Manual de Engenharia para

Sistemas Fotovoltaicos

Manual de Engenharia para

Sistemas Fotovoltaicos

Organizadores:

João Tavares Pinho

Marco Antonio Galdino

CEPEL – CRESESB

Edição Revisada e Atualizada

Rio de Janeiro – Março – 2014

**COORDENAÇÃO E ORGANIZAÇÃO DESTA EDIÇÃO**

João Tavares Pinho - UFPA

Marco Antonio Galdino - Cepel

**ELABORAÇÃO:**

Adriano Moehlecke - PUC-RS

Alexandre de Albuquerque Montenegro - UFSC Alexandre José Bühler - UFRGS

Ana Paula Cardoso Guimarães - Cepel

André Ricardo Mocelin - USP

Arno Krenzinger - UFRGS

Ary Vaz Pinto Junior - Cepel

Bruno Eduardo Montezano – PUC-RJ

Cesar Wilhelm Massen Prieb - UFRGS

Chigueru Tiba - UFPE

Claudio Moises Ribeiro - UFES

Claudomiro Fábio de Oliveira Barbosa - UFPA Edinaldo José da Silva Pereira - UFPA

Eduardo Filippo Oliveira Allatta - CBEM Elielza Moura de Souza Barbosa - UFPE Fabiano Perin Gasparin - UFRGS

Giuliano Arns Rampinelli - UFRGS

Izete Zanesco - PUC-RS

**COLABORADORES DAS EDIÇÕES**

**ANTERIORES:**

Ana Paula C. Guimarães - UFMG

Claudio M. Ribeiro - Cepel

Fernando A. A. Prado Jr. - Cesp

João Jorge Santos - Chesf

Joaquim Paim Marzulo - CEEE

Leonildo de Souza Silva - Ministério da Aeronáutica Leopoldo E. G. Bastos - UFRJ

Luís Sérgio do Carmo - Cemig

Luiz C. G. Valente - Cepel

Maria Julita G. Ferreira - Cesp

Osvaldo L. S. Pereira - Coelba

Patrícia C. da Silva – Cresesb

Paulo M. A. Craveiro - Coelce

Rosimeri X. de Oliveira – Light

Ruberval Baldini - BRSOLAR

Sérgio Benincá - SOLTEC ENG. ENERGIA Teresa V. Mousinho Reis - Coelba

João Tavares Pinho - UFPA

José Geraldo de M. Furtado - Cepel

Leonardo dos Santos R. Vieira - Cepel

Lucas Rafael do Nascimento - UFSC

Luis Carlos Macedo Blasques - UFPA

Marcia da Rocha Ramos - Cepel

Marco Antonio Galdino - Cepel

Marcos André Barros Galhardo - UFPA

Maria das Graças Pimentel de Figueiredo – CBEM Marta Maria de Almeida Olivieri - Cepel Naum Fraidenraich - UFPE

Olga de Castro Vilela - UFPE

Osvaldo Lívio Soliano Pereira - CBEM

Patrícia de Castro da Silva - Cepel

Philippe Cedraz Lopes – CBEM/UNIFACS Rafael Haag - UFRGS

Renan Cleberson Carneiro Silva – CBEM/UNIFACS Ricardo Rüther - UFSC

Roberto Zilles - USP

Sérgio Roberto F. C. de Melo - PUC-RJ

Tereza Virginia Mousinho Reis - CBEM

Wilson Negrão Macêdo - UFPA

**REVISÃO DAS EDIÇÕES ANTERIORES:**

Ana Paula C. Guimarães - UFMG

Arno Krenzinger - UFRGS

Claudio M. Ribeiro - Cepel

Elizabeth M. D. Pereira - PUC-MG

Hamilton Moss de Souza - Cepel

João T. Pinho - UFPA

Lúcio César de S. Mesquita - Agência Energia Marco A. F. C. Ribeiro - The New World Power do Brasil

Marco Antônio Galdino - Cepel

Maria Julita G. Ferreira - Cesp

Mário H. Macagnan - UFRGS

Patrícia C. da Silva - Cresesb

Ricardo M. Dutra - Cresesb

Roberto Zilles – USP

**Apresentação**

O Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos foi uma iniciativa do Grupo de Trabalho de Energia Solar (GTES), criado em 1992 a partir da necessidade de fomentar, discutir e difundir questões ligadas à tecnologia solar fotovoltaica no Brasil. Destinava se a auxiliar o pessoal técnico envolvido com projetos de sistemas fotovoltaicos, tendo sido concebido de forma a atender a necessidade básica de se ter, à época, literatura sobre o assunto na língua portuguesa e em conformidade com a realidade brasileira.

A versão original da publicação, editada em 1996, foi reproduzida na forma de apostila, tendo sido distribuídos, através de fotocópias, mais de mil exemplares em todo o país. Em 1999, o Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio de Salvo Brito (Cresesb), do Cepel, lançou a primeira edição da publicação na forma de livro, com conteúdo revisado e atualizado, cujo enfoque era, prioritariamente, voltado para aplicações de sistemas fotovoltaicos isolados de pequeno porte.

Considerando, entretanto, o constante interesse na aquisição desta publicação, a grande evolução da tecnologia fotovoltaica no período de 1999 a 2014 e a crescente utilização de sistemas fotovoltaicos conectados à rede no Brasil, o Cepel/Cresesb dedicou-se, mais uma vez, a realizar uma reformulação completa do documento.

É neste contexto que a nova edição do Manual traz muitas novidades. Com mais de 500 páginas, a publicação traça um histórico do caminho da energia fotovoltaica no Brasil, com exemplos de projetos instalados nos últimos anos. Juntamente com informações sobre o uso de sistemas fotovoltaicos conectados à rede, são incluídos tópicos relacionados às normas e regulamentos aplicáveis ao setor, além de aspectos econômicos.

A partir da perspectiva de aumento do uso de sistemas fotovoltaicos de energia no país - seja como uma opção para atender aos desafios da universalização dos serviços de energia elétrica, seja como uma alternativa de geração distribuída conectada à rede elétrica convencional - esta nova edição do Manual, totalmente revisada, atualizada e ampliada, visa a promover uma melhor qualificação técnica dos profissionais envolvidos na área. Esta qualificação deve abranger os conceitos básicos, o conhecimento das tecnologias atualmente empregadas, assim como a orientação para

elaboração de projeto e os procedimentos de instalação e manutenção dos equipamentos.

Com recursos do Ministério de Minas e Energia (MME), oriundos do Convênio de Cooperação Técnica e Financeira no 721906/2009, esta publicação é resultado de um trabalho conjunto com a Universidade Federal do Pará (UFPA) tendo contado, também, com a colaboração de diversos professores e pesquisadores, de outras instituições, de reconhecida competência técnica na área. O MME espera, com esta iniciativa, estimular o desenvolvimento de formas sustentáveis de geração de energia, com baixa emissão de gases de efeito estufa, contribuindo, assim, para a manutenção de uma matriz elétrica fortemente baseada em fontes renováveis.

O MME e o Cepel têm a satisfação de publicar esta nova edição do Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos, documento já considerado um clássico da literatura fotovoltaica no Brasil, sendo visto como um valioso instrumento didático e de difusão de informação técnica especializada, voltado ao treinamento e à formação de pessoal qualificado na área de energia solar.

Jorge Paglioli Jobim

Diretor do Departamento de Desenvolvimento Energético do MME

Ary Vaz Pinto Junior

Chefe do Departamento de Tecnologias Especiais do Cepel

**SUMÁRIO**

**LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS**

**LISTA DE FIGURAS**

**LISTA DE QUADROS E TABELAS**

**GLOSSÁRIO**

**CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO**

1.1 – Energia solar térmica

1.2 – Energia solar fotovoltaica

1.2.1 – História e situação atual da energia solar fotovoltaica no mundo 1.2.2 – Breve histórico da energia solar fotovoltaica no Brasil 1.3 – Referências

**CAPÍTULO 2 – RECURSO SOLAR**

2.1 – O Sol e suas características

2.2 – Geometria Sol-Terra

2.3 – Radiação solar sobre a terra

2.3.1 – Distribuição da irradiação solar média diária no mundo 2.4 – Instrumentos de medição da radiação solar

2.5 – Potencial solar e sua avaliação

2.6 – Tratamento e análise dos dados solarimétricos

2.6.1 – Avaliação da qualidade dos dados medidos

2.6.2 – Tratamento dos dados primários e sua análise

2.7 – Bases de dados solarimétricos e programas computacionais 2.7.1 – Informações a partir de medições de superfície

2.7.2 – Informações a partir de medições por satélites

2.7.3 – Programas computacionais para acessar e tratar dados de irradiação solar 2.7.4 – Comparação entre dados de irradiação solar de diversas fontes 2.8 – Referências

2.9 – Páginas de interesse

**CAPÍTULO 3 – CÉLULAS E MÓDULOS FOTOVOLTAICOS** 3.1 – Breve histórico

3.2 – Princípios de funcionamento da célula fotovoltaica

3.3 – Características elétricas das células fotovoltaicas

3.3.1 – Curva *I-V*

3.3.2 – Parâmetros elétricos

3.3.3 – Resistências série e paralelo de células fotovoltaicas

3.3.4 – Associações de células e módulos fotovoltaicos

*3.3.4.1 – Associação em série*

*3.3.4.2 – Associação em paralelo*

3.3.5 – Parâmetros externos que afetam as características elétricas

*3.3.5.1 – Influência da irradiância solar*

*3.3.5.2 – Influência da temperatura*

3.4 – Células e módulos fotovoltaicos de Silício cristalino

3.4.1 – Garantias de módulos fotovoltaicos de c-si

3.5 – Células e módulos fotovoltaicos de filmes finos

3.6 – Células fotovoltaicas para concentração e multijunção

3.7 – Células orgânicas e de corantes

3.8 – Normas para módulos fotovoltaicos

3.9 – Referências

**CAPÍTULO 4 – COMPONENTES BÁSICOS DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS** 4.1 – Módulos fotovoltaicos

4.1.1 – Características construtivas dos módulos fotovoltaicos

4.1.2 – Características elétricas dos módulos

4.1.3 – Fatores que afetam as características elétricas dos módulos

*4.1.3.1 – Efeito da irradiância solar*

*4.1.3.2 – Efeito da temperatura*

*4.1.3.3 – Temperatura nominal de operação*

4.1.4 – Identificação das características elétricas dos módulos

*4.1.4.1 – Registro Inmetro*

4.1.5 – Caixa de conexões

4.1.6 – Terminais

4.1.7 – Módulos fotovoltaicos com microinversores integrados

4.2 – Associação de módulos fotovoltaicos

4.2.1 – Módulos fotovoltaicos conectados em série

4.2.2 – Módulos fotovoltaicos conectados em paralelo

4.2.3 – Efeitos de sombreamento

4.2.4 – Diodo de desvio (*by-pass*)

4.2.5 – Diodo de bloqueio

4.2.6 – Fusíveis de proteção da série fotovoltaica

4.3 – Baterias

4.3.1 – Terminologia

4.3.2 – Baterias recarregáveis

*4.3.2.1* – *Profundidade de descarga, número de ciclos e temperatura 4.3.2.2* – *Técnica e modo de operação do controle de carga*

*4.3.2.3* – *Manutenção periódica do estado de carga*

4.3.3 – Baterias Chumbo-ácido

*4.3.3.1* – *Baterias abertas com liga de baixo-Antimônio nas placas positivas 4.3.3.2* – *Baterias sem manutenção*

*4.3.3.3* – *Baterias seladas*

*4.3.3.4* – *Baterias estacionárias com placas tubulares (OPzS e OPzV)*

*4.3.3.5* – *Efeito da temperatura*

*4.3.3.6 – Sulfatação*

*4.3.3.7* – *Hidratação*

*4.3.3.8 – Sedimentação*

*4.3.3.9 – Água para baterias*

4.3.4 – Baterias Níquel-Cádmio e Níquel-hidreto metálico

*4.3.4.1 – Efeito da temperatura em baterias Ni-Cd*

4.3.5 – Baterias Li-íon

4.3.6 – Características ideais para uso de baterias em sistemas fotovoltaicos isolados 4.3.7 – Transporte, descarte e reciclagem de baterias

4.3.8 – Salas de baterias

4.4 – Outros sistemas de armazenamento

4.5 – Controladores de carga

4.5.1 – Tipos de controladores de carga

4.5.2 – Detalhamento das características e funções de controladores de carga 4.5.3 – Controladores de carga baseados em tensão

4.5.4 – Controladores de carga baseados em estado de carga da bateria 4.5.5 – Carga em 3 estágios

4.5.6 – Controlador SPPM

4.5.7 – Registro do Inmetro

4.5.8 – Controladores de carga para outros tipos de baterias

4.6 – Inversores

4.6.1 – Classificação dos inversores

4.6.1.1 – Dispositivos semicondutores utilizados em inversores

4.6.1.2 – Inversores comutados pela rede (para SFCR)

4.6.1.3 – Inversores autocomutados

4.6.2 – Princípio de funcionamento dos conversores c.c.-c.a.

4.6.3 – Características dos inversores

4.6.4 – Inversores para SFCRs

4.6.5 – Critérios de qualidade de um inversor

4.6.6 – Registro do Inmetro

4.7 – Conversores c.c.-c.c.

4.8 – Seguimento do ponto de potência máxima (SPPM)

4.8.1– Algoritmos de seguimento do ponto de potência máxima

4.9 – Dispositivos de proteção, supervisão e controle, e aquisição e armazenamento de dados 4.9.1 – Proteção

4.9.2 – Supervisão e controle, aquisição e armazenamento de dados *4.9.2.1 – Sistema de coleta de dados operacionais (SCD)* 4.10 – Referências

**CAPÍTULO 5 – APLICAÇÕES DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS** 5.1 – Sistemas fotovoltaicos isolados

5.1.1 – Sistemas isolados individuais

5.1.2 – Sistemas isolados em minirrede

5.2 – Sistemas de bombeamento de água

5.2.1 – Tipos de bombas

*5.2.1.1 – Bombas centrífugas*

*5.2.1.2 – Bombas volumétricas*

5.2.2 – Tipos de motores

*5.2.2.1 – Motores c.c.*

*5.2.2.2 – Motores c.a.*

5.2.3 – Qualidade da água

5.3 – Sistemas de telecomunicações e monitoramento remoto

5.4 – Outras aplicações

5.4.1 – Proteção catódica

5.4.2 – Cerca elétrica

5.4.3 – Dessalinização da água

5.5 – Sistemas conectados à rede

5.5.1 – Micro e minigeração fotovoltaica

*5.5.1.1 – Medição bidirecional de registros independentes*

*5.5.1.2 – Medições simultâneas*

5.5.2 – Sistemas fotovoltaicos integrados a edificações

5.5.3 – Usinas fotovoltaicas (UFVs)

5.6 – Referências

**CAPÍTULO 6 – PROJETO DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS**

6.1 – Etapas preliminares de projeto de um sistema fotovoltaico

6.1.1 – Avaliação do recurso solar

6.1.2 – Localização

6.1.3 – Escolha da configuração

6.1.4 – Levantamento da demanda e do consumo de energia elétrica

6.1.4.1 – Estimativa da curva de carga

6.2 – Dimensionamento de sistemas fotovoltaicos isolados pelo método do mês crítico 6.2.1 – Projeto de sistemas isolados para geração de energia elétrica segundo a RN 493/2012 *6.2.1.1 – SIGFI*

*6.2.1.2 – MIGDI*

6.3 – Projeto de sistemas fotovoltaicos para bombeamento de água

6.3.1 – Estimativa de consumo de água

6.3.2 – Dimensionamento do sistema de geração

6.4 – Projeto de sistemas fotovoltaicos conectados à rede

6.4.1 – Dimensionamento do gerador fotovoltaico

6.4.2 – Dimensionamento do inversor

6.4.3 – Compromisso entre forma e função dos SFCRs

6.5 – Projeto elétrico

6.6 – Ferramentas computacionais para projeto de sistemas fotovoltaicos

6.6.1 – Homer

6.6.2 – Hybrid2

6.6.3 – RETScreen

6.6.4 – Insel

6.6.5 – PV- Design Pro

6.6.6 – PV-Sol

6.6.7 – PVSyst

6.6.8 – SolarPro

6.6.9 – SolEm

6.6.10 – PV F-CHART

6.6.11 – PVSIZE

6.7 – Apresentação do projeto

6.7.1 – Projeto básico

6.7.2 – Projeto executivo

6.7.3 – Termos de garantia

6.8 – Referências

**CAPÍTULO 7 – INSTALAÇÃO DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS E RECOMENDAÇÕES DE SEGURANÇA**

7.1 – Recomendações gerais sobre segurança

7.2 – Módulos fotovoltaicos

7.2.1 – Recomendações sobre segurança no manuseio e instalação de módulos fotovoltaicos 7.2.2 – Localização do gerador fotovoltaico

7.2.3 – Orientação e inclinação do gerador fotovoltaico

7.2.4 – Montagem da estrutura de suporte dos módulos

7.3 – Instalação do sistema de armazenamento

7.3.1 – Recomendações sobre segurança no manuseio e instalação de baterias 7.3.2 – Compartimento das baterias

7.3.3 – Montagem do banco de baterias

7.4 – Instalação dos componentes de condicionamento de potência

7.5 – Instalação dos componentes de proteção

7.6 – Aterramento

7.7 – Instalação dos componentes de supervisão e controle, e aquisição e armazenamento de dados 7.8 – Instalação de outros componentes, cabos, conexões e acessórios

