

SISTEMAS FOTOVOLTAICOS CONECTADOS À REDE ELÉTRICA

Roberto Zilles

Wilson Negrão Macêdo

Marcos André Barros Galhardo

Sérgio Henrique Ferreira de Oliveira

© 2012 Oficina de Textos

Grafia atualizada conforme o Acordo Ortográfico da Língua Portuguesa de 1990, em vigor no Brasil a partir de 2009.

CONSELHO EDITORIAL Cylon Gonçalves da Silva; Doris C. C. K. Kowaltowski;
José Galizia Tundisi; Luis Enrique Sánchez; Paulo Helene;
Rozely Ferreira dos Santos; Teresa Gallotti Florenzano

CAPA Malu Vallim

DIAGRAMAÇÃO Casa Editorial Maluhy & Co.

PROJETO GRÁFICO Douglas da Rocha Yoshida

PREPARAÇÃO DE TEXTO Gerson Silva

REVISÃO DE TEXTO Felipe Navarro Bio de Toledo

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

(Câmara Brasileira do Livro, SP, Brasil)

Sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica / Roberto Zilles...[et al.]. – São Paulo : Oficina de Textos, 2012. -- (Coleção aplicações da energia solar fotovoltaica ; 1)

Outros autores: Wilson Negrão Macêdo, Marcos André Barros Galhardo, Sérgio Henrique Ferreira de Oliveira

Bibliografia.

ISBN 978-85-7975-052-6

1. Energia elétrica - Distribuição 2. Energia elétrica - Sistemas 3. Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede (SFCRs) I. Zilles, Roberto. II. Macêdo, Wilson Negrão. III. Galhardo, Marcos André Barros. IV. Oliveira, Sérgio Henrique Ferreira de. V. Série.

12-04225

CDD-621.3191

Índices para catálogo sistemático:

1. Sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica : Sistemas elétricos de potência : Engenharia elétrica 621.3191

Todos os direitos reservados à **Editora Oficina de Textos**

Rua Cubatão, 959

CEP 04013-043 São Paulo SP

tel. (11) 3085 7933 fax (11) 3083 0849

www.ofitexto.com.br

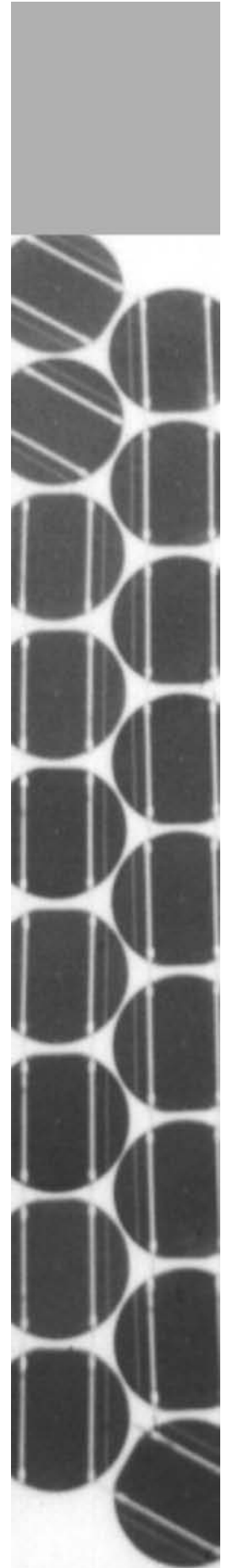
atend@ofitexto.com.br

Prólogo

Cuando escribo estas líneas, en marzo de 2012, el precio de los módulos fotovoltaicos en el mercado internacional ha descendido hasta 0,8 \$ por vatio, lo que permite producir electricidad a costes inferiores a 0,1\$/kWh, que resultan atractivos económicamente en un número creciente de escenarios de conexión a red. Así, la tecnología fotovoltaica, que hasta hace poco tiempo se consideraba marginal y apropiada sólo para suministrar electricidad en situaciones aisladas de las redes eléctricas, es ahora, y por sus propios méritos, una alternativa que gana pujanza en los mix de la electricidad convencional. Algunos datos servirán para corroborar esta afirmación. Entre los años 2008 y 2011, la producción fotovoltaica mundial pasó de 7,9 a 37,2 GW. Un crecimiento así, del 370% en 3 años, es seguramente record en la historia energética mundial. En 2011, la fabricación de los contactos frontales de las células solares consumió algo más de 4400 t de plata, equivalentes al 18% del total de la producción mundial de este metal. También en 2011, el mercado fotovoltaico europeo superó al eólico; y la producción fotovoltaica de electricidad en Alemania llegó a 18.000 GWh, superando a la hidráulica. Y, comoquiera que los análisis son unánimes a la hora de señalar que el advenimiento de la electricidad fotovoltaica no ha hecho más que empezar, urge disponer de instrumentos adecuados para formar a las generaciones de ingenieros que deberán empeñarse en la implantación a gran escala de esta tecnología. Y esto fue precisamente la primera idea que me vino a la cabeza cuando tuve la oportunidad de leer el manuscrito: este libro es un excelente instrumento de formación.

“Se aprende haciendo.” La paternidad de la frase se atribuye a Sófocles, quien la habría enunciado en el siglo II a.C. Comoquiera que sea, la insistencia con la que se viene repitiendo desde entonces es buen síntoma de que los intentos de enseñar sin primero hacer (equivalentes, por tanto, a intentos de enseñar sin saber) representan una amenaza que se mantiene a lo largo del tiempo. Ortega y Gasset, en su Meditación de la Técnica, advirtió de los peligros que encierra esta amenaza en el ámbito de lo universitario:

El llamado “espíritu” es una potencia demasiado etérea que se pierde en el laberinto de si misma, de sus propias infinitas posibilidades. ¡Es demasiado fácil pensar! La mente en su vuelo apenas si encuentra resistencia. Por eso es tan importante para el intelectual palpar objetos materiales y aprender en su trato con ellos una disciplina de contención.



Ahora bien, para generar conocimiento, las enseñanzas del hacer deben encontrar acomodo en un corpus teórico que las estructure y permita avanzar en la concepción y entendimiento del caso general, sin el que lo aprendido no pasa de constituir un recetario de utilidad limitada. Es oportuno recordar dos de los cuatro principios que Descartes enunció en su Discurso del método:

El primero, no admitir jamás cosa alguna como verdadera sin haber conocido con evidencia que así era. [...] El tercero, en conducir con orden mis pensamientos, empezando por los objetos más simples y más fáciles de conocer, para ascender poco a poco, gradualmente, hasta el conocimiento de los más compuestos, e incluso suponiendo un orden entre los que no se preceden naturalmente.

Pues bien, el libro se ajusta perfectamente a estos dos principios. Todo su contenido está apoyado en la evidencia adquirida por sus autores a su paso por el Laboratorio de Sistemas Fotovoltaicos del Instituto de Electrotécnica y Energía de la Universidad de Sao Paulo (IEE-USP). Así, el libro elude la tentación, desgraciadamente muy extendida, de presentar la “realidad virtual” constituida por simulaciones de software cerrado. En su lugar, presenta “realidades reales” y métodos de cálculo que en algún momento han formado parte del hacer de sus autores, y que el lector puede reproducir con relativa facilidad. Además, los temas están bien seleccionados y ordenados, abarcando desde una explicación somera pero rigurosa, del efecto fotovoltaico, que permite al lector hacerse una idea clara de cómo la luz se convierte en electricidad; hasta la presentación de los pormenores del funcionamiento operativo del sistema concreto que funciona desde hace una década en la sede del IEE-USP, que permite dar respuesta a las inquietudes respecto al impacto de los sistemas fotovoltaicos en la calidad del servicio que presta la red a la que están conectados.

El Laboratorio de Sistemas Fotovoltaicos del IEE-USP es un auténtico lugar de encuentro de la energía solar en Latinoamérica, por el que han pasado todos los autores del libro, que se formaron o trabajaron allí bajo la orientación del profesor Roberto Zilles, alma Mater de este laboratorio desde su fundación en 1995. Conozco a Roberto desde que llegara a España para hacer su tesis doctoral en 1987. Por aquel entonces, los viajes turísticos eran patrimonio de muy pocos, y los tópicos sobre los países sustituían al conocimiento directo de la realidad. El tópico que circulaba sobre Brasil hacía presuponer que Roberto debía ser una especie de mezcla entre un jugador de fútbol y un bailarín de samba. Pero hizo falta poco tiempo para que entendiéramos lo diferente que era ese tópico de la realidad. Roberto, que ciertamente era un más que aceptable jugador de fútbol pero a quien nunca vimos sambar, resultó ser un trabajador infatigable, con una buena formación teórica y muy riguroso en sus métodos, lo que pronto hizo de él un excelente ingeniero experimental. Pero, más allá de su capacidad profesional, Roberto es sobretodo un hombre empático, con un extraordinario don natural para entender las preocupaciones y los sentimientos de los demás, que le granjean el cariño de todos los que le conocemos, y el respeto unánime de quienes han tenido la fortuna de formarse bajo su orientación. Haber dado cabida en este libro a la práctica totalidad de las experiencias de otros grupos de trabajo de Brasil, no es más que una muestra de su generosidad.

