

Energia Elétrica e Sustentabilidade

Jaqueline Oliveira Rezende
(Organizadora)



Atena
Editora

Ano 2018

JAQUELINE OLIVEIRA REZENDE

(Organizadora)

Energia Elétrica e Sustentabilidade

Atena Editora
2018

2018 by Atena Editora

Copyright © da Atena Editora

Editora Chefe: Profª Drª Antonella Carvalho de Oliveira

Diagramação e Edição de Arte: Geraldo Alves e Natália Sandrini

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
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
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
Prof. Dr. Willian Douglas Guilherme – Universidade Federal do Tocantins

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) (eDOC BRASIL, Belo Horizonte/MG)	
E56	Energia elétrica e sustentabilidade [recurso eletrônico] / Organizadora Jaqueline Oliveira Rezende. – Ponta Grossa (PR): Atena Editora, 2018. Formato: PDF Requisitos de sistema: Adobe Acrobat Reader Modo de acesso: World Wide Web Inclui bibliografia ISBN 978-85-85107-45-1 DOI 10.22533/at.ed.451180110 1. Desenvolvimento energético – Aspectos ambientais. 2. Desenvolvimento sustentável. 3. Energia elétrica. I. Rezende, Jaqueline Oliveira. CDD 338.4
Elaborado por Maurício Amormino Júnior – CRB6/2422	

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

2018

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

APRESENTAÇÃO

A sustentabilidade pode ser entendida como a capacidade de o ser humano utilizar os recursos naturais para satisfazer as suas necessidades sem comprometer esses recursos para atender as gerações futuras. Nesse contexto, a sustentabilidade está inter-relacionadas em diversos setores, sendo os principais o social, o ambiental e o econômico. Dessa forma, constitui um dos desafios da sociedade moderna o desenvolvimento sustentável que objetiva preservar o meio ambiente durante a realização de outras atividades.

A energia elétrica representa um dos principais pilares para o progresso econômico de uma nação e, conseqüentemente, para o atendimento de inúmeras necessidades da humanidade. Portanto, esse setor também tem se preocupado com a geração, a transmissão, a distribuição de energia elétrica e a construção de novos empreendimentos, como as usinas hidrelétricas, de maneira a preservar o meio ambiente. Logo, a Engenharia Elétrica tem apresentado significativas pesquisas e resultados de ações pautadas na sustentabilidade.

Neste ebook é possível notar que a relação da Engenharia Elétrica e a Sustentabilidade é de preocupação de diversos profissionais envolvidos nesse setor, sendo esses advindos da academia, das concessionárias de energia elétrica e do governo. Dessa forma, são apresentados trabalhos teóricos e resultados práticos de diferentes formas de aplicação da preservação do meio ambiente na engenharia elétrica.

Inicialmente são apresentados artigos que discorrem sobre o desenvolvimento sustentável e a sustentabilidade ambiental, custos ambientais em empreendimentos de geração de energia elétrica, recuperação ambiental, conservação da fauna, políticas administrativas e direcionamento de resíduos eletrônicos.

Em seguida, são descritos estudos sobre formas de geração de energia elétrica renováveis não convencionais, sendo apresentadas a energia eólica e a energia solar fotovoltaica. Essas formas de geração contribuem para o desenvolvimento sustentável, uma vez que geram energia elétrica utilizando recursos naturais não finitos, o vento na geração eólica e o sol na geração fotovoltaica.

Além disso, neste exemplar são expostos artigos que contemplam diversas áreas da engenharia elétrica, como redes smart grids, sistema de proteção, operação remota de usinas hidrelétricas, inteligência computacional aplicada a usina termelétrica, transformadores de potência, linhas de transmissão, tarifa horária, lâmpadas led, prevenção de acidentes em redes de média tensão e eficiência energética.

Jaqueline Oliveira Rezende

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1	1
O PARADIGMA INTERDISCIPLINAR DO DESENVOLVIMENTO AMBIENTALMENTE SUSTENTÁVEL	
<i>Tiago Borga</i>	
<i>Rodrigo Regert</i>	
<i>Ludimar Pegoraro</i>	
CAPÍTULO 2	15
SUSTENTABILIDADE, RECICLAGEM E MEIO AMBIENTE: A RELEVÂNCIA DA LOGÍSTICA	
<i>Welleson Feitosa Gazel</i>	
<i>Wesley Gomes Feitosa</i>	
<i>Antônio Adriano Alves de Souza</i>	
<i>Jeremias Monteiro Vaillant Junior</i>	
<i>Maria de Nazaré Souza Nascimento</i>	
<i>Márcio Costa</i>	
<i>Marcos José Alves Pinto Junior</i>	
<i>Carlos Renato Montel</i>	
CAPÍTULO 3	32
A CONTRIBUIÇÃO DO SISTEMA DE CONTAS ECONÔMICAS E AMBIENTAIS PARA ESTIMAR OS CUSTOS AMBIENTAIS NOS EMPREENDIMENTOS DE GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA	
<i>Adriana Maria Dassie</i>	
<i>José Eustáquio Diniz Alves</i>	
<i>David Montero Dias</i>	
CAPÍTULO 4	42
LEVANTAMENTO DOS IMPACTOS INERENTES À IMPLANTAÇÃO DE PCHS E IDENTIFICAÇÃO DO CUSTO DE OPORTUNIDADE NO RIO COXIM, MS, BRASIL	
<i>Thiago Oliveira Barbosa</i>	
<i>Poliana Ferreira da Costa</i>	
<i>Bruna Souza dos Santos</i>	
<i>Adriana Maria Güntzel</i>	
CAPÍTULO 5	57
MUDANÇAS CLIMÁTICAS E A AMPLIAÇÃO DAS SÉRIES DE DADOS DISPONÍVEIS, E AS POSSÍVEIS ALTERAÇÕES NO DIMENSIONAMENTO DE VERTEDORES	
<i>Marcos Vinicius Andriolo</i>	
CAPÍTULO 6	66
RECUPERAÇÃO SUSTENTÁVEL DO ENTORNO DE RESERVATÓRIOS DE HIDRELÉTRICAS: UM ESTUDO NA UHE CORUMBÁ IV	
<i>Jorge Santos Ribas Jr.</i>	
<i>José Roberto Ribas</i>	
<i>Tatiana Maria Soeltl</i>	
<i>André Nicolau Brylynskyi</i>	
CAPÍTULO 7	81
LT 500 KV ARA-TAU: COMO O LICENCIAMENTO AMBIENTAL PODE PROPICIAR A CONSERVAÇÃO DA ESPÉCIE AMEAÇADA <i>CALLITHRIX AURITA</i> (SAGUI-DA-SERRA-ESCURO)	
<i>Jéssica Motta Luiz Bom</i>	
CAPÍTULO 8	95
NOVAS DIMENSÕES DA GOVERNANÇA DO SETOR ENERGÉTICO BRASILEIRO	
<i>Fernando Amaral de Almeida Prado Jr.</i>	
<i>Ana Lúcia Rodrigues da Silva</i>	