7.9 – Comissionamento de sistemas fotovoltaicos

7.10 – Referências

**CAPÍTULO 8 – OPERAÇÃO E MANUTENÇÃO**

8.1 – Recomendações sobre segurança

8.2 – Procedimentos e cuidados de operação

8.3 – Procedimentos de manutenção preventiva de sistemas fotovoltaicos isolados (SFIs) 8.3.1 – Gerador fotovoltaico

*8.3.1.1 – Aspectos físicos*

*8.3.1.2 – Aspectos elétricos*

8.3.2 – Baterias

*8.3.2.1 – Aspectos físicos*

*8.3.2.2 – Aspectos elétricos*

8.3.3 – Componentes de condicionamento de potência

*8.3.3.1* – *Controladores de carga*

*8.3.3.2 – Inversores de SFIs*

8.3.4 – Cargas

8.3.5 – Cabeamento e dispositivos de segurança

8.3.6 – Sistema de aquisição de dados

8.3.7 – Elaboração de plano de inspeção e manutenção

8.4 – Procedimentos de inspeção e manutenção corretiva de sistemas fotovoltaicos 8.5 – Manutenção de sistemas fotovoltaicos conectados à rede (SFCRs) - microgeração

8.6 – Manutenção de centrais fotovoltaicas

8.7 – Manutenção de sistemas fotovoltaicos de bombeamento de água

8.8 – Análise de dados de desempenho de um sistema fotovoltaico

8.9 – Referências

**APÊNDICE 1 – NORMAS E REGULAMENTOS**

**APÊNDICE 2 – ASPECTOS ECONÔMICOS**

**APÊNDICE 3 – EXEMPLOS DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS INSTALADOS NO BRASIL**

**APÊNDICE 4 – ESPECIFICAÇÃO DE EQUIPAMENTOS PRINCIPAIS PARA SISTEMAS FOTOVOLTAICOS ISOLADOS E PLANILHAS AUXILIARES PARA DIMENSIONAMENTO**

**APÊNDICE 5 – PLANILHA PARA INSPEÇÃO DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS**

**LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS**

µ-Si *Micro-crystalline Silicon* (Silício Microcristalino)

ABENS Associação Brasileira de Energia Solar

Abinee Associação Brasileira da Indústria Elétrica e Eletrônica

ABNT Associação Brasileira de Normas Técnicas

ACL Ambiente de Contratação Livre

ACR Ambiente de Contratação Regulada

AM *Air Mass* (Massa de Ar)

ANEEL Agência Nacional de Energia Elétrica

a-Si *Amorphous Silicon* (Silício Amorfo)

BID Banco Interamericano de Desenvolvimento

BIG Banco de Informações de Geração

BIPV *Building Integrated Photovoltaic* (Sistema Fotovoltaico Integrado a Edificações) BOS *Balance of System* (Balanço do Sistema)

BSF *Back Surface Field* (Campo Retrodifusor)

c.a. Corrente Alternada

c.c. Corrente Contínua

CBEE Centro Brasileiro de Energia Eólica

CBENS Congresso Brasileiro de Energia Solar

CB-Solar Centro Brasileiro para Desenvolvimento da Energia Solar Fotovoltaica CCC Conta de Consumo de Combustíveis

CCEE Câmara de Comercialização de Energia Elétrica

CCEI Contrato de Compra de Energia Incentivada

CDE Conta de Desenvolvimento Energético

CdS Sulfeto de Cádmio

CdTe Telureto de Cádmio

Ceal Companhia Energética de Alagoas (ou Eletrobras Distribuição Alagoas)

Ceam Companhia Energética do Amazonas (ou Eletrobras Amazonas Energia) CEB Central Energética de Brasília

CEEE Companhia Estadual de Energia Elétrica

Celesc Centrais Elétricas de Santa Catarina

Celg Companhia Energética de Goiás

Celpa Centrais Elétricas do Pará

Celpe Companhia Energética de Pernambuco

Cemig Companhia Energética de Minas Gerais

Cepel Centro de Pesquisas de Energia Elétrica

Ceron Companhia Energética de Rondônia (ou Eletrobras Distribuição Rondônia) Cesp Companhia Energética de São Paulo

CETEC-MG Fundação Centro Tecnológico de Minas Gerais

CIGS Disseleneto de Cobre, Índio e Gálio

CIS Disseleneto de Cobre e Índio

CLP Controlador Lógico Programável

CNPq Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico Coelba Companhia de Eletricidade do Estado da Bahia

Coelce Companhia Energética do Ceará

COFINS Contribuição para o Financiamento da Seguridade Social Copel Companhia Paranaense de Energia

Cosern Companhia Energética do Rio Grande do Norte

CPFL Companhia Paulista de Força e Luz

CPV *Concentrated Photovoltaics* (Fotovoltaica com Concentração) Cresesb Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio de Salvo Brito c-Si *Crystalline Silicon* (Silício Cristalino)

CSI *Current Source Inverter* (Inversor de Fonte de Corrente) CSP *Concentrated Solar Power* (Potência Solar Concentrada) CSTR Centro de Saúde e Tecnologia Rural

CTA Centro Tecnológico de Aeronáutica (atual Centro Técnico Aeroespacial) CTEEP Companhia de Transmissão de Energia Elétrica Paulista

Chesf Companhia Hidroelétrica do São Francisco

DIC Duração de Interrupção Individual por Unidade Consumidora

DOE *Department of Energy* (Departamento de Energia dos Estados Unidos da América) DPS Dispositivo de Proteção Contra Surtos

DSSC *Dye-Sensitized Solar Cell* (Célula Solar Sensibilizada por Corante) DSV Dispositivo de Seccionamento Visível

Eletrobras Centrais Elétricas Brasileiras

Eletronorte Centrais Elétricas do Norte do Brasil

Eletrosul Centrais Elétricas do Sul do Brasil

Emater Empresa de Assistência Técnica e Extensão Rural

Embrapa Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária

Emepa Empresa Estadual de Pesquisa Agropecuária da Paraíba

EPE Empresa de Pesquisa Energética

EPIA *European Photovoltaic Industry Association* (Associação Europeia da Indústria Fotovoltaica)

EUA Estados Unidos da América

EVA Acetato de Etil-Vinila

Fapeu Fundação de Amparo à Pesquisa e Extensão Universitária da UFSC FDI Fator de Dimensionamento de Inversores

FF Fator de Forma

Fies Fundo de Incentivo em Energia Solar

Finep Financiadora de Estudos e Projetos

Fundeci Fundo de Desenvolvimento Científico e Tecnológico

FV Fotovoltaico

GaAs Arseneto de Gálio

GEDAE Grupo de Estudos e Desenvolvimento de Alternativas Energéticas

Geinfra Gerência de Infraestrutura do Estado do Maranhão

GIZ *Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit* (Agência Alemã de Cooperação Internacional) (antiga GTZ)

HIT *Heterojunction with Intrinsic Thin Layer* (Heterojunção com Camada Fina Intrínseca) Homer *Hybrid Optimization Model for Electric Renewable*

HSP Horas de Sol Pleno

IBC *Interdigitated Back Contact* (Contato Posterior Interdigital)

ICG Interesse Exclusivo de Centrais de Geração para Conexão Compartilhada ICMS Imposto sobre Circulação de Mercadorias e Prestação de Serviços Ideal Instituto para o Desenvolvimento de Energias Alternativas na América Latina Ider Instituto de Desenvolvimento Sustentável e Energias Renováveis IEC *International Electrotechnical Commission* (Comissão Eletromecânica Internacional) IEE Instituto de Energia e Ambiente (antigo Instituto de Eletrotécnica e Energia)

IEEE *Institute of Electrical and Electronics Engineers* (Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos)

IGBT *Insulated Gate Bipolar Transistor* (Transistor Bipolar de Porta Isolada) II Imposto de Importação

IME Instituto Militar de Engenharia

IncCond *Incremental Conductance* (Condutância Incremental)

Infraero Empresa Brasileira de Infraestrutura Aeroportuária

InGaAs Arseneto de Índio e Gálio

InGaP Fosfeto de Índio e Gálio

INMET Instituto Nacional de Meteorologia

Inmetro Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia

InP Fosfeto de Índio

INPE Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais

INSEL *Integrated Simulation Environment Language*

INT Instituto Nacional de Tecnologia

IPCC *Intergovernmental Panel on Climate Change* (Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas)

ISO *International Standards Organization* (Organização Internacional de Padrões) ISS Imposto Sobre Serviços

LABSOL Laboratório de Energia Solar

LED *Light Emitting Diode* (Diodo Emissor de Luz)

Li-ion Ion de Lítio

LpT Programa Luz para Todos

LSF Laboratório de Sistemas Fotovoltaicos

LVD *Low Voltage Disconnect* (Desconexão por Baixa Tensão)

MBE *Molecular Beam Epitaxy* (Epitaxia por Feixe Molecular)

MCT Ministério da Ciência e Tecnologia (atual Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação - MCTI)

MIGDI Microssistema Isolado de Geração e Distribuição de Energia Elétrica MME Ministério de Minas e Energia

MOCVD *Metalorganic Chemical Vapour Deposition* (Deposição Química de Organometálicos em Fase Vapor)

MODES Modelos de Sistemas de Energia

MOSFET *Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor* (Transistor de Efeito de Campo Metal-Óxido-Semicondutor)

MPPT *Maximum Power Point Tracking* (na terminologia brasileira: Seguidor do Ponto de Potência Máxima - SPPM)

m-Si *Mono-crystalline Silicon* (Silício Monocristalino)

MTE Ministério do Trabalho e Emprego

NaNiCl Cloreto de Níquel e Sódio

NASA *National Aeronautics and Space Administration* (Administração Nacional de Aeronáutica e Espaço)

NBR Norma Brasileira

NEA Núcleo de Energias Alternativas

Nepa Núcleo de Estudos e Pesquisas em Alimentação

NiCd Níquel-Cádmio

NiMH Hidreto Metálico de Npiquel

NOCT *Nominal Operating Cell Temperature* (Temperatura Nominal de Operação da Célula) NR Norma Regulamentadora

NREL *National Renewable Energy Laboratory* (Laboratório Nacional de Energias Renováveis dos Estados Unidos da América)

n-Si *Nano-crystalline Silicon* (Silício Nanocristalino)

O&M Operação e Manutenção

OLADE Organização Latino Americana de Energia

OPV *Organic Photovoltaics* (Fotovoltaica Orgânica)

OPzS *Ortsfest Panzerplatte Spezial* (Bateria Estacionária com Placas Tubulares, Eletrólito Fluido e Separadores Especiais)

OPzV *Ortsfest Panzerplatte Verschlossen* (Bateria Estacionária com Placas Tubulares, Eletrólito em Gel e Válvula de Segurança)

Org. Organização

P&D Pesquisa e Desenvolvimento

P&O *Perturb* & *Observe* (Perturbar & Observar)

Pb-ácido Chumbo-ácido

PBE Programa Brasileiro de Etiquetagem

PCH Pequenas Centrais Hidrelétricas

PET Tereftalato de polietileno

Petrobras Petróleo Brasileiro S.A.

PIE Produtor Independente de Energia

PIS Programa de Integração Social

PRC Plano de Revitalização e Capacitação do Prodeem

Procel Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica

Prodeem Programa de Desenvolvimento Energético de Estados e Municípios

PRODIST Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica da Aneel p-Si *Poli-crystalline Silicon* (Silício Policristalino, ou Multicristalino) PTU Programa do Trópico Úmido

PUC-RS Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul

PVC *Polyvinyl Chloride* (Cloreto de Polivinila)

PVF *Polyvinyl Fluoride* (Fluoreto de Polivinila)

PWM *Pulse Width Modulation* (Modulação por Código de Pulso)

RAM Bateria Alcalina Recarregável de Manganês

RGR Reserva Global de Reversão

RMS *Root Mean Square* (Raiz Média Quadrática)

RN Resolução Normativa

SBFV Sistema de Bombeamento Fotovoltaico

SFCR Sistema Fotovoltaico Conectado à Rede

SFD Sistema Fotovoltaico Domiciliar

SFH Sistema Fotovoltaico Híbrido

SFI Sistema Fotovoltaico Isolado

SFIE Sistema Fotovoltaico Integrado a Edificação

SFV Sistema Fotovoltaico

Si-Cz Silício por Czochralski

Si-FZ Silício por Fusão Zonal

SIGFI Sistema Individual de Geração de Energia Elétrica com Fonte Intermitente SIN Sistema Interligado Nacional

SLI *Starting, Lighting, Ignition* (Partida, Iluminação, Ignição)

SNESF Simpósio Nacional de Energia Solar Fotovoltaica

SONDA Sistema de Organização Nacional de Dados Ambientais

SPDA Sistema de Proteção Contra Descargas Atmosféricas

SPPM Seguidor do Ponto de Potência Máxima

SSE *Surface Meteorology and Solar Energy* (Meteorologia de Superfície e Energia Solar)

ST Sistema Térmico

STC *Standard Test Conditions* (Condições Padrão de Ensaio)

Sudesb Superintendência dos Desportos do Estado da Bahia

SWERA *Solar and Wind Energy Resource Assessment* (Levantamento de Recursos Energéticos Solar e Eólico)

TCO *Transparent Conductive Oxide* (Óxido Condutivo Transparente) TD Taxa de Desempenho (em inglês, *Performance Ratio* – PR)

TF Tarifa de Fornecimento

TIR Taxa Interna de Retorno

TUSD Tarifa de Uso do Sistema de Distribuição

TUST Tarifa de Uso do Sistema de Transmissão de Energia Elétrica

TV Televisor

UA Unidade Astronômica

UC Unidade Consumidora

UFCG Universidade Federal de Campina Grande

UFMA Universidade Federal do Maranhão

UFPA Universidade Federal do Pará

UFPE Universidade Federal de Pernambuco

UFRGS Universidade Federal do Rio Grande do Sul

UFSC Universidade Federal de Santa Catarina

UFV Usina Fotovoltaica

UNICAMP Universidade Estadual de Campinas

UPS *Uninterruptible Power Supply* (Fonte de Potência Ininterrupta)

USAID *United States Agency for International Development* (Agência Americana para o Desenvolvimento Internacional)

USCA Unidade de Supervisão em Corrente Alternada

USP Universidade de São Paulo

VN Valor Normativo

VSI *Voltage Source Inverter* (Inversor de Fonte de Tensão) WMO *World Meteorological Organization* (Organização Meteorológica Mundial) Wp Watt-pico

WRC *World Radiation Center* (Centro Mundial de Radiação)

**LISTA DE FIGURAS**

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO

Figura 1.1 – Evolução do Mercado Brasileiro de Aquecimento Solar.

Figura 1.2 – Desenvolvimento das células fotovoltaicas.

Figura 1.3 – Representação dos eventos-chave no desenvolvimento das células fotovoltaicas. Figura 1.4 – Produção mundial de células fotovoltaicas.

Figura 1.5 – Evolução da potência instalada em sistemas fotovoltaicos no mundo. Figura 1.6 – Distribuição da produção mundial de células fotovoltaicas em 2012.

CAPÍTULO 2 – RECURSO SOLAR

Figura 2.1 – Estrutura do Sol.

Figura 2.2 – Órbita da Terra em torno do Sol, com seu eixo N-S inclinado de um ângulo de 23,45º, indicando as estações do ano no hemisfério Sul.

Figura 2.3 – Variação da irradiância solar extraterrestre (*I0,ef*) ao longo do ano.

Figura 2.4 – Ilustração dos ângulos θ*Z*, α e γ*S* (representando a posição do Sol em relação ao plano horizontal) e da orientação de uma superfície inclinada em relação ao mesmo plano: ângulos β, γ, γ*S* e θ.

Figura 2.5 – Irradiância direta incidente sobre uma superfície horizontal e Irradiância direta incidente sobre uma superfície inclinada.

Figura 2.6 – Equação do tempo ao longo do ano.

Figura 2.7 – Fluxo de potência global (em W/m2).

Figura 2.8 – Componentes da radiação solar.

Figura 2.9 – Distribuição espectral da irradiância no topo da atmosfera; da irradiância ao incidir perpendicularmente sobre uma superfície inclinada (37°) ao nível do mar e voltada para a linha do Equador; e da irradiância após atravessar uma massa de ar de 1,5.

Figura 2.10 – Mapa mundial de irradiação solar em média anual.

Figura 2.11 – Mapa brasileiro de irradiação solar em média anual.

Figura 2.12 – Mapa europeu de irradiação solar em média anual.

Figura 2.13 – Piranômetro termoelétrico.

Figura 2.14 – Piranômetro fotovoltaico.

Figura 2.15 – Resposta espectral dos piranômetros.

Figura 2.16 – Desenho esquemático de um pireliômetro.

Figura 2.17 – Pireliômetro montado em um rastreador solar.

Figura 2.18 – Banda de sombreamento com ajuste manual.

Figura 2.19 – Disco de sombreamento com rastreamento em dois eixos.

Figura 2.20 – Interface de utilização do programa RADIASOL2.

Figura 2.21 – Médias mensais e anual da radiação solar média diária incidente sobre um coletor inclinado de 10°N na região de Rio Branco.

Figura 2.22 – Médias mensais e anual da radiação solar média diária incidente sobre um coletor inclinado de 10°N na região de Manaus.

CAPÍTULO 3 – CÉLULAS E MÓDULOS FOTOVOLTAICOS

Figura 3.1 – Distribuição das tecnologias usadas na produção industrial de células fotovoltaicas. Figura 3.2 – Estrutura de bandas de energia em condutores, semicondutores e isolantes. Figura 3.3 – Geração de pares elétron-lacuna pela incidência de fótons no material semicondutor. Figura 3.4 – Níveis de energia em materiais tipo *n* e *p*.

Figura 3.5 – Junção *pn* no escuro em equilíbrio térmico, mostrando a barreira de potencial (qV0) as correntes de difusão (Id) e de deriva (iD) de portadores.