EDUARDO LORENZO

Catedrático de la Universidad Politécnica de Madrid

Mañón, primavera de 2012

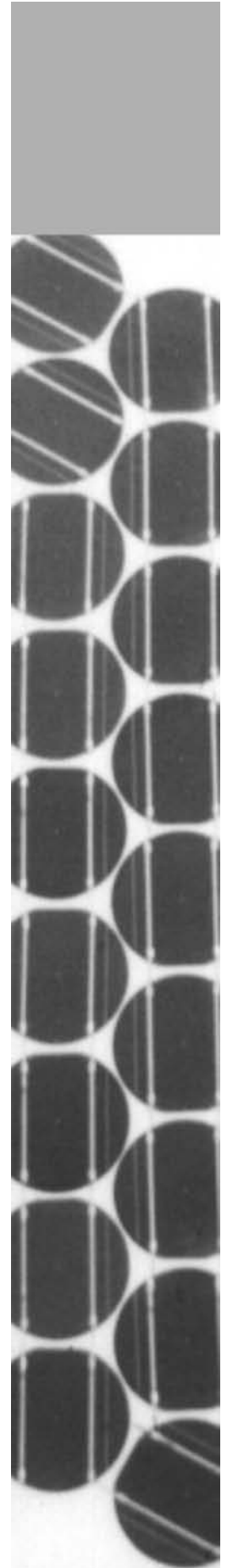
Apresentação

Quando escrevo estas linhas, em março de 2012, o preço dos módulos fotovoltaicos no mercado internacional caiu para US\$ 0,8 por watt, o que permite produzir eletricidade a custos inferiores a US\$ 0,1/kWh, economicamente atraentes em um número crescente de cenários de conexão de rede. Desse modo, a tecnologia fotovoltaica, que até pouco tempo era considerada marginal e apropriada somente para fornecer eletricidade em situações isoladas das redes elétricas, é agora, e por seus próprios méritos, uma alternativa que ganha força nos mix da eletricidade convencional. Alguns dados servirão para corroborar essa afirmação. Entre 2008 e 2011, a produção fotovoltaica mundial passou de 7,9 a 37,2 GW. Um crescimento assim, de 370% em três anos, é certamente recorde na história energética mundial. Em 2011, a fabricação dos contatos frontais das células solares consumiu pouco mais de 4.400 t de prata, equivalentes a 18% do total da produção mundial desse metal. Também em 2011, o mercado fotovoltaico europeu superou o eólico; e a produção fotovoltaica de eletricidade na Alemanha chegou a 18.000 GWh, superando a hidráulica. E, sendo as análises unânimes ao apontar que o advento da eletricidade fotovoltaica está apenas começando, urge dispor de instrumentos adequados para formar as gerações de engenheiros que deverão se dedicar à implantação em grande escala dessa tecnologia. Foi justamente essa a primeira ideia que me veio à cabeça quando tive a oportunidade de ler o manuscrito: este livro é um excelente instrumento de formação.

“Deve-se aprender fazendo.” A paternidade da frase é atribuída a Sófocles, que a teria enunciado no século II a.C. Seja como for, a insistência com que vem sendo repetida desde então é um bom sintoma de que as tentativas de ensinar sem primeiro fazer (equivalentes, portanto, a tentativas de ensinar sem saber) representam uma ameaça que perdura ao longo do tempo. Ortega y Gasset, em *Meditación de la Técnica*, advertiu sobre os perigos que encerra essa ameaça no âmbito universitário:

O chamado “espírito” é uma potência etérea demais, que se perde no labirinto de si mesma, de suas próprias infinitas possibilidades. É muito fácil pensar! A mente, em seu voo, não encontra resistência. Por isso é tão importante para o intelectual palpar objetos materiais e aprender, em seu trato com eles, uma disciplina de contenção.

Pois bem, para gerar conhecimento, os ensinamentos do fazer devem encontrar acomodação em um corpo teórico que os estruture e permita avançar na concepção



e entendimento do caso geral, sem o que o aprendido não passa de um receituário de utilidade limitada. É oportuno recordar dois dos quatro princípios que Descartes enunciou em *Discurso do método*:

O primeiro, jamais admitir coisa alguma como verdadeira sem ter conhecido com evidência que assim era. [...] O terceiro, em conduzir com ordem meus pensamentos, começando pelos objetos mais simples e mais fáceis de conhecer, para progredir, pouco a pouco, gradualmente, até o conhecimento dos mais compostos, e inclusive supondo uma ordem entre os que não se precedem naturalmente.

Bem, o livro se ajusta perfeitamente a esses dois princípios. Todo seu conteúdo está apoiado na evidência adquirida por seus autores em sua passagem pelo Laboratório de Sistemas Fotovoltaicos do Instituto de Eletrotécnica e Energia da Universidade de São Paulo (IEE-USP). Assim, o livro escapa à tentação, infelizmente muito difundida, de apresentar a “realidade virtual”, constituída por simulações de *software* fechado. Em seu lugar, apresenta “realidades reais” e métodos de cálculo que em algum momento fizeram parte do fazer de seus autores, e que o leitor pode reproduzir com relativa facilidade. Além disso, os temas estão bem selecionados e ordenados, abarcando desde uma explicação simples, mas rigorosa, do efeito fotovoltaico, que permite ao leitor ter uma ideia clara de como a luz se transforma em eletricidade; até a apresentação dos pormenores do funcionamento operacional do sistema específico que funciona há uma década na sede do IEE-USP, que permite responder às inquietudes em relação ao impacto dos sistemas fotovoltaicos na qualidade do serviço prestado pela rede à qual estão conectados.

O Laboratório de Sistemas Fotovoltaicos do IEE-USP é um verdadeiro ponto de encontro da energia solar na América Latina, pelo qual passaram todos os autores do livro, que se formaram ou ali trabalharam sob a orientação do professor Roberto Zilles, *alma mater* desse laboratório desde sua fundação, em 1995. Conheço Roberto desde que chegou à Espanha para defender sua tese de doutorado, em 1987. Naquela época, as viagens turísticas eram patrimônio de muito poucos, e os clichês sobre os países substituíam o conhecimento direto da realidade. O lugar-comum que circulava sobre o Brasil fazia pressupor que Roberto devia ser uma espécie de mistura entre um jogador de futebol e um dançarino de samba. Mas foi necessário pouco tempo para que entendêssemos quão diferente era esse clichê da realidade. Roberto, que certamente era um mais que aceitável jogador de futebol, mas a quem nunca vimos sambar, mostrou ser um trabalhador incansável, com uma boa formação teórica e muito rigoroso em seus métodos, o que logo fez dele um excelente engenheiro experimental. Mas, além de sua capacidade profissional, Roberto é, acima de tudo, um homem empático, com um extraordinário dom natural de entender as preocupações e os sentimentos dos outros, o que lhe granjeia o carinho de todos que o conhecem e o respeito unânime de quem teve a felicidade de se formar sob sua orientação. Ter dado espaço neste livro a praticamente todas as experiências de outros grupos de trabalho do Brasil não é mais que uma mostra de sua generosidade.