CAPÍTULO 9	107
A GOVERNANÇA COMO INSTRUMENTO DE POLÍTICA PÚBLICA DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA NO BRASIL	
<i>Denise Pereira Barros</i>	
CAPÍTULO 10	120
O ACORDO DE PARIS E OS NOVOS CAMINHOS PARA A GESTÃO SOCIOAMBIENTAL: DESAFIOS E OPORTUNIDADES PARA AS EMPRESAS DO SETOR ELÉTRICO	
<i>Gustavo André Santana de Sá</i> <i>Pedro Magalhães Sobrinho</i>	
CAPÍTULO 11	133
OS CRITÉRIOS ENERGÉTICO-ECONÔMICOS UTILIZADOS NO PLANEJAMENTO DA EXPANSÃO DA GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA: REFLEXÕES SOBRE ALGUNS MITOS E A NECESSIDADE DE UMA NOVA AGENDA	
<i>Luiz Claudio Gutierrez Duarte</i>	
CAPÍTULO 12	151
MITIGAÇÃO DO RISCO HIDROLÓGICO- LEILÃO DE COMPRA E VENDA DE ENERGIA NA MODALIDADE SWAP DA ELETRONORTE	
<i>Ivan Rezende</i> <i>Virginia Fernandes Feitosa</i> <i>João David Resende</i> <i>Dante de Castro Simplicio</i> <i>Rafael Capistrano dos Santos Stanzani</i> <i>Gervásio Nery De Albuquerque</i>	
CAPÍTULO 13	159
A INOVAÇÃO TECNOLÓGICA COMO RESULTADO DO APROVEITAMENTO DO CAPITAL INTELECTUAL PROTEGIDO PELO DIREITO DA PROPIEDADE INTELECTUAL – UM VETOR DE AUMENTO DE RECEITA EM POTENCIAL	
<i>Fernando da Silva Jansen</i>	
CAPÍTULO 14	174
O CUSTO E A ESTRUTURA DE CAPITAL PARA A INDÚSTRIA DE ENERGIA ELÉTRICA BRASILEIRA: ASPECTOS METODOLÓGICOS E APLICAÇÕES	
<i>Luiz Claudio Gutierrez Duarte</i> <i>Washington Blanco</i>	
CAPÍTULO 15	188
GESTÃO DE CUSTOS EMPRESARIAIS NO NEGÓCIO TRANSMISSÃO	
<i>Ana Rita Xavier Haj Mussi</i> <i>Marcos Paulo Boaventura Severino Rezende</i>	
CAPÍTULO 16	202
GESTÃO E GERENCIAMENTO DOS RESÍDUOS PROVENIENTES DE EQUIPAMENTOS ELETROELETRÔNICOS EM GARANHUNS-PE	
<i>Rosalva Raimundo da Silva</i> <i>José Romenik de Almeida</i> <i>Marcela Caroline S F Azevedo</i> <i>Maria Claudjane J. L. Alves</i>	
CAPÍTULO 17	213
METODOLOGIA PARA O PLANEJAMENTO DA EXPANSÃO CONSIDERANDO A INSERÇÃO DE GERAÇÃO EÓLICA EM LARGA ESCALA NA MATRIZ ELÉTRICA NACIONAL	
<i>Sérgio Pinheiro dos Santos</i> <i>Fernando Rodrigues Alves</i>	

*Antônio Roseval Ferreira Freire
Ronaldo Ribeiro Barbosa de Aquino
Otoni Nóbrega Neto
Pedro Alves de Melo*

CAPÍTULO 18 225

GRUPO GPT, GRUPO DE ESTUDO DE PRODUÇÃO TÉRMICA E FONTES NÃO CONVENCIONAIS
COMPARAÇÃO DE CÁLCULO DE PRODUÇÃO EÓLICA UTILIZANDO WASP, OPENWIND E WINDSIM EM
TERRENO COMPLEXO NA BAHIA, BRASIL

*Daniel Agnese Ramos
Vanessa Gonçalves Guedes
Angelo Alberto Mustto Cabrera
Sérgio Roberto Ferreira Cordeiro de Melo
Wady Abrahamo Cury Netto
Tulio Anselmo dos Santos Valentim*

CAPÍTULO 19 235

A INFLUÊNCIA, SOB O ASPECTO DE CURTO-CIRCUITO, DE GERADORES EÓLICOS NO SISTEMA
ELÉTRICO DE POTÊNCIA.

