

ENERGIA SOLAR

fundamentos, tecnologia e aplicações

CONSELHO EDITORIAL

André Costa e Silva

Cecilia Consolo

Dijon de Moraes

Jarbas Vargas Nascimento

Luis Barbosa Cortez

Marco Aurélio Cremasco

Rogério Lerner

ÂNGELO VIAN
CARLOS MARCIO VIEIRA TAHAN
GUIDO JAVIER ROSTEGUI AGUILAR
MARCOS ROBERTO GOUVEA
MATHEUS MINGATOS FERNANDES GEMIGNANI

ENERGIA SOLAR

fundamentos, tecnologia e aplicações

Projeto de P&D Gerenciador para Sistemas de Geração Intermitente,
Fontes Complementares e Armazenagem de Energia

2021

Energia solar: fundamentos, tecnologia e aplicações

© 2021 Ângelo Vian, Carlos Marcio Vieira Tahan, Guido Javier Rostegui Aguilar,
Marcos Roberto Gouvea, Matheus Mingatos Fernandes Gemignani

Editora Edgard Blücher Ltda.

Publisher Edgard Blücher

Editor Eduardo Blücher

Coordenação editorial Jonas Eliakim

Produção editorial Aline Fernandes

Diagramação e capa Laércio Flenic

Revisão de texto Samira Panini

Imagem da capa iStockphoto

Blucher

Rua Pedroso Alvarenga, 1245, 4º andar
04531-934 – São Paulo – SP – Brasil
Tel 55 11 3078-5366
contato@blucher.com.br
www.blucher.com.br

Segundo Novo Acordo Ortográfico, conforme 5. ed.
do Vocabulário Ortográfico da Língua Portuguesa,
Academia Brasileira de Letras, março de 2009.

É proibida a reprodução total ou parcial por quaisquer
meios, sem autorização escrita da Editora.

Todos os direitos reservados pela Editora
Edgard Blücher Ltda.

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Angélica Ilacqua CRB-8/7057

Energia solar: fundamentos, tecnologia e
aplicações / Ângelo Vian, Carlos Marcio Vieira Tahan,
Guido Javier Rostegui Aguilar, Marcos Roberto Gouvea,
Matheus Mingatos Fernandes Gemignani -- São Paulo:
Blucher, 2021.
130p.

Bibliografia
ISBN 978-65-5550-060-8 (impresso)
ISBN 978-65-5550-059-2 (eletrônico)

Open Access

1. Energia solar I. Vian, Ângelo

21-0558

CDD 621.47

Índices para catálogo sistemático:
1. Energia solar

Este volume é constituído de textos e gráficos extraídos, revisados, complementados e atualizados da publicação: “A Energia Solar - Tecnologia e Regulação” de Vian A, Tahan CV, Robba EJ, Gouvêa MR, Gemignani MF, Moretti A, Coppa P, editado em 2014, pela Editora Ofício das Palavras (2014 - ISBN- 978-85). Os autores e participantes da elaboração do presente volume, também são autores da publicação citada.

“A Energia Solar - Tecnologia e Regulação” foi elaborada no Projeto de P&D “Oportunidades Tecnológicas para Produção de Energia Elétrica Solar Fotovoltaica no Brasil” (2012 a 2014), desenvolvido no âmbito do Programa P&D Aneel da Companhia Energética de Petrolina, que também patrocina o presente projeto.

PREFÁCIO

A atenção mundial com o meio ambiente tem incentivado a pesquisa e a instalação de fontes de geração de energia elétrica sustentáveis que não agredam o planeta, dentre as quais destacam-se aquelas cujas fontes primárias são a energia dos ventos e a energia solar.

Com essa motivação a evolução tecnológica das gerações eólica e solar têm experimentado avanços muito importantes nas últimas duas décadas. A característica de produção intermitente dessas fontes traz novos desafios ao projeto e à operação dos sistemas elétricos, na medida que a disponibilidade de geração está condicionada a fenômenos da natureza que não podem ser controlados. Surge daí, a importância da armazenagem de energia.

Nesse ambiente, a presença de geração sustentável intermitente, de baterias para armazenagem e de cargas gerenciáveis cria sistemas autônomos, constituindo ilhas de geração/carga, interligadas ou não a outros sistemas.

Nasce portanto, a importância de pesquisa e do desenvolvimento de recursos tecnológicos para o gerenciamento do despacho econômico e eficiente desses sistemas híbridos.

A Companhia Energética de Petrolina, atenta aos movimentos do setor energético brasileiro e integrada no esforço do Programa de Pesquisa e Desenvolvimento promovido pela ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica, desenvolveu o projeto “Gerenciador para Sistemas de Geração Intermitente, Fontes Complementares e Armazenagem de Energia”, em colaboração com a Aries Engenharia e a FDTE - Fundação para o Desenvolvimento Tecnológico da Engenharia.