EDUARDO LORENZO

Catedrático de la Universidad Politécnica de Madrid

Mañón, primavera de 2012

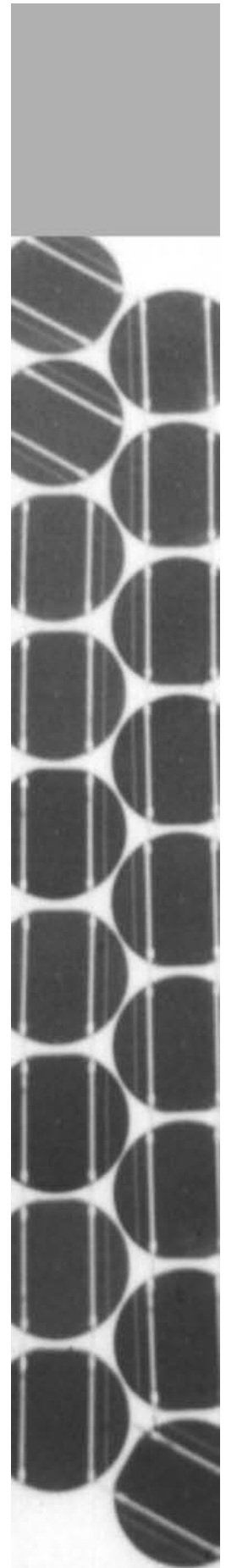
Prefácio

O objetivo deste livro é apresentar uma base de Engenharia compreensível e que possa ser utilizada na análise operacional e em projetos de Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede (SFCRs), de modo que não só engenheiros, mas também técnicos, possam entender e conhecer as peculiaridades dessa aplicação. O texto é planejado para auxiliar na capacitação de engenheiros e técnicos, fornecendo os principais conceitos associados à aplicação de SFCRs. Com um bom equilíbrio entre teoria e prática, o que o diferencia das poucas publicações existentes nessa área no País, este livro visa ajudar no entendimento dos principais parâmetros envolvidos no dimensionamento e na operação desse tipo de aplicação.

Embora o entendimento desse material seja mais fácil quando usado por engenheiros e técnicos praticantes da área de SFCRs, houve a preocupação dos autores em tornar o presente material suficientemente compreensível, de modo que sirva também para o uso em sala de aula como um livro de referência para quem se propõe a conhecer de forma mais aprofundada a geração distribuída de eletricidade com sistemas fotovoltaicos. A abordagem dada aos componentes elétricos de um SFCR neste livro pretende preencher parte da lacuna existente com relação ao material didático sobre sistemas fotovoltaicos no País.

Esta obra, além de apresentar os conceitos básicos associados aos dispositivos de conversão fotovoltaica, ilustra uma nova configuração do setor elétrico em termos de geração distribuída de eletricidade com SFCRs e apresenta as figuras de mérito para avaliação do desempenho dessas instalações. Modelos matemáticos representativos das várias partes que constituem um SFCR são também apresentados com o objetivo de auxiliar em análises operacionais e no dimensionamento de SFCRs. A apresentação de instalações e configurações usuais desses sistemas, bem como exemplos de sistemas instalados no País e a avaliação de seus resultados operacionais, complementam os conceitos básicos.

Alguns exemplos ilustrativos são incorporados ao final dos capítulos, dando ao leitor oportunidade de melhor compreender e aplicar o arcabouço teórico abordado. Nas próximas edições do livro, pretende-se ampliar continuamente a quantidade de exemplos e abordá-los de diferentes formas, sempre com o intuito de aguçá-lo e testar o entendimento dos leitores a respeito do conteúdo apresentado.



Como ferramenta de apoio à avaliação de instalações com geradores fotovoltaicos, no Anexo deste livro são apresentados alguns diagramas indicativos do percentual de captação anual de irradiação solar de uma dada superfície, conforme sua orientação e inclinação, para capitais dos Estados brasileiros e de países sul-americanos. Apresenta-se ainda na página do livro no site da editora (<http://www.ofitexto.com.br>) um código fonte de programação em Matlab para auxiliar em simulações numéricas de um SFCR.

Julga-se que a metodologia apresentada neste livro, essencialmente objetiva e prática, constitui um ótimo instrumento para aqueles que pretendem adquirir conhecimentos sobre os SFCRs. Finalmente, espera-se que esta obra possa ser útil a um grande número de estudantes, professores e profissionais da área, dos quais os autores aguardam e agradecem as críticas e sugestões, muito importantes para o desenvolvimento das próximas edições.

Por último, aproveita-se a oportunidade para agradecer aos bolsistas do Grupo de Estudos e Desenvolvimento de Alternativas Energéticas da Universidade Federal do Pará (GEDAE-UFPA) e do Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia de Energias Renováveis e Eficiência Energética da Amazônia (INCT-EREEA) no importante apoio prestado à realização desta obra.

OS AUTORES

Sumário

1 Dispositivos de Conversão Fotovoltaica, 13

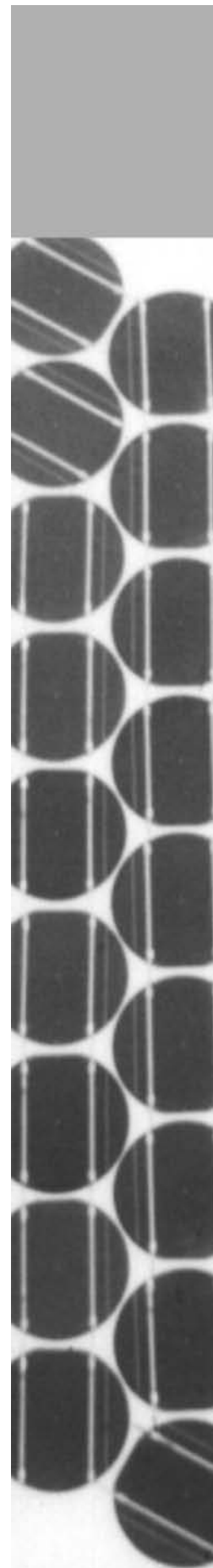
- 1.1 – Conversão fotovoltaica, 13
- 1.2 – Tecnologias convencionais no mercado de células fotovoltaicas, 17
- 1.3 – Características construtivas das células e módulos fotovoltaicos, 18
- 1.4 – Características elétricas das células e módulos fotovoltaicos, 20
- 1.5 – Gerador fotovoltaico, 30
- 1.6 – Sistema fotovoltaico conectado à rede (SFCR), 38
- 1.7 – Exemplos ilustrativos, 41

2 Geração Distribuída de Eletricidade e Figuras de Mérito para Avaliação do Desempenho de SFCRs, 47

- 2.1 – O conceito de geração distribuída, 49
- 2.2 – Definições de geração distribuída, 49
- 2.3 – O atual mercado para os geradores distribuídos, 50
- 2.4 – Localização e uso da geração distribuída, 50
- 2.5 – Recursos naturais e tecnologias usadas na geração distribuída, 51
- 2.6 – Potência instalada em sistemas de geração distribuída, 51
- 2.7 – Vantagens e barreiras à geração distribuída, 53
- 2.8 – A geração distribuída de eletricidade com sistemas fotovoltaicos, 56
- 2.9 – Figuras de mérito para avaliação do desempenho de SFCRs, 65
- 2.10 – Custo da energia produzida, 68

3 Modelamento e Dimensionamento de SFCRs, 73

- 3.1 – Configuração básica de um SFCR, 73
- 3.2 – Gerador fotovoltaico, 74
- 3.3 – Inversor c.c./c.a., 78
- 3.4 – Cálculo da potência de saída do SFCR, 89
- 3.5 – Cálculo da energia produzida, 90
- 3.6 – Fator de dimensionamento do inversor, 90
- 3.7 – Perdas envolvidas, 92
- 3.8 – Dimensionamento e escolha da tensão de trabalho do gerador fotovoltaico, 97
- 3.9 – Exemplos ilustrativos, 105