*Eloi Rufato Junior
Lucas Marino Bianchessi Sganzeta
William Da Veiga*

CAPÍTULO 20 247

PLATAFORMA DE AQUISIÇÃO E CONTROLE IOT INTEGRADO A SISTEMA DE GERAÇÃO
FOTOVOLTAICA

*Caio Castro Rodrigues
Joice Machado Martins
Layse Pereira do Nascimento
João Vitor Natal Silva Quincó Maciel
Otavio Andre Chase
José Felipe Souza de Almeida*

CAPÍTULO 21 258

DETERMINAÇÃO DE PROCESSOS PARA LEVANTAMENTO PRÁTICO DAS CURVAS
CARACTERÍSTICAS DE PAINÉIS FOTOVOLTAICOS

*Jaqueline Oliveira Rezende
Sebastião Camargo Guimarães Júnior*

CAPÍTULO 22 272

ANÁLISE DO PAYBACK DE UM GERADOR FOTOVOLTAICO EM UMA RESIDÊNCIA UNIFAMILIAR
NO NOROESTE DO ESTADO DO RIO GRANDE DO SUL

*Samara Iasmim Schardong
Andréia Balz
Fábio Augusto Henkes Huppes
Mauro Fonseca Rodrigues*

SOBRE A ORGANIZADORA 283

DETERMINAÇÃO DE PROCESSOS PARA LEVANTAMENTO PRÁTICO DAS CURVAS CARACTERÍSTICAS DE PAINÉIS FOTOVOLTAICOS

Jaqueline Oliveira Rezende

Universidade Federal de Uberlândia (UFU),
Faculdade de Engenharia Elétrica
Uberlândia – MG

Sebastião Camargo Guimarães Júnior

Universidade Federal de Uberlândia (UFU),
Faculdade de Engenharia Elétrica
Uberlândia – MG

RESUMO: A energia solar fotovoltaica é uma fonte alternativa de energia muito promissora, a qual converte diretamente a energia solar em energia elétrica. Esta energia é obtida através de painéis fotovoltaicos, os quais são caracterizados por uma curva característica IV que relaciona os valores de corrente elétrica e tensão que o mesmo fornece em determinadas condições ambientais. Este trabalho tem como objetivo determinar um método simples e prático para a obtenção das curvas características, pois com estas é possível dimensionar corretamente a aplicação dos painéis fotovoltaicos e, assim, aumentar a eficiência da energia solar fotovoltaica. Para a determinação dos métodos simples foram realizados ensaios com o painel através de dois métodos distintos com o objetivo de traçar a curva característica com os dados coletados em cada método e comparar os resultados encontrados para analisar se o método proposto apresenta resultados

coerentes.

PALAVRAS-CHAVE: Curva característica, energia solar fotovoltaica e fontes alternativas de energia.

ABSTRACT: Photovoltaic solar energy is an alternative energy source very promising, which directly converts solar energy into electrical energy. This energy utilizes photovoltaic panels, which are characterized by a curve relating the values of electrical current and a voltage provide under certain environmental conditions, this curve is called a characteristic curve. The objective of this study aims to establish a simple and practical method to obtain the characteristic curves, so that with these curve it is possible correctly to design the application of photovoltaic panels and thus increase the efficiency of the characteristic photovoltaic solar energy. For the determination of the characteristic curve simple tests were performed with the panel by two different methods for the purpose of draw the characteristic curve with the data collected by each method and compare the results to analyze the proposed method provides consistent results.

KEYWORDS: Characteristic curve, photovoltaic solar energy and alternative energy sources.

1 | INTRODUÇÃO

A dependência do homem em relação à energia elétrica é notória, cada vez mais o ser humano necessita utilizar a energia elétrica em suas atividades do dia-a-dia. Dessa forma, o considerável aumento da demanda de energia elétrica deve-se principalmente devido ao constante aumento da população mundial, ao crescimento do poder de compra por grande parte da população, a invenção cada vez maior de equipamentos que necessitam de energia elétrica para funcionarem e a dependência das pessoas com estes novos equipamentos.

Para suprir a demanda de energia elétrica os principais recursos energéticos utilizados atualmente por grande parte da população constituem nos combustíveis fósseis, os quais são o petróleo, o gás natural e o carvão mineral (Confederação Nacional das Indústrias). Estes combustíveis fósseis são utilizados principalmente em usinas termoelétricas, as quais contribuem substancialmente com a degradação do meio ambiente. Os principais problemas ambientais causados por essas fontes de energia são a chuva ácida, a destruição da camada de ozônio e a contribuição para o aumento do efeito estufa.

Dessa forma, devido principalmente aos problemas ambientais que as tradicionais fontes de energia causam e a preocupação com o considerável aumento da demanda de energia elétrica as fontes alternativas de energia estão cada vez mais sendo estudadas e empregadas para obter energia sem degradar o meio ambiente. Essas fontes de energia são reconhecidas por utilizarem recursos naturais e inesgotáveis para obtenção de energia elétrica, ou seja, são fontes de energia que praticamente não causam impactos ambientais e não são consideradas fontes finitas, sendo estas renováveis com o tempo.

Uma das fontes alternativas de energia que está sendo amplamente estudada é a energia solar fotovoltaica. A energia solar fotovoltaica utiliza a energia proveniente do sol para a obtenção direta de energia elétrica. Para realizar essa conversão de energia são utilizadas células fotovoltaicas, as quais são constituídas de material semicondutor. Uma única célula fotovoltaica fornece pouca energia sendo que para se conseguir a tensão e corrente elétrica suficientes para alimentar um sistema, é necessário o agrupamento dessas através de ligações em série e em paralelo formando um painel fotovoltaico (Grupo de Trabalho de Energia Solar).

Os painéis fotovoltaicos são descritos através de suas curvas características, as quais contêm os valores de corrente elétrica e tensão que o painel fornece em determinadas condições de temperatura ambiente e radiação solar. Por meio dessas curvas é possível identificar os valores máximos de corrente, tensão e potência que o painel fotovoltaico fornece. Assim, traçando essas curvas para as condições reais de temperatura ambiente e radiação solar do local onde será instalado o painel é possível determinar os valores de corrente, tensão e potência que o mesmo fornece nessas condições e projetar de maneira correta a sua aplicação.

Dessa forma, as curvas características são de extrema importância para a utilização adequada do painel fotovoltaico, pois traçando as curvas para as condições ambientais do local onde será utilizado o painel fotovoltaico pode-se através destas projetar adequadamente sua instalação contribuindo para aumentar a eficiência da energia solar fotovoltaica. Assim, é necessário que se determine processos para a obtenção das curvas características de forma simples e prática, contribuindo para que as mesmas sejam amplamente utilizadas no projeto da energia solar fotovoltaica.