Figura 3.6 – Estrutura básica de uma célula fotovoltaica de silício.

Figura 3.7 – Corrente fotogerada na junção *pn* iluminada (célula fotovoltaica). Figura 3.8 – Fatores que limitam a eficiência de uma célula fotovoltaica.

Figura 3.9 – Corrente elétrica em função da diferença de potencial aplicada em uma célula fotovoltaica de silício de 156 mm x 156 mm, sob condições-padrão de ensaio.

Figura 3.10 – Circuito equivalente básico para uma célula fotovoltaica (modelo com um diodo). Figura 3.11 – Símbolo de módulo fotovoltaico.

Figura 3.12 – Potência elétrica em função da tensão elétrica de uma célula fotovoltaica de silício cristalino de 156 mm x 156 mm, sob condições-padrão de ensaio.

Figura 3.13 **–** Efeito da resistência série (Rs) na curva I-V de uma célula fotovoltaica, sendo todas as curvas para a mesma temperatura e irradiância (STC), considerando em aberto a resistência paralelo (Rp=∞).

Figura 3.14 – Efeito da resistência paralelo (Rp) na curva I-V de uma célula fotovoltaica, sendo todas as curvas para a mesma temperatura e irradiância (STC), considerando nula a resistência série (Rs=0).

Figura 3.15 – Obtenção das resistências série e paralelo pela curva I-V de uma célula.

Figura 3.16 – Curvas *I-V* de duas células fotovoltaicas de silício cristalino conectadas em série e em paralelo.

Figura 3.17 – Influência da variação da irradiância solar na curva característica *I-V* de uma célula fotovoltaica de silício cristalino na temperatura de 25 °C.

Figura 3.18 – Influência da temperatura da célula fotovoltaica na curva *I-V* (para irradiância de 1.000 W/m2, espectro AM1,5).

Figura 3.19 – Estrutura básica de uma célula fotovoltaica de silício cristalino.

Figura 3.20 – Célula fotovoltaica de silício cristalino.

Figura 3.21 – Fabricação de tarugos (lingotes) de m-Si pelas técnicas de Float-Zone (FZ) e Czochralski.

Figura 3.22 – Células m-Si coloridas; célula p-Si verde e dourada.

Figura 3.23 – Esquema dos componentes de um módulo fotovoltaico com células de silício cristalino. Figura 3.24 – Degradação máxima de módulos, de acordo com 3 diferentes formas de garantia. Figura 3.25 – Vistas em corte de células fotovoltaicas de filmes finos.

Figura 3.26 – Corte simplificado mostrando como é feita a definição das células fotovoltaicas, bem como sua conexão em série, em um módulo fotovoltaico de filme fino de a-Si.

Figura 3.27 – Esquema simplificado de uma célula fotovoltaica com corante e eletrólito.

CAPÍTULO 4 – COMPONENTES BÁSICOS DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS

Figura 4.1 – Curva característica *I-V* e curva de potência *P-V* para um módulo com potência nominal de 100 Wp.

Figura 4.2 – Definição do fator de forma.

Figura 4.3 – Efeito causado pela variação da irradiância solar sobre a curva característica I-V para um módulo fotovoltaico de 36 células de silício cristalino (c-Si) a 25 °C.

Figura 4.4 – Efeito causado pela variação da temperatura das células sobre a curva característica I-V para um módulo fotovoltaico de 36 células de silício cristalino (c-Si) sob irradiância de 1.000 W/m2.

Figura 4.5 – Modelo de etiqueta do Inmetro afixada nos módulos.

Figura 4.6 – Caixa de conexões e diagrama de ligações de um módulo de 240 Wp, com 60 células em série (20 para cada diodo), onde *VOC* = 36,9 V.

Figura 4.7 – Conectores de engate rápido MC4 para conexão série de módulos fotovoltaicos.

Figura 4.8 – Curvas *I-V* para um módulo de 220 Wp, 2 módulos idênticos associados em série e 4 módulos idênticos associados em série.

Figura 4.9 – Curvas *I-V* para a conexão em paralelo dos mesmos módulos fotovoltaicos da Figura 4.8.

Figura 4.10 – Curva I-V para 4 módulos conectados em série e sem sombreamento; curva I-V para os mesmos 4 módulos na situação de sombreamento de uma de suas células; curva I-V com o mesmo sombreamento, mas com a utilização de diodos de desvio.

Figura 4.11 – Diagrama mostrando a ligação de diodos de desvio nos módulos fotovoltaicos. Figura 4.12 – Operação de um diodo de desvio.

Figura 4.13 – Diagrama com 4 séries fotovoltaicas conectadas em paralelo usando diodos de bloqueio; diodo de bloqueio evitando o fluxo de corrente da bateria para o módulo, quando o controlador não desempenha esta função.

Figura 4.14 – Diagrama com 4 séries fotovoltaicas que utilizam fusíveis fotovoltaicos de proteção.

Figura 4.15 – Capacidade de uma bateria Chumbo-ácido em função da taxa de descarga, referenciada à capacidade em C/20.

Figura 4.16 – Curvas típicas do efeito da profundidade de descarga e da temperatura na vida útil da bateria.

Figura 4.17 – Perfil típico da tensão durante o carregamento de uma célula Chumbo-ácido aberta, com várias taxas de carga.

Figura 4.18 – Perfil típico da tensão durante o processo de descarga de uma célula Chumbo-ácido aberta, com várias taxas de descarga.

Figura 4.19 – Modelo de circuito de um elemento de bateria.

Figura 4.20 – Vista explodida mostrando as principais partes constituintes de uma célula eletroquímica.

Figura 4.21 – Vista em corte de uma bateria do tipo OPzV.

Figura 4.22 – Modelo de etiqueta do Inmetro para baterias.

Figura 4.23 – Sinalização aplicável a baterias Chumbo-ácido.

Figura 4.24 – Esquema de um SFI domiciliar.

Figura 4.25 – Controlador paralelo (*shunt*) com LVD opcional.

Figura 4.26 – Controlador série com LVD opcional.

Figura 4.27 – Modelo de etiqueta do Inmetro para controladores de carga.

Figura 4.28 – Tipos de inversores classificados de acordo com o princípio de funcionamento. Figura 4.29 – Símbolos de componentes utilizados em inversores.

Figura 4.30 – Formas de onda de tensão (V) e corrente (I) sobre um dispositivo semicondutor em chaveamento e condução e potência dissipada em um dispositivo semicondutor em chaveamento e condução.

Figura 4.31 – Inversor de um estágio e inversor de dois estágios.

Figura 4.32 – Inversor de dois estágios.

Figura 4.33 – Inversor de meia ponte e ponte completa monofásica.

Figura 4.34 – Possíveis formas de onda da tensão de saída de um conversor c.c.-c.a.

Figura 4.35 – Estratégia de controle PWM para um conversor cc-ca – tensões de controle Vcaref e Vtri e tensão na saída Vcarga.

Figura 4.36 – Ponte trifásica.

Figura 4.37 – Forma de onda quadrada modificada trifásica.

Figura 4.38 – Estratégia de controle do chaveamento para PWM trifásico.

Figura 4.39 – Curvas de eficiência para cargas resistivas de alguns inversores para uso em sistemas fotovoltaicos isolados.

Figura 4.40 – Curvas I-V e P-V de um gerador de seis módulos de 72 células em série, mostrando a ocorrência de máximos locais na curva de potência em decorrência de sombreamentos parciais.

Figura 4.41 – Exemplo de sistemas fotovoltaicos que utilizam SPPM.

Figura 4.42 – Desenho de uma instalação típica de dispositivos de proteção para um SFCR. Figura 4.43 – Diagrama elétrico de um SIGFI30 de um projeto da Eletrobras Distribuição Acre. Figura 4.44 – Pontos de supervisão, controle e aquisição de dados em um SFI.

CAPÍTULO 5 – APLICAÇÕES DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS

Figura 5.1 – Configuração básica de um SFI.

Figura 5.2 – Exemplo de sistema híbrido.

Figura 5.3 – Sistema fotovoltaico conectado à rede.

Figura 5.4 – Diagrama unifilar de um sistema fotovoltaico domiciliar em c.c.

Figura 5.5 – Diagrama simplificado do sistema fotovoltaico domiciliar em c.c. Figura 5.6 – SFD no município Xapuri, na comunidade extrativista Dois Irmãos, no Acre. Figura 5.7 – Esquema unifilar de SFD com atendimento exclusivamente em c.c. Figura 5.8 – Esquema unifilar de SFD com atendimento c.c. e c.a.

Figura 5.9 – SFD constituído por um único inversor alimentando todas as cargas da instalação. Figura 5.10 – Sistema MIGDI fotovoltaico da comunidade de Sobrado no Amazonas. Figura 5.11 – Diagrama esquemático de um sistema fotovoltaico de abastecimento de água. Figura 5.12 – Região de aplicação dos SBFVs.

Figura 5.13 – Tipos de motobombas para SBFVs em função da profundidade e da vazão. Figura 5.14 – Configurações utilizadas para sistemas de bombeamento fotovoltaico. Figura 5.15 – Vista em corte de uma bomba centrífuga.

Figura 5.16 – Corte de uma bomba tipo parafuso.

Figura 5.17 – Diagrama expandido de uma bomba de deslocamento positivo tipo diafragma. Figura 5.18 – Proteção catódica com anodo galvânico.

Figura 5.19 – Proteção catódica por corrente impressa (sistema com fonte elétrica convencional).

Figura 5.20 – Perfil da tensão ao longo de uma tubulação protegida por um sistema de proteção catódica.

Figura 5.21 – Diagrama de um sistema fotovoltaico para proteção catódica.

Figura 5.22 – Diagrama genérico para cerca elétrica com alimentação fotovoltaica. Figura 5.23 – Esquema de dessalinização fotovoltaica por osmose reversa.

Figura 5.24 – Sistema fotovoltaico instalado no estádio Pituaçu, BA.

Figura 5.25 – Medição bidirecional de registros independentes com a utilização de um medidor bidirecional e com a utilização de dois medidores unidirecionais.

Figura 5.26 – Medições simultâneas.

Figura 5.27 – Sistemas de grande porte.

Figura 5.28 – UFV Tanquinho.

CAPÍTULO 6 – PROJETO DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS

Figura 6.1 – Diagrama de blocos de sistemas fotovoltaicos isolados.

Figura 6.2 – Diagrama de blocos de sistemas fotovoltaicos: Microgeração conectada à rede. Figura 6.3 – Exemplo de perfis de radiação solar diária com valores equivalentes de HSP.

Figura 6.4 – Média mensal da irradiância global diária no plano horizontal para os períodos especificados - vila de São Tomé (Pará).

Figura 6.5 – Exemplo de uma curva de carga de uma comunidade da Amazônia. Figura 6.6 – Exemplo de curva de carga estimada para uma dada localidade.

Figura 6.7 – Configuração básica de um sistema fotovoltaico de abastecimento de água. Figura 6.8 – Níveis de interesse em um SBFV.

Figura 6.9 – Exemplos de gráficos fornecidos por fabricantes para determinação da potência FV necessária para cada aplicação.

Figura 6.10 – Taxa de desempenho (TD) de 527 SFCRs instalados na Europa ocidental entre 1991 e 2005.

Figura 6.11 – Exemplos de cargas mecânicas impostas por três módulos FV distintos.

Figura 6.12 – Curvas I-V de um gerador FV em função da temperatura e a compatibilidade, com as janelas de tensão do SPPM e de operação do inversor.

Figura 6.13 **–** Gráfico de eficiência do inversor em função do nível de carga e da tensão de operação. Figura 6.14 – Planta Piloto do Megawatt Solar - Eletrosul - Florianópolis - 11,97 kWp. Figura 6.15 **–** Vista em planta da distribuição elétrica dos geradores fotovoltaicos da planta-piloto.

Figura 6.16 – Sistema FV plano inclinado a 27 °N, com 10,24 kWp, integrado ao Centro de Cultura e Eventos da UFSC (Sistema de referência).

Figura 6.17 – Comparação da produtividade entre a Planta Piloto (subsistemas 1, 2 e 3) e o Sistema de Referência.

CAPÍTULO 7 – INSTALAÇÃO DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS E RECOMENDAÇÕES DE SEGURANÇA

Figura 7.1 – Exemplo de placa de advertência de risco de choque elétrico.

Figura 7.2 – Exemplo de placa de advertência de acesso restrito.

Figura 7.3 – Exemplo de placa de advertência de risco de choque elétrico devido à geração própria de sistemas conectados à rede.

Figura 7.4 – Fator de espaçamento versus latitude do local da instalação do gerador fotovoltaico.

Figura 7.5 – Ilustração para definição do espaçamento mínimo entre gerador fotovoltaico e obstáculo, para evitar sombreamento.

Figura 7.6 – Orientação da face dos módulos fotovoltaicos para o norte verdadeiro em um dado local no hemisfério Sul.

Figura 7.7 – Exemplo de correção para uma declinação magnética local de 20º negativos. Figura 7.8 – Ângulo de inclinação dos módulos fotovoltaicos.

Figura 7.9 – Exemplo de uma estrutura de sustentação de módulos fotovoltaicos. Figura 7.10 – Formas usuais de instalação de módulos fotovoltaicos.

Figura 7.11 – Sistema fotovoltaico residencial instalado em localidade isolada do Rio Grande do Sul. Figura 7.12 – Detalhe de sistema de fixação em parede de residência.

Figura 7.13 – Principais tipos de fundações utilizadas.

Figura 7.14 – Fixação da estrutura no solo com fundação tipo bloco de cimento. Figura 7.15 – Fixação da estrutura diretamente no solo.

Figura 7.16 – Geradores fotovoltaicos instalados sobre uma plataforma flutuante. Figura 7.17 – Sistema de ventilação de uma sala de baterias.

Figura 7.18 – Detalhe de compartimento para baterias com orifícios na parte superior para ventilação.

Figura 7.19 – Vista de baterias no interior de uma caixa especialmente construída para seu acondicionamento.

Figura 7.20 – Abrigo de baterias bem ventilado e instalado na lateral de uma escola.

Figura 7.21 – Abrigo de madeira devidamente ventilado e isolado e com tela para impedir a entrada de pequenos insetos e animais.

Figura 7.22 – Armário de baterias.

Figura 7.23 – Banco de baterias em MIGDI da Celpa, na Ilha de Araras (Marajó-PA). Figura 7.24 – Forma de conexão de banco de baterias.

Figura 7.25 – Exemplos de controladores de carga e inversores instalados na parede da sala de controle.

Figura 7.26 – Exemplo de controladores de carga e inversor instalados dentro de uma caixa.

Figura 7.27 – Exemplo de edificação em madeira para instalação de banco de baterias, equipamentos de condicionamento de potência e de proteção - MIGDI da Ilha de Araras, Pará.

Figura 7.28 – Exemplo de uma chave fusível NH disponível comercialmente.

Figura 7.29 – Pontos de instalação dos componentes de proteção, monitoração e controle de um SFV para atendimento em c.c.

Figura 7.30 – Pontos de instalação dos componentes de proteção, monitoração e controle de um SFV para atendimento em c.a.

Figura 7.31 – Pontos de instalação dos componentes de proteção, monitoração e controle de um SFCR.

CAPÍTULO 8 – OPERAÇÃO E MANUTENÇÃO

Figura 8.1 – Inclinômetro.

Figura 8.2 – Exemplo de medição da tensão de circuito aberto do gerador fotovoltaico em um sistema com baterias.

Figura 8.3 – Termômetro infravermelho.

Figura 8.4 – Exemplo de medição da tensão de circuito aberto de um módulo. Figura 8.5 – Exemplo de medição da corrente de curto-circuito do gerador.

Figura 8.6 – Solarímetro portátil.

Figura 8.7 – Exemplo de medição da corrente de curto-circuito de um módulo. Figura 8.8 – Anomalias na curva I-V de um painel fotovoltaico.

Figura 8.9 – Fotografia com câmera termográfica.

Figura 8.10 – Câmera termográfica infravermelha.

Figura 8.11 – Densímetro.

Figura 8.12 – Tensão de circuito aberto (volts) e densidade específica (g/dm3) do eletrólito em função do estado de carga para baterias de chumbo-ácido de tensão nominal de 12 V a 30°C.

Figura 8.13 – Exemplo de densímetro integrado em bateria sem manutenção.

Figura 8.14 – Exemplo de medição da tensão de circuito aberto do banco de baterias.

Figura 8.15 – Exemplo de medição da tensão de circuito aberto de uma bateria com elementos de 2V com conexões externas.

Figura 8.16 – Analisador digital de baterias.

Figura 8.17 – Detectando um curto-circuito entre cabos. Figura 8.18 – Detectando uma falta à terra.

**LISTA DE QUADROS E TABELAS**

CAPÍTULO 2 – RECURSO SOLAR

Tabela 2.1 – Principais características do Sol.

Tabela 2.2 – Unidades para a radiação solar (irradiância e irradiação) e fatores de conversão. Tabela 2.3 – Valores típicos de albedo para diferentes tipos de superfícies.

CAPÍTULO 3 – CÉLULAS E MÓDULOS FOTOVOLTAICOS

Tabela 3.1 **–** Bandas proibidas *Eg* para diversos materiais semicondutores à temperatura de 300 K. Tabela 3.2 – Propriedades do silício à temperatura de 300 K e baixas concentrações de dopantes.

Tabela 3.3 **–** Níveis de energia de ionização para impurezas utilizadas como dopantes tipos *p* e *n* em silício.

Tabela 3.4 – Eficiência das melhores células fotovoltaicas fabricadas em laboratórios até 2012. Tabela 3.5 – Áreas ocupadas por de módulos de diferentes tecnologias.