4 Instalação e Configuração de SFCRs, 113

4.1 – Configurações de SFCRs, 114

4.2 – Conexão com a rede de distribuição - ponto de conexão, 115

4.3 – Outros elementos necessários à instalação, 120

4.4 – Conexões trifásica, bifásica e monofásica, 121

5 Exemplos de SFCRs Instalados no Brasil, 125

5.1 – SFCRs instalados por universidades e centros de pesquisa, 127

5.2 – SFCRs instalados por concessionárias de energia, 139

5.3 – SFCRs instalados pela iniciativa privada, 143

6 Resultados Operacionais de um SFCR, 149

6.1 – Configuração do SFCR instalado no IEE-USP, 149

6.2 – Curva de carga da edificação e análise do fluxo de potência, 151

6.3 – Contribuição energética e desempenho do sistema, 152

6.4 – Aspectos qualitativos, 153

6.5 – Considerações sobre os resultados operacionais, 160

Referências Bibliográficas, 163

Anexo, 169

Dispositivos de Conversão Fotovoltaica

1

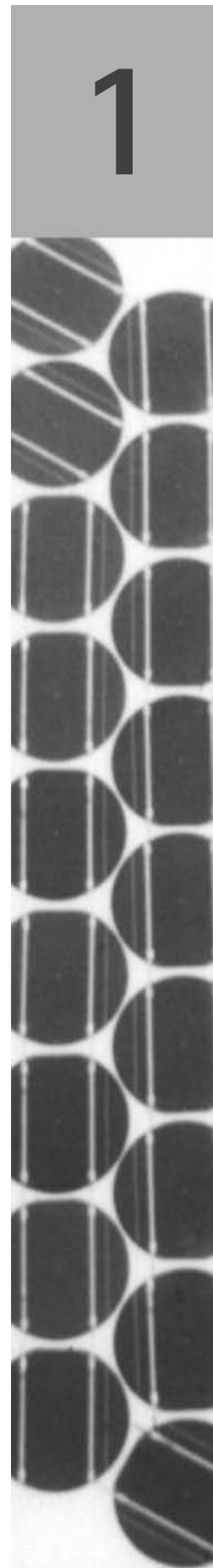
A palavra “fotovoltaico” vem do grego *photos*, que significa luz, e de *Volta*, nome do físico italiano que, em 1800, descobriu a pilha elétrica. A descoberta do fenômeno de conversão fotovoltaica remete ao século XIX, período no qual alguns estudiosos observaram fenômenos físicos que permitiam a conversão da luz em energia elétrica. Alexandre-Edmond Becquerel, em 1839, percebe que uma solução de um eletrólito com eletrodos de metal, quando exposta à radiação luminosa, tem sua condutividade aumentada. Em 1873, Willoughby Smith descobre a fotocondutividade no selênio sólido. Em 1876, Adams e Day percebem que uma junção de selênio e platina desenvolve o efeito fotovoltaico quando exposta à luz solar.

A partir do século XX, o desenvolvimento da tecnologia dos semicondutores tornou possível o crescimento da indústria fotovoltaica, e sua expansão no mercado mundial foi acelerada com a utilização dessa tecnologia em aplicações aeroespaciais, militares e, posteriormente, para a geração de eletricidade, tanto na forma distribuída como em grandes centrais.

1.1 CONVERSÃO FOTOVOLTAICA

A transformação da energia contida na radiação luminosa em energia elétrica é um fenômeno físico conhecido como *efeito fotovoltaico*. Observado primeiramente pelo físico francês Edmond Becquerel em 1839, o *efeito fotovoltaico* ocorre em certos materiais semicondutores com capacidade de absorver a energia contida nos fótons presentes na radiação luminosa incidente, transformando-a em eletricidade. A energia absorvida por esses materiais quebra as ligações químicas entre as moléculas presentes em suas estruturas. Com isso, cargas elétricas são liberadas e podem ser utilizadas para a realização de trabalho. O *efeito fotovoltaico* é uma característica física intrínseca ao material que compõe os dispositivos de conversão fotovoltaica.

Os semicondutores utilizados nos dispositivos de conversão fotovoltaica são compostos de elementos capazes de absorver a energia da radiação solar e transferir parte dessa energia para os elétrons, produzindo, assim, pares de portadores de carga (elétrons e lacuna). Os materiais utilizados para fabricar dispositivos com essa finalidade são escolhidos levando em conta a equivalência



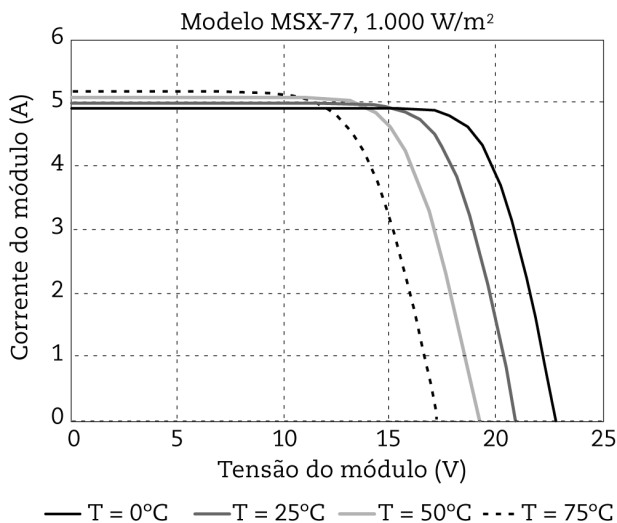


Fig. 1.21 Curvas $I - V$ para o módulo MSX-77, a 1.000 W/m^2 e vários níveis de temperatura da junção p-n

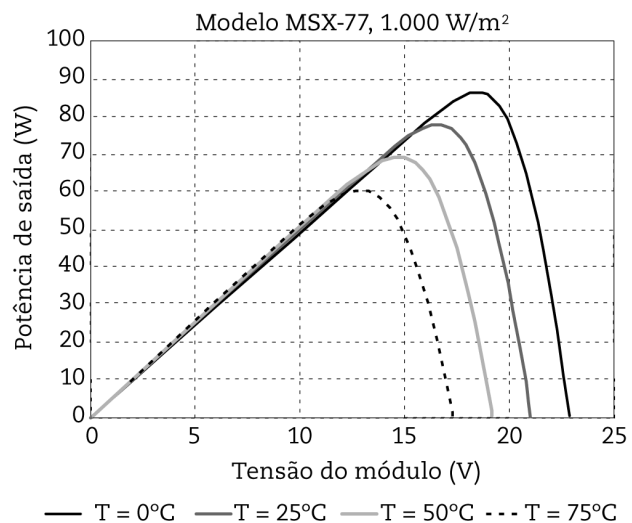


Fig. 1.22 Curvas $P - V$ para o módulo MSX-77, a 1.000 W/m^2 e vários níveis de temperatura da junção p-n

1.4.5 Eficiência de conversão (η)

Como qualquer outra fonte de energia elétrica, as células fotovoltaicas não têm a capacidade de transformar toda a energia incidente em eletricidade, por causa das limitações da tecnologia e das perdas inerentes ao processo. Portanto, faz-se necessário destacar as figuras de mérito que caracterizam o balanço de energia inerente à conversão fotovoltaica.

A eficiência de conversão de energia é o parâmetro mais importante das células fotovoltaicas e é definida como a razão entre a máxima potência elétrica gerada pelo dispositivo e a potência nele incidente. Esse último parâmetro depende exclusivamente do espectro da luz incidente no plano da célula. Algebricamente, a eficiência pode ser vista como:

$$\eta = \frac{P_{\text{Gerada}}}{P_{\text{Incidente}}} = \frac{FF \times V_{OC} \times I_{SC}}{P_{\text{Incidente}}} \quad (1.12)$$

A Fig. 1.23 mostra os valores de eficiência de conversão para diferentes tecnologias de fabricação de células fotovoltaicas ao longo de 35 anos. Os valores de eficiência mostrados são referentes a ensaios experimentais realizados em laboratório. Nessa figura também são indicados os locais em que houve as medições.

1.5 GERADOR FOTOVOLTAICO

Define-se como gerador fotovoltaico qualquer dispositivo capaz de converter energia solar em eletricidade por meio do efeito fotovoltaico, sendo a célula fotovoltaica o dispositivo que constitui a unidade básica. Porém, a célula atinge valores de tensão da ordem de 0,5 V a 1,5 V, segundo as várias tecnologias existentes, que são incompatíveis com equipamentos elétricos de condicionamento de potência e armazenamento de energia. Assim, é necessária

Geração Distribuída de Eletricidade e Figuras de Mérito para Avaliação do Desempenho de SFCRs

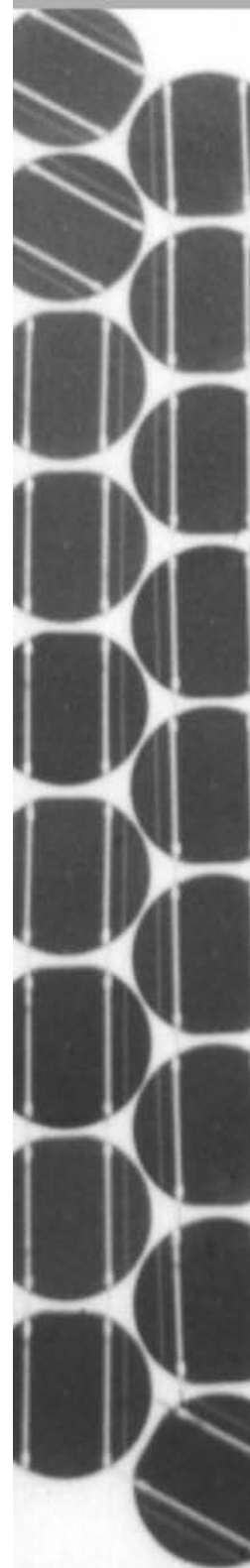
2

A geração distribuída é entendida pelos setores energéticos mundiais como produção energética próxima ao consumo. Embora seja um conceito que apenas recentemente ganhou a atenção de grupos de pesquisa, Estados e empresas concessionárias, trata-se de uma forma de geração energética que foi bastante comum e que chegou a ser a regra desde o início da industrialização até a primeira metade do século XX, período em que a energia motriz da indústria era praticamente toda gerada localmente.