2 | CARACTERÍSTICAS DO PAINEL FOTOVOLTAICO

O painel fotovoltaico possui como principal característica a sua representação através de circuito equivalente, o qual possibilita através deste determinar equações que descrevem o comportamento elétrico do mesmo. Além disso, uma importante particularidade do painel fotovoltaico são as curvas características, as quais descrevem o desempenho de corrente elétrica e tensão fornecidos pelo painel através de gráficos.

Os valores de tensão e corrente elétrica fornecidos pelos painéis possuem seus valores influenciados de forma direta pela radiação solar e temperatura ambiente. Assim, para uma melhor compreensão das curvas características é necessário compreender como as condições ambientais interferem nos valores de tensão e corrente do painel. A seguir serão detalhadas as principais características dos painéis fotovoltaicos.

2.1. Circuito Equivalente

O painel fotovoltaico pode ser representado através de três circuitos equivalentes distintos, os quais são o modelo simplificado, o modelo com duas resistências e o modelo com dois diodos. Cada forma de representar o painel possui suas equações que auxiliam na determinação dos parâmetros que compõem o circuito equivalente. Para realização deste trabalho foi considerado o modelo simplificado e o mesmo pode ser observado na Figura 1.

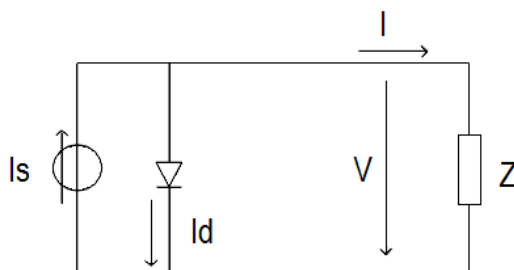


Figura 1: Circuito equivalente simplificado do painel fotovoltaico.

No circuito equivalente a fonte de corrente I_s representa a corrente elétrica gerada devido à radiação solar incidente, o diodo corresponde a uma característica do material semicondutor, a corrente I representa a corrente que o painel fornece, a tensão V é o valor de tensão que o painel entrega e a impedância Z corresponde à carga conectada

ao painel (C. Camus e E. Eusébio).

As equações para determinar os parâmetros do circuito equivalente do painel fotovoltaico serão descritas a seguir.

$$V_{tr} = \frac{KT_r}{q} \quad [V] \quad (1)$$

Onde:

V_{tr} - Potencial térmico de referência;

K - Constante de Boltzmann;

T_r - Temperatura absoluta na condição de teste padrão

q - carga elétrica do elétron.

$$V_t = \frac{KT}{q} \quad [V] \quad (2)$$

Onde:

V_t - Potencial térmico;

K - Constante de Boltzmann;

T - Temperatura absoluta;

q - carga elétrica do elétron.

$$m = \frac{V_{maxr} - V_{car}}{V_{tr} \cdot \ln \left(1 - \frac{I_{maxr}}{I_{ccr}} \right)} \quad (3)$$

Onde:

m - Fator de idealidade do diodo;

V_{maxr} - Tensão máxima de referência;

V_{car} - Tensão de circuito aberto de referência;

V_{tr} - Potencial térmico de referência;

I_{maxr} - Corrente máxima de referência;

I_{ccr} - Corrente de curto-circuito de referência.

$$m' = \frac{m}{\text{número de células do painel}} \quad (4)$$

Onde:

m' - Fator de idealidade equivalente do diodo;

m - Fator de idealidade do diodo.

$$I_{or} = \frac{I_{ccr}}{e^{\frac{m \cdot V_{car}}{V_{tr}}} - 1} \quad [A] \quad (5)$$

Onde:

- I_{or} - Corrente inversa máxima de saturação do diodo na referência;
- I_{ocr} - Corrente de curto-circuito de referência;
- V_{car} - Tensão de circuito aberto de referência;
- m - Fator de idealidade do diodo;
- V_{tr} - Potencial térmico de referência.

$$I_o = I_{or} \cdot \left(\frac{T}{T_r} \right)^3 \cdot e^{\frac{\varepsilon}{m} \left(\frac{1}{V_{tr}} - \frac{1}{V_t} \right)} \quad [A] \quad (6)$$

Onde:

- I_o - Corrente inversa máxima de saturação do diodo;
- I_{or} - Corrente inversa máxima de saturação do diodo na referência;
- T - Temperatura ambiente;
- T_r - Temperatura ambiente de referência;
- ε - Banda de energia do silício;
- m' - Fator de idealidade equivalente do diodo.;
- V_{tr} - Potencial térmico de referência;
- V_t - Potencial térmico.

$$I_{cc} = I_{ocr} \cdot \left(\frac{G}{G_r} \right) \quad [A] \quad (7)$$

Onde:

- I_{cc} - Corrente de curto-circuito;
- I_{ocr} - Corrente de curto-circuito de referência;
- G - Radiação solar incidente;
- G_r - Radiação solar de referência.

$$I_{cc} = I_{ocr} \cdot \left(\frac{G}{G_r} \right) \quad [A] \quad (8)$$

Onde:

- I - Corrente do painel fotovoltaico;
- I_{cc} - Corrente de curto-circuito;
- I_o - Corrente inversa máxima de saturação do diodo;
- V - Tensão de saída do painel fotovoltaico;
- m - Fator de idealidade do diodo;
- V_t - Potencial térmico.

$$P_{\max} = V_{\max} \cdot I_{\max} \quad [W] \quad (9)$$

Onde:

P_{\max} - Potência máxima;

V_{\max} - Tensão máxima;

I_{\max} - Corrente máxima.

