

# Energia Solar e Eólica

Paulo Jayme Pereira Abdala  
(Organizador)

 **Atena**  
Editora

Ano 2019

**Paulo Jayme Pereira Abdala**  
(Organizador)

# Energia Solar e Eólica

Atena Editora  
2019

2019 by Atena Editora

Copyright © da Atena Editora

**Editora Chefe:** Profª Drª Antonella Carvalho de Oliveira

**Diagramação e Edição de Arte:** Geraldo Alves e Karine de Lima

**Revisão:** Os autores

#### Conselho Editorial

Prof. Dr. Alan Mario Zuffo – Universidade Federal de Mato Grosso do Sul  
Prof. Dr. Álvaro Augusto de Borba Barreto – Universidade Federal de Pelotas  
Prof. Dr. Antonio Carlos Frasson – Universidade Tecnológica Federal do Paraná  
Prof. Dr. Antonio Isidro-Filho – Universidade de Brasília  
Profª Drª Cristina Gaio – Universidade de Lisboa  
Prof. Dr. Constantino Ribeiro de Oliveira Junior – Universidade Estadual de Ponta Grossa  
Profª Drª Daiane Garabeli Trojan – Universidade Norte do Paraná  
Prof. Dr. Darllan Collins da Cunha e Silva – Universidade Estadual Paulista  
Profª Drª Deusilene Souza Vieira Dall’Acqua – Universidade Federal de Rondônia  
Prof. Dr. Eloi Rufato Junior – Universidade Tecnológica Federal do Paraná  
Prof. Dr. Fábio Steiner – Universidade Estadual de Mato Grosso do Sul  
Prof. Dr. Gianfábio Pimentel Franco – Universidade Federal de Santa Maria  
Prof. Dr. Gilmei Fleck – Universidade Estadual do Oeste do Paraná  
Profª Drª Girlene Santos de Souza – Universidade Federal do Recôncavo da Bahia  
Profª Drª Ivone Goulart Lopes – Istituto Internazionele delle Figlie de Maria Ausiliatrice  
Profª Drª Juliane Sant’Ana Bento – Universidade Federal do Rio Grande do Sul  
Prof. Dr. Julio Candido de Meirelles Junior – Universidade Federal Fluminense  
Prof. Dr. Jorge González Aguilera – Universidade Federal de Mato Grosso do Sul  
Profª Drª Lina Maria Gonçalves – Universidade Federal do Tocantins  
Profª Drª Natiéli Piovesan – Instituto Federal do Rio Grande do Norte  
Profª Drª Paola Andressa Scortegagna – Universidade Estadual de Ponta Grossa  
Profª Drª Raissa Rachel Salustriano da Silva Matos – Universidade Federal do Maranhão  
Prof. Dr. Ronilson Freitas de Souza – Universidade do Estado do Pará  
Prof. Dr. Takeshy Tachizawa – Faculdade de Campo Limpo Paulista  
Prof. Dr. Urandi João Rodrigues Junior – Universidade Federal do Oeste do Pará  
Prof. Dr. Valdemar Antonio Paffaro Junior – Universidade Federal de Alfenas  
Profª Drª Vanessa Bordin Viera – Universidade Federal de Campina Grande  
Profª Drª Vanessa Lima Gonçalves – Universidade Estadual de Ponta Grossa  
Prof. Dr. Willian Douglas Guilherme – Universidade Federal do Tocantins

#### Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) (eDOC BRASIL, Belo Horizonte/MG)

E56 Energia solar e eólica [recurso eletrônico] / Organizador Paulo Jayme Pereira Abdala. – Ponta Grossa (PR): Atena Editora, 2019. – (Energia Solar e Eólica; v. 1)

Formato: PDF

Requisitos de sistema: Adobe Acrobat Reader

Modo de acesso: World Wide Web

Inclui bibliografia

ISBN 978-85-7247-066-7

DOI 10.22533/at.ed.667192201

1. Energia – Fontes alternativas. 2. Energia eólica. 3. Energia solar. I. Abdala, Paulo Jayme Pereira.

CDD 621.042

**Elaborado por Maurício Amormino Júnior – CRB6/2422**

O conteúdo dos artigos e seus dados em sua forma, correção e confiabilidade são de responsabilidade exclusiva dos autores.

2019

Permitido o download da obra e o compartilhamento desde que sejam atribuídos créditos aos autores, mas sem a possibilidade de alterá-la de nenhuma forma ou utilizá-la para fins comerciais.

[www.atenaeditora.com.br](http://www.atenaeditora.com.br)

## APRESENTAÇÃO

As chamadas energias renováveis, também conhecidas como energias alternativas ou ainda energias limpas são três denominações possíveis para qualquer forma de energia obtida por meio de fontes renováveis, e que não produzem grandes impactos ambientais negativos. Atualmente, com a grande preocupação mundial em compensar as emissões de CO<sub>2</sub>, o consumo deste tipo de energia tem sido o foco de governos e empresas em todo globo.

Neste sentido, o Brasil possui uma matriz energética bastante limpa, onde predomina o uso de hidrelétricas, apesar do crescimento do uso de termelétricas, as quais são abastecidas por combustível fóssil. No Brasil, o setor energético é responsável por grande parte das emissões de CO<sub>2</sub>, ficando atrás somente do setor agrícola que reapresenta a maior contribuição para o efeito estufa brasileiro.

A energia proveniente do sol é a alternativa renovável mais promissora para o futuro e, por este motivo tem recebido maior atenção e também mais investimentos. A radiação solar gratuita fornecida pelo sol pode ser captada por placas fotovoltaicas e ser posteriormente convertida em energia elétrica. Esses painéis usualmente estão localizados em construções, como indústrias e casas, o que proporciona impactos ambientais mínimos. Esse tipo de energia é uma das mais fáceis de ser implantada em larga escala. Além de beneficiar os consumidores com a redução na conta de energia elétrica reduzem as emissões de CO<sub>2</sub>.

Com relação à energia eólica, o Brasil faz parte do grupo dos dez países mais importantes do mundo para investimentos no setor. As emissões de CO<sub>2</sub> requeridas para operar esta fonte de energia alternativa são extremamente baixas e é uma opção atrativa para o país não ser dependente apenas das hidrelétricas. Os investimentos em parques eólicos vem se tornando uma ótima opção para neutralização de carbono emitidos por empresas, indústrias e etc.

Neste contexto, este EBOOK apresenta uma importante contribuição no sentido de atualizar os profissionais que trabalham no setor energético com informações extremamente relevantes. Ele está dividido em dois volumes contendo artigos práticos e teóricos importantes para quem deseja informações sobre o estado da arte acerca do assunto.