Tabela 3.6 – Eficiências de células fotovoltaicas coloridas.

Tabela 3.7 – Normas e regulamentos sobre módulos fotovoltaicos.

CAPÍTULO 4 – COMPONENTES BÁSICOS DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS Tabela 4.1 – Dados técnicos que constam na etiqueta do módulo.

Tabela 4.2 – Dados técnicos adicionais que podem constar na folha de dados do módulo. Tabela 4.3 – Classes de eficiência de módulos fotovoltaicos no Brasil.

Tabela 4.4 – Dados técnicos de catálogos de baterias recarregáveis disponíveis comercialmente. Tabela 4.5 – Densidade do eletrólito H2SO4 (valores típicos a 25 °C).

Tabela 4.6 – Exemplos de resistências internas (Ri) de dois modelos de baterias sem manutenção. Tabela 4.7 – Tensões características de células e baterias de chumbo-ácido.

Tabela 4.8– Redução da vida útil de baterias Chumbo-ácido tipo VRLA em função da temperatura média anual de operação.

Tabela 4.9– Valores máximos admissíveis de impurezas em água para baterias. Tabela 4.10– Concentração máxima de impurezas permitida na água destilada e/ou deionizada. Tabela 4.11 – Tensões características de células e baterias de níquel-cádmio.

Tabela 4.12–Exemplo de especificações para os pontos de ajuste um controlador de carga *on-off* baseado em tensão.

Tabela 4.13 – Características de dispositivos semicondutores de chaveamento. Tabela 4.14 – Lógica de acionamento de uma ponte trifásica (6 tempos).

Tabela 4.15 – Exemplo de especificações de potência de pico e de limitações térmicas da potência de um inversor.

Tabela 4.16 – Comparação de características de inversores para conexão à rede com e sem transformador.

CAPÍTULO 5 – APLICAÇÕES DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS

Tabela 5.1 – Especificação dos SIGFIs, segundo RN Aneel 493/2012.

Tabela 5.2 – Condutividade e salinidade das águas.

Tabela 5.3 – Condutividade da água de poços na região Nordeste.

Tabela 5.4 – Densidade de corrente para proteção catódica.

CAPÍTULO 6 – PROJETO DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS

Tabela 6.1 – Exemplo de cálculo de consumo diário de energia (média semanal). Tabela 6.2 – Valores estimados de consumo médio mensal de alguns equipamentos elétricos.

Tabela 6.3 – Exemplos de equipamentos elétricos que devem ser evitados ou proibidos em sistemas isolados de pequeno porte.

Tabela 6.4 – Disponibilidades mensais de energia por unidade consumidora.

Tabela 6.5 – Estimativa de consumo médio de água por uso final.

Tabela 6.6 – Perda de carga em tubulações de PVC.

Tabela 6.7 – Perdas de carga em conexões de PVC.

Tabela 6.8 – Eficiências de SBFVs.

Tabela 6.9 – Níveis de tensão considerados para conexão de micro e minicentrais geradoras. Tabela 6.10 – Requisitos mínimos em função da potência instalada.

Tabela 6.11 – Principais características dos programas pesquisados e suas respectivas páginas na internet.

CAPÍTULO 7 – INSTALAÇÃO DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS E RECOMENDAÇÕES DE SEGURANÇA

Tabela 7.1 – Normas nacionais recomendadas para consulta.

Tabela 7.2 – Normas internacionais recomendadas para consulta.

Tabela 7.3 – Vantagens e desvantagens das diferentes formas de instalação.

Tabela 7.4 – Componentes de Proteção (chaves, disjuntores, DPS e fusíveis).

CAPÍTULO 8 – OPERAÇÃO E MANUTENÇÃO

Quadro 8.1 – Ações recomendadas em caso de acidente com ácido de baterias. Quadro 8.2 – Gerador Fotovoltaico.

Quadro 8.3 – Baterias.

Quadro 8.4 – Controladores de carga.

Quadro 8.5 – Inversor.

Quadro 8.6 – Cargas.

Quadro 8.7 – Verificações típicas de sistemas de microgeração conectados à rede. Tabela 8.1 – Falhas típicas dos sistemas do programa alemão 1.000 Telhados.

Tabela 8.2 – Recomendações de equipe e sistema de monitoramento em função do tamanho da central FV.

**GLOSSÁRIO**

**Aerogerador** Dispositivo responsável por converter a energia cinética contida nos ventos em energia mecânica e, em seguida, em eletricidade.

**Albedo** Parte da radiação solar que chega à superfície da Terra e é refletida pelo ambiente do entorno (solo, vegetação, obstáculos, terrenos rochosos etc.).

**Ano Meteorológico Padrão (ou Típico)**

Determinação estatística dos dados meteorológicos locais ao longo dos meses de vários anos.

**Amperímetro** Instrumento usado para medir a corrente elétrica.

**Armário de baterias** Local onde comumente são abrigadas as baterias que formam o sistema de armazenamento.

**Arquitetura bioclimática** Aplicação das condicionantes impostas pelo clima local ao projeto arquitetônico (adaptações por meios naturais).

**Aterramento elétrico** Ligação intencional de estruturas ou instalações com a terra, visando garantir o funcionamento correto da instalação e, principalmente, proporcionar um

caminho preferencial às correntes elétricas indesejáveis, de forma a evitar

riscos para as pessoas e os equipamentos.

**Atlas solarimétrico** Coletânea de informações sobre os recursos solares existentes na forma de cartas de isolinhas de radiação solar, insolação, em tabelas numéricas, etc.

**Banco de baterias** Conjunto de baterias conectadas (série/paralelo) entre si para armazenamento de energia.

**Bateria** Acumulador de energia elétrica mais utilizado nos sistemas fotovoltaicos.

***Autodescarga*** *Descarregamento gradual da bateria quando não está em uso, devido a processos químicos internos.*

***Capacidade*** *Quantidade de amperes-hora (Ah) que pode ser retirada da bateria quando esta apresenta carga plena.*

***Carga*** *Conversão de energia elétrica em potencial eletroquímico no interior da célula.*

***Célula*** *Unidade eletroquímica básica da bateria.*

***Ciclo*** *Sequência de carga-descarga da bateria até uma determinada profundidade de descarga.*

***Descarga*** *Conversão de potencial eletroquímico em energia elétrica no interior da célula.*

***Eletrólito*** *Material condutor (geralmente fluído ou gel), onde a passagem de eletricidade tem lugar na bateria, e que suporta as reações químicas necessárias.*

***Sobrecarga*** *Fornecimento de corrente a bateria após a mesma ter atingido a carga plena.*

***Tensão nominal*** *Tensão média da bateria durante o processo de descarga com uma determinada taxa de descarga a uma determinada temperatura.*

***Vida útil*** *Quantidade de vezes que a bateria pode carregar-descarregar ou o período de tempo no qual sua capacidade reduz significativamente.*

**Bomba centrífuga** Máquina hidráulica na qual a movimentação do fluído ocorre pela ação de forças que se desenvolvem na massa do mesmo, em consequência da rotação

de um eixo, que é acoplado um disco (rotor, impulsor) dotado de pás (palhetas,

hélice), o qual recebe o fluído pelo seu centro e o expulsa pela periferia (ação

da força centrífuga).

**Bomba volumétrica** Máquina hidráulica na qual a movimentação do fluído é causada diretamente pela ação do órgão de impulsão da bomba, que obriga o fluído a executar o

mesmo movimento a que está sujeito este impulsor (êmbolo, engrenagens,

lóbulos, palhetas).

**Bússola** Instrumento usado para verificar o ângulo azimutal do gerador fotovoltaico, isto é, a orientação correta do mesmo.

**Carga** Potencia nominal de um equipamento, ou soma das potências nominais dos equipamentos elétricos em condições de entrar em funcionamento.

**Célula a combustível** Dispositivo eletroquímico que converte a energia química em energia elétrica e calor, tendo como combustível o hidrogênio.

**Célula fotovoltaica** Dispositivo elementar especificamente desenvolvido para realizar a conversão direta da energia solar em energia elétrica.

***Corrente de curto-circuito*** *Máxima corrente que a célula (ou módulo) fotovoltaica pode produzir quando a tensão elétrica em seus terminais é igual a zero, considerando as condições*

*padrão de teste.*

***Eficiência*** *Relação entre a potência elétrica produzida pela célula fotovoltaica e a potência da energia solar incidente (irradiância).*

***Fator de forma*** *Relação entre a máxima potência da célula (ou módulo) fotovoltaica e o produto entre a tensão de circuito aberto e a corrente de curto-circuito.*

***Máxima potência*** *Máximo valor de potência que a célula (ou módulo) fotovoltaica pode produzir, considerando as condições padrão de teste.*

***Tensão de circuito aberto*** *Máxima tensão entre os terminais da célula (ou módulo) fotovoltaica quando não há corrente elétrica circulando, considerando as condições-padrão de*

*teste.*

**Centrais fotovoltaicas** Sistemas fotovoltaicos de médio e grande porte, composto por vários geradores fotovoltaicos interligados à rede elétrica por um ou mais inversor. Em geral,

são operados por empresas de geração, sendo sua conexão à rede elétrica feita

em média tensão.

**Central hidroelétrica** Instalação na qual a energia potencial e cinética contida em um fluxo de água é convertida em energia mecânica e, em seguida, em energia elétrica.

**Choque elétrico** Efeito que se manifesta no organismo humano quando é percorrido por uma corrente elétrica. Em geral este efeito é indesejável.

**Coletor solar** Dispositivo responsável pela captação da energia solar, conversão em energia térmica e, por fim, aquecimento de um fluido.

**Condições padrão de teste** Condições nas quais a célula (ou módulo) fotovoltaica é submetida para determinação dos seus parâmetros elétricos. As condições são: irradiância solar

de 1.000 W/m2, distribuição espectral padrão para a massa de ar de 1,5 e

temperatura de célula de 25 °C.

**Constante solar** Irradiância solar incidente num plano perpendicular à direção de propagação no topo da atmosfera terrestre. Valor: 1.367 W/m2.

**Controlador de carga** Dispositivo responsável por regular e gerenciar o fluxo energético dos geradores fotovoltaicos para as baterias, bem como protegê-las de uma

descarga profunda decorrente de um longo período sem geração.

**Conversores c.c.-c.c.** Em geral, utilizado como controlador de carga de baterias a partir da energia gerada por geradores fotovoltaicos.

**Corrente alternada** Corrente cuja polaridade e intensidade variam periodicamente no tempo. **Corrente contínua** Corrente cuja polaridade e intensidade são constantes.

**Curva de carga** Gráfico que mostra a evolução no tempo da quantidade de potência solicitada por uma carga ou um conjunto de cargas.

***Datalogger*** Dispositivo eletrônico responsável pela aquisição e armazenamento de dados ao longo do tempo.

**Declinação Magnética** Diferença entre a direção do Norte Verdadeiro e do Norte Magnético.

**Declinação solar** Ângulo formado entre as linhas imaginárias do Equador e a que liga o centro da Terra ao Sol.

**Demanda** Média das potências elétricas ativas ou reativas, solicitadas ao sistema elétrico pela parcela da carga instalada em operação na unidade consumidora, durante

um intervalo de tempo especificado.

**Densímetro** Instrumento que indica o estado de carga da bateria por determinação da densidade do eletrólito.

**Dessalinização** Retirada de sais da água salgada ou salobra, tornando-a doce e própria para o consumo humano.

**Dessalinizador** Equipamento que realiza a dessalinização da água.

**Diodo de bloqueio** Conectados entre os módulos FV e as baterias para impedir que aqueles atuem como carga para as baterias em períodos onde não haja geração de energia.

Esses diodos impedem, também, que, em um gerador FV, módulos operando

em condições normais injetem correntes elevadas em grupos de módulos em

condições de funcionamento anormais.

**Diodo de desvio ou by pass**

Conectados em paralelo com os módulos para impedir que, em uma associação série, o mau funcionamento de um dos módulos (devido a defeitos de fabricação ou condições de sombreamento) influencie negativamente no desempenho de todo o gerador.

**Efeito fotovoltaico** Conversão direta da energia da luz (espectro visível) em energia elétrica. A célula fotovoltaica é o elemento que realiza esta conversão.

**Eletrificador** Dispositivo que transforma um sinal de tensão em pulsos elétricos de alta intensidade e curta duração.

**Energia** Capacidade dos corpos de desenvolver uma força ou produzir um trabalho. **Energia cinética** Energia que está associada ao movimento.

**Energia elétrica** É a fonte de energia mais versátil e utilizada no mundo, estando presente em todos os usos energéticos finais.

**Energia eólica** Energia cinética presente na deslocação do ar (vento) que pode ser convertida em energia mecânica para acionamento de bombas, moinhos e geradores de

energia elétrica.

**Energia mecânica** Energia que pode ser usada diretamente para realização de trabalho, seja ela potencial ou cinética.

**Energia solar** Fonte primária de todas as fontes de energia.

**Energia solar fotovoltaica** Conversão direta da energia solar radiante em energia elétrica corrente contínua.

**Energia solar térmica** Conversão direta da energia solar radiante em calor utilizável.

**Equador** É a linha imaginária que divide o planeta em Hemisfério Norte e Hemisfério Sul, sendo equidistante dos pólos Norte e Sul.

**Equinócio** Momento em que o Sol, durante seu movimento aparente, cruza o plano do equador celeste. Os equinócios ocorrem duas vezes por ano: em setembro e em

março. Os dias e noites são iguais em duração.

**Equipamentos de condicionamento de potência**

Equipamentos cuja função principal é otimizar o controle geração/consumo visando ao aproveitamento ótimo do recurso solar, aliado à qualidade e continuidade na entrega da energia ao usuário.

**Equipotencialização** Procedimento que consiste na interligação de elementos da instalação, visando obter a equipotencialidade necessária para os fins desejados.

**Estação meteorológica** Constituídas por uma série de sensores utilizados com a finalidade de realizar a monitoração continuamente, em intervalos de tempo predeterminados, das

variáveis meteorológicas (vento, irradiância, temperatura, etc.).

**Fiação ou cabeamento** Conjunto de cabos ou fios destinados à distribuição da energia elétrica para um determinado fim.

**Fonte de energia** Recurso energético renovável ou não.

**Gerador fotovoltaico** Constituído por módulos fotovoltaicos em diferentes associações (série/paralela) e pelo cabeamento elétrico que os interliga, além de outros acessórios.

**Grupo gerador diesel** Equipamento que utiliza o diesel como combustível para acionar uma máquina motriz, cuja energia mecânica do seu eixo é convertida em energia elétrica por

um gerador.

**GWth** Unidade de potência usada para caracterização de equipamentos para resfriamento ou aquecimento.

**Horas de Sol Pleno** Número de horas por dia em que a radiação solar deve permanecer constante e igual a 1.000 W/m2.

**Inclinômetro** Instrumento usado para medir o ângulo de inclinação do gerador fotovoltaico.

**Inversor** Dispositivo responsável pela conversão de uma tensão contínua (c.c.), proveniente dos geradores renováveis, ou do banco de baterias, para uma

tensão alternada (c.a.), com amplitude e frequência determinadas.

***Eficiência*** *Relação entre a potência de saída e a potência de entrada do inversor.*

***Fator de dimensionamento de inversor***

*Relação entre a potência nominal c.a. do inversor e a potência pico do gerador fotovoltaico (potência na condição padrão de teste).*

***Forma de onda*** *Tipificação do inversor segundo as características da forma de onda (quadrada, quadrada modificada ou senoidal).*

***Frequência*** *Frequência da tensão c.a. de saída do inversor, geralmente 50 ou 60 Hz.* ***Potência nominal*** *Potência que o inversor fornece à carga em regime contínuo.*

***Tensão de entrada*** *Função da potência nominal fornecida pelo inversor às cargas c.a.*

***Tensão de saída*** *Regulada na maioria dos inversores, e sua escolha depende da tensão de operação das cargas c.a.*

**Irradiação difusa** Irradiação solar que atinge a superfície após sofrer espalhamento pela atmosfera terrestre

**Irradiação direta** Irradiação solar que incide diretamente sobre a superfície, sem sofrer qualquer influência.

**Irradiação global** Quantidade resultante da soma da irradiações solares direta e difusa, e albedo.

**Irradiação solar** Energia incidente por unidade de superfície de um dado plano, obtida pela integração da irradiância durante um intervalo de tempo, normalmente uma

hora ou um dia.

**Irradiância extraterreste** Irradiância solar que atinge o topo da camada atmosférica da Terra.

**Irradiância solar** Potência radiante (radiação solar) incidente por unidade de superfície sobre um dado plano.

***LED*** Componente eletrônico constituído por um material semicondutor que quando submetido a uma determinada corrente elétrica emite luz.

**Massa de ar** Efeito de uma atmosfera translúcida sob a luz do Sol.

**Medidor bidirecional** Dispositivo que registra a entrada e a saída de energia elétrica em uma unidade consumidora.

**Medidor unidirecional** Dispositivo que registra a entrada ou a saída de energia elétrica em uma unidade consumidora.

**Microgeração distribuída** Central geradora de energia elétrica, com potência instalada menor ou igual a 100 kW e que utilize fontes com base em energia hidráulica, solar, eólica,

biomassa ou cogeração qualificada, conforme regulamentação da ANEEL,

conectada na rede de distribuição por meio de instalações de unidades

consumidoras.

**Microssistema isolado de geração e distribuição de energia elétrica**

Sistema isolado de geração e distribuição de energia elétrica com potência instalada total de geração de até 100 kW.