2.2. Curva Característica

O painel fotovoltaico pode ter suas características de funcionamento expressas por meio da curva característica. Assim, este gráfico é formado por infinitos pontos de tensão e corrente que representam os pontos de operação do painel fotovoltaico. As curvas indicam valores de tensão e corrente que o painel fotovoltaico fornece em determinadas condições de temperatura ambiente e radiação solar e também permite que se conheçam os valores de potência, uma vez que, esta é o produto da tensão e corrente.

O gráfico da curva característica é traçado entre duas condições de operação do painel fotovoltaico, que são curto-circuito e circuito aberto do painel. Quando o dispositivo se encontra em curto-circuito este apresenta o maior valor de corrente e zero de tensão e potência, e estando em circuito aberto o mesmo produz a tensão máxima e zero de corrente e potência.

Os principais pontos de operação do painel fotovoltaico serão descritos a seguir (M. T. Tolmasquim).

- I_{cc} – corrente de curto-circuito: é a máxima corrente que o painel fotovoltaico pode fornecer em determinadas condições de temperatura ambiente e radiação solar;
- V_{ca} – tensão de circuito aberto: é o máximo valor de tensão que o painel fotovoltaico pode fornecer em determinadas condições de temperatura ambiente e radiação solar;
- I_{mp} – corrente de máxima potência: é a corrente em que o dispositivo fotovoltaico fornece a potência máxima em determinadas condições de temperatura ambiente e radiação solar. Esta corrente é considerada a corrente nominal do painel fotovoltaico;
- V_{mp} – tensão de máxima potência: é o valor de tensão em que o dispositivo fornece a maior potência em determinadas condições de radiação solar e temperatura ambiente. Este valor de tensão é considerado a tensão nominal que o painel fotovoltaico fornece;
- P_{mp} – potência máxima de pico: é o maior valor de potência que o painel fotovoltaico pode fornecer em determinadas condições de radiação solar e

temperatura ambiente. Além disso, este valor é o ponto da curva característica no qual o produto da tensão e corrente é máximo.

A Figura 2 ilustra os principais pontos da curva característica IV.

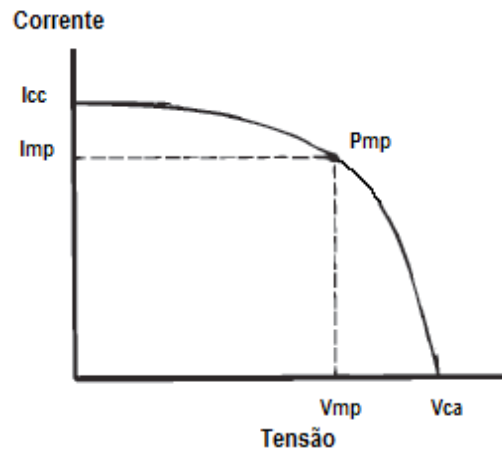


Figura 2: Curva característica IV.

2.3. Fatores que Interferem no Funcionamento do Painel Fotovoltaico

Os fatores que interferem significativamente no desempenho dos painéis fotovoltaicos são a radiação solar e a temperatura ambiente (F. Kininger).

O painel apresenta aumento de sua eficiência quando há o aumento da radiação solar e essa eficiência diminui à medida que a radiação solar também diminui. Com o aumento da radiação solar incidente há o aumento da potência de saída (P) do painel, a tensão de circuito aberto (V_{ca}) varia muito pouco, a corrente de curto-circuito (I_{cc}) varia linearmente e a corrente inversa de saturação (I_0) varia. A Figura 3 ilustra a influência da radiação solar na curva característica IV.

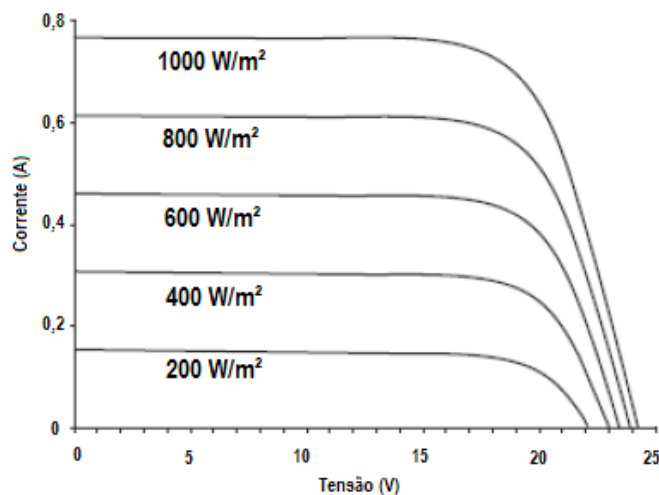


Figura 3: Curva característica IV com variação da radiação solar.

A temperatura ambiente possui influência oposta à eficiência dos dispositivos fotovoltaicos comparado com os efeitos da radiação solar nos mesmos. Quando há aumento da temperatura ambiente a eficiência dos painéis fotovoltaicos diminui

e ocorrendo a diminuição da temperatura ambiente há a elevação da eficiência do dispositivo. O aumento da temperatura ambiente faz com que a potência de saída (P) da do painel fotovoltaico decresça, a tensão de circuito aberto (V_{ca}) também decresça, a corrente de curto-circuito (I_{cc}) varia muito pouco e a corrente inversa de saturação (I_o) varia. A variação da curva característica devido à variação da temperatura ambiente pode ser vista na Figura 4.

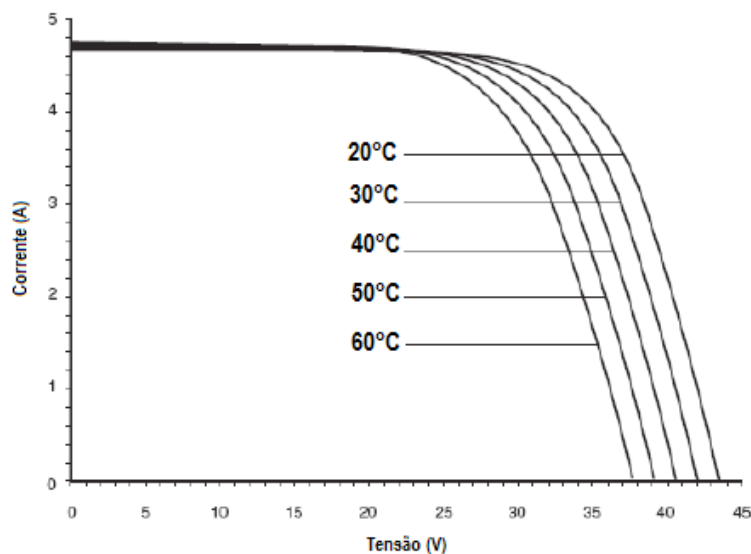


Figura 4: Curva característica IV com variação da temperatura.