Paulo Jayme Pereira Abdala

## SUMÁRIO

<b>CAPÍTULO 1</b> .....	<b>10</b>
UMA REVISÃO SOBRE AS TECNOLOGIAS FOTOVOLTAICAS ATUAIS	
Alexandre José Bühler Ivan Jorge Gabe Fernando Hoefling dos Santos	
<b>DOI 10.22533/at.ed.6671922011</b>	
<b>CAPÍTULO 2</b> .....	<b>26</b>
VALIDAÇÃO DE MODELOS DE COMPORTAMENTO TÉRMICO DE PAINÉIS FOTOVOLTAICOS PARA O SEMIÁRIDO BRASILEIRO	
Bruna de Oliveira Busson Pedro Henrique Fonteles Dias Ivonne Montero Dupont Pedro Hassan Martins Campos Paulo Cesar Marques de Carvalho Edylla Andressa Queiroz Barroso	
<b>DOI 10.22533/at.ed.6671922012</b>	
<b>CAPÍTULO 3</b> .....	<b>41</b>
A GERAÇÃO SOLAR DE CALOR DE PROCESSOS INDUSTRIAIS NA PRODUÇÃO DE GESSO BETA DO POLO GESSEIRO DO ARARIPE	
André Vitor de Albuquerque Santos Kenia Carvalho Mendes	
<b>DOI 10.22533/at.ed.6671922013</b>	
<b>CAPÍTULO 4</b> .....	<b>58</b>
A UTILIZAÇÃO DO SILÍCIO NACIONAL PARA A FABRICAÇÃO DE PLACAS SOLARES: UMA REFLEXÃO DAS DIFICULDADES TECNOLÓGICA E FINANCEIRA	
Felipe Souza Davies Gustavo Luiz Frisso Matheus Vinícius Brandão	
<b>DOI 10.22533/at.ed.6671922014</b>	
<b>CAPÍTULO 5</b> .....	<b>72</b>
AEROPORTO DE VITÓRIA/ES: ESTUDO DO POTENCIAL DE GERAÇÃO DE ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA	
Ana Luiza Guimarães Valory Sidney Schaeffer Warley Teixeira Guimarães	
<b>DOI 10.22533/at.ed.6671922015</b>	
<b>CAPÍTULO 6</b> .....	<b>87</b>
ANÁLISE ENERGÉTICA E EXERGÉTICA DE MÓDULOS FOTOVOLTAICOS DE SILÍCIO MONOCRISTALINO E POLICRISTALINO	
Suellen Caroline Silva Costa Janaína de Oliveira Castro Silva Cristiana Brasil Maia Antônia Sônia Alves Cardoso Diniz	
<b>DOI 10.22533/at.ed.6671922016</b>	

<b>CAPÍTULO 7 .....</b>	<b>1043</b>
ANÁLISE HARMÔNICA NOS INVERSORES FOTOVOLTAICOS DE UMA MICROGERAÇÃO FOTOVOLTAICA	
Alessandro Bogila Joel Rocha Pinto Thales Prini Franchi Thiago Prini Franchi	
<b>DOI 10.22533/at.ed.6671922017</b>	
<b>CAPÍTULO 8 .....</b>	<b>120</b>
ANÁLISE TÉCNICA E ECONÔMICA DA IMPLEMENTAÇÃO DE UM SISTEMA FOTOVOLTAICO NO MODELO DE UMA ÁRVORE NA FACULDADE DE TECNOLOGIA DA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA	
Bárbara de Luca De Franciscis Gouveia	
<b>DOI 10.22533/at.ed.6671922018</b>	
<b>CAPÍTULO 9 .....</b>	<b>139</b>
ANÁLISE FINANCEIRA DE SISTEMAS DE MICROGERAÇÃO FOTOVOLTAICA FINANCIADOS EM PALMAS - TO	
Brunno Henrique Brito Maria Lúcia Feitosa Gomes de Melo	
<b>DOI 10.22533/at.ed.6671922019</b>	
<b>CAPÍTULO 10 .....</b>	<b>152</b>
APLICAÇÃO DE SISTEMA FOTOVOLTAICO EM ESCOLAS MUNICIPAIS DA CIDADE DE CRUZ ALTA/RS: ANÁLISE DE IMPLANTAÇÃO E POTENCIAL DE ENERGIA GERADA	
Alessandra Haas Franciele Rohr Ísis Portolan dos Santos	
<b>DOI 10.22533/at.ed.66719220110</b>	
<b>CAPÍTULO 11 .....</b>	<b>165</b>
APLICAÇÃO DO ALGORITMO DE RASTREAMENTO DO PONTO DE MÁXIMA POTÊNCIA (MPPT) EM MÓDULOS FOTOVOLTAICOS	
Augusto Hafemeister João Batista Dias Leonel Augusto Calliari Poltosi	
<b>DOI 10.22533/at.ed.66719220111</b>	
<b>CAPÍTULO 12 .....</b>	<b>181</b>
AR CONDICIONADO SOLAR – CICLO DE ADSORÇÃO	
Rafael de Oliveira Barreto Pollyanne de Oliveira Carvalho Malaquias Matheus de Mendonça Herzog Luciana Carvalho Penha Lucio Cesar de Souza Mesquita Elizabeth Marques Duarte Pereira	
<b>DOI 10.22533/at.ed.66719220112</b>	
<b>CAPÍTULO 13 .....</b>	<b>194</b>
AVALIAÇÃO DA EFICIÊNCIA DO COLETOR SOLAR PLANO ACOPLADO EM SECADOR HÍBRIDO	
Raphaela Soares da Silva Camelo	

Ícaro da Silva Misquita  
Thais Andrade de Paula Lovisi  
Lizandra da Conceição Teixeira Gomes de Oliveira  
Juliana Lobo Paes  
Camila Lucas Guimarães

**DOI 10.22533/at.ed.66719220113**

**CAPÍTULO 14 ..... 212**

AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO DE NOVO PROTÓTIPO DE FOTOBIORREATOR NÃO TRANSPARENTE PARA CULTIVO DE MICROALGAS COM ILUMINAÇÃO INTERNA ATRAVÉS DE POFS QUE RECEBEM A LUZ DE LENTES MONTADAS EM SISTEMA DE RASTREAMENTO SOLAR

Gisel Chenard Díaz  
Yordanka Reyes Cruz  
Rene Gonzalez Carliz  
Fabio Toshio Dino  
Maurílio Novais da Paixão  
Donato A. Gomes Aranda  
Marina Galindo Chenard

**DOI 10.22533/at.ed.66719220114**

**CAPÍTULO 15 ..... 225**

AVALIAÇÃO DE WEBSITES BRASILEIROS PARA SIMULAÇÃO DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS CONECTADOS À REDE: PARÂMETROS DE ENTRADA E RESULTADOS

Marina Calcagnotto Mascarello  
Letícia Jenisch Rodrigues

**DOI 10.22533/at.ed.66719220115**

**CAPÍTULO 16 ..... 241**

AVALIAÇÕES DE CUSTO E DESEMPENHO DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS TIPO SIGFI COM DIFERENTES PERÍODOS DE AUTONOMIA

Marta Maria de Almeida Olivieri  
Leonardo dos Santos Reis Vieira  
Marco Antonio Galdino  
Márcia da Rocha Ramos

**DOI 10.22533/at.ed.66719220116**

**CAPÍTULO 17 ..... 257**

AVALIAÇÃO DO POTENCIAL EÓLICO CONSIDERANDO O EFEITO DA ESTEIRA AERODINÂMICA DE TURBINAS ATRAVÉS DO MODELO DO DISCO ATUADOR

Luiz Fernando Pezzi  
Adriane Prisco Petry

**DOI 10.22533/at.ed.66719220117**

**CAPÍTULO 18 ..... 272**

COMPARAÇÃO DE RESULTADOS DE GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA ATRAVÉS DE DIFERENTES BASES DE DADOS DE IRRADIAÇÃO - ESTUDO DE CASO EM CURITIBA