**Minigeração distribuída** Central geradora de energia elétrica, com potência instalada superior a 100 kW e menor ou igual a 1 MW para fontes com base em energia hidráulica, solar,

eólica, biomassa ou cogeração qualificada, conforme regulamentação da

ANEEL, conectada na rede de distribuição por meio de instalações de unidades

consumidoras.

**Minirrede ou Microrede de distribuição**

Rede de distribuição de energia elétrica que pode operar isoladamente do sistema de distribuição, atendida diretamente por uma unidade de geração distribuída.

**Módulo fotovoltaico** Unidade básica do gerador fotovoltaico formada por um conjunto de células solares, interligadas eletricamente e encapsuladas, com o objetivo de gerar

energia elétrica.

***Caixa de conexões*** *Local onde são abrigados os diodos de desvio e as conexões dos conjuntos de células em série.*

***Estrutura de suporte*** *Estrutura concebida para se adaptar ao terreno, ou à estrutura do prédio, às características dos módulos e à estratégia de ajuste de inclinação e*

*orientação.*

**Piranômetro** Instrumento destinado a medir a irradiação solar global. **Pireliômetro** Instrumento destinado a medir a irradiação solar direta. **Potência** Quantidade de trabalho realizado por unidade de tempo.

**Radiação solar** Energia procedente do sol sob a forma de onda eletromagnética.

**Rastreador solar** Suporte mecânico ativo que permite o apontamento da superfície do gerador fotovoltaico na direção do Sol, com intuito de maximizar a produção de

energia. Idealmente tal dispositivo deve manter o ângulo de incidência da luz

solar sempre próximo da normal à superfície do gerador.

**Seguidores do ponto de máxima potência**

Dispositivo utilizado para maximizar a potência disponível do gerador fotovoltaico. Permite encontrar e regular os pontos de máxima potência (produto I-V) em todos os estados de funcionamento.

**Semicondutor** Material que, quando aquecido ou combinado com outros materiais, é capaz de conduzir eletricidade. Semicondutores em células fotovoltaicas são, por

exemplo, o Silício, Telureto de cádmio (CdTe) e Disseleneto de cobre (CIS)

**Silício** Segundo elemento químico mais frequente no mundo. Material base na indústria dos semicondutores e matéria-prima para a fabricação de células

solares.

***Amorfo*** *Forma alotrópica não cristalina do silício.*

***Monocristalino*** *Formado por uma estrutura cristalina homogénea ao longo de todo o material.*

***Policristalino*** *Formado por pequenos cristais, colados uns aos outros e que têm um tamanho que vai desde alguns milímetros até alguns centímetros.*

**Sistema de**

**armazenamento**

Sistema responsável em acumular energia elétrica, para a distribuição no momento oportuno e na medida requerida.

**Sistema de proteção** Sistema responsável em minimizar ou até mesmo eliminar falhas que possam prejudicar a segurança das pessoas e dos equipamentos. Composto por:

disjuntores, chaves seccionadoras, dispositivos de proteção contra surtos

(DPS), sistemas de aterramento e sistemas de proteção contra descargas

atmosféricas (SPDA).

**Sistema fotovoltaico** Sistema de conversão da radiação solar em energia aproveitável sob a forma de eletricidade. É constituído por um bloco gerador, um bloco de

condicionamento de potência e, opcionalmente, um bloco de armazenamento.

**Sistema fotovoltaico conectado à rede**

**Sistema fotovoltaico de bombeamento de água**

**Sistema fotovoltaico domiciliar**

**Sistema fotovoltaico integrados a edificações**

**Sistema fotovoltaico isolado ou autônomo**

**Sistema híbrido de energia**

**Sistema individual de geração de energia elétrica com fonte intermitente**

Sistema fotovoltaico com funcionamento dependente da rede elétrica, tendo a produção de energia entregue diretamente a mesma.

Sistema fotovoltaico utilizado exclusivamente para o acionamento de motobomba para bombeamento de água.

Sistema fotovoltaico isolado utilizado para ao atendimento de domicílios individuais.

Sistema fotovoltaico que pode ser aplicado em edificações novas ou já existentes sobre os telhados ou fachadas, servindo não apenas como fontes de energia, mas como elementos de sombreamento e diferencial arquitetônico da própria construção.

Sistema fotovoltaico com funcionamento independente da rede elétrica, isto é, não conectado. Em geral, utiliza baterias para armazenamento de energia.

Sistema que utiliza mais de uma fonte primária de energia (renovável ou não), dependendo da disponibilidade dos recursos, para gerar energia elétrica de forma coordenada e com custos mínimos, dada a possibilidade de se explorar a complementaridade entre as fontes, permitindo assim que o mesmo opere com o mínimo de interrupções, o que garante uma boa qualidade no atendimento de cargas especificas.

Sistema de geração de energia elétrica, utilizado para o atendimento de uma única unidade consumidora, cujo fornecimento se dê exclusivamente por meio de fonte de energia intermitente.

**Sol** Sol é a estrela mais próxima da Terra, sendo sua principal fonte de energia. **Sol (concentração)** Irradiância solar correspondente a 1.000 W/m2.

**Solstício** Momento em que o Sol, durante seu movimento aparente, atinge a maior declinação em latitude, medida a partir da linha do equador. Os solstícios

ocorrem duas vezes por ano: em dezembro e em junho. No verão, os dias são

mais longos. No inverno, as noites são mais longas.

**Tabela Price** É um sistema de amortização do saldo devedor cuja principal característica é a apresentação de parcelas iguais no pagamento de um determinado

financiamento.

**Tabela SAC** É um sistema caracterizado pela amortização constante do saldo devedor e, principalmente, pelo valor decrescente na parcela de um financiamento.

**Temperatura nominal da célula nas condições de operação**

Temperatura nominal atingida pelas células quando o módulo é exposto em circuito aberto a seguintes condições: irradiância na superfície da célula igual a 800 W/m2, temperatura do ar a 20 ° C e velocidade de vento incidente a igual 1 m/s.

**Unidade Astronômica** Distância média entre o Sol e a Terra; cerca de 150 milhões de km.

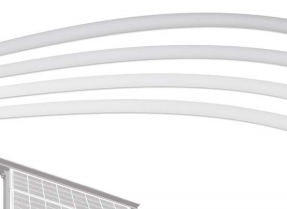
**Vento** Movimento do ar na atmosfera terrestre devido ao aquecimento heterogêneo provocado pela radiação solar nas diferentes regiões da superfície terrestre.

**Voltímetro** Instrumento usado para medir a tensão elétrica.

**Wp (watt-pico)** Unidade de potência de saída de uma célula, módulo ou gerador fotovoltaico, considerando as condições padrão de teste.

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO



**CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO**

O aproveitamento da energia gerada pelo Sol, inesgotável na escala terrestre de tempo, tanto como fonte de calor quanto de luz, é hoje uma das alternativas energéticas mais promissoras para prover a energia necessária ao desenvolvimento humano. Quando se fala em energia, deve-se lembrar de que o Sol é responsável pela origem de praticamente todas as outras fontes de energia na Terra. Em outras palavras, as fontes de energia são, em última instância, derivadas, em sua maioria, da energia do Sol.

É a partir da energia do Sol que se dá a evaporação, origem do ciclo das águas, que possibilita o represamento e a consequente geração de eletricidade (hidroeletricidade). A radiação solar também induz a circulação atmosférica em larga escala, causando os ventos. Assim, também a energia eólica é uma forma indireta de manifestação da energia solar, já que os ventos se formam a partir da conversão da radiação solar em energia cinética, em função de um balanço diferenciado nas diferentes latitudes entre a radiação solar incidente e a radiação terrestre emitida. Petróleo, carvão e gás natural foram gerados a partir de resíduos de plantas e animais que originalmente obtiveram do recurso solar a energia necessária ao seu desenvolvimento. É também através da energia do Sol que a matéria orgânica, como a cana-de-açúcar, realiza a fotossíntese e se desenvolve para, posteriormente, ser transformada em combustível nas usinas. Entretanto, neste manual tratar-se-á apenas do que se pode chamar de energia solar direta.

O Relatório Especial sobre Fontes Renováveis de Energia e Mitigação da Mudança Climática, publicado pelo IPCC (*Intergovernmental Panel on Climate Change)*, agregou a energia solar direta em cinco grandes blocos: 1) solar passiva, onde se insere a arquitetura bioclimática; 2) solar ativa, onde se inserem o aquecimento e a refrigeração solares; 3) solar fotovoltaica, para produção de energia elétrica com e sem concentradores, sendo esta última o objeto deste manual; 4) a geração de energia elétrica a partir de concentradores solares térmicos para altas temperaturas e; 5) um processo inspirado na fotossíntese através do qual, em um reator alimentado por dióxido de carbono (CO2), água e metal ou óxido metálico, exposto à radiação solar, produz-se hidrogênio, oxigênio e monóxido de carbono. Neste caso, o hidrogênio seria o combustível solar a alimentar células a combustível, não mais produzido a partir de gás natural, mas da quebra da molécula da água através da luz solar. Ressalta-se que a técnica mencionada ainda não se mostrou eficiente na produção do combustível solar e continua em desenvolvimento.

De forma mais simplificada, para fins de engenharia, pode-se falar da energia solar térmica e energia solar fotovoltaica. Algumas formas de utilização da energia solar são apresentadas a seguir.

47

**1.1 – Energia Solar Térmica**

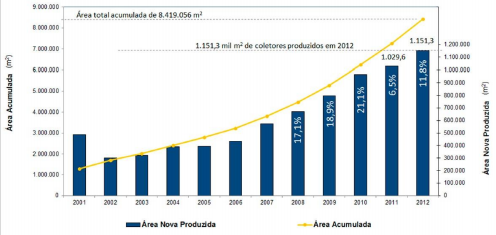
Neste caso, o interesse é na quantidade de energia que um determinado corpo é capaz de absorver, sob a forma de calor, a partir da radiação solar incidente no mesmo. A utilização dessa forma de energia implica não somente em saber captá-la, mas também em como armazená-la. Os equipamentos mais difundidos com o objetivo específico de se utilizar a energia solar térmica são conhecidos como coletores solares*.*

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

Os coletores solares planos são largamente utilizados para aquecimento de água em residências, hospitais, hotéis, etc., visando à redução do consumo de energia elétrica ou de gás. Em termos globais, o Relatório da Situação Global das Renováveis 2012 estima que a potência instalada acumulada no mundo, apenas para aquecimento de água e geração de calor, atingiu 232 GWth1 ao final de 2011, o que representa o uso de uma área aproximada de 330 milhões de m2. O mesmo relatório estima que mais de 200 milhões de residências no mundo usam coletores solares para aquecimento de água. No Brasil, a área acumulada atingiu 8,49 milhões de m2, o que supera 5,7 GWth, sendo 1,15 milhão de m2 acrescentados apenas em 2012. A Figura 1.1 apresenta a evolução do setor de aquecimento solar no mercado brasileiro ao longo da última década.

1 GWth – Gigawatt térmico. Unidade de potência usada para caracterização de equipamentos para resfriamento, como condicionadores de ar, ou aquecimento, como coletores solares, centrais termelétricas ou turbinas.

48

Figura 1.1 - Evolução do Mercado Brasileiro de Aquecimento Solar. Fonte: (DASOL, 2013).

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

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

Em 2013, as instalações CSP de diferentes tecnologias de concentradores solares atingiram uma potência instalada global da ordem de 2,8 GW, onde aproximadamente 90% das instalações se encontravam em operação. A Espanha é responsável por aproximadamente 65% do total das plantas em operação no mundo.

Uma grande vantagem dos sistemas solares térmicos é a possibilidade de serem acoplados a sistemas de armazenamento de calor para uso em outros horários, que não coincidem com a incidência

49

solar. Isso traz uma maior flexibilidade no despacho de energia elétrica, em comparação aos sistemas fotovoltaicos, além de maior eficiência no processo de conversão de energia e de uma gama de aplicação mais ampla. Outra vantagem é a possibilidade de integração com outras aplicações que necessitem de energia térmica.

Um dos grandes desafios que se coloca para o segmento industrial solar térmico é a queda significativa dos preços dos módulos fotovoltaicos2, que tornam estes mais competitivos.

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

A arquitetura bioclimática não se restringe a características arquitetônicas adequadas. Preocupa se, também, com o rendimento dos equipamentos e sistemas que são necessários ao uso da edificação (aquecimento de água, circulação de ar e de água, iluminação, conservação de alimentos, etc.) e com o uso de materiais de conteúdo energético tão baixo quanto possível.

**1.2 – Energia Solar Fotovoltaica**

A energia solar fotovoltaica é a energia obtida através da conversão direta da luz em eletricidade (Efeito Fotovoltaico), sendo a célula fotovoltaica, um dispositivo fabricado com material semicondutor, a unidade fundamental desse processo de conversão.

As principais tecnologias aplicadas na produção de células e módulos fotovoltaicos são classificadas em três gerações. A primeira geração é dividida em duas cadeias produtivas: silício monocristalino (m-Si) e silício policristalino (p-Si), que representam mais de 85% do mercado, por ser

2 Módulo fotovoltaico é uma unidade básica, formada por um conjunto de células fotovoltaicas, interligadas eletricamente e encapsuladas, com o objetivo de gerar energia elétrica, e se constitui na unidade comercial do gerador fotovoltaico. Ver item 3.4.

50

considerada uma tecnologia consolidada e confiável, e por possuir a melhor eficiência comercialmente disponível.

A segunda geração, comercialmente denominada de filmes finos, é dividida em três cadeias produtivas: silício amorfo (a-Si), disseleneto de cobre e índio (CIS) ou disseleneto de cobre, índio e gálio (CIGS) e telureto de cádmio (CdTe). Esta geração apresenta menor eficiência do que a primeira e tem uma modesta participação do mercado, competindo com a tecnologia c-Si3. Existem dificuldades associadas à disponibilidade dos materiais, vida útil, rendimento das células e, no caso do cádmio, sua toxicidade, que retardam a sua utilização em maior escala.

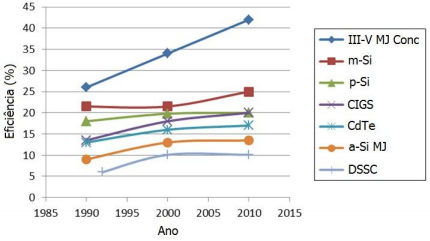
A terceira geração, ainda em fase de Pesquisa e Desenvolvimento (P&D), testes e produção em pequena escala, é dividida em três cadeias produtivas: célula fotovoltaica multijunção e célula fotovoltaica para concentração (CPV – *Concentrated Photovoltaics*), células sensibilizadas por corante (DSSC – *Dye-Sensitized Solar Cell*) e células orgânicas ou poliméricas (OPV – *Organic Photovoltaics*). A tecnologia CPV, por exemplo, demonstrou ter um potencial para produção de módulos com altas eficiências, embora o seu custo ainda não seja competitivo com as tecnologias que atualmente dominam o mercado.

A Figura 1.2 apresenta a evolução da eficiência das células fotovoltaicas verificada no período de 1990 a 2010, mostrando a melhor eficiência obtida para células de pequena área (0,5 a 5,0 cm2) fabricadas em laboratório, usando diferentes tecnologias. Células multijunção para concentração (III-V MJ Conc)4 foram fabricadas com dupla junção até 1995 e, posteriormente, com junções triplas. Na Figura 1.2, a eficiência da célula a-Si MJ (multijunção com silício amorfo) refere-se ao valor já estabilizado após exposição prolongada à luz.

3 Denominação genérica das tecnologias de silício cristalino, m-Si e p-Si.

4 Células com Concentradores Multijunção, também conhecidas por III-V MJ Conc, utilizam na sua fabricação semicondutores dos antigos grupos III e V da tabela periódica.

51

Figura 1.2 **-** Desenvolvimento das células fotovoltaicas. Fonte: Adaptada de (GREEN et al., 2011).

Um desafio paralelo para a indústria é o desenvolvimento de acessórios e equipamentos complementares para sistemas fotovoltaicos, com qualidade e vida útil comparáveis às dos módulos (fabricantes de módulos de silício cristalino garantem os seus produtos por 25 anos). Sistemas de armazenamento de energia e de condicionamento de potência têm sofrido grandes avanços no sentido de aperfeiçoamento e redução de custos, embora ainda não tenham atingido o grau de desenvolvimento desejado.

**1.2.1 – História e situação atual da energia solar fotovoltaica no mundo**

Os principais eventos associados ao desenvolvimento dos equipamentos de conversão da energia solar fotovoltaica podem ser visualizados na Figura 1.3.

O efeito fotovoltaico, primeiramente descoberto por Edmond Becquerel, em 1839, implica no aparecimento de uma diferença de potencial nos terminais de uma célula eletroquímica causada pela absorção de luz. Em 1876 foi concebido o primeiro aparato fotovoltaico advindo dos estudos da física do estado sólido e, apenas em 1956, iniciou-se a produção industrial, seguindo o crescimento da área de eletrônica.

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

52



Figura 1.3 - Representação dos eventos-chave no desenvolvimento das células fotovoltaicas. Fonte: Adaptado de (FERREIRA, 1993).

53

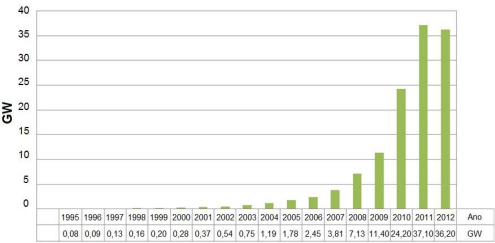
A crise do petróleo de 1973 renovou e ampliou o interesse em aplicações terrestres para a energia solar fotovoltaica. Porém, para tornar economicamente viável essa forma de conversão de energia, seria necessário, naquele momento, reduzir em até 100 vezes o custo de produção das células fotovoltaicas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

Em 1978, a produção da indústria fotovoltaica no mundo já ultrapassava a marca de 1 MWp/ano5. Os Estados Unidos foram líderes mundiais na produção dessa tecnologia durante a maior parte da década de 1990. No final dessa década, políticas de governo na Alemanha e no Japão resultaram em aumentos substanciais no desenvolvimento desse mercado. Essas políticas foram impulsionadas, em parte, por um forte compromisso com a redução de CO2, conforme previsto pelo Protocolo de Kyoto, e em parte para desenvolver o mercado dessa tecnologia para exportação.