A partir da década de 1940, no entanto, a geração energética em centrais de grande porte ficou mais barata, reduzindo o interesse pela geração distribuída e, como consequência, cessou o incentivo ao desenvolvimento tecnológico para esse tipo de geração. Com isso, os setores energéticos dos principais países do mundo passaram a ser caracterizados pela geração centralizada de energia.

Dessa forma, o problema do abastecimento de energia elétrica é solucionado quase que hegemonicamente pela construção de grandes usinas geradoras. Como, em geral, essas usinas estão distantes dos centros consumidores, faz-se necessário, de forma associada com tal solução, instalar extensas linhas de transmissão e complexos sistemas de distribuição para levar a energia aos consumidores finais.

Essa solução resolveu o equacionamento entre oferta e demanda até o fim do século XX, quando diversos fatores pressionaram a busca por formas diferentes de aumentar a oferta de energia. Os principais fatores que criaram o contexto para a busca de outras formas de abastecimento energético foram: (i) problemas como as crises do petróleo, iniciadas na década de 1970; (ii) restrições ambientais associadas aos setores energéticos; (iii) escassez de potenciais para a instalação de grandes empreendimentos energéticos; (iv) extensos prazos para a construção dessas usinas; (v) os fortes impactos ambientais que grandes empreendimentos geralmente provocam e (vi) o grande endividamento que resulta da instalação



Assim, se a reestruturação do setor energético brasileiro construiu um contexto favorável à ideia da geração distribuída de energia, o avanço recente da ciência (em particular com o surgimento de novas tecnologias de conversão energética) e o constante aumento da demanda energética deram força ao seu desenvolvimento. Finalmente, cabe ressaltar que esse retorno à geração distribuída não substitui a geração centralizada; é complementar a ela.

2.1 O CONCEITO DE GERAÇÃO DISTRIBUÍDA

O pressuposto básico que oferece sustentação inicial ao termo geração distribuída é a ideia de contraposição à geração centralizada de energia, que é o formato adotado por praticamente todo o mundo para seus setores energéticos. Nele, a oferta de energia é formada por grandes unidades de geração, distantes dos grandes centros consumidores. Toda essa energia é então levada aos consumidores através de extensas linhas de transmissão e complexa rede de distribuição.

Talvez por tratar-se de uma forma de geração pouco usada nos últimos anos, ainda não haja uma definição precisa e única do que caracteriza a geração distribuída. Assim, atualmente é possível encontrar definições que variam segundo fatores como: forma de conexão à rede, capacidade instalada, localização, tecnologias e recursos primários utilizados. A seguir, são reunidas algumas das definições de geração distribuída adotadas por instituições envolvidas no setor energético.

2.2 DEFINIÇÕES DE GERAÇÃO DISTRIBUÍDA

No Brasil, a geração distribuída consolida um passo importante em seu desenvolvimento quando é mencionada, na Lei nº 10.848/04, como uma das possíveis fontes de geração de energia. O detalhamento apresentado no Decreto nº 5.163, de 30 de julho de 2004, fornece características que ajudarão as empresas distribuidoras, que até então se opunham a essa forma de geração, a enxergar na geração distribuída uma forma de mitigar riscos de planejamento. No artigo 14 do Decreto nº 5.163/04 explicita-se como geração distribuída a produção de energia elétrica proveniente de empreendimentos de permissionários, agentes concessionários ou autorizados, conectados diretamente no sistema elétrico de distribuição do comprador. A exceção se faz às hidrelétricas com capacidade instalada superior a 30 MW e às termelétricas, inclusive de cogeração, com eficiência energética inferior a 75%. Apenas as termelétricas movidas com biomassa ou resíduos de processos não são limitadas por esse percentual. Essa restrição colocada às termelétricas foi revisada pela Resolução Normativa nº 228, de 25 de julho de 2006, uma vez que as termelétricas atuais com geração pura de eletricidade (sem cogeração) não atingem eficiência energética superior a 75%. Portanto, essa resolução normativa pretende estabelecer requisitos mais bem elaborados e mais coerentes ao atendimento a critérios de racionalidade energética, para então certificar essas termelétricas como Geradoras Distribuídas.



Fig. 2.2 Sistema de 5 kWp, integrado a uma edificação residencial (Soto del Real, Madri, Espanha)



Fig. 2.3 Sistema fotovoltaico integrado a um estacionamento (geração de eletricidade ao mesmo tempo que fornece sombra aos carros)

os custos do capital reunido para o empreendimento. Instalados próximo aos locais de maior consumo, ajudam a postergar os investimentos no aumento da capacidade das linhas de distribuição (o que, em si, já possui um valor econômico) e evitam perdas técnicas no transporte da eletricidade, representando, assim, um investimento eficaz do ponto de vista financeiro. Finalmente, a tecnologia fotovoltaica utiliza a radiação solar como insumo, um recurso renovável de energia, ajudando a manter o caráter renovável e sustentável da

Modelamento e Dimensionamento de SFCRs

3

Neste capítulo são abordados os modelos representativos de cada parte que compõe um SFCR, com o intuito de utilizá-los como ferramentas em simulações numéricas que permitam analisar a sensibilidade do fator de dimensionamento do inversor (*FDI*) às particularidades do local de instalação do SFCR, que são, basicamente, a radiação solar incidente no plano do gerador fotovoltaico e a temperatura ambiente. Com essa finalidade, são utilizadas algumas figuras de mérito para avaliar a operação desses sistemas, possibilitando a comparação entre sistemas com características diferentes.

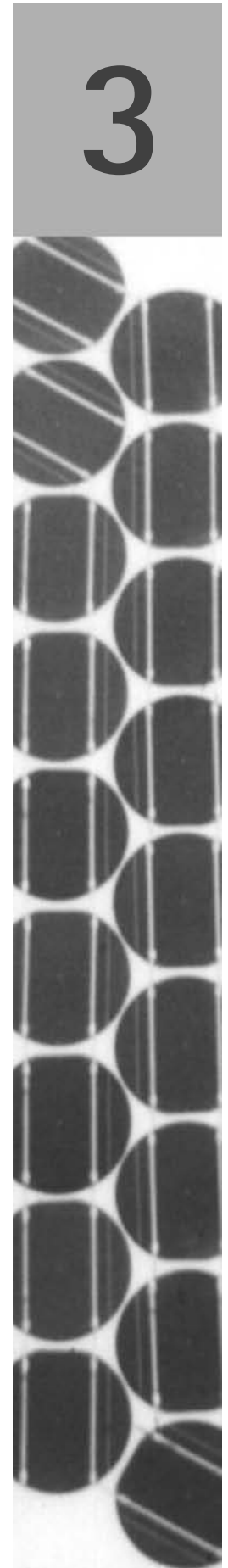
Com o modelamento apresentado neste capítulo, é possível calcular a potência média de saída do SFCR por meio de simulações numéricas envolvendo valores de radiação solar e temperatura ambiente. Essas ferramentas permitem avaliar o efeito da relação *FDI* em termos energéticos, auxiliando na escolha da configuração de um SFCR.

3.1 CONFIGURAÇÃO BÁSICA DE UM SFCR

Na configuração básica de um SFCR, simplificada, consideram-se os conjuntos formados pelo gerador fotovoltaico, o inversor e a rede elétrica local. O primeiro gera a energia em c.c. que será condicionada na unidade de potência e transformada em c.a., para ser diretamente transferida à rede elétrica. Em cada etapa de processamento da eletricidade, há perdas relacionadas a diferentes causas, como, por exemplo, aumento da temperatura de operação do gerador fotovoltaico, perdas ôhmicas no cabeamento ou perdas referentes ao processo de seguimento do ponto de máxima potência (SPMP). Essas perdas, somadas às perdas de conversão do inversor, contabilizarão na eficiência de conversão em energia elétrica total do SFCR.

A Fig. 3.1 mostra um diagrama esquemático da configuração básica de um SFCR, bem como os parâmetros envolvidos no modelamento desse tipo de aplicação.

Nota-se que o dimensionamento desse tipo de aplicação requer um conhecimento detalhado das diversas partes do SFCR. A seguir, descrevem-se os modelos representativos de cada uma das partes do sistema, bem como os parâmetros envolvidos.



