

# Discrete Representation of Photovoltaic Modules

A. B. R. Massaranduba, B. F. O. Coelho, E. P. Machado, *Member, IEEE*. E. C. Silva,  
and A. C. Pinto, *Member, IEEE*.

**Abstract**—In order to develop a tool that facilitates the understanding of photovoltaic modules simulation, this work presents a methodology for representing these modules using only linear elements. Taking as a starting point the four-parameter representation of a photovoltaic module, a discrete equivalent is obtained based on the Newton-Raphson method for solving nonlinear equations. The characteristic curves, I-V and P-V, obtained with this methodology for a commercial module and its behavior when coupled to an RLC circuit are then presented.

**Index Terms**—Photovoltaic modules, Discrete representation, I-V and P-V curves, RLC circuit.

## I. INTRODUÇÃO

Devido a diminuição dos combustíveis fósseis e ao aumento da demanda por energia elétrica, sistemas de geração de energia baseados em fontes renováveis têm despertado cada vez mais o interesse da sociedade atual [1], [2]. Dentre essas tecnologias está a energia solar fotovoltaica, que é um tipo de energia renovável capaz de contribuir para solucionar os problemas energéticos enfrentados pelo mundo [3].

A principal atratividade desses sistemas está na sua capacidade de gerar eletricidade pela transformação direta de uma fonte de energia inesgotável, sem contribuir para o aquecimento global durante sua fase de operação. Além disso, o decréscimo dos custos dos dispositivos empregados nesse processo de conversão de energia, bem como o aumento de estudos para melhorar sua eficiência, tornam a geração fotovoltaica uma tecnologia competitiva [4]. O sistema é composto por arranjos de módulos fotovoltaicos, que por sua vez são formados por células capazes de fazer a conversão direta da luz em energia elétrica [5]. Entretanto, módulos fotovoltaicos são elementos de natureza não linear [6], o que dificulta o estudo do comportamento do sistema quando diferentes tipos de cargas são acopladas aos seus terminais.

Plataformas computacionais permitem a simulação de sistemas com diferentes complexidades, porém a compreensão da interação entre os elementos requer experiência e certo nível de abstração do usuário, uma vez que os modelos implementados por essas plataformas normalmente não são de domínio público. Diante disso, surgiu a necessidade de elaborar uma ferramenta que pudesse facilitar o entendimento

do comportamento estacionário e dinâmico, bem como a avaliação do desempenho de módulos e arranjos fotovoltaicos.

A metodologia de avaliação do desempenho de geradores fotovoltaicos dá-se através do levantamento das curvas características I-V e P-V, as quais relacionam as grandezas de saída, corrente e potência, com a tensão terminal. Em tais curvas, são apresentadas informações importantes do gerador, a saber: tensão de circuito aberto ( $V_{oc}$ ), corrente de curto-circuito ( $I_{sc}$ ), tensão de máxima potência ( $V_{mp}$ ) e corrente de máxima potência ( $I_{mp}$ ) [7]. Além disso, as curvas características dos geradores podem ser utilizadas para realizar o diagnóstico de possíveis anomalias durante a operação (sombreamento, pontos quentes, polarização, falhas de conexão) [8], [9], bem como para estimação dos parâmetros dos circuitos elétricos equivalentes [10]–[12].

Existem diversos trabalhos que versam sobre as metodologias de modelagem de geradores fotovoltaicos na literatura técnico-científica. Em [13], os autores propuseram um novo modelo a 5 parâmetros em que a parametrização era feita analiticamente com base nos dados fornecidos pelo fabricante, sem a necessidade de realizar a iteração de equações complicadas ou estimar valores iniciais. No trabalho apresentado em [14], foram utilizados os princípios do equivalente de Thévenin e das funções lineares em trechos para criar um modelo a dois diodos simplificado capaz de aproximar uma solução explícita para as curvas I-V de um gerador fotovoltaico. Em [15], os autores buscaram linearizar um modelo a dois diodos aproximando as equações não lineares por polinômios de Chebyshev, obtendo soluções analíticas para o sistema. Em [16], foi utilizada uma rede neural residual modificada para prever as curvas características I-V de um módulo fotovoltaico para uma dada condição de operação. Os resultados foram então comparados ao de um modelo a um diodo, mostrando que o modelo implementado com a rede neural obteve um desempenho superior.

Este trabalho propõe uma metodologia para representar geradores fotovoltaicos por uma rede resistiva e fontes de corrente, podendo ser interpretado como um modelo de grandes sinais, dada a capacidade de representação do equipamento quando sujeito a grandes perturbações nas variáveis de entrada. Embora seja não linear e variante no tempo, quando submetido a determinadas condições de contorno nas variáveis de entrada, o circuito discreto equivalente assume a forma linear, podendo ser interpretado como um modelo de pequenos sinais do gerador, representação imprescindível durante a condução de estudos das malhas de controle dos conversores de interface. Além do mais, a metodologia proposta pode ser aplicada em conjunto com os diferentes métodos de identificação paramétrica propostos na literatura. Como resultado do trabalho, são apresentadas as curvas características I-V e P-V obtidas para

A. B. R. Massaranduba, Universidade Federal do Vale do São Francisco (UNIVASF), Juazeiro, Bahia, Brasil, biamassaranduba@hotmail.com.

B. F. O. Coelho, Universidade Federal do Vale do São Francisco (UNIVASF), Juazeiro, Bahia, Brasil, brunofonsecaoc@gmail.com

E. P. Machado, Universidade Federal do Vale do São Francisco (UNIVASF), Juazeiro, Bahia, Brasil, eubis.machado@univasf.edu.br.

E. C. Silva, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, Paraíba, Brasil, edival.silva@ee.ufcg.edu.br

A. C. Pinto, Universidade Federal do Vale do São Francisco (UNIVASF), Juazeiro, Bahia, Brasil, adeon.pinto@univasf.edu.br.

um módulo fotovoltaico comercial, bem como o processo de interconexão e simulação quando acoplado à uma rede RLC.

Este artigo está organizado da seguinte forma: a Seção II apresenta o modelo a um diodo de células e módulos fotovoltaicos, abordando também a representação da dependência da temperatura e irradiância e a metodologia para estimação de parâmetros; a Seção III expõe o modelo discreto do módulo fotovoltaico; já a Seção IV apresenta as análises computacionais utilizadas para obter as curvas características dos geradores fotovoltaicos e também com uma rede RLC acoplada; As conclusões podem ser observadas na Seção V.

## II. MODELO A UM DIODO DE CÉLULAS E MÓDULOS FOTOVOLTAICOS

### A. Representação de Células

Um modelo