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

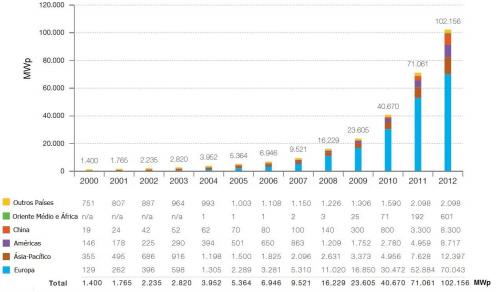
Embora abundante na Terra, a energia solar para produção de energia elétrica ainda é pouco utilizada. Nos países desenvolvidos este cenário vem mudando, porque fortes incentivos foram concedidos para a instalação de sistemas fotovoltaicos. A Figura 1.4 apresenta a evolução da produção mundial de células fotovoltaicas, tendo sido produzidos, em 2012, cerca de 36,2 GWp. Esta potência equivale a mais de duas vezes e meia a potência da usina hidroelétrica de Itaipu, a maior central de produção de energia elétrica do Brasil. Nos últimos onze anos, o crescimento anual médio da indústria de células e módulos fotovoltaicos foi de 54,2%.

5 Wp (watt-pico) é a unidade de potência de saída de um gerador fotovoltaico, sob as condições padrão de ensaio. 54

Figura 1.4 **-** Produção mundial de células fotovoltaicas. Fonte: Modificado de (Roney 2013).

A Figura 1.5 apresenta a potência instalada em sistemas fotovoltaicos no mundo no período de 2000 a 2012. O maior mercado de módulos fotovoltaicos tem sido a Alemanha, seguida da Itália, sendo que, apenas na Europa, encontram-se instalados aproximadamente 74% da produção mundial. Em 2011, a energia elétrica produzida pelos sistemas fotovoltaicos correspondeu a 2% do consumo europeu, com destaque para a Itália, onde este número foi da ordem de 5%. Na última década, a potência instalada em sistemas fotovoltaicos nos países europeus somente foi menor que a instalada em centrais eólicas e a gás natural. Depois da Europa, os maiores mercados para sistemas fotovoltaicos estão no Japão e nos Estados Unidos. Vale ressaltar que, até 2012, a potência instalada acumulada global superou os 100 GWp, sendo 32,3 GWp na Alemanha e 16 GWp na Itália.

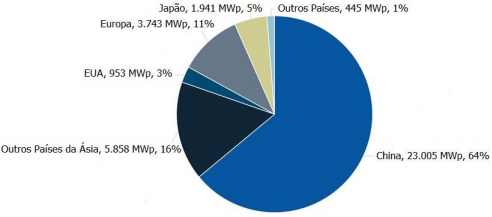
55

Figura 1.5 **-** Evolução da potência instalada em sistemas fotovoltaicos no mundo. Fonte: (EPIA, 2013).

Outros mercados estão surgindo, principalmente na Ásia, podendo-se citar, dentre outros países, o expressivo crescimento verificado na China e na Índia, devido a políticas favoráveis, preços baixos de módulos fotovoltaicos e programas de eletrificação rural em larga escala. Na China, mais do que incentivar o uso da tecnologia através de programas governamentais, a política mais agressiva está voltada para a produção e exportação de células e módulos fotovoltaicos. A Figura 1.6 apresenta a distribuição percentual da produção mundial de células segundo o país ou região, em 2012. A China, que fabricou 23 GWp em módulos fotovoltaicos, deteve 64% da produção mundial desse ano. As indústrias instaladas em países asiáticos, não necessariamente com tecnologia desenvolvida nacionalmente, dominam o mercado, com 85%. Em 2012, na Europa foram produzidos 11% dos módulos fotovoltaicos e nos Estados Unidos, 3%, mas deve-se observar que muitas empresas europeias e norte-americanas deslocaram suas fábricas para a Ásia, em busca de redução de custos de produção, em função da existência de uma cadeia produtiva estabelecida, mão de obra qualificada e barata, e incentivos por meio de fontes de financiamento para implantação de fábricas.

O gráfico da Figura 1.6 mostra os principais países fabricantes de módulos fotovoltaicos do mundo em 2012.

56

Figura 1.6 **-** Distribuição da produção mundial de células fotovoltaicas em 2012. Fonte: (GTM RESEARCH, 2013)

O custo das células fotovoltaicas é, ainda hoje, um grande desafio para a indústria e o principal empecilho para a difusão dos sistemas fotovoltaicos em larga escala. No entanto, a tecnologia fotovoltaica está se tornando cada vez mais competitiva, em razão, tanto dos seus custos decrescentes, quanto dos custos crescentes das demais formas de produção de energia, inclusive em função da internalização de fatores que eram anteriormente ignorados, como a questão dos impactos ambientais. No final de 2013, para venda em maior escala, o preço do módulo fotovoltaico de c-Si encontrava-se em cerca de 0,60 €/Wp na Europa, de 0,65 U$/Wp nos EUA e menos de 3 R$/Wp no Brasil.

**1.2.2 – Breve histórico da energia solar fotovoltaica no Brasil**

O território brasileiro recebe elevados índices de irradiação solar, quando comparado com países europeus, onde a tecnologia fotovoltaica é disseminada para a produção de energia elétrica. Constata se, entretanto, que o avanço tecnológico no Brasil tem passado por fases de crescimento, bem como por períodos de várias dificuldades.

Nos anos 50, iniciou-se o desenvolvimento de módulos fotovoltaicos no Instituto Nacional de Tecnologia (INT) e no Centro Tecnológico de Aeronáutica (CTA) – hoje Centro Técnico Aeroespacial, sendo realizado, em 1958, o Primeiro Simpósio Brasileiro de Energia Solar. O início do desenvolvimento de células fotovoltaicas de silício cristalino na Universidade de São Paulo (USP) teve por base o conhecimento em microeletrônica. As atividades foram focadas no desenvolvimento de lingotes de silício monocristalino com o método Czochralski (Si-Cz), que, utilizados para a fabricação de células fotovoltaicas, resultaram em dispositivos com eficiência da ordem de 12,5%.

O desenvolvimento de tecnologias de filmes finos começou na década de 1970, no Instituto Militar de Engenharia (IME), localizado no Rio de Janeiro, com colaboração internacional. Foi montada uma linha completa para processamento de células fotovoltaicas de Cu2S/CdS (sulfeto de

57

cobre/sulfeto de cádmio) com dimensões de 5 x 5 cm. Um dos principais resultados obtidos foi a produção de um módulo fotovoltaico de 30 x 30 cm com 5% de eficiência. A tecnologia evoluiu inicialmente para células fotovoltaicas de filmes finos CIS, mas atualmente o grupo atua na tecnologia de células CdTe.

Nos anos 70, o desenvolvimento tecnológico no Brasil, no setor de energia solar fotovoltaica, iniciado duas décadas antes, equiparava-se ao que ocorria nos países de vanguarda no mundo, incentivado pela crise internacional do petróleo. No final dos anos 70 e início da década de 80, duas fábricas de módulos fotovoltaicos de silício cristalino foram estabelecidas no país. Porém, nos anos 80, vários grupos de pesquisa direcionaram os seus trabalhos para outras áreas, devido à falta de incentivos, e as fábricas reduziram a sua produção significativamente, ou foram extintas. Atualmente há apenas uma fábrica para encapsulamento de módulos fotovoltaicos em funcionamento no Brasil (Empresa Tecnometal, localizada em Campinas).

A Associação Brasileira de Energia Solar (ABENS) foi criada em 1978 e possuía escritórios regionais em vários estados brasileiros. Porém, uma década mais tarde, as atividades foram interrompidas temporariamente. Muitos anos depois, com o aumento do número de especialistas e das atividades de pesquisa no país, iniciou-se, durante o II SNESF - Simpósio Nacional de Energia Solar Fotovoltaica, ocorrido em 2005 no Cepel (Rio de Janeiro, RJ), uma discussão entre os pesquisadores atuantes na área, para reorganização da ABENS. Após a sua reestruturação, o primeiro congresso promovido pela ABENS (I CBENS - Congresso Brasileiro de Energia Solar) foi realizado em 2007 em Fortaleza, CE. Até 2012 foram realizados três outros congressos: II CBENS em novembro de 2008 (Florianópolis, SC); III CBENS em setembro de 2010 (Belém, PA) e IV CBENS em setembro de 2012 (São Paulo, SP).

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

No início dos anos 90, células fotovoltaicas de silício cristalino foram desenvolvidas para serem testadas no primeiro satélite brasileiro. Atualmente, no Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), localizado em São José dos Campos, SP, estão sendo testadas e usadas células de tripla junção, para aplicações espaciais.

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

58

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

Nos anos 90, a difusão da tecnologia fotovoltaica no Brasil ficou defasada em relação ao que ocorria na Alemanha, Japão e outros países europeus onde os incentivos estavam direcionados ao desenvolvimento tecnológico e industrial e, principalmente, para aplicações associadas ao uso da energia solar em residências. Como marco, pode-se citar o Programa de 1.000 Telhados Fotovoltaicos, iniciado em 1990, na Alemanha.

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

No início do século XXI, com o avanço industrial na fabricação de células e módulos fotovoltaicos, verificado principalmente na China, e aumento do número de instalações de sistemas fotovoltaicos interligados à rede elétrica, o Brasil não conseguiu acompanhar a evolução que estava ocorrendo no mundo. Em 2001, entretanto, uma iniciativa do Governo Federal, caracterizada pela criação do Fundo Setorial de Energia (CT-ENERG), resultou em um crescimento das atividades de P&D em energia solar fotovoltaica e na formação de grupos de pesquisa e programas de pós

graduação.

Nesse contexto, em 2004, foi criado em Porto Alegre, RS, o Centro Brasileiro para Desenvolvimento da Energia Solar Fotovoltaica (CB-Solar), por meio de um Termo de Cooperação Técnico-Científica entre entidades dos governos Federal (Ministério da Ciência e Tecnologia), Estadual (Secretaria Estadual de Energia, Minas e Comunicações) e Municipal (Secretaria Municipal da Produção, Indústria e Comércio), em conjunto com a Companhia Estadual de Energia Elétrica (CEEE) e a Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul (PUC-RS). Duas ações do CB

Solar podem ser destacadas:

1) a promoção do I e II Simpósio Nacional de Energia Solar Fotovoltaica (SNESF), realizados, respectivamente, em 2004 e 2005 em parceria com o Cresesb, universidades, centros de pesquisas, órgãos governamentais e empresas;

59

2) o desenvolvimento de tecnologias em escala piloto para fabricação de células fotovoltaicas de silício cristalino e de módulos fotovoltaicos, incluindo uma análise técnico-econômica da sua produção em escala industrial.

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

No que concerne às ações efetivas para aproveitamento da energia fotovoltaica, foram instalados diversos sistemas fotovoltaicos isolados e sistemas híbridos para fornecimento de energia em ilhas e localidades afastadas da rede elétrica em todo o território brasileiro. Em 1994, o Governo Federal, por meio do Ministério de Minas e Energia, criou um programa para promover a eletrificação rural, baseado principalmente nos sistemas fotovoltaicos, denominado Prodeem (Programa de Desenvolvimento Energético de Estados e Municípios), envolvendo universidades, centros de pesquisa, secretarias estaduais de energia e concessionárias federais e estaduais, através do qual foram adquiridos mais de 8.500 sistemas fotovoltaicos.

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

Em 2003, foi instituído pelo Governo Federal o Programa Nacional de Universalização do Acesso e Uso da Energia Elétrica - Programa Luz para Todos (LpT), através do Decreto nº 4.873/2003, e alterado pelo Decreto nº 6.442/ 2008, que tem por objetivo prover o acesso à energia elétrica a todos os domicílios e estabelecimentos do meio rural. Os agentes executores do LpT são as concessionárias de energia, que podem utilizar recursos subsidiados no investimento dos sistemas de atendimento. O processo de universalização tem ocorrido majoritariamente por meio de extensão de rede, mas também contempla a instalação de sistemas fotovoltaicos. Neste contexto, milhares de SIGFIs foram instalados nos estados da Bahia e de Minas Gerais, pelas distribuidoras estaduais Coelba e Cemig, respectivamente.

60

Ainda no âmbito do LpT, a Eletrobras, em parceria com a agência alemã de cooperação técnica GIZ (Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit, antiga GTZ) e a Eletrobras Distribuição Acre, desenvolveu um projeto piloto de implantação de 103 SIGFIs em uma reserva extrativista localizada no município de Xapuri, AC. Sistemas tipo MIGDIs também foram utilizados no âmbito do LpT pelas distribuidoras do Amazonas e do Pará , em parceria com a Eletrobras, para fornecimento de energia elétrica a comunidades ribeirinhas remotas.

Em 2009, foi publicada a Lei nº 12.111 que dispõe sobre os serviços de energia elétrica nos Sistemas Isolados. Essa lei é um marco para a universalização do atendimento de energia elétrica pois autoriza a utilização de subsídio governamental para reembolsar o custo de geração, incluindo investimentos e custos de operação e manutenção, de qualquer sistema elétrico - e não mais só aqueles a base de combustíveis fósseis - para atendimento de áreas isoladas ao SIN (Sistema elétrico Interligado Nacional). Com isso é assegurado recurso para a universalização mesmo com a extinção do Programa LpT em 2014. A Celpa e distribuidoras da Eletrobras elaboraram projetos para atendimento de algumas comunidades remotas com base unicamente em sistemas fotovoltaicos. Em 2013 o MME, com apoio do EPE, da Eletrobras e do Cepel, elaborou um relatório (em fase de revisão) intitulado “Especificações dos Projetos de Referência no âmbito do Programa Luz para Todos” com critérios para orientar as distribuidoras na elaboração de seus projetos para os leilões previstos na Lei nº 12.111 e que utilizem recursos de investimento do Programa LpT. Em maio de 2013 a Celpa efetuou o primeiro leilão de energia nestes termos, que resultou em fracassado pois os proponentes não conseguiram atestar a capacidade técnica requerida. A estimativa é que em 2014 a Celpa lance de novo o leilão e também a Eletrobras Amazonas Energia e a Eletrobras Distribuição Acre lancem os seus.

Com o aumento do número de instalações de sistemas fotovoltaicos no país, o Inmetro (Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia) criou um grupo de trabalho (GT-FOT) para atuar nesta área, como parte do Programa Brasileiro de Etiquetagem (PBE), formado por especialistas de universidades e centros de pesquisa, representantes de órgãos públicos e de empresas privadas. O GT

FOT estabeleceu requisitos para a etiquetagem dos componentes utilizados em sistemas fotovoltaicos (módulos, inversores, controladores de carga e baterias), descritos no documento intitulado “Requisitos de Avaliação da Conformidade para Sistemas e Equipamentos para Energia Fotovoltaica”, publicado pela Portaria Inmetro No 4/2011, bem como identificou um conjunto de laboratórios habilitados a efetuar os ensaios. Atualmente, diversos componentes disponíveis no mercado nacional já se encontram etiquetados, conforme as tabelas disponibilizadas pelo Inmetro. Adicionalmente, para serem comercializados, tais equipamentos necessitam ainda do registro do Inmetro, conforme Resolução Conmetro nº 05, de maio de 2008.

O COBEI (Comitê Brasileiro de Eletricidade, da ABNT) também criou um grupo técnico sobre sistemas fotovoltaicos que foi responsável pela elaboração, entre outras, das Normas NBR 16149

61

Sistemas Fotovoltaicos (FV) - Características da interface de conexão com a rede elétrica de distribuição e NBR 16150 Sistemas Fotovoltaicos (FV) - Características da interface de conexão com a rede elétrica de distribuição - procedimento de ensaio de conformidade, com base nas normas IEC. Em dezembro de 2013, a norma “Sistemas fotovoltaicos conectados à rede – Requisitos mínimos para documentação, ensaios de comissionamento, inspeção e avaliação de desempenho” foi submetida à consulta pública (Projeto 03:082.01-005).

Os primeiros sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica foram instalados no Brasil no final dos anos 90 em concessionárias de energia elétrica, universidades e centros de pesquisa. A Chesf (Companhia Hidroelétrica do São Francisco) foi pioneira nesta área ao instalar um sistema fotovoltaico de 11 kWp em 1995, em sua sede em Recife, PE. Outros sistemas pioneiros foram instalados na USP (São Paulo, SP), na UFSC (Florianópolis, SC), na UFRGS (Porto Alegre, RS) e no Cepel (Rio de Janeiro, RJ).

A regulamentação para sistemas fotovoltaicos conectados à rede de distribuição, associados a unidades consumidoras, foi definida em 2012 pela Aneel, a partir da publicação da Resolução Normativa nº 482/2012, que trata da micro e mini geração distribuída, correspondendo, respectivamente, a potências iguais ou inferiores a 100 kWp, e superiores a 100 kWp até 1 MWp. A regulamentação prevê o sistema de compensação de energia elétrica, de acordo com o qual é feito um balanço entre a energia consumida e a gerada na unidade consumidora (modelo *net metering*).