Danilo Carvalho de Gouveia  
Jeanne Moro  
Muza Iwanow  
Rebecca Avença  
Jair Urbanetz Junior

**DOI 10.22533/at.ed.66719220118**

<b>CAPÍTULO 19</b> .....	<b>284</b>
DESENVOLVIMENTO DE SUPERFÍCIES SUPERHIDROFÓBICAS COM EFEITO AUTOLIMPANTE PARA APLICAÇÕES EM MÓDULOS FOTOVOLTAICOS	
Lucélio Oliveira Lemos	
Magnum Augusto Moraes Lopes de Jesus	
Aline Geice Vitor Silva	
Angela de Mello Ferreira	
<b>DOI 10.22533/at.ed.66719220119</b>	
<b>CAPÍTULO 20</b> .....	<b>297</b>
DESENVOLVIMENTO DE UM APLICATIVO PARA DIMENSIONAMENTO DE SISTEMAS DE GERAÇÃO FOTOVOLTAICA	
Stéphane Rodrigues da Silva	
Érica Tiemi Anabuki	
Luis Cláudio Gambôa Lopes	
<b>DOI 10.22533/at.ed.66719220120</b>	
<b>CAPÍTULO 21</b> .....	<b>312</b>
DO PETRÓLEO À ENERGIA FOTOVOLTAICA: A INSERÇÃO DO BRASIL NESTE NOVO MERCADO	
Emilia Ribeiro Gobbo	
Maria Antonia Tavares Fernandes da Silva	
Rosemarie Bröker Bone	
<b>DOI 10.22533/at.ed.66719220121</b>	
<b>CAPÍTULO 22</b> .....	<b>330</b>
EFEITO DO SOMBREAMENTO EM MÓDULOS FOTOVOLTAICOS	
José Rafael Cápua Proveti	
Daniel José Custódio Coura	
Carlos Roberto Coutinho	
Adriano Fazolo Nardoto	
<b>DOI 10.22533/at.ed.66719220122</b>	
<b>CAPÍTULO 23</b> .....	<b>342</b>
ESTIMATIVA DA PRODUÇÃO ENERGÉTICA E DE DESEMPENHO DE UM SISTEMA FOTOVOLTAICO INTEGRADO AO COMPLEXO AQUÁTICO DA UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA	
Helena Flávia Napolini	
Gustavo Xavier de Andrade Pinto	
Julio Boing Neto	
Ricardo Rütther	
<b>DOI 10.22533/at.ed.66719220123</b>	
<b>CAPÍTULO 24</b> .....	<b>354</b>
ESTUDO DA SECAGEM INTERMITENTE DA MANGA UTILIZANDO SECADOR HÍBRIDO SOLAR-ELÉTRICO	
Camila Lucas Guimarães	
Juliana Lobo Paes	
Raphaela Soares da Silva Camelo	
Madelon Rodrigues Sá Braz	
Ícaro da Silva Misquita	
Lizandra da Conceição Teixeira Gomes de Oliveira	
<b>DOI 10.22533/at.ed.66719220124</b>	

<b>CAPÍTULO 25</b> .....	<b>367</b>
ANÁLISE PRÉVIA DO VALOR DA DEPENDÊNCIA DO SOLO PARA AS ATIVIDADES AGRÍCOLAS COM A POSSÍVEL IMPLANTAÇÃO DO PARQUE EÓLICO DA SERRA, EM SÃO FRANCISCO DE PAULA, RS	
Antonio Robson Oliveira da Rosa Leonardo Beroldt Rafael Haag	
<b>DOI 10.22533/at.ed.66719220125</b>	
<b>CAPÍTULO 26</b> .....	<b>379</b>
APLICAÇÃO DE UM DVR EM AEROGERADORES SCIG E DFIG PARA AUMENTO DE SUORTABILIDADE FRENTE A AFUNDAMENTOS DE TENSÃO	
Edmar Ferreira Cota Renato Amorim Torres Victor Flores Mendes	
<b>DOI 10.22533/at.ed.66719220126</b>	
<b>CAPÍTULO 27</b> .....	<b>398</b>
AVALIAÇÃO DO POTENCIAL EÓLICO DE UMA REGIÃO COM TOPOGRAFIA COMPLEXA UTILIZANDO DINÂMICA DOS FLUIDOS COMPUTACIONAL	
William Corrêa Radünz Alexandre Vagtinski de Paula Adriane Prisco Petry	
<b>DOI 10.22533/at.ed.66719220127</b>	
<b>CAPÍTULO 28</b> .....	<b>410</b>
EDIFICAÇÃO DE ENERGIA POSITIVA: ANÁLISE DE GERAÇÃO E CONSUMO DE ENERGIA ELÉTRICA NO ESCRITÓRIO VERDE DA UTFPR EM CURITIBA	
Larissa Barbosa Krasnhak Elis Almeida Medeiros de Mello Jair Urbanetz Junior Eloy Casagrande Junior	
<b>DOI 10.22533/at.ed.66719220128</b>	
<b>CAPÍTULO 29</b> .....	<b>422</b>
ESTAÇÃO METEOROLÓGICA WIFI DE BAIXO CUSTO BASEADO EM THINGSPEAK	
Renan Tavares Figueiredo Odélsia Leonor Sanchez de Alsina Diego Lopes Coriolano Eurípes Lopes de Almeida Neto Ladjane Coelho dos Santos Iraí Tadeu Ferreira de Resende Ana Claudia de Melo Oliveira	
<b>DOI 10.22533/at.ed.66719220129</b>	
<b>SOBRE O ORGANIZADOR</b> .....	<b>431</b>

## EFEITO DO SOMBREAMENTO EM MÓDULOS FOTOVOLTAICOS

### **Carlos Roberto Coutinho**

Instituto Federal do Espírito Santo, Coordenadoria  
de Eletrotécnica  
São Mateus - ES

### **Adriano Fazolo Nardoto**

Instituto Federal do Espírito Santo, Coordenadoria  
de Eletrotécnica  
São Mateus - ES

### **José Rafael Cápuca Proveti**

Universidade Federal do Espírito Santo,  
Departamento de Ciências Naturais  
São Mateus - ES

### **Daniel José Custódio Coura**

Universidade Federal do Espírito Santo,  
Departamento Computação e Eletrônica  
São Mateus - ES

**RESUMO:** O presente trabalho aborda os efeitos provocados em sistemas de microgeração devido ao sombreamento de módulos fotovoltaicos. Embora os sistemas fotovoltaicos sejam uma alternativa na geração de eletricidade, se deve levar em consideração as estruturas próximas à instalação. Estruturas ao entorno de módulos fotovoltaicos provocam regiões de sombra que podem afetar seu funcionamento. A forma como as células fotovoltaicas são interligadas, propicia o mau funcionamento de parte considerável dos módulos fotovoltaicos, reduzindo assim a potência gerada pelo

sistema, sob o sombreamento de poucas células. Através de um circuito eletrônico que varia a carga aplicada ao módulo fotovoltaico, e a coleta de dados como tensão e corrente elétrica, são traçadas as curvas características de módulos fotovoltaicos, sob diferentes níveis de sombreamento. Estas curvas são utilizadas na comparação entre os diferentes níveis e na verificação dos efeitos provocados pelo sombreamento. Ao final, o trabalho propõe a utilização de diodos de bypass como possível solução para instalações onde os efeitos provocados pelo sombreamento são eminentes. **PALAVRAS-CHAVE:** Módulo fotovoltaico, sombreamento, célula fotovoltaica.