3 | DESCRIÇÃO DOS MÉTODOS

O comportamento elétrico do painel fotovoltaico, como descrito anteriormente, é influenciado pela radiação solar e temperatura ambiente. Ao adquirir um painel solar os fabricantes destes disponibilizam os valores de tensão de circuito aberto, corrente de curto-circuito, potência máxima, tensão de máxima potência e corrente de máxima potência que o painel fornece nas condições de teste padrão (STC – *Standart Test Conditions*). Estas condições de teste padrão se referem à radiação solar de 1000 W/m^2 , temperatura ambiente de 25°C e massa de ar de 1,5.

Dessa forma, os dados disponíveis pelos fabricantes dificilmente podem ser usados como referência para dimensionar a aplicação dos painéis fotovoltaicos, uma vez que, muitas vezes no local da instalação dos mesmos os valores de temperatura ambiente e radiação solar são diferentes das condições padrão. Assim, é de grande necessidade que se trace as curvas características nas condições ambientais do local que será utilizado a energia solar fotovoltaica.

Com a finalidade de determinar um procedimento simples de obter as curvas características foram realizados ensaios com o painel solar fotovoltaico por meio de dois métodos distintos. A realização destes tem como objetivo comparar as curvas obtidas com os dados coletados no primeiro e segundo método e determinar se os resultados encontrados são coerentes e corretos.

Para que as curvas características obtidas pelos dois métodos distintos pudessem

ser comparadas com as mesmas condições de temperatura ambiente e radiação solar, os ensaios relativos a cada método foram realizados em sequência. Assim, realizava-se o ensaio utilizando o primeiro método, o qual possui duração de aproximadamente quinze minutos, e em seguida realizava-se o ensaio com o segundo método, com duração de aproximadamente cinco minutos. Nos dois tipos de ensaios foi utilizado o mesmo painel fotovoltaico, para que a diferença deste não interferisse nas curvas características obtidas.

A seguir serão descritos os dois métodos utilizados na realização dos ensaios.

3.1 Primeiro Método

O primeiro método proposto tem como objetivo ser simples e prático na obtenção da curva característica, possibilitando que este possa ser amplamente utilizado. Os ensaios deste método utilizam equipamentos de medições simples e fáceis de obterem para coletar os dados necessários para traçar a curva característica do painel fotovoltaico. Com os dados obtidos nos ensaios e utilizando as equações do circuito equivalente do painel, a curva neste método foi traçada através do *software* Matlab.

Nos ensaios através do primeiro método foram utilizados os seguintes equipamentos: painel solar fotovoltaico, suporte para o painel, reostato, multímetro, bússola e termômetro infravermelho. Para se obter o valor da radiação solar neste método o ideal é utilizar o equipamento piranômetro. Porém, devido à impossibilidade de adquirir estes dados com o piranômetro disponível no laboratório e, também, devido o código utilizado para gerar as curvas características não necessitar dos valores de radiação, esta foi obtida com o equipamento Mini-KLA.

A montagem dos equipamentos para o primeiro método pode ser observada na Figura 5 a seguir.

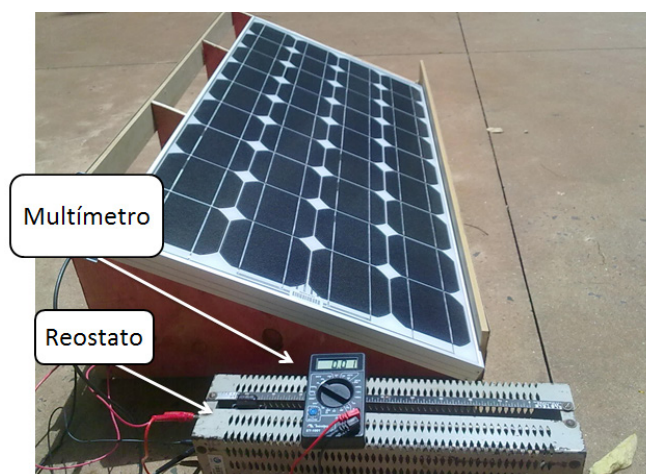


Figura 5: Ensaio com o primeiro método.

Para realizar as medições primeiramente foi posicionado o painel no suporte do mesmo, com orientação para o Norte Verdadeiro, uma vez que, nesta posição o painel recebe a maior quantidade de radiação solar. Assim, com multímetros coletaram-se os valores de tensão de circuito aberto e corrente de curto-circuito. Em seguida, foi conectado aos terminais do painel um reostato, com a finalidade de variar a carga

conectada ao painel e obter vários valores de tensão e corrente elétrica.

3.2. Segundo Método

O segundo método utilizado para obter as curvas características foi usado como referência para validar as curvas obtidas com o primeiro método, pois este método utiliza para coletar os dados um equipamento próprio para medições de painéis fotovoltaicos. Esse equipamento é chamado Mini-KLA e quando conectado aos terminais no painel traça imediatamente a curva característica do mesmo e fornece os valores de tensão de circuito aberto, radiação solar e temperatura ambiente. As curvas obtidas com esse método são transferidas para o computador através do *software* MiniLes 2.3, o qual é fornecido pelo fabricante do equipamento Mini-KLA.

Os equipamentos utilizados nos ensaios com o segundo método foram: painel solar fotovoltaico, suporte para o painel, Mini-KLA, sensor de radiação solar Si-01TC-T e bússola. A Figura 6 ilustra a montagem dos equipamentos utilizando o segundo método.



