componentes do sistema que reduzem sua atratividade.

Atualmente a tarifa de energia residencial no Brasil é única, não dependendo da faixa de horário de consumo como ocorre no continente europeu. É previsto para os próximos anos a entrada em vigência da tarifa branca onde a energia elétrica terá três valores distintos ao longo do dia. Deste modo, espera-se um crescimento natural de sistemas de micro e minigeração domésticos e comerciais visando reduzir os custos em energia elétrica pelos consumidores finais.

REFERÊNCIAS

- [1] EPIA – European Photovoltaic Industry Association - **Photovoltaic Energy - Electricity from the Sun**. Disponível em: <http://www.epia.org/index.php?eID=tx_nawsecuredl&u=0&file=/uploads/tx_epiapublications/Electricity_from_the_Sun_2010_update_02.pdf&t=1367161093&hash=13cfa6e8a04418ac8ce48608000fa58632b9482b> Acesso em: 25/04/2013
- [2] BRASIL. Ministério de Minas e Energia, Empresa de Pesquisa Energética. **Plano Decenal de Expansão de Energia 2021**. Disponível em: <<http://www.mme.gov.br/mme/galerias/arquivos/noticias/2013/PDE2021.pdf>>. Acesso em: 18/03/2013.
- [3] CRESESB. **Manual de engenharia para sistemas fotovoltaicos**. Rio de Janeiro, 1999.
- [4] Maior Usina da América Latina será em Manaus. Disponível em: <<http://www.d24am.com/noticias/economia/maior-usina-solar-da-america-latina-sera-instalada-no-entorno-da-arena-amazonia/74152>>. Acesso em: 22/04/2013.
- [5] Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL). **Atlas de energia elétrica do Brasil**. Brasília, 2005. Disponível em: <http://www.aneel.gov.br/arquivos/pdf/livro_atlas.pdf>. Acesso em: 22/04/2013.
- [6] Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL). **Resolução Normativa N° 482**. Brasília, 17 de abril de 2012. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/cedoc/ren2012482.pdf>>. Acesso em: 06/05/2013.
- [7] TOSO, G. **Fonti Rinnovabili di Energia**. Torino, Itália, 2011.
- [8] SRIPANYAKORN, S.; JUGDAOHSINGH, R.; THOMPSON, R. P. H.; POWELL, J.J. **Dietary silicon and bone health**. Nutrition Bulletin, Oxford, 2005.
- [9] Beiser, A. **Modern Physics. An introductory survey**. Londres, Inglaterra, 1968.
- [10] U.S. Department Energy. **Energy Basics**. Disponível em: <http://www.eere.energy.gov/basics/renewable_energy/photovoltaics.html>. Acesso em: 19/03/2013.

- [11] Wagner, J. A. – **Simulação de sistemas fotovoltaicos autônomos**. 1991 – Dissertação de Mestrado – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1991.
- [12] Oliveira, H. **Tecnologia Fotovoltaica em Filmes Finos**. 2008 – Monografia – Programa de Pós-Graduação em Engenharia, Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2008.
- [13] Oliveira, M.M., **Análise de desempenho de um gerador fotovoltaico com seguidor azimutal**. 2008. Dissertação de Mestrado – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2008.
- [14] The Highs and Lows of Photovoltaics System Calculations. **Electrical Construction & Maintenance**. Disponível em: <<http://ecmweb.com/green-building/highs-and-lows-photovoltaic-system-calculations>>. Acesso em: 04/06/2013.
- [15] Rüter, R. **Edifício Solares Fotovoltaicos: o potencial da geração solar fotovoltaica integrada a edificações urbanas e interliga à rede elétrica pública no Brasil**. Florianópolis, 2004.
- [16] Potencial Energético Solar – **Sundata**. Disponível em <<http://www.cresesb.cepel.br/sundata/index.php#sundata>> Acesso em: 10/06/2013.
- [17] Remmers, K. H., **Inverter, Storage an PV System Technology: Industry Guide** 2013. Disponível em: <<http://www.pv-system-tech.com/>> Acesso em: 24/05/2013
- [18] WIKIPÉDIA, **Massa de Ar**, Disponível em: <http://pt.wikipedia.org/wiki/Massa_de_ar>. Acesso em: 20/05/2013.
- [19] PTTREnEnergy: Matching Technologies and Opportunities: **Solar Photovoltaic Systems and Components**. Disponível em <http://www.pttrenenergy.upc.edu/index2.php?option=com_docman&task=doc_view&gid=215&Itemid=35>. Acesso em: 23/05/2013.
- [20] Câmara, C. F., **Sistemas Fotovoltaicos conectados à rede elétrica**. 2011. Monografia – Programa de Pós-Graduação de Engenharia, Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2011. Disponível em <<http://www.solenerg.com.br/files/monografia-Carlos-Fernando-Camara.pdf>>. Acesso em: 09/06/2013.

[21] Power-technology.com – **News, views and contacts from the global power industry.** Disponível em: <<http://www.power-technology.com/projects/bavaria/bavaria3.html>> Acesso em: 27/04/2013.

[22] EPIA – European Photovoltaic Industry Association – **Connecting the Sun: Solar Photovoltaics on the road to large-scale grid integration.** Disponível em: <http://www.connectingthesun.eu/wp-content/uploads/2012/09/cts_report_cover.jpg> Acesso em: 25/05/2013

[23] IHS Electronics & Media: **The Global Solar Power Industry in 2013 – Predictions and Prospects for the Year Ahead.** Disponível em: <http://www.imsresearch.com/media_contact.php?sector=6>. Acesso em: 05/06/2013.

[24] EPIA – European Photovoltaic Industry Association – **Global Market Outlook For Photovoltaics 2013-2017.** Disponível em: <http://www.epia.org/index.php?eID=tx_nawsecuredl&u=0&file=/uploads/tx_epiapublications/GMO_2013_-_Final_PDF_01.pdf&t=1371649759&hash=e4dd6087f9ac184701c605e42b3614565d391e9c>. Acesso em: 25/05/2013

[25] EPIA – European Photovoltaic Industry Association – **ustainability of photovoltaic Systems: The Energy Pay Back Time.** Disponível em: <http://www.epia.org/index.php?eID=tx_nawsecuredl&u=0&file=/uploads/tx_epiafactsh eets/110513_Fact_Sheet_on_the_Energy_Pay_Back_Time.pdf&t=1371649784&hash=05e5857157b59a37bcc372e4c9dd1854d90f1070> Acesso em: 16/06/2013

[26] **NeoSolar Energia.** Disponível em: <www.neosolar.com.br> Acesso em: 10/06/2013.