**ABSTRACT:** This paper discusses the effects caused in microgeneration systems due to shading of photovoltaic modules. Although photovoltaic systems are an alternative for power generation, one should take into consideration the next to install structures. The structures around photovoltaic modules cause shadow regions that may affect its operation. The way solar cells are interconnected, provides the malfunction of a considerable part of the photovoltaic modules, thus reducing the power generated by the system, under the shade of a few cells. Through an electronic circuit that varies the load applied to the photovoltaic module, and collecting data as voltage and

electric current, the characteristic curves of photovoltaic modules under different levels of shading are drawn. These curves are used in the comparison between the different levels and verification of the effects caused by shading. Finally, the paper proposes the use of bypass diodes as a possible solution for installations where the effects caused by shading are eminent.

**KEYWORDS:** Photovoltaic module, shading, photovoltaic cell.

## 1 | INTRODUÇÃO

Preocupada com melhores condições para o desenvolvimento sustentável do setor elétrico brasileiro, bem como o aproveitamento adequado dos recursos naturais e utilização eficiente das redes elétricas, a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) aprovou em abril de 2012 a resolução normativa número 482, que estabelece as condições de acesso à micro e minigeração de energia elétrica (ANEEL, 2012). Com esta resolução, qualquer consumidor do sistema elétrico, além de comprar, pode gerar parte ou toda energia elétrica que consome, e ainda fornecer o excedente para a concessionária podendo ser compensado por isso. Este tipo de geração, também chamada de geração distribuída, apresenta como grande vantagem o fato de a carga estar mais próximo, ou dentro da unidade geradora, reduzindo as perdas e possibilitando melhor qualidade no serviço. Segundo (Moreira, 2012) o conceito de microgeração tem sido objeto de estudo por vários autores, tendo sido definida como sendo a produção de calor ou energia em pequena escala quando comparada com as centrais termoelétricas típicas, normalmente variando de alguns kW até algumas dezenas de MW.

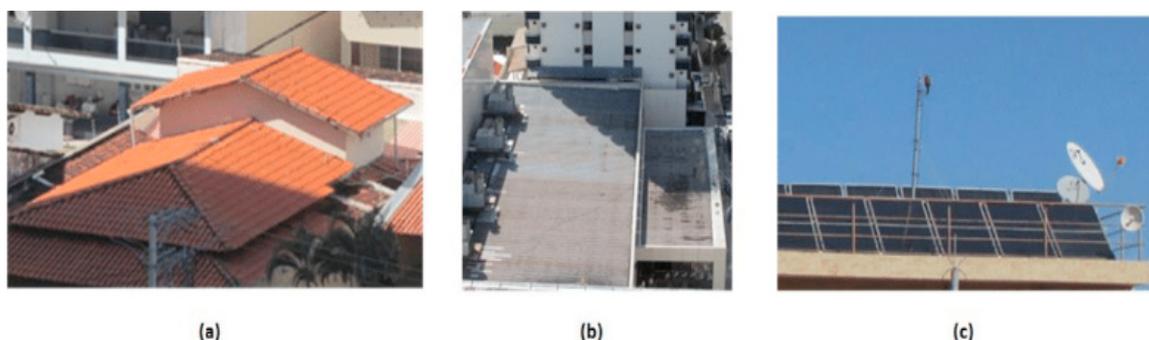
A diferença básica entre microgeração e minigeração, segundo (ANEEL, 2012), é a potência que cada central pode produzir, menor ou igual a 100 kW e de 100 a 1 MW respectivamente. Este tipo de geração já é amplamente utilizado em países europeus, como Alemanha e Espanha, porém, no Brasil ainda caminha a passos curtos.

Em uma unidade de microgeração, a energia elétrica pode ser gerada pela energia solar, por meio de painéis fotovoltaicos. Esta energia gerada é interligada a um inversor de frequência, transformando-a de contínua para alternada, para que possa alimentar as cargas instaladas na residência (ANEEL, 2014). Caso a potência demandada nesta instalação seja menor que a consumida, este excedente pode ser cedido à concessionária, ficando o consumidor com os créditos da energia fornecida. Nos períodos em que a geração não consegue suprir a potência demandada, a instalação se utiliza da energia da rede de distribuição e é compensada pelos períodos em que forneceu. Nesta instalação se faz necessário ainda um medidor capaz de contabilizar a quantidade de energia fornecida e a consumida, para que ocorra uma compensação àquela que mais forneceu energia, a concessionária ou residência (Moreira, 2012).

Vislumbrando uma forma de gerar energia de maneira limpa e sustentável, e ainda, diminuir os custos domiciliares devido aos constantes aumentos nas tarifas de energia elétrica, os consumidores estão cada vez mais interessados em transformar suas residências em uma unidade de micro, ou até mesmo minigeração através da conversão da energia solar em energia elétrica.

## 2 | SOMBREAMENTO DE MÓDULOS FOTOVOLTAICOS

Um grande problema encontrado na produção de energia elétrica através da radiação solar é, que devido às construções ao entorno da unidade de consumo, o período em que os painéis ficam expostos à radiação se torna menor. Edifícios, torres de comunicação e outras estruturas acabam interferindo na captação de radiação, provocando áreas de sombra no equipamento fotovoltaico. A Fig. 1 mostra algumas situações de sombreamento, que podem afetar a produção de energia elétrica.



**Figura 1** - Exemplos de sombreamento

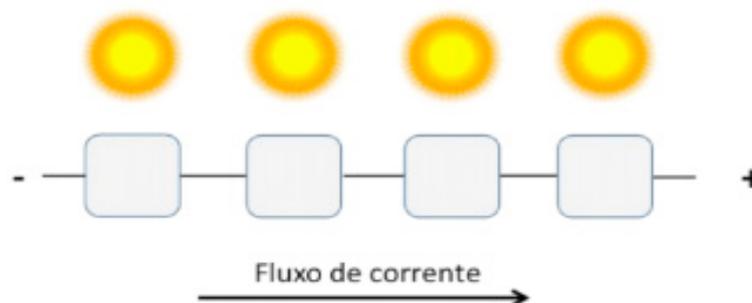
Fonte: autor.

No caso das Figs. 1(a) e 1(b), a sombra provocada pela estrutura vizinha pode interromper totalmente a captação de radiação solar em um módulo ali instalado. Este tipo de sombreamento, chamado de sombreamento total, faz com que este módulo deixe de fornecer energia, e, dependendo do arranjo montado, pode interferir em todo o sistema de geração fotovoltaica. A Fig. 1(c) ilustra um caso de sombreamento parcial, onde a sombra sobre algumas células pode fazer com que o módulo deixe de fornecer energia.

Uma maneira de minimizar as perdas nos painéis fotovoltaicos por sombreamento é a utilização de diodos de *bypass*. Estes dispositivos tem a função de isolar as células ou painéis afetados pelo sombreamento, impedindo que todo o sistema de geração de energia seja afetado.