Figura 6: Ensaio com o segundo método.

Para as medições com o segundo método também foi posicionado o painel fotovoltaico no suporte com orientação para o Norte Verdadeiro. Em seguida, conectou-se o equipamento Mini-KLA aos terminais do painel e o sensor de radiação solar Si-01TC-T foi conectado ao Mini-KLA. O sensor pertence ao Mini-KLA e este é o responsável por realizar as medições de radiação solar e temperatura ambiente do local.

4 | CÁLCULO TEÓRICO

Com as equações do circuito equivalente do painel solar fotovoltaico é possível realizar o cálculo teórico do valor de corrente elétrica que o painel solar fornece em determinadas condições de temperatura ambiente e radiação solar. Assim, para realizar o estudo do painel fotovoltaico utilizado nos ensaios práticos foram realizados os cálculos teóricos para os dados coletados durante os ensaios realizados.

Para realizar os cálculos teóricos é necessário conhecer as características elétricas do painel nas condições de teste padrão fornecidas pelos fabricantes e os

dados obtidos através dos ensaios.

As características elétricas do painel fotovoltaico Sanmodule SW 75 do fabricante Solar World, o qual foi utilizado em todos os ensaios, são:

- Potência máxima de pico (P_{mp}) = 75 W_p
- Tensão de circuito aberto (V_{ca}) = 21,7 V
- Tensão de máxima potência (V_{mp}) = 17,3 V
- Corrente de curto-circuito (I_{cc}) = 4,80 A
- Corrente de máxima potência (I_{mp}) = 4,35 A

Os valores coletados nos ensaios de tensão de circuito aberto, corrente de curto-circuito, radiação solar e temperatura ambiente, realizado no dia 4 de novembro de 2011, são:

- $V_{ca} = 18,7$ V
- $I_{cc} = 5,25$ A
- $G = 907$ W/m²
- $T = 338$ K

Assim, os cálculos utilizando as expressões do circuito equivalente do painel fotovoltaico, serão mostrados a seguir.

Cálculo do potencial térmico de referência, utilizando a equação 1.

$$V_{tr} = 0,0257V \quad (10)$$

Cálculo do fator de idealidade do diodo, utilizando a equação 3.

$$m = 72,33 \quad (11)$$

Cálculo do fator de idealidade equivalente do diodo, utilizando a equação 4.

$$m' = \frac{72,33}{36} = 2 \quad (12)$$

Cálculo do potencial térmico, utilizando a equação 2.

$$V_t = 0,0291 V \quad (13)$$

Cálculo da corrente inversa máxima de saturação do diodo na referência, utilizando a equação 5.

$$I_{or} = 4,087 \times 10^{-5} A \quad (14)$$

Cálculo da corrente inversa máxima de saturação do diodo, utilizando a equação 6.

$$I_0 = 1,518 \times 10^{-4} A \quad (15)$$

Cálculo da corrente de curto-circuito, utilizando a equação 7.

$$I_{cc} = 4,35 A \quad (16)$$

Cálculo da corrente de saída do painel fotovoltaico, utilizando a equação 8.

$$I = 4,16 A \quad (17)$$

Dessa forma, através dos cálculos teóricos pode-se observar que o painel fornecerá uma corrente elétrica de 4,16 A, quando este atingir uma tensão de 15 V. Esta tensão foi escolhida para o cálculo da corrente através da curva característica IV.

5 | CURVA CARACTERÍSTICA

Para determinar um processo simples de obter as curvas características dos painéis fotovoltaicos foram propostos dois métodos distintos, os quais foram descritos anteriormente. Nestes métodos foi estabelecido qual seria a maneira de realizar os ensaios dos respectivos métodos, com a finalidade de obter de forma distinta as curvas características.

Determinado os procedimentos a serem utilizados em cada método foi possível realizar os ensaios com o painel fotovoltaico. Nesses ensaios foram coletados os dados necessários para traçar a curva característica, como os valores de tensão de circuito aberto e corrente de curto-circuito. As curvas de ambos os métodos não puderam ser traçadas no mesmo gráfico devido o equipamento Mini-KLA disponibilizar as curvas apenas em arquivos para leitura.

Foram realizados diversos ensaios com o painel através dos dois métodos propostos para verificar quais as melhores condições de realizar os mesmos. Assim, observou-se que para obter valores válidos de tensão e corrente é necessário que a temperatura ambiente e a radiação solar permaneçam praticamente constantes durante a realização dos ensaios, para que a variação destes valores não interferisse nas curvas características obtidas.

Dessa forma, foram obtidas vinte curvas características de cada método para serem comparadas e analisadas. A seguir será apresentada uma curva característica de cada método, obtidas com dados coletados nos ensaios realizados no dia 24 de outubro de 2011. Neste dia a radiação solar registrada foi de 891 w/m² e temperatura ambiente de 67,2°C.

Com a realização do ensaio através do primeiro método obteve-se o valor de tensão de circuito aberto de 18,34 V e corrente de curto-circuito de 5,04 A. A Figura 7 ilustra a curva traçada com os dados coletados nesse ensaio através do *software* Matlab.

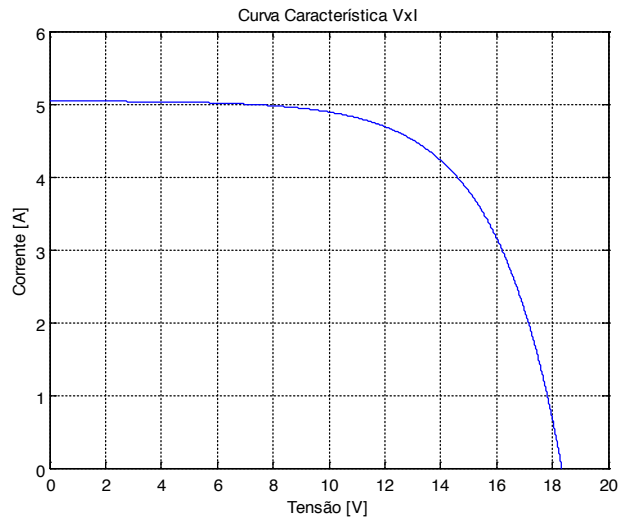


Figura 7: Curva característica obtida com o primeiro método.