Com base na Fig. 3.16, observa-se que a limitação é caracterizada pelo distanciamento do PMP do gerador fotovoltaico (deslocando a tensão no PMP - V_{mp}) como uma função da potência de entrada e/ou temperatura do inversor.

Nota-se que, quando a potência c.c. de entrada do inversor alcança um determinado valor (aprox. 1.200 W), o inversor passa a limitar a potência nesse valor. Após algum tempo de operação nessa condição, a temperatura do inversor aumenta, e um outro processo para manter a temperatura em um valor constante máximo se faz necessário.

Percebe-se que o controle para limitação da potência de operação consiste basicamente no controle da tensão de operação do gerador fotovoltaico, com o objetivo de manter a temperatura na ponte inversora, manter a potência de trabalho menor ou igual a um valor máximo predefinido ou, ainda, manter a tensão de operação dentro de valores preestabelecidos pelo fabricante do inversor. A operação do inversor em valores mais elevados de potência faz com que ele aqueça mais rapidamente, obrigando-o a mudar seu ponto de operação para evitar o seu aquecimento excessivo. Contudo, quando isso ocorre, a potência de saída é progressivamente reduzida de seu valor máximo (no caso da Fig. 3.18, 1.100 W c.a.) até atingir a condição termicamente aceitável. Logo, a instalação de geradores fotovoltaicos com potência superior à do inversor pode reduzir a produtividade e aumentar o custo da energia produzida por um SFCR, dependendo do perfil do recurso solar disponível em cada localidade.

3.8 DIMENSIONAMENTO E ESCOLHA DA TENSÃO DE TRABALHO DO GERADOR FOTOVOLTAICO

Nesta seção utiliza-se todo o modelamento abordado anteriormente, cuja implementação é realizada em um código computacional desenvolvido para o programa Matlab e apresentado na página do livro no site da editora (<http://www.ofitexto.com.br>), a fim de proporcionar ao leitor uma ferramenta de apoio e, ainda, exemplificar o dimensionamento de um SFCR. Para facilitar o entendimento, supõe-se que o módulo fotovoltaico e o inversor já tenham sido predefinidos e suas características, conhecidas, tal como descrito nas seções seguintes.

3.8.1 Módulo fotovoltaico selecionado

O módulo escolhido para ser utilizado como referência para este estudo é o IS230 (Fig. 3.19), do fabricante Isofotón, que possui 96 células em série de silício monocristalino e potência nominal de 230 Wp. A Tab. 3.4 apresenta as principais características elétricas e térmicas desse modelo de módulo fotovoltaico.



Fig. 3.19 Módulo IS230

Fonte: catálogo do fabricante Isofotón.

Instalação e Configuração de SFCRs

4

Para a implantação de um SFCR, é necessária a instalação de um gerador fotovoltaico para produzir eletricidade, ou seja, precisa-se dispor de um conjunto de módulos interconectados e suportes estruturais para a fixação arquitetônica dos módulos. Além disso, para converter a corrente contínua (c.c.) em corrente alternada (c.a.), em tensão de 220 V ou 127 V, análoga à fornecida pela rede elétrica convencional, necessitamos de um inversor de corrente contínua em alternada; inversor c.c./c.a.. Esse equipamento será responsável por converter a eletricidade produzida em c.c. pelo gerador fotovoltaico em eletricidade em c.a. possível de ser utilizada na rede elétrica convencional. O inversor é, portanto, um equipamento que deve ser instalado entre o gerador fotovoltaico e o ponto de fornecimento à rede (Fig. 4.1).

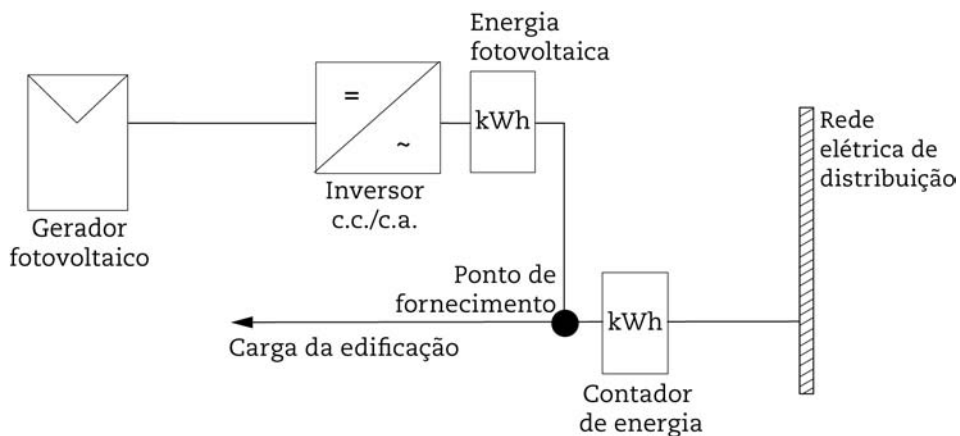


Fig. 4.1 Diagrama esquemático de uma sugestão para a conexão de um sistema fotovoltaico à rede

Para quantificar a energia fotovoltaica produzida, é necessário incluir um segundo contador de kWh (o primeiro contabiliza a energia adquirida da rede pela edificação), instalado entre o inversor e o ponto de conexão da concessionária de distribuição de eletricidade (Fig. 4.1). Esse contador permite registrar toda a energia gerada pelo sistema fotovoltaico. Se os contadores forem bidirecionais, essa modalidade de conexão permitirá descontar a energia consumida quando a produção fotovoltaica for superior à demanda da edificação.

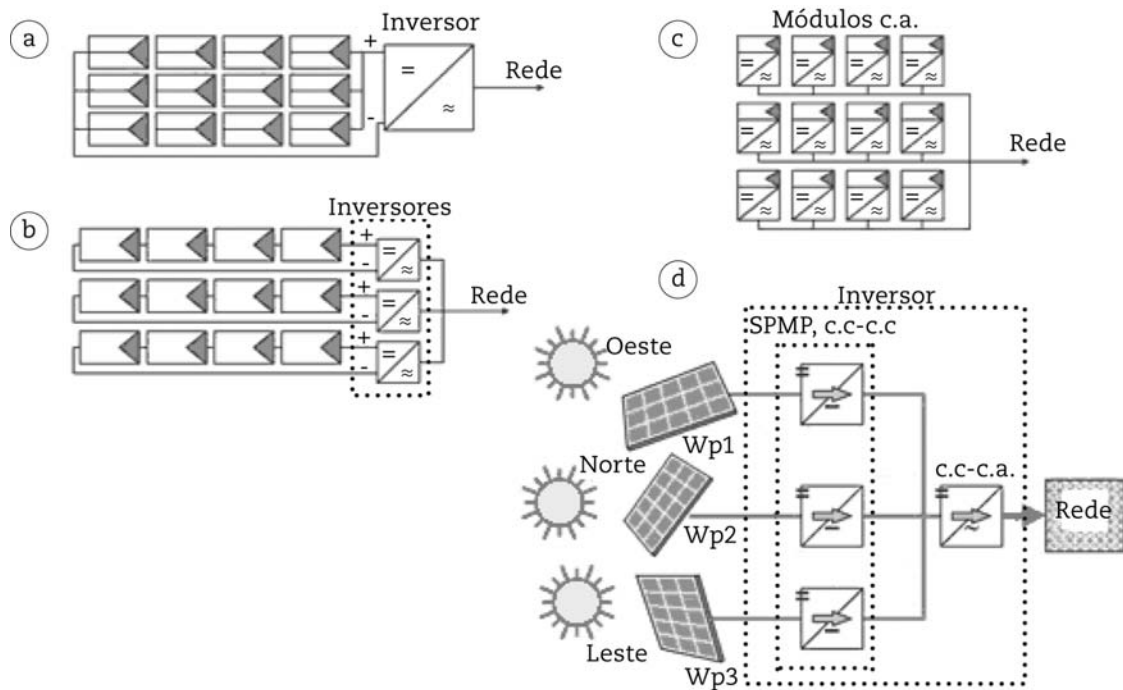


Fig. 4.3 Conceitos básicos de projeto para SFCRs: (a) sistemas com uma única combinação gerador-inversor centralizada; (b) sistemas com várias combinações gerador-inversor descentralizadas (*string configuration*); (c) módulos c.a.; (d) sistemas com várias combinações de gerador e um único inversor centralizado (*multi-string configuration*)

Fonte: modificado de Abella e Chenlo (2004).

rede elétrica possibilitassem uma série de configurações que implicaram várias formas de controle e conexão com a rede. Em consequência, surgiram várias formas de computar os fluxos para efeito de faturamento ou não.