## 2.1 Efeito do sombreamento no módulo fotovoltaico

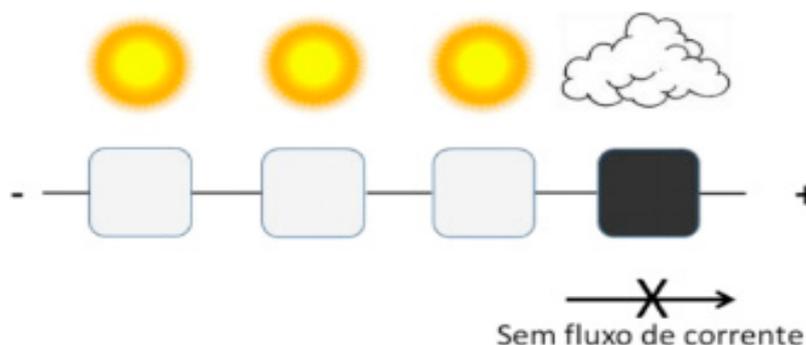
Um módulo fotovoltaico consiste em um arranjo de células fotovoltaicas ligadas em série e paralelo. A ligação série é feita para que se alcance um nível de tensão desejado, enquanto a ligação paralela aumenta a corrente elétrica fornecida (Hecktheuer, 2001). A Fig. 2 ilustra a ligação em série de quatro células fotovoltaicas, bem como o fluxo de corrente nestas quando há a presença de radiação solar.



**Figura 2** - Ligação série de células fotovoltaicas

Fonte: adaptado de (Villalva & Gazoli, 2012).

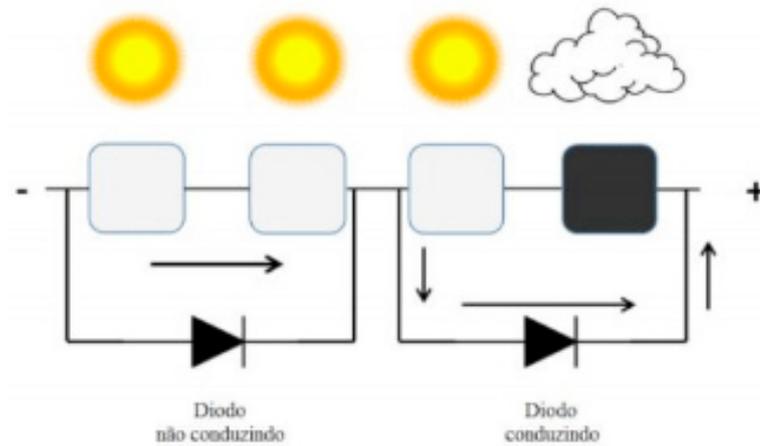
Segundo (Resende, 2004), as células fotovoltaicas são fotodiodos, que, sob a presença da radiação solar, fornecem corrente elétrica para um circuito. O grande problema ao serem ligadas em série, se dá ao fato de que se uma das células não mais receber a radiação solar, ela deixa de conduzir, impedindo que todo o arranjo forneça corrente elétrica ao circuito (CRESESB, 2008) conforme ilustra a Fig. 3.



**Figura 3** - Ligação em série de células fotovoltaicas com sombreamento.

Fonte: adaptado de (Villalva & Gazoli, 2012).

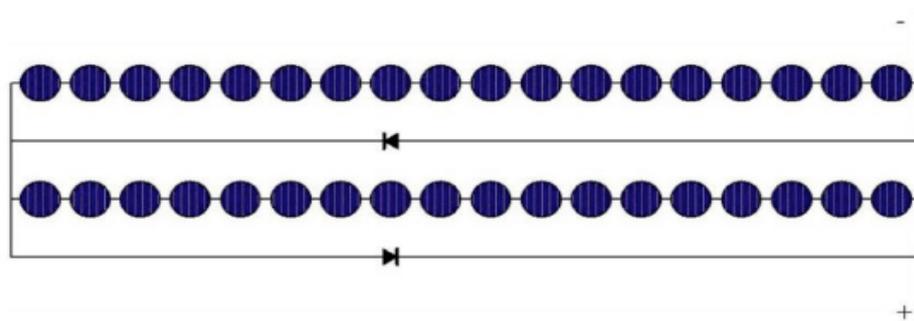
Uma possível solução para este problema é a inserção de um diodo em paralelo com uma célula, ou um arranjo de células, para que este desvie a corrente da célula sombreada. Este diodo, também chamado de diodo de *bypass* é responsável em não permitir que todo o módulo seja afetado pelo sombreamento de uma única célula, além de proteger o módulo contra tensões reversas muito altas que poderiam causar o aparecimento de pontos quentes com consequente deterioração do módulo (Hecktheuer, 2001). A Fig. 4 ilustra o funcionamento do diodo de *bypass*.



**Figura 4** - Células fotovoltaicas com diodo de *bypass*.

Fonte: adaptado de (Villalva & Gazoli, 2012).

Os módulos fotovoltaicos comercializados são formados por conjuntos de células fotovoltaicas interligadas em série (Carvalho, 2013), logo, estão sujeitos ao problema do sombreamento. Para amenizar os efeitos, são interligados alguns diodos de *bypass* a grupos de células.



**Figura 5** - Ligação de diodos de *bypass* em módulos fotovoltaicos.

Fonte: (CRESESB, 2008).

A Fig. 5 ilustra a ligação dos diodos de *bypass* em um módulo fotovoltaico, onde cada um dos diodos protege um grupo de dezoito células. Caso ocorra o sombreamento em uma célula, todo o grupo ao qual está inserida será afetado, entrando em funcionamento o diodo que cria um desvio para a corrente gerada no módulo. Quando o sombreamento atinge células de grupos distintos, os dois diodos entram em funcionamento, e embora o módulo deixe de fornecer potência, evitará danos (Hecktheuer, 2001).

O objetivo deste trabalho é estudar os efeitos do sombreamento em módulos fotovoltaicos. O estudo se baseia na comparação da capacidade de geração de energia de módulos fotovoltaicos sob diferentes níveis de sombreamento. Além dos efeitos do sombreamento, verificar também sua minimização através dos diodos de *bypass*.

### 3 | METODOLOGIA

A quantidade de radiação solar incidente sobre um módulo fotovoltaico influencia diretamente na quantidade de energia elétrica produzida. Assim, quando uma parte deste módulo deixa de ser iluminada, ou sombreada, ela deixa de fornecer potência à carga.

Com o objetivo de verificar este fenômeno, este trabalho realiza comparações com painéis sombreados e não sombreados, e compara a potência gerada em ambos os casos. A forma como é feita a comparação e as ferramentas utilizadas são descritas nos tópicos a seguir

#### 3.1 Coleta de dados

Segundo (Gasparin, 2009), a curva corrente versus tensão (I-V) descreve o comportamento da corrente em função da tensão em uma célula, módulo ou arranjo fotovoltaico. A curva descreve como estas grandezas variam de acordo com a variação da carga conectada, estando diretamente ligada à irradiância, e inversamente à temperatura. Da mesma forma, a curva de potência, potência versus tensão (P-V) caracteriza a variação da potência fornecida pelo sistema fotovoltaico.