Utilizando o segundo método no ensaio com o painel fotovoltaico observou-se uma tensão se circuito aberto de 18,60 V e uma corrente de curto-circuito de 5,07 A. A curva obtida nesse método pode ser observada na Figura 8.

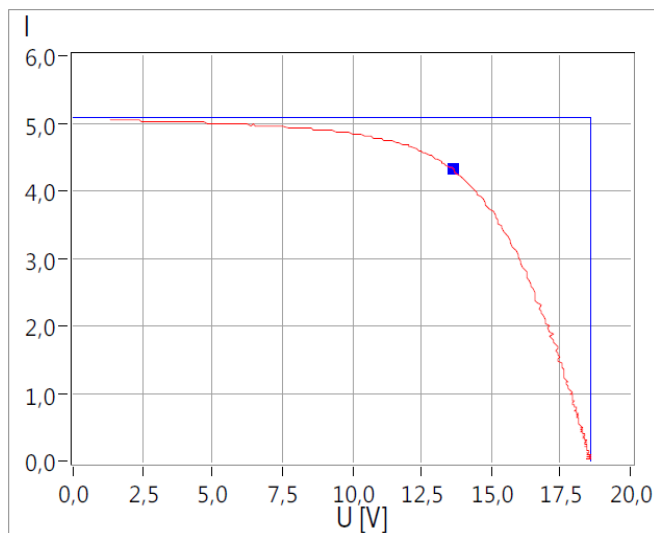


Figura 8: Curva característica obtida com o segundo método.

Com a análise das curvas características pode-se observar que as curvas traçadas a partir dos dados do primeiro método e as curvas obtidas com o equipamento Mini-KLA, no segundo método, são muito semelhantes. A Tabela I mostra os valores de tensão e corrente coletados em cada método bem como o erro percentual relativo entre as duas medições.

	V_{ca}	I_{cc}	V_{mp}	I_{mp}
1º Método	18,34 V	5,04 A	13,91 V	4,26 A
2º Método	18,6 V	5,07 A	13,6 V	4,32 A
Erro Percentual	1,39 %	0,59 %	2,28 %	1,39 %

TABELA I: Erro Percentual entre os Valores de Tensão e de Corrente

A diferença entre as curvas características e também os valores de tensão de circuito aberto e corrente de curto-circuito medido em ambos os métodos ocorre devido os ensaios com os dois métodos não serem realizados de forma simultânea. Como ocorre um pequeno intervalo de tempo (aproximadamente quinze minutos) entre a realização dos ensaios com o primeiro e o segundo método as condições ambientais variam e mesmo que essa mudança seja pequena interfere diretamente nos valores de tensão e corrente fornecidos pelo painel fotovoltaico.

6 | CONCLUSÃO

Obtido as curvas características foi possível analisá-las e também comparar os valores de tensão e correntes medidos através dos dois métodos. Com a análise das curvas características observa-se que as curvas referentes ao primeiro método e as curvas do segundo método são muito semelhantes e os valores de tensão e correntes descritos pela curva são praticamente os mesmos, tendo uma diferença de apenas alguns décimos nestes valores.

Com a realização deste trabalho foi possível verificar que os dados obtidos com o primeiro método que utiliza equipamentos de medições simples são muito próximos dos valores fornecidos com o segundo método, que utiliza um equipamento de medição próprio para painel fotovoltaico. Dessa forma, pode-se concluir que os dados coletados com o primeiro método são corretos e verdadeiros e estes podem ser utilizados para determinar adequadamente a aplicação dos painéis fotovoltaicos e, assim, contribuir para aumentar a eficiência da energia solar fotovoltaica.

Espera-se com este trabalho que as curvas características possam ser amplamente determinadas e utilizadas na aplicação dos painéis fotovoltaicos contribuindo com a eficiência destes. Pois, como o primeiro método obtém dados válidos para a determinação da curva característica e este utiliza equipamentos de medições simples, tornam-se mais simples a obtenção dessas curvas.

REFERÊNCIAS

C. Camus e E. Eusébio. **Gestão de Energia – Energia Solar**. Instituto Superior de Engenharia de Lisboa. Lisboa, 2006.

Confederação Nacional das Indústrias. **Matriz Energética: Cenários, Oportunidades e Desafios**. Acedido em 4 de janeiro de 2012, em <http://www.cni.or.br>.

F. Kininger. **Photovoltaic Systems Technology**. Universitat Kassel. Kassel, 2003.

Grupo de Trabalho de Energia Solar. **Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos**. Rio de Janeiro, 2004.

M. T. Tolmasquim. **Fontes Renováveis de Energia no Brasil**. 1ª ed. Rio de Janeiro: Interciência, 2003.

SOBRE A ORGANIZADORA

Jaqueline Oliveira Rezende Possui graduação em Engenharia Elétrica, com certificado de estudos em Engenharia de Sistemas de Energia Elétrica e mestrado em Engenharia Elétrica, ambos pela Universidade Federal de Uberlândia (UFU). Atualmente é aluna de doutorado em Engenharia Elétrica, no Núcleo de Dinâmica de Sistemas Elétricos, pela Universidade Federal de Uberlândia. Atuou como professora nos cursos de Engenharia Elétrica e Engenharia de Controle e Automação. Tem realizado pesquisas em Sistemas de Energia Elétrica, dedicando-se principalmente às seguintes áreas: Energia Solar Fotovoltaica; Curvas Características de Painéis Fotovoltaicos; Dinâmica de Sistemas Elétricos; Geração Distribuída; Simulação Computacional; Algoritmo Genético.

Agência Brasileira do ISBN
ISBN 978-85-85107-45-1