Na atualidade, a tendência de uso da configuração baseada no conceito de *string* implica uma padronização no que se refere à combinação gerador fotovoltaico mais inversor, principalmente quando se fala nas aplicações em edificações. No entanto, a conexão e a consequente interação com a rede elétrica dependem também do tratamento dado a essa alternativa de geração de eletricidade em cada localidade específica.

As configurações e os componentes abordados na seção anterior são importantes para a definição de projetos de SFCR; porém, não se limitam à topologia do inversor, à combinação gerador-inversor ou mesmo ao tipo de módulo empregado, mas incluem os demais componentes que constituem o sistema. Para fins de análise dos fluxos de potência, os elementos básicos de um SFCR são:

- gerador fotovoltaico: responsável pela transformação da energia do Sol em energia elétrica c.c.;

Exemplos de SFCRs Instalados no Brasil

5

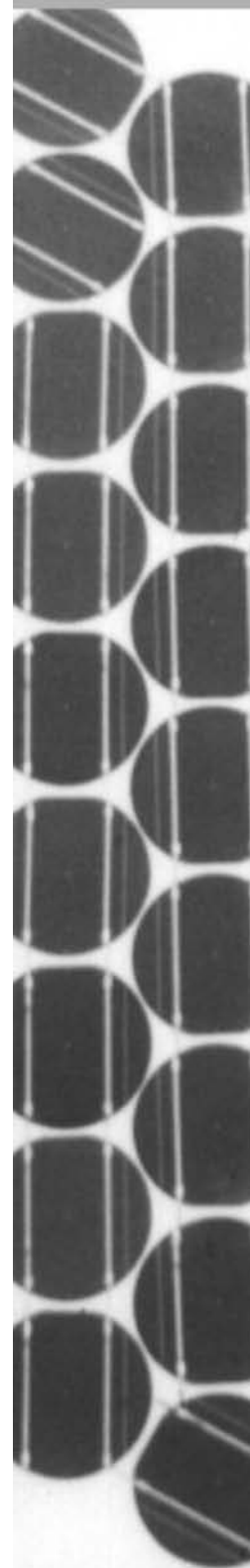
O potencial brasileiro de uso de SFCRs, evidenciado pelos primeiros projetos já realizados e pelos que estão em fase de planejamento, aliado à experiência internacional de utilização desses sistemas, expõe a necessidade de realizar ações prévias à disseminação desse tipo de instalação fotovoltaica, com o objetivo de ajudar na consolidação dessa aplicação, tornando-a uma fonte de eletricidade competitiva e sustentável.

Antes de iniciar um amplo programa de apoio à entrada desse tipo de uso da tecnologia solar fotovoltaica, é importante realizar experiências piloto que tenham o intuito de (i) conhecer o seu comportamento técnico quando exposta às condições brasileiras de operação e (ii) determinar as normas e regulamentações que garantam o desempenho e a segurança de todos os envolvidos na sua utilização.

No Brasil, a inserção da tecnologia solar fotovoltaica não está sendo muito diferente da experiência de outros países. Inicialmente, ocorreu no meio rural, em geral por iniciativas governamentais ou de concessionárias que financiam a instalação de sistemas fotovoltaicos autônomos, como os *Solar Home Systems* (SHS) ou os sistemas de bombeamento de água.

Apenas a partir da segunda metade da década de 1990 é que começaram a surgir as primeiras experiências relacionadas à conexão de sistemas fotovoltaicos à rede convencional de distribuição de eletricidade, firmando no Brasil a tendência mundial de aumento da importância dessa aplicação da tecnologia. A Tab. 5.1 apresenta um breve resumo de algumas experiências de SFCRs realizadas no país entre 1995 e 2009.

Entre os anos de 1995 e 2009, foram instalados 39 SFCRs em território brasileiro, dos quais 35 encontravam-se em operação. Destes, 15 foram implementados por universidades e centros de pesquisa, 12 foram encabeçados por concessionárias de energia elétrica, cinco foram instalados por empresas privadas ligadas à energia solar, dois foram financiados por pessoas físicas em suas residências e um foi financiado por uma organização não governamental (Benedito, 2009). A seguir, detalham-se as características de algumas dessas experiências e apresentam-se dados de produtividade para alguns SFCRs.



5.1 SFCRs INSTALADOS POR UNIVERSIDADES E CENTROS DE PESQUISA

5.1.1 As experiências da UFSC

A Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), representada pelo Laboratório de Energia Solar (LabSolar) e pelo Laboratório de Eficiência Energética em Edificações (LabEEE), vem desenvolvendo pesquisas com sistemas fotovoltaicos integrados a edificações e conectados à rede. Os grupos de pesquisa desses laboratórios instalaram três sistemas conectados à rede nas dependências do próprio *campus* da UFSC e assessoraram a instalação de diversos outros sistemas conectados, incluindo projetos de concessionárias e da iniciativa privada, como será discutido ao longo deste capítulo.

Sistema de 2 kWp no prédio da Engenharia Mecânica da UFSC

Esse projeto, financiado pela fundação Alexander von Humboldt, possui uma potência nominal de 2 kWp, instalados na face norte de um dos prédios da Faculdade de Engenharia Mecânica (onde se encontra o LabSolar) da UFSC, em Florianópolis. Instalado em setembro de 1997, esse sistema conectado à rede foi o primeiro no Brasil a ser integrado à estrutura arquitetônica do edifício. A Fig. 5.1 apresenta uma visão frontal e lateral do gerador fotovoltaico.

A instalação é composta por 68 módulos de silício amorfo dupla junção, com cobertura de vidro e sem moldura, sendo 54 opacos e 14 semitransparentes, cada um com 60 cm × 100 cm, todos do antigo fabricante Phototronics Solartechnik. Os 68 módulos foram divididos em quatro geradores, três com 16 e um com 20 módulos. Dos 20 módulos do quarto gerador, 14 são semitransparentes. A instalação conta com quatro inversores de 650 Wp da marca Würth, um para cada gerador fotovoltaico, inserindo a energia na rede a uma tensão de 220 V c.a.

O acompanhamento do comportamento do sistema é feito diariamente pelo LabSolar por meio de medições da irradiação (horizontal e no plano dos módulos), da temperatura dos módulos e do ambiente, das potências c.c. e c.a. entregues e da energia total gerada. O desempenho do sistema pode ser avaliado com os dados de produtividade anual (Y_F) disponíveis para oito anos de operação, entre 1998 e 2005, conforme mostra a Tab. 5.2.

O valor médio de Y_F é de 1.259 kWh/kWp, o que revela um fator de capacidade médio de 14%. Até



Fig. 5.1 Detalhes do gerador fotovoltaico do sistema de 2 kWp no prédio da Engenharia Mecânica da UFSC

Fonte: Rütther et al. (2006).

TAB. 5.2 Produtividade anual do sistema de 2 kWp da UFSC entre 1998 e 2005

Ano	Produtividade (kWh/kWp)
1998	1.293
1999	1.231
2000	1.320
2001	1.254
2002	1.181
2003	1.264
2004	1.250
2005	1.277
Média	1.259

Fonte: Rütther et al. (2006).

Resultados Operacionais de um SFCR

6

Até pouco tempo, as redes de distribuição eram projetadas e operadas com base em um sistema de produção de eletricidade centralizado, em que se supunha que a corrente sempre fluía da subestação para o consumidor. Com a diversificação das formas de produção de eletricidade e a possibilidade da inserção de pequenos produtores de eletricidade na matriz elétrica, as redes de distribuição de energia passam a ter uma configuração mais complexa. Com isso, torna-se importante a realização de estudos que identifiquem as influências da inserção desses pequenos produtores no planejamento e na operação da rede de distribuição.