Como o objetivo do presente trabalho é verificar o efeito do sombreamento, a análise das curvas características será utilizada na comparação da resposta dos módulos fotovoltaicos ao sombreamento. Desta forma, utiliza um sistema eletrônico que varia a carga conectada ao módulo e coleta dados de tensão e corrente. Este sistema, através de transistores de junção bipolar (BJT), simula uma carga que parte de valores próximos a um curto-circuito, e atinge o valor máximo de um circuito aberto. Os dados coletados são enviados a um software matemático, que é responsável em plotar as curvas.

Devido à influência da temperatura e da irradiância, estas duas grandezas também foram mensuradas. Para as medidas de temperatura dos painéis foi utilizada a câmera termográfica da marca Irisys modelo IRI4035, bem como as medidas de irradiância foram feitas com o medidor da marca Icel modelo SP-2000.

#### 3.2 Simulação do sombreamento

Para verificação dos efeitos do sombreamento são utilizados os módulos fotovoltaicos da marca Kyocera, modelo KD135SX-UPU. Estes módulos são fabricados com silício policristalino, e possuem uma eficiência em torno de 16%. Cada um dos módulos é constituído por 36 células no total interligadas em série, com dois diodos de *bypass*, um para cada grupo de dezoito células, como ilustrado pela Fig. 5. Cada um dos painéis será testado sob três condições diferentes, para que seja feita a comparação.

Os testes foram realizados considerando três situações distintas:

- Módulos sem sombreamento: no primeiro teste os módulos ficaram expostos à radiação solar sem nenhuma célula obstruída, conforme Fig. 6 (a). Após traçar suas curvas, foram adotadas como parâmetro de comparação com as curvas nos testes onde ocorre sombreamento;
- Sombreamento total de uma célula, com o objetivo de verificar o efeito provocado, a segunda etapa consistiu em sombrear totalmente uma célula de cada módulo, conforme Fig. 6(b) e plotar suas curvas. O efeito foi provocado instalando um anteparo entre o módulo e a direção do sol;
- Sombreamento total de duas células afetando os dois arranjos do módulo. Como os módulos possuem dois arranjos série, cada um com um diodo de *bypass*, ao bloquear a radiação em uma célula de cada, a potência fornecida pelo módulo fica totalmente comprometida. Da mesma forma, que nos testes anteriores, o efeito foi provocado instalando um anteparo entre o módulo e a direção do sol.



**Figura 6** - Testes de sombreamento realizados nos módulos fotovoltaicos.

Fonte: autor.

## 4 | RESULTADOS OBTIDOS

Para cada um dos dois módulos foram traçadas as curvas P-V e I-V para os três casos propostos na subseção 3.2, as curvas obtidas são apresentadas a seguir.

### 4.1 Módulo 1

Os dados coletados no Módulo 1, foram sob uma irradiância de  $740 \text{ W/m}^2$  e temperatura de  $51,2 \text{ }^\circ\text{C}$ , medidos com os instrumentos descritos na subseção 3.1. As curvas sem sombreamento, com uma e duas células sombreadas seguem respectivamente.

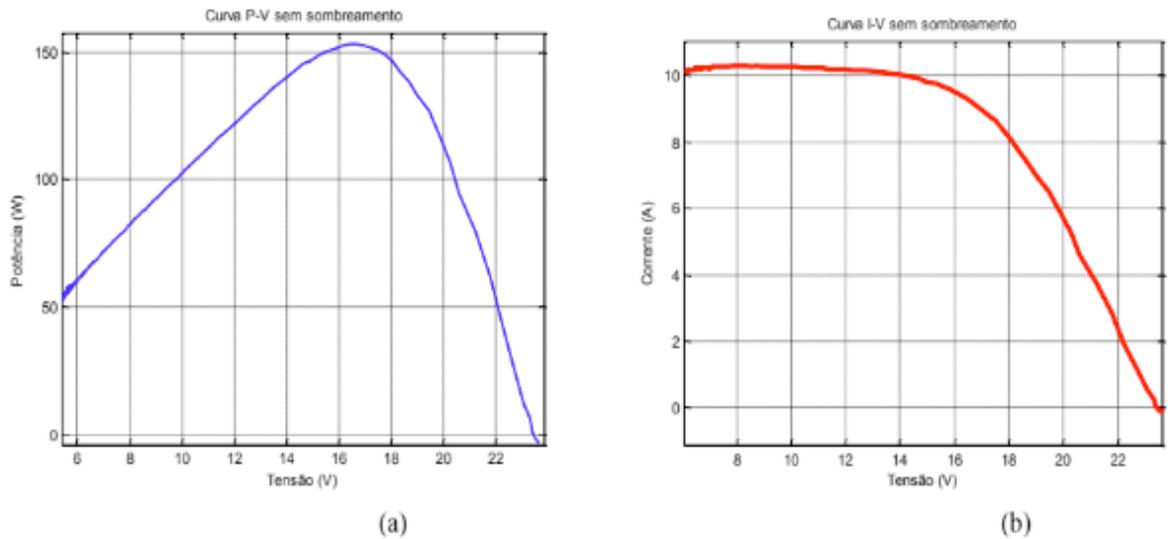


Figura 7 - Curvas P-V e I-V do Módulo 1 sem sombreamento.

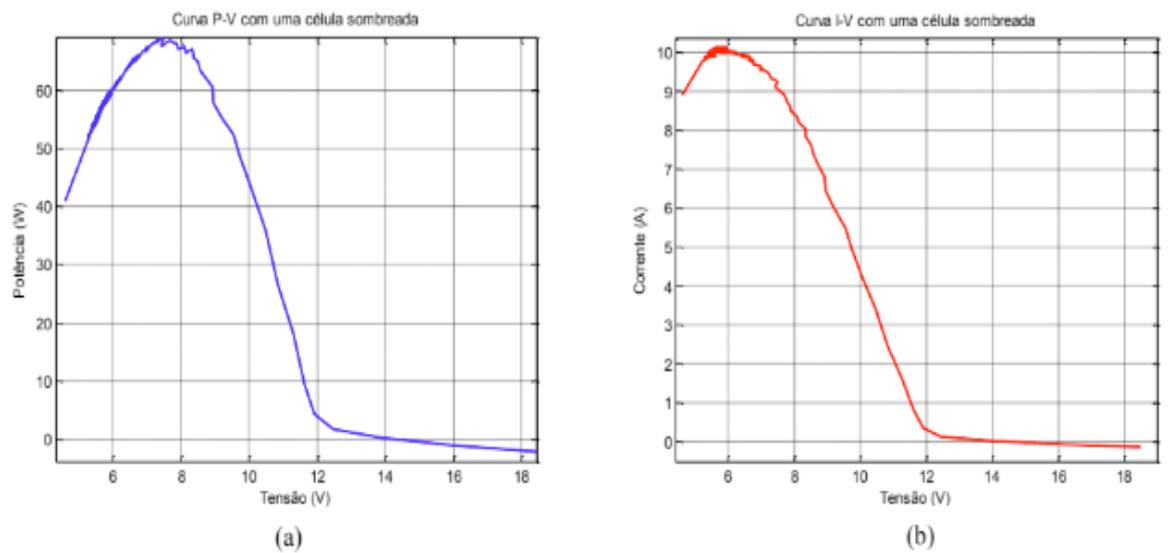


Figura 8 - Curvas P-V e I-V do módulo 1 com sombreamento em uma célula.