No que se refere à instalação de Usinas Fotovoltaicas (UFV) no Brasil, a primeira planta, um empreendimento da iniciativa privada com potência de 1 MWp, foi inaugurada em 2011 no Município de Tauá, CE. O Apêndice 3 apresenta alguns sistemas fotovoltaicos instalados no Brasil.

Em 2011, a Aneel lançou a chamada no 13/2011 para um Projeto Estratégico de P&D, denominado “Arranjos Técnicos e Comerciais para Inserção da Geração Solar Fotovoltaica na Matriz Energética Brasileira”. No escopo desta chamada, foram selecionados 18 projetos de sistemas fotovoltaicos centralizados conectados à rede elétrica (UFVs), com potência instaladas na faixa de 0,5 MWp e 3 MWp, resultando numa potência instalada total de cerca de 24 MWp, com custo aproximado de R$ 400 milhões. A maioria dos projetos será executada pelas concessionárias de energia elétrica públicas e privadas localizadas em diferentes regiões do Brasil, com previsão para entrada em operação até 2015.

Em novembro de 2013 ocorreu o primeiro Leilão de Energia (A-3) cujos empreendimentos de geração fotovoltaicos – com potência igual ou superior a 5MW - foram habilitados pelo EPE. O leilão foi destinado à compra de energia de novos empreendimentos de geração eólica, solar e termelétrica a biomassa ou a gás natural em ciclo combinado, para início de suprimento a partir de janeiro de 2016, com custo marginal de referência de R$ 126,00/MWh. Entretanto nenhum empreendimento

62

fotovoltaico, nem usinas térmicas a biomassa ou pequenas centrais hidrelétricas apresentou proposta contemplando este valor, de forma que todos os projetos contratados foram de plantas eólicas, totalizando 867,6 MW de capacidade e preço médio final de R$ 124,43/MWh.

Atualmente a capacidade de sistemas fotovoltaicos instalados no Brasil, incluindo sistemas isolados e conectados à rede, é da ordem de 30 a 40MWp (Abinee, 2012). O mercado brasileiro ainda não apresenta atratividade para a instalação no país de indústrias de módulos fotovoltaicos, que precisam de um mercado anual da ordem de centenas de MWp. Há algumas poucas fábricas de inversores fotovoltaicos de pequeno porte (300 a 500 W) para SIGFIs, mas não de controladores ou inversores de maior potência ou de inversores para conexão a rede. Por causa desse mercado ainda incipiente, o número de empresas domésticas de projetos e instalações de sistemas fotovoltaicos é pequeno e, na sua maioria, com pouca experiência. Sem políticas públicas de incentivo, estima-se que o mercado fotovoltaico brasileiro irá crescer timidamente alguns megawatts ao ano.

Segundo a Abinee (Associação Brasileira da Indústria Elétrica e Eletrônica), em seu relatório publicado em 2012 (Abinee, 2012), esse ritmo de crescimento da demanda nacional continuará lento, devido a vários fatores: o custo de geração do sistema fotovoltaico ainda não é competitivo, o investimento para instalações residenciais é elevado, as distribuidoras mostram restrições à micro e minigeração por receio de perda de mercado, há falta de políticas específicas de financiamentos e de modelos de comercialização e, finalmente, os consumidores têm pouco conhecimento sobre a fonte fotovoltaica como opção de geração de energia elétrica.

**1.3 – Referências**

ABINEE. Propostas para Inserção da Energia Solar Fotovoltaica na Matriz Elétrica Brasileira. Junho de 1012. Disponível em http://www.abinee.org.br/informac/arquivos/profotov.pdf.

ARVIZU, D.; BALAYA, P.; CABEZA, L.; HOLLANDS, T.; JÄGER-WALDAU, A.; KONDO, M.; KONSEIBO, C.; MELESHKO, V.; STEIN, W.; TAMAURA, Y.; XU, H.; ZILLES, R. **Direct solar energy**. In IPCC Special Report on Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation [EDENHOFER, O.; PICHS-MADRUGA, R.; SOKONA, Y.; SEYBOTH, K.; MATSCHOSS, P.; KADNER, S.; ZWICKEL, T.; EICKEMEIER, P.; HANSEN, G.; SCHLÖMER, S.; VON STECHOW, C. (eds)]. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University Press, 2011.

CARVALHO, C.; BORGES, E.; ALMEIDA, G.; ARAÚJO, I.; OLIVIERI, M.; SCHWAB, T.; KLAUS W. **Solar Home Systems in Xapuri – A case study in Northern Brazil**. Rio de Janeiro, Brazil: RIO 9 - World Climate & Energy Event, 17-19 March 2009. p. 99-105.

DASOL. **Cresce produção de coletores solares e reservatórios térmicos**. SolBrasil, v. 16, maio de 2013, pp. 6-7.

63

DHERE, N. G.; CRUZ, L. R.; LOBO, P. C.; BRANCO, J. R. T.; RUTHER, R.; LIMA, J. H. G.; ZANESCO, I. **History of solar energy research in Brazil**. Orlando, Florida, USA: Proceedings of the ISES 2005 Solar World Congress, v. 1, 2005. p. 1-6.

EPIA - European Photovoltaic Industry Association. **Global market outlook for photovoltaics 2013-2017**. 2013. 60 p. Disponível em: <http://www.epia.org/>.

EPIA - European Photovoltaic Industry Association. **Global market outlook for photovoltaics until 2016**. 2012. 74 p. Disponível em: <http://www.epia.org/>.

EPIA - European Photovoltaic Industry Association. **World’s solar photovoltaic capacity passes 100-gigawatt landmark after strong year**. Press Release 2013. Disponível em: <http://www.epia.org/>.

FERREIRA, M. J. G. **Inserção da energia solar fotovoltaica no Brasil**. São Paulo, Brasil: Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Energia, USP, 1993.

GALDINO, M. A.; LIMA, J. H.; NOVGORODCEV, A.; ZILLES, R.; ZANESCO, I.; MOEHLECKE, A.; ORLANDO, A. F.; KRENZINGER, A. **The brazilian program for labelling photovoltaic Systems.** Barcelona, Espanha: Proceedings of the Twentieth European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, v. I, 2005. p. 3199-3202.

GALDINO, M. A.; LIMA, J. H. **PRODEEM - O Programa Nacional de Eletrificação Rural baseado em energia solar fotovoltaica**. Rio de Janeiro, Brasil: Anais do IX CBE - Congresso Brasileiro de Energia. COPPE/UFRJ - PPE, v. IV, 2002. p. 1806-1814.

GREEN, M. A.; RAFFAELLE, R. P.; BRUTON, T. M.; CONIBEER, G. **Achievements and challenges of solar electricity from photovoltaics.** In Handbook of Photovoltaic Science and Engineering [LUQUE, A., HEGEDUS, S. (eds)]. 2. ed. Chichester: John Wiley & Sons, 2011. p. 1-38.

GTM RESEARCH - **GTM Research: Yingli gains crown as top producer in a 36 GW global PV market.** 2013. Disponível em: http://www.greentechmedia.com/articles/read/Yingli-Gains-Crown As-Top-Producer-in-a-36-GW-Global-PV-Market; maio de 2013.

HERING, G. **Enter the dragon**. Photon International, Março de 2012. p. 132-161.

INMETRO. **PBE - Orientações Gerais para fabricantes e importadores sobre a Regulamentação de Equipamentos para geração de energia fotovoltaica**. Disponível em http://www2.inmetro.gov.br/pbe/pdf/guia\_de\_orientacoes\_PBE\_fotovoltaico.pdf

INMETRO. **PBE - Tabela De Eficiência Energética - Sistema De Energia Fotovoltaica – Módulos**. Disponível em: <http://www.inmetro.gov.br/consumidor/tabelas.asp>.

64

IRENA. **Renewable energy technologies: Cost analysis Series.** Solar Photovoltaics, Junho de 2012. 45 p.

JRC European Comission. **PV status report 2011. Research, solar cell production and market implementation of photovoltaics**. Agosto de 2011. 123 p. Disponível em: <http://re.jrc.ec.europa.eu/refsys/>.

LIMA, A.; CARVALHO, C.; OLIVIERI, M.; ROCHA, M.; KLAUS, W.; BORGES, E.; SILVA, I.; SOARES, Y. **Brazilian policies to provide universal access to energy**. Cancun, Mexico: 2013 ISES Solar World Congress, 3-7 November 2013.

REN21. **Renewables 2013 Global Status Report**. Paris, França. 2013.

RONEY, J. M. **World Solar Power Topped 100,000 Megawatts in 2012.** Compilado pelo Earth Policy Institute (EPI). Disponível em http://www.earth policy.org/indicators/C47/solar\_power\_2013.

SCHACHINGER, M. **Module price index. October 2013: New low price suppliers**. PV Magazine. Disponível em http://www.pv-magazine.com/investors/module-price index/#axzz2kSl6qcu0. Consultado em novembro de 2013.

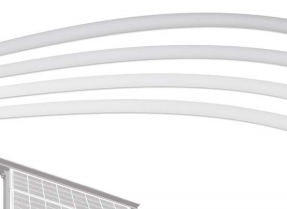
SCHMELA, M. **A bullish PV year**. Photon International, Março de 2003. p. 42-48.

ZANESCO, I.; MOEHLECKE, A.; SOUZA, J. A.; ARAUJO, R. G.; BRAGA, J. F. P.; SELINKE, R. **Desenvolvimento de planta piloto de produção de células fotovoltaicas e módulos fotovoltaicos com tecnologia nacional**. Florianópolis, Brasil: XXI SNPTEE - Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica, 2011. p. 1-9.

65

CAPÍTULO 2

RECURSO SOLAR

66

**CAPÍTULO 2 – RECURSO SOLAR**

O Sol é a principal fonte de energia para a Terra. Além de ser responsável pela manutenção da vida no Planeta, a radiação solar constitui-se numa inesgotável fonte energética, havendo um enorme potencial de sua utilização por meio de sistemas de captação e conversão em outra forma de energia, como por exemplo, a térmica e a elétrica.

**2.1 – O Sol e suas Características**

O Sol é basicamente uma enorme esfera de gás incandescente, em cujo núcleo acontece a geração de energia através de reações termonucleares. Sua estrutura, apresentada na Figura 2.1, é composta pelas principais regiões: núcleo, zona radiativa, zona convectiva, fotosfera, cromosfera e coroa (ou às vezes chamada de corona).

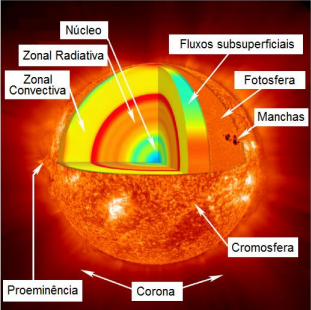


Figura 2.1 - Estrutura do Sol. Fonte: (http://theuniversalmatrix.com/pt-br/artigos/wp-content/uploads/2011/12/Sol Estrutura-Interna.png)

O núcleo, com temperatura de cerca de 15 milhões de kelvin, é a região mais densa e onde a energia é produzida por reações termonucleares. Logo acima se encontra a zona radiativa, onde a energia produzida no núcleo é transferida para as regiões superiores através da radiação.

A zona convectiva possui este nome em função dos processos de convecção que dominam o transporte de energia das regiões mais internas do Sol para a superfície solar.

67

A fotosfera, primeira região da atmosfera solar, com 330 km de espessura e temperatura próxima de 5.800 K, é a camada visível do Sol. Esta zona tem a aparência da superfície de um líquido em ebulição, repleta de bolhas, que são chamadas de grânulos fotosféricos. Estes grânulos têm em torno de 1.500 km de diâmetro e duram cerca de 10 minutos cada. Estas zonas granulares representam os processos convectivos do gás quente, que emerge da camada convectiva para a fotosfera. As regiões mais escuras entre os grânulos são zonas onde o gás mais frio e mais denso flui novamente para o interior do Sol. A fotosfera é a fonte da maior parte da radiação visível que é emitida pelo Sol. Um dos fenômenos fotosféricos mais notáveis é o das manchas solares, que são regiões mais frias que a fotosfera solar, possuindo uma temperatura de cerca de 3.800 K na região central, chamada de umbra e pouco mais elevada na parte periférica, denominada de penumbra. As manchas solares são indicadoras da intensa atividade magnética presente no Sol e seguem um ciclo de onze anos em que o número de manchas varia entre máximos e mínimos. Este ciclo provoca alterações na irradiação emitida pelo Sol e também apresenta consequências na Terra, alterando o comportamento da sua atmosfera.

A cromosfera do Sol normalmente não é visível, porque a intensidade da irradiação é muito mais baixa do que aquela relativa à região da fotosfera. A temperatura na cromosfera varia, na sua base, de 4.300 K a mais de 40.000 K, e sua altura é de aproximadamente 2.500 km.

A camada mais externa e rarefeita da atmosfera solar é chamada de coroa. Apesar do brilho da coroa solar ser equivalente ao da lua cheia, ela somente é visualizada na ocorrência de um eclipse, em virtude do alto brilho da fotosfera.

Em função dos gradientes de temperatura e da presença de várias linhas de emissão e absorção encontrados na atmosfera solar, o espectro de emissão do Sol pode ser considerado apenas semelhante ao de um corpo negro de temperatura de aproximadamente 5.800 K. No Sol a energia é liberada a partir de reações termonucleares, onde quatro prótons são fundidos em um núcleo de hélio, com a liberação de energia. Estima-se que o Sol tenha reserva de hidrogênio suficiente para alimentar as reações nucleares por mais 5 bilhões de anos (NASA, 2013a, 2013b).

As principais características do Sol estão descritas na Tabela 2.1.

68

Tabela 2.1 - Principais características do Sol. Fonte: (OLIVEIRA FILHO e SARAIVA, 2004).

**Principais características do Sol**

Massa 1,989 x 10~~30~~ kg Raio 696.000 km Densidade média 1.409 kg m~~-3~~ Densidade central 1,6 10~~5~~ kg m~~-3~~ Distância 1 UA ou 1,499 10~~8~~km Potência Luminosa 3,83 10~~26~~ W Temperatura efetiva 5.785 K Temperatura central 1,5 x 10~~7~~ K Hidrogênio = 91,2 %

Hélio = 8,7 %

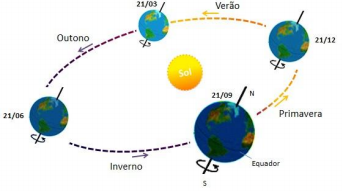
Composição química principal

Oxigênio = 0,078 % Carbono = 0,043 %

Período rotacional no Equador 25 dias Período rotacional na latitude 60° 29 dias

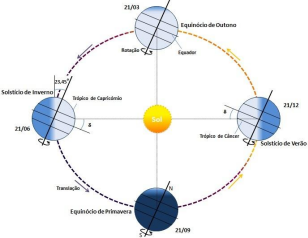
**2.2 – Geometria Sol-Terra**

A Terra, em seu movimento anual em torno do Sol descreve uma trajetória elíptica com uma pequena excentricidade (ε ≈ 0,017). O seu eixo, em relação ao plano normal à elipse, apresenta uma inclinação de aproximadamente 23,45º. Essa inclinação, juntamente com o seu movimento de translação, dá origem às estações do ano. Observando-se o movimento aparente do Sol, ao meio dia solar, ao longo do ano, verifica-se que o ângulo entre os seus raios e o plano do Equador varia entre +23,45º em torno do dia 21 de junho (solstício de inverno no hemisfério Sul), e -23,45º em 21 de dezembro (solstício de verão no hemisfério Sul). Este ângulo, denominado Declinação Solar (δ), é positivo ao Norte e negativo ao Sul do Equador. Nos dias 21 de setembro (equinócio de primavera) e 21 de março (equinócio de outono) os raios solares se alinham com o plano do Equador (δ = 0). A Figura 2.2 (a) ilustra o movimento da Terra em torno do Sol e as estações do ano para o hemisfério Sul e a Figura 2.2 (b) mostra a Declinação Solar (δ) em quatro posições da Terra ao longo do ano.



(a)

69



(b)

Figura 2.2 (a) e (b) – Órbita da Terra em torno do Sol, com seu eixo N-S inclinado de um ângulo de 23,45º, indicando as estações do ano no hemisfério Sul.

Na Figura 2.2 (b) é possível observar a variação da duração dos dias ao longo do ano para uma determinada localidade, resultante da inclinação do eixo da Terra. Verificam-se dias mais longos, por exemplo, em localidades no hemisfério Sul**,** no solstício de verão e dias mais curtos no solstício de inverno. No Equador terrestre a duração dos dias é sempre igual e nas suas proximidades as variações são pequenas ao longo do ano. É possível também observar que nos equinócios, as durações dos dias são as mesmas para qualquer localidade.

Considerando-se as convenções para a declinação solar e a latitude, positivas ao Norte e negativas ao Sul do Equador, a diferença entre a declinação e a latitude determina a trajetória do movimento aparente do Sol para um determinado dia em uma dada localidade na Terra.

A declinação solar pode ser calculada utilizando-se a Equação 2.1.

⎢⎣⎡⎟ +

⎥⎦⎤

⎜⎝⎛

360

⎞

*sen*( ) *sen*(23,45) cos *n*(2.1) δ = − ( 10)

365,25

⎠

onde *n* representa o dia juliano, contado de 1 a 365 a partir de 1 de janeiro (i.e. 01/jan→ *n* = 1; 02/jan→ *n* = 2;...; 31/dez→ *n* = 365).

O termo “radiação solar” é usado de forma genérica e pode ser referenciado em termos de fluxo de potência, quando é especificamente denominado de irradiância solar, ou em termos de energia por unidade de área, denominado, então, de irradiação solar. Existem diversas unidades para se representar valores de radiação solar. A Tabela 2.2 mostra algumas destas unidades e os fatores de conversão.