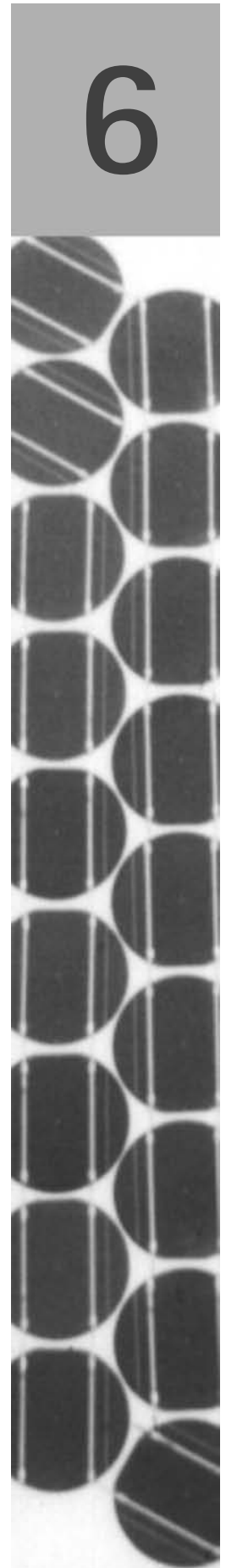
A economia de energia obtida com a instalação de SFCRs e o impacto do uso desses sistemas no transformador de distribuição têm sido foco de alguns estudos (Al-Hasan; Ghoneim; Abdullah, 2004; Jimenez; Calleja; González, 2006; Paatero; Lund, 2007), bem como o efeito do uso de SFCRs em larga escala (Faaborg, 2002; Ishikawa et al., 2002; Otani et al., 2004).

As seções a seguir apresentam as peculiaridades da contribuição energética do SFCR de 11,07 kWp do Instituto de Eletrotécnica e Energia da Universidade de São Paulo (IEE-USP). Ao se avaliar os parâmetros de qualidade da energia associados à inserção desse tipo de geração distribuída, percebe-se que a capacidade instalada do SFCR, o perfil de consumo da edificação, a qualidade da rede elétrica no ponto de conexão e a forma de conexão são características importantes a serem analisadas e consideradas caso a caso.

As informações aqui apresentadas podem ser úteis para o planejamento e o dimensionamento de unidades de geração distribuída em prédios públicos. Entre elas, estão a contribuição energética de um SFCR, os parâmetros de qualidade da energia produzida e a sua influência no funcionamento da rede elétrica local no ponto de conexão.

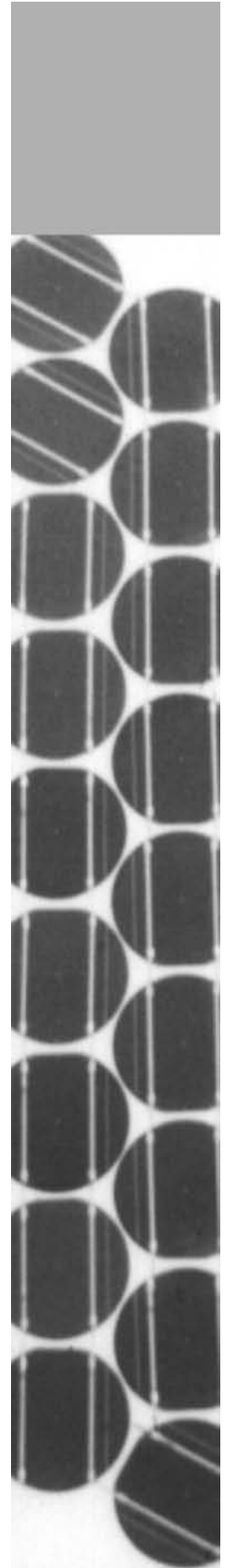
6.1 CONFIGURAÇÃO DO SFCR INSTALADO NO IEE-USP

Em funcionamento desde dezembro de 2003, o SFCR do Instituto de Eletrotécnica e Energia da Universidade de São Paulo (IEE-USP) é constituído por oito geradores fotovoltaicos instalados na fachada norte do prédio da administração, com uma inclinação de 23°, totalizando uma potência de geração de 11,07 kWp. Cada um desses geradores fotovoltaicos foi associado a um inversor de 1 kW. As saídas dos



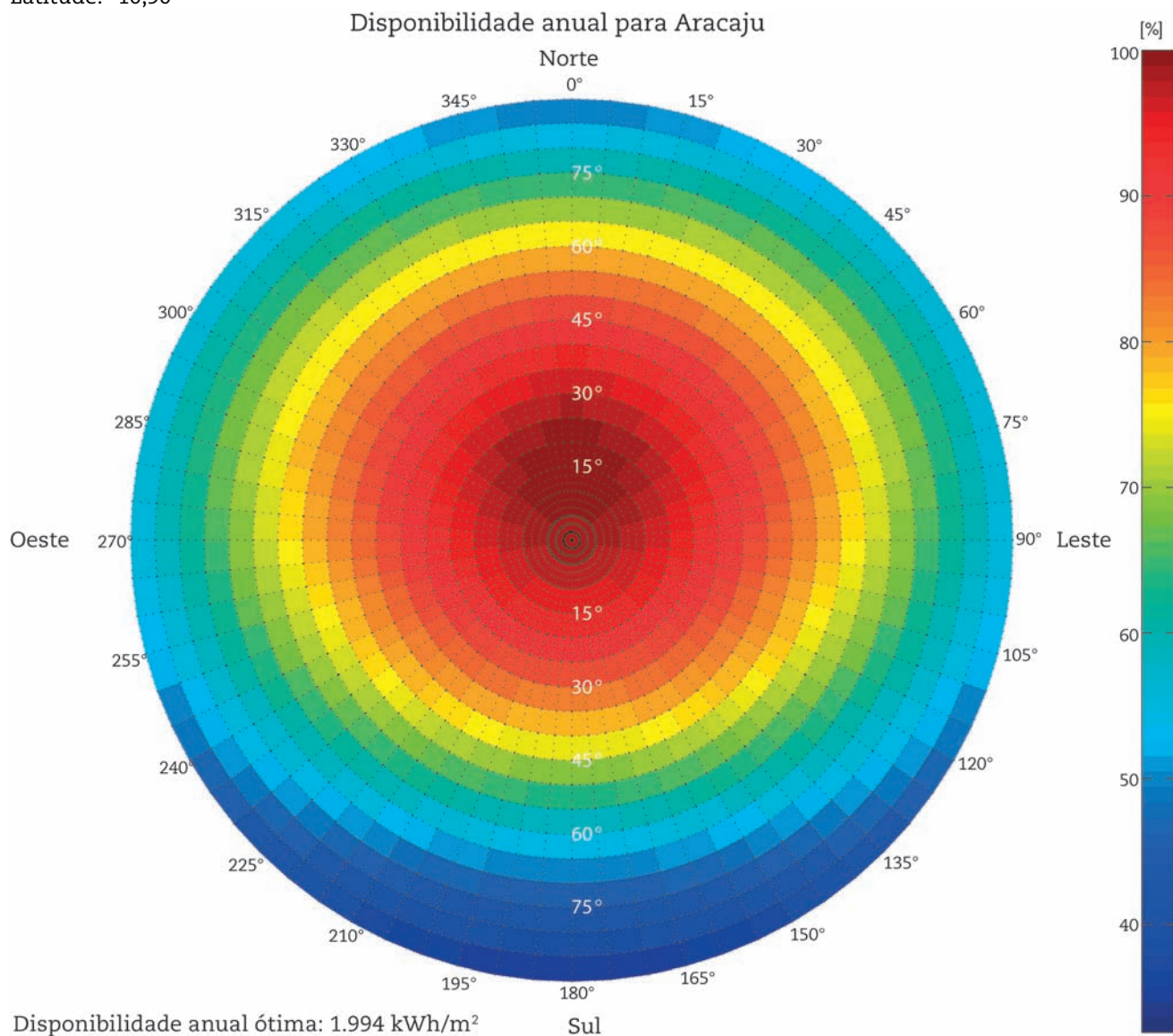
Anexo

Porcentagem de captação anual de irradiação solar, conforme os ângulos de inclinação e azimute, para capitais no Brasil e na América do Sul



Aracaju

Latitude: -10,90°



TAB. 6.1 Relação de perdas (sobre o valor máximo teórico) segundo a orientação (γ) e inclinação (β) do gerador fotovoltaico para a cidade de Aracaju

FATORES DE CORREÇÃO SEGUNDO UMA INCLINAÇÃO E ORIENTAÇÃO DADAS (Disponibilidade anual ótima = 1.994 kWh/m ²)										
$\gamma \backslash \beta$	0°	10°	20°	30°	40°	50°	60°	70°	80°	90°
0°	0,985	1,000	0,993	0,962	0,910	0,838	0,749	0,648	0,546	0,461
±25°	0,985	0,996	0,986	0,954	0,902	0,834	0,751	0,659	0,565	0,475
±50°	0,985	0,991	0,976	0,943	0,893	0,828	0,754	0,673	0,590	0,510
±90°	0,985	0,973	0,946	0,904	0,852	0,792	0,726	0,658	0,590	0,521