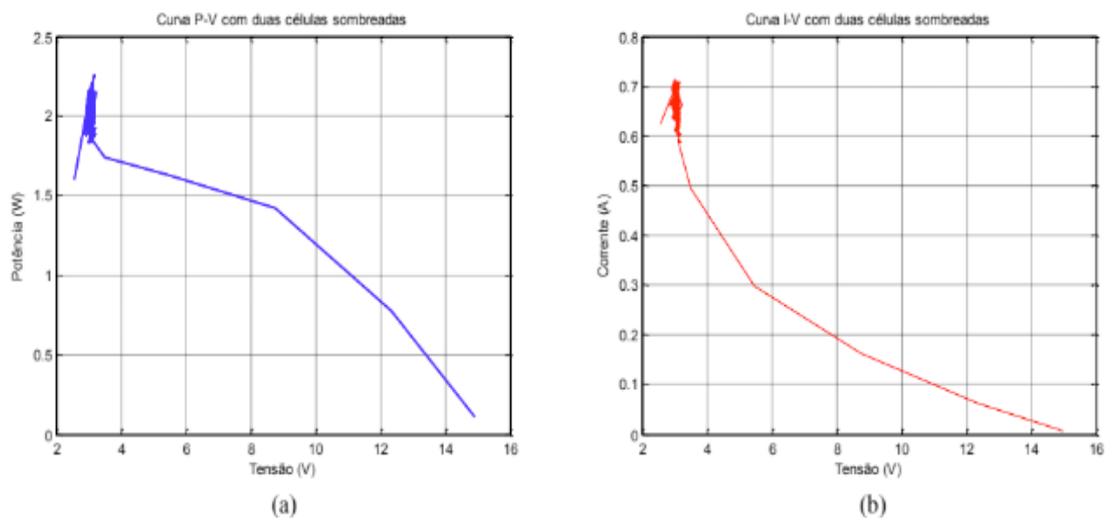


Figura 9 - Curvas P-V e I-V do módulo 1 com sombreamento em duas células.

## 4.2 Módulo 2

Os dados coletados no Módulo 2, foram sob uma irradiância de  $690 \text{ W/m}^2$  e temperatura de  $51,7 \text{ }^\circ\text{C}$ , medidos com os instrumentos descritos na subseção 3.1. As curvas sem sombreamento, com uma e duas células sombreadas seguem respectivamente.

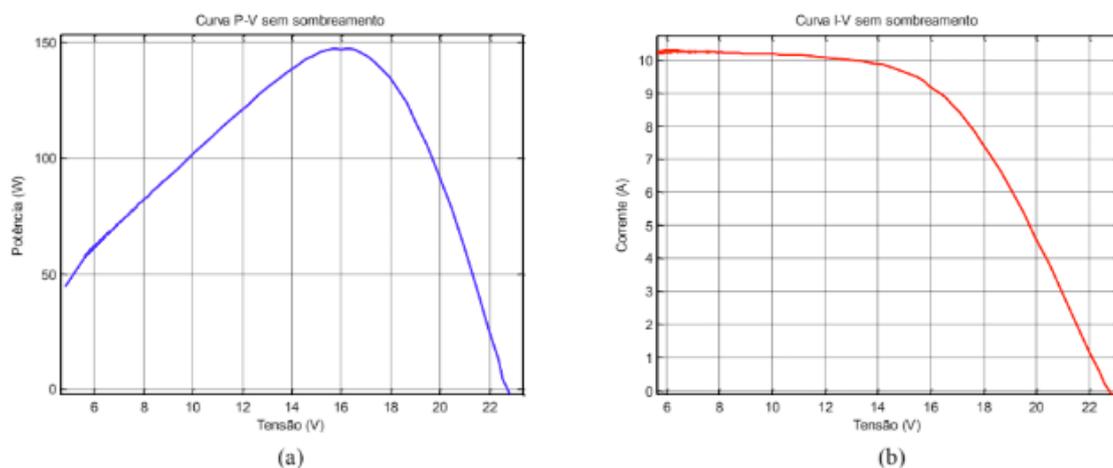


Figura 10 - Curvas P-V e I-V do módulo 2 sem sombreamento.

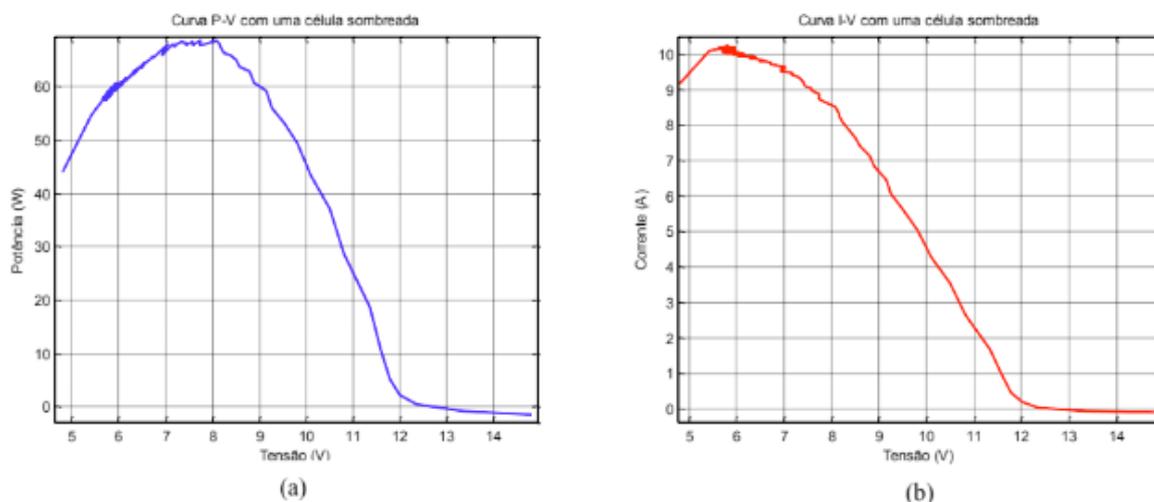


Figura 11 - Curvas P-V e I-V do módulo 2 com sombreamento em uma célula.

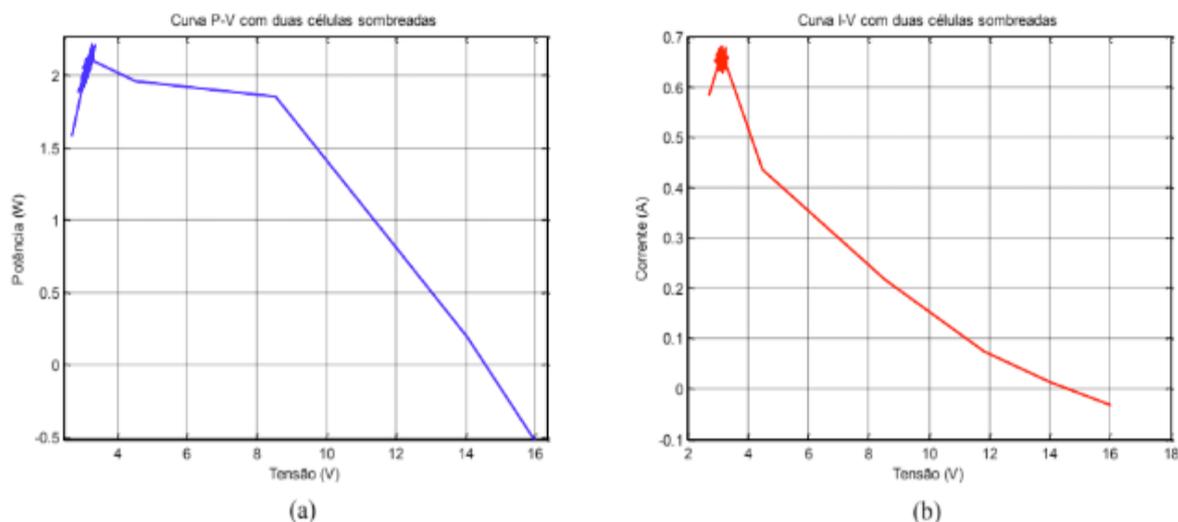


Figura 12 - Curvas P-V e I-V do módulo 2 com sombreamento em duas células.