70

Tabela 2.2 - Unidades para a radiação solar (irradiância e irradiação) e fatores de conversão

**Para converter de: Para: Multiplique por:**

cal/cm2.min W/m2697,8

W/m2cal/cm2.min 0,0014331

W/m2 mcal/cm2.s 0,023885

MJ/m2.dia kWh/m2.dia 0,27778

Langley/dia kWh/m2.dia 0,01163

cal/cm2J/cm24,1868

cal/cm2kWh/m20,01163

J/cm2cal/cm20,23885

J/cm2kWh/m20,0027778

kWh/m2cal/cm285,985

kWh/m2J/cm2360

Langley cal/cm21

A irradiância solar que atinge a Terra, no topo da camada atmosférica, é denominada irradiância extraterreste. A constante solar (*I0*) é definida como o valor da irradiância extraterrestre que chega sobre uma superfície perpendicular aos raios solares na distância média Terra-Sol, e tem valor aproximado de 1.367 W/m² (adotado pelo WRC – *World Radiation Center*). A excentricidade da elipse que descreve a trajetória da Terra em torno do Sol resulta em uma variação no valor da irradiância extraterrestre ao longo do ano. A Figura 2.3 mostra o comportamento anual da irradiância extraterrestre, ou irradiância extraterrestre efetiva (*I0,ef*)

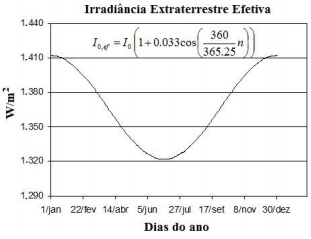


Figura 2.3 – Variação da irradiância solar extraterrestre (*I0,ef*) ao longo do ano.

Verifica-se na Figura 2.3 que o valor mínimo de *I0,ef* é de aproximadamente 1.322 W/m2 (afélio) e encontra-se próximo do solstício de inverno para o hemisfério Sul, e o valor máximo de

71

aproximadamente 1.412 W/m2 (periélio) próximo ao solstício de verão. Nesta figura também é apresentada uma equação para o cálculo do *I0,ef* em função da constante solar (*I0*), e do dia juliano (*n*).

*Ângulos da Geometria Solar*

As relações geométricas entre os raios solares, que variam de acordo com o movimento aparente do Sol e a superfície terrestre, são descritas através de vários ângulos, os quais estão apresentados na Figura 2.4 e definidos a seguir:

- Ângulo Zenital (θ*Z*): ângulo formado entre os raios do Sol e a vertical local (Zênite).

- Altura ou Elevação Solar (α): ângulo compreendido entre os raios do Sol e a projeção dos mesmos sobre o plano horizontal (horizonte do observador).

Verifica-se que os ângulos mencionados acima são complementares (Figura 2.4 (a)), ou seja: (θ*Z* + α = 90°).

- Ângulo Azimutal do Sol (γ*s*): também chamado azimute solar, é o ângulo entre a projeção dos raios solares no plano horizontal e a direção Norte-Sul (horizonte do observador). O deslocamento angular é tomado a partir do Norte (0°) geográfico1, sendo, por convenção, positivo quando a projeção se encontrar à direita do Sul (a Leste) e negativo quando se encontrar à esquerda (a Oeste).

-180° ≤ γ*s* ≤ 180°

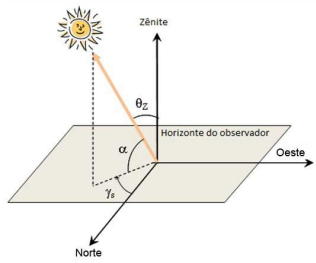
- Ângulo Azimutal da Superfície (γ): ângulo entre a projeção da normal à superfície no plano horizontal e a direção Norte-Sul. Obedece às mesmas convenções do azimute solar.

- Inclinação da superfície de captação (β): ângulo entre o plano da superfície em questão e o plano horizontal [0° 90°].

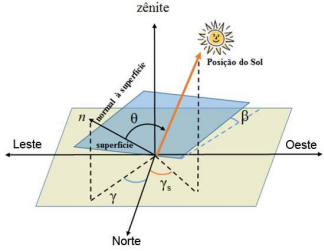
- Ângulo de incidência (θ): ângulo formado entre os raios do Sol e a normal à superfície de captação.

1 Também denominado de Norte verdadeiro por alguns autores.

72



(a)



(b)

Figura 2.4 – (a) Ilustração dos ângulos θ*Z*, α e γ*S*, representando a posição do Sol em relação ao plano horizontal; (b) Ilustração da orientação de uma superfície inclinada em relação ao mesmo plano: ângulos β, γ, γ*S* e θ.

Outros ângulos de igual importância, que não estão representados na Figura 2.4, são:

- Ângulo Horário do Sol ou Hora Angular (ω): deslocamento angular Leste-Oeste do meridiano do Sol, a partir do meridiano local, e devido ao movimento de rotação da Terra. Conforme apresentado na Equação 2.2, cada hora solar (*Hs*) corresponde a um deslocamento de 15°. São adotados, como

73

convenção, valores negativos para o período da manhã, positivos para o período da tarde, e zero ao meio dia solar (momento em que o Sol cruza o meridiano local).

(2.2)

O ângulo (θ*Z*) pode ser calculado em função da declinação solar (δ), do ângulo horário (ω) e da latitude local (φ), utilizando-se a Equação 2.3.

cosθ *z*= cosδ.cosω.cosφ + *sen*δ.*sen*φ(2.3)

Uma informação interessante que pode resultar da equação acima é o valor da duração do dia em uma determinada localidade e época do ano. Para tanto, considera-se o ângulo zenital igual a 90 graus (θ*Z* = 90°) e calcula-se o ângulo horário que, neste caso, é igual à hora angular do pôr-do-sol (ω*s*). Considerando-se que o comprimento angular do dia varia entre -ω*s* e +ω*s*, ao duplicar o valor de ω*s* e converter a hora angular para hora solar (15° = 1 h), obtém-se o número teórico de horas de sol para o dia e local em questão.

O ângulo horário do pôr-do-sol pode ser obtido da Equação 2.3, sendo igual a: (2.4) Então, o número teórico de horas de sol é calculado como:

(2.5) O ângulo de incidência (θ), entre os raios do Sol e uma superfície com orientação (γ) e inclinação (β) qualquer, pode ser obtido utilizando-se a Equação 2.6.

cos cos .cos .cos .cos cos . .

θ β δ ω φ β δ φ

= + + +

*sen sen*

*sen sen sen sen sen* β γ δ ω β γ δ ω φ

. .cos . .cos .cos .cos . −

*sen sen*

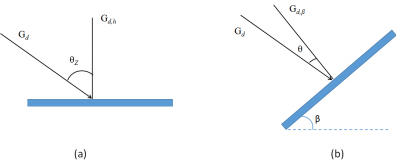
β γ δ φ

.cos . .cos

(2.6)

Os ângulos (θ*Z*) e (θ) permitem calcular a componente direta da irradiância que incide normalmente a um plano horizontal (*Gd,h*) ou a qualquer superfície inclinada (*Gd,β*), desde que conhecida a componente direta da irradiância incidente sobre a superfície, conforme Equação 2.7. Essa informação é necessária para os cálculos de irradiância solar direta coletada por dispositivos de conversão de energia solar. A Figura 2.5 indica o ângulo de incidência da irradiância solar direta sobre uma superfície horizontal e sobre uma superfície inclinada.

(2.7) 74

Figura 2.5 – (a) Irradiância direta incidente sobre uma superfície horizontal; (b) Irradiância direta incidente sobre uma superfície inclinada.

*Hora solar e hora oficial*

Os cálculos em energia solar são baseados na hora solar, a qual é definida pelo ângulo horário (ω), conforme descrito anteriormente.

Para a conversão da hora oficial, também chamada de hora civil (a do relógio), em hora solar, considera-se, como primeira etapa, a diferença de longitudes entre o meridiano do observador e o meridiano padrão no qual a hora oficial está baseada; a segunda etapa é dada pela Equação do Tempo (*E*), que é uma correção relacionada a dois fatores principais, a inclinação do eixo da Terra com relação ao plano da sua órbita (eclíptica) e a excentricidade da órbita da Terra (ε).

A Equação 2.8 fornece a diferença entre hora solar e hora oficial (em minutos). *Hora solar* −*Hora oficial* = 4(*Lst* − *Lloc* ) + *E*(2.8)

onde Lst e Lloc representam a longitude padrão do fuso e a longitude local, respectivamente, o fator 4 é utilizado para converter os valores de longitude (em graus) para tempo (em minutos). O parâmetro *E* é o valor resultante da Equação do Tempo (apresentada na Equação 2.9), sendo fornecido em minutos. A Figura 2.6 mostra a variação da Equação do Tempo ao longo do ano.

(2.9)

onde,

(2.10) sendo *n* o dia juliano.

75



Figura 2.6 – Equação do tempo ao longo do ano.

Verifica-se que o maior valor positivo de *E* é em torno de 16 minutos, entre outubro e novembro, e o maior valor negativo é 14 minutos em fevereiro (Figura 2.6). Embora as diferenças devidas à Equação do Tempo sejam relativamente pequenas, as diferenças entre hora oficial e hora solar podem ser bastante significativas dependendo da diferença entre os meridianos local, e padrão (Equação 2.8).

**2.3 – Radiação Solar sobre a Terra**

Como mencionado anteriormente, a densidade média anual do fluxo energético proveniente da radiação solar (irradiância solar), quando medida num plano perpendicular à direção da propagação dos raios solares no topo da atmosfera terrestre recebe o nome de “constante solar” e corresponde ao valor de 1.367 W/m2.

Considerando que o raio médio da Terra é 6.371 km, e considerando o valor da irradiância de 1.367 W/m2 incidindo sobre a área projetada da Terra, conclui-se que a potência total disponibilizada pelo Sol à Terra, no topo da atmosfera, é de aproximadamente 174 mil TW (terawatts).

Observações periódicas feitas a partir do espaço permitem análises mais qualitativas dos fluxos de energia na Terra. Trenberth *et al.* (2009) atualizaram o diagrama de fluxo de potência global (Figura 2.7), com base em medições de março de 2000 a novembro de 2005. Segundo esse diagrama, cerca de 54 % da irradiância solar que incide no topo da atmosfera, é refletida (7 %) e absorvida (47 %) pela superfície terrestre (os 46 % restantes são absorvidos ou refletidos diretamente pela atmosfera). Ou seja, da potência total disponibilizada pelo Sol à Terra, cerca de 94 mil TW chegam efetivamente à superfície terrestre.

76

Figura 2.7 - Fluxo de potência global (em W/m2). O valor da irradiância solar incidente no topo da atmosfera aqui apresentado é um fluxo médio anual recebido ao longo das 24 horas de um dia (341,3 W/m2) no topo da atmosfera. Fonte: (Trenberth *et al*., 2009).

O consumo mundial de energia primária no ano de 2011 foi cerca de 143 mil TWh, então, no intervalo de duas horas a quantidade de energia solar recebida na superfície terrestre (multiplicando 94 mil TW por duas horas, resultando em 188 mil TWh) é superior ao consumo energético anual da humanidade.

Considerando a radiação solar que chega à superfície terrestre e incidente sobre uma superfície receptora para geração de energia, tem-se que ela é constituída por uma componente direta (ou de feixe) e por uma componente difusa. A radiação direta é aquela que provêm diretamente da direção do Sol e produz sombras nítidas. A difusa é aquela proveniente de todas as direções e que atinge a superfície após sofrer espalhamento pela atmosfera terrestre.

Mesmo num dia totalmente sem nuvens, pelo menos de 20 % da radiação que atinge a superfície é difusa. Já em um dia totalmente nublado, não há radiação direta, e 100 % da radiação é difusa.

Notadamente, se a superfície estiver inclinada com relação à horizontal, haverá uma terceira componente refletida pelo ambiente do entorno (solo, vegetação, obstáculos, terrenos rochosos, etc.). O coeficiente de reflexão destas superfícies é denominado de “albedo”. A Tabela 2.3 apresenta valores típicos de albedo para diferentes tipos de superfícies.

77

Tabela 2.3 - Valores típicos de albedo para diferentes tipos de superfícies. Fonte: (MARKVART e CASTAÑER, 2004).

**Superfície Albedo**

Gramado 0,18 – 0,23

Grama seca 0,28 – 0,32

Solo descampado 0,17

Asfalto 0,15

Concreto novo (sem ação de intempéries) 0,55

Concreto (em construção urbana) 0,2

Neve fresca 0,8 – 0,9

Água, para diferentes valores de altura solar:

α > 45o α = 30o α = 20o α = 10o

0,05 0,08 0,12 0,22

A Figura 2.8 apresenta as três componentes citadas da radiação solar sobre uma superfície receptora, sendo que a quantidade resultante da soma das parcelas direta, difusa e devida ao albedo (quando a superfície é inclinada) é denominada de radiação global.



Figura 2.8 - Componentes da radiação solar. Fonte: (PINHO et al., 2008).

Antes de atingir o solo, as características da radiação solar (intensidade, distribuição espectral e angular) são afetadas por interações com a atmosfera, devidas aos efeitos de absorção e espalhamento. Estas modificações são dependentes da espessura da camada atmosférica, também identificada por um coeficiente denominado Massa de Ar (AM, do inglês *Air Mass*), e, portanto, do ângulo zenital do sol, da distância Terra-Sol e das condições atmosféricas e meteorológicas.

78

A massa de ar pode ser interpretada também como o comprimento relativo que a radiação solar direta percorre até atingir a superfície terrestre. Para ângulos zenitais entre 0o e 70º a massa de ar ao nível do mar pode ser definida matematicamente pela Equação 2.11, que considera a Terra plana. Para ângulos zenitais maiores, os efeitos da curvatura da Terra devem ser levados em consideração.

(2.11)

Denomina-se de AM1 quando a massa de ar é igual a 1, ou seja, o Sol encontra-se no zênite (ângulo zenital igual a 0o). Outras denominações são dadas, por exemplo, AM2, quando o ângulo zenital é igual a 60o e AM0 (sem massa atmosférica para a radiação solar atravessar), definida como a massa de ar no topo da atmosfera (radiação extraterrestre).

A Figura 2.9 mostra o espectro da irradiância solar em três condições: no topo da atmosfera da Terra (AM0); ao atingir perpendicularmente uma superfície ao nível do mar inclinada a 37° (AM1,3) e voltada para a linha do Equador (global inclinada); e após atravessar uma espessura de atmosfera 50 % maior que quando o Sol encontra-se no zênite, incidindo sobre uma superfície ao nível do mar (AM1,5 (irradiância direta + circunsolar).

O Sol emite luz com uma distribuição semelhante ao que seria esperado a partir de um corpo negro a 5.800 K (5.527 °C), que é aproximadamente a temperatura de sua superfície. Quando a luz atravessa a atmosfera, parte é absorvida por gases com bandas de absorção específicas. O ozônio (O3), por exemplo, absorve numa banda na faixa do UV (Ultravioleta) em comprimentos de onda inferiores a 300nm. O vapor d’água (H2O) e o dióxido de Carbono e (CO2) absorvem em várias bandas na faixa do IR (infravermelho) em comprimentos de onda superiores a 1000nm (por isso o CO2 é um gás que causa “efeito estufa”).

Outra parte da radiação incidente na atmosfera interage com esta e é espalhada em todas as direções, constituindo a radiação difusa.

O espalhamento da luz pelas moléculas dos gases da atmosfera é denominado de espalhamento. de Rayleigh. A teoria do espalhamento de Rayleigh se aplica a partículas esféricas de dimensões pequenas em relação ao comprimento de onda incidente, ou seja, quando r < 0,1 λ ( raio da partícula é menor do que 1/10 do comprimento de onda), o que se refere às moléculas dos gases presentes na atmosfera. Ainda de acordo com a teoria, o espalhamento (σ) é uma função contínua do da freqüência (ou comprimento de onda) e proporcional à sua quarta potência, ou seja, σ ν4, de forma que sua intensidade é maior para a região do azul e do violeta. Assim, o espalhamento é a principal razão pela qual o céu é azul.

79

O material em suspensão na atmosfera (particulado) e as nuvens também causam espalhamento da luz, mas de forma igual para todos os comprimentos de onda (espalhamento de Mie), ou seja, espalham a luz branca.

As perdas do fluxo de potência entre o espectro da irradiância incidente no topo da atmosfera e o espectro da irradiância global que atinge a superfície inclinada citada são de aproximadamente 27 %, resultando em cerca de 1.000 W/m2 incidentes sobre a referida superfície, cabendo ressaltar que este nível de irradiância é considerado como valor padrão para a especificação da potência nominal de uma célula ou de um módulo fotovoltaico.

Figura 2.9 - Distribuição espectral da irradiância no topo da atmosfera; da irradiância ao incidir perpendicularmente sobre uma superfície inclinada (37°) ao nível do mar e voltada para a linha do Equador; da irradiância após atravessar uma massa de ar de 1,5. Fonte: [NREL, 2012].

**2.3.1 - Distribuição da irradiação solar média diária no mundo**

A Figura 2.10 mostra a distribuição espacial da irradiância solar média anual (W/m2) que incide sobre a superfície da Terra. Esses dados foram estimados a partir de imagens de satélites meteorológicos obtidos no período de 1990 a 2004. Para obter, a partir destes dados, a irradiação solar na base temporal diária média anual, em kWh/m².dia, deve-se multiplicar por 24h.

Esse mapa é particularmente útil para os profissionais envolvidos no desenvolvimento e aplicação de tecnologias para converter energia solar em eletricidade. Os projetos de sistemas

80