Com o objetivo de difundir conhecimentos adquiridos nesse projeto, entendeu-se oportuna a preparação desta publicação, onde os interessados pelo tema podem encontrar fundamentos, tecnologia e aplicações relativas à produção de energia elétrica a partir da energia solar.

Cabe ressaltar que esta publicação é o resultado do esforço de vários pesquisadores e especialistas, citando informações de diversas fontes disponíveis no contexto internacional.

Finalmente agradecemos à ANEEL, cujo programa de incentivo e promoção da pesquisa possibilitou a elaboração desta publicação.

Hélio Takeno
Companhia Energética de Petrolina

SUMÁRIO

1. GERAÇÃO DE ENERGIA SOLAR	11
1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO	11
1.2 INTRODUÇÃO AOS SISTEMAS DE ENERGIA SOLAR.....	14
1.2.1 CONCEITOS GERAIS.....	14
1.3 ENERGIA SOLAR NO BRASIL E NO MUNDO	15
1.3.1 AS INSTALAÇÕES FOTOVOLTAICAS NO MUNDO	16
1.3.2 APLICAÇÕES DE ENERGIA SOLAR NO BRASIL	25
2. PRODUÇÃO DE ENERGIA	33
2.1 EVOLUÇÃO DOS MATERIAIS	33
2.1.1 SILÍCIO - PRIMEIRA GERAÇÃO.....	34
2.1.2 ARQUITETURA AVANÇADA DO SILÍCIO.....	34
2.1.3 FILME FINO (<i>THIN FILM</i>).....	35
2.2 TECNOLOGIA AVANÇADA DE MÓDULOS.....	36
2.2.1 CÉLULAS BIFACIAIS	36
2.2.2 MEIAS CÉLULAS	37
2.2.3 BARRAMENTOS MÚLTIPLOS.....	37
2.2.4 TELHAS SOLARES.....	38
2.3 DISTRIBUIÇÃO DAS TECNOLOGIAS NO MERCADO BRASILEIRO	38
2.4 APLICAÇÕES E ARQUITETURAS	39
2.5 TECNOLOGIA E EVOLUÇÃO DOS SISTEMAS	51
2.5.1 TECNOLOGIAS DE CONVERSÃO	51
2.5.2 COMPARAÇÃO ENTRE AS TECNOLOGIAS TERMODINÂMICA E FOTOVOLTAICA	56

2.5.3 DISTRIBUIÇÃO DAS TECNOLOGIAS NO MERCADO.....	64
2.5.4 COMPARAÇÃO ENTRE TECNOLOGIAS.....	65
3. POTENCIAL ENERGÉTICO	69
3.1 INSUMO SOLAR.....	69
3.1.1 RADIAÇÃO DIRETA.....	73
3.1.2 A RADIAÇÃO DIFUSA.....	74
3.1.3 A RADIAÇÃO REFLETIDA – O ALBEDO.....	74
3.1.4 MEDIÇÃO DA ENERGIA INCIDENTE NA TERRA.....	75
3.1.5 VARIAÇÃO DA DISPONIBILIDADE DE ENERGIA SOLAR.....	75
3.1.6 DIAGRAMA DE PERCURSOS SOLARES.....	77
3.1.7 DIAGRAMAS TÍPICOS DA RADIAÇÃO SOLAR.....	78
3.1.8 HORAS DE SOL A PINO.....	80
3.2 AFERIÇÃO DO POTENCIAL.....	82
3.2.1 MEDIÇÕES DE IRRADIAÇÃO SOLAR.....	82
3.2.2 POTENCIAL DA DISPONIBILIDADE DE ENERGIA SOLAR.....	84
3.3 VANTAGENS E LIMITAÇÕES DA UTILIZAÇÃO DE ENERGIA SOLAR.....	87
3.3.1 VANTAGENS.....	87
3.3.2 LIMITAÇÕES.....	87
4. CUSTOS DOS SISTEMAS – GD E CENTRALIZADA	89
4.1 SISTEMAS FOTOVOLTAICOS – SISTEMAS E COMPONENTES	95
4.2 SISTEMAS FOTOVOLTAICOS – CUSTOS E DESEMPENHO	97
4.2.1 ESTRUTURA DO CUSTO DA INSTALAÇÃO DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS.....	100
4.2.2 O CUSTO DA ENERGIA PRODUZIDA POR FONTES FOTOVOLTAICAS.....	115
4.2.3 O POTENCIAL PARA A REDUÇÃO DE CUSTOS.....	117
REFERÊNCIAS.....	123