## 5 | ANÁLISE DOS RESULTADOS

Ao comparar as curvas P-V sem sombreamento com as com uma célula sombreada, de ambos os módulos, se pode verificar uma queda na potência máxima atingida em aproximadamente cinquenta por cento. Sem sombreamento todas as células do módulo estão fornecendo potência à carga, enquanto ao sombrear uma célula, todo um conjunto de dezoito células deixa de fornecer potência. Desta forma, apenas metade do módulo continua funcionando.

Outra observação importante nesta primeira comparação é em relação ao nível de tensão fornecido pelos módulos, que também sofreu uma redução em torno de cinquenta por cento. Como apenas metade do módulo continuou funcionando, a tensão entregue à carga é justamente a referente à esta metade. A corrente fornecida não sofreu grandes alterações, pois todas as células estão ligadas em série.

Um grande efeito nas grandezas observadas verifica-se ao sombrear duas células nos módulos. Como estas células são uma de cada grupo, os dois arranjos série deixam de funcionar, entregando uma potência praticamente zerada à carga.

## 6 | CONCLUSÕES

Diante dos dados coletados este trabalho aponta as seguintes conclusões:

- Pequenas áreas de sombra podem acarretar um grande efeito aos sistemas de microgeração;
- Sendo a potência elétrica o produto entre tensão e corrente elétrica, a redução na potência entregue à carga é devido à queda no nível de tensão;
- A queda no nível de tensão entregue também pode provocar mau funcionamento nos inversores de frequência do sistema de microgeração, pois traba-

lham com valores mínimos de tensão em sua entrada. Um módulo sombreado pode gerar uma tensão abaixo da mínima necessária ao funcionamento do inversor, afetando todo o sistema de microgeração.

- Os inversores de frequência possuem um sistema de rastreamento do ponto de máxima potência (MPPT - *Maximum Power Point Tracking*), porém, um conjunto de módulos fotovoltaicos sob sombreamento pode gerar diferentes pontos de máxima potência, dificultando assim a correta atuação do sistema de rastreamento, fazendo com que opere em um ponto (máximo local) diferente daquele onde o máximo de potência poderia ser extraído do sistema fotovoltaico. Este problema pode ser minimizado com a utilização de inversores com mais de uma entrada de MPPT;
- O sombreamento em uma única célula compromete a metade do módulo. Caso este sombreamento atinja duas células de diferentes grupos todo o módulo ficará comprometido;
- Os diodos de *bypass* mostraram sua eficácia na minimização dos efeitos, uma vez que ao sombrear uma célula, apenas uma metade do módulo deixa de funcionar. Caso as células estivessem interligadas sem este componente, todo o módulo deixaria de funcionar;
- Com a ligação de um maior número de diodos de *bypass*, ao invés de dois grupos de dezoito células quatro grupos de nove células, a redução na potência poderia estar em torno de vinte cinco ou cinquenta por cento, nos casos de sombreamento de uma e duas células respectivamente;
- Módulos com um maior número de diodos de *bypass*, embora tenham um maior custo, podem ser uma solução viável a unidades de microgeração onde as estruturas vizinhas possam provocar sombreamento.

## 7 | REFERÊNCIAS

ANEEL. **Resolução Normativa nº 482**, Pub. L. No. 482/2012 (2012). Brasília. Disponível em: <http://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>

ANEEL. (2014). **Micro e Minigeração Distribuída**. Brasília: ANEEL. Disponível em: <http://www.aneel.gov.br/biblioteca/downloads/livros/caderno-tematico-microeminigeracao.pdf>

Carvalho, P. M. S. de. (2013). **Modelação e Simulação de Sistemas Fotovoltaicos**. INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DE LISBOA. Disponível em: <http://repositorio.ipl.pt/bitstream/10400.21/2541/1/Dissertação.pdf>

CRESESB - Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio de Salvo Brito. (2008). **Energia solar princípios e aplicações**. *Centro de Referência Para Energia Solar E Eólica*, 28. [http://doi.org/10.1016/0038-092X\(72\)90013-8](http://doi.org/10.1016/0038-092X(72)90013-8)

Gasparin, F. P. (2009). **Sistema traçador de curvas características de módulos fotovoltaicos**. Disponível em: <ftp://ftp.solar.ufrgs.br/teses/gasparin.pdf>

Hecktheuer, L. A. (2001). **Análise de Associações de Módulos Fotovoltaicos**. UFRGS. Disponível em: <http://www.lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/2125/000314640.pdf?sequence=1>

Moreira, D. (2012). **Implementação de microgeração no sector residencial**. Disponível em: <http://repositorio-aberto.up.pt/handle/10216/60292>

Resende, S. M. (2004). **Materiais e Dispositivos Eletrônicos** (2nd ed.). São Paulo: Livraria da Física.

Villalva, M. G., & Gazoli, J. R. (2012). **Energia Solar Fotovoltaica** (1st ed.). São Paulo: Érica.

## **SOBRE O ORGANIZADOR:**

**Paulo Jayme Pereira Abdala** possui graduação em Engenharia Eletrônica pelo Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca - RJ (1988), mestrado em Engenharia Mecânica pela Universidade Federal do Rio de Janeiro (2005) e pós-graduação em Gestão de Aviação Civil pela Universidade de Brasília (2003). Entre 1989 e 2008 foi Chefe do Laboratório de Ruído Aeronáutico e Emissões de Motores do DAC/ANAC, tendo desenvolvido centenas de estudos sobre poluição sonora e atmosférica oriundas da atividade aeronáutica. Foi representante oficial do Brasil em diversos Fóruns Internacionais sobre meio ambiente promovidos pela Organização de Aviação Civil Internacional OACI - Agência da ONU. Foi Coordenador dos Cursos de Engenharia de Produção, Elétrica, Civil e Mecânica na UNOPAR/PG entre 2013 e 2018. Atualmente é Consultor Independente para a AGÊNCIA NACIONAL DE AVIAÇÃO CIVIL, OACI e INFRAERO. Tem experiência na área de Engenharia Eletrônica, atuando principalmente nos seguintes temas: acústica, meio ambiente e pedagogia (metodologia TRAINAIR/OACI).

Agência Brasileira do ISBN  
ISBN 978-85-7247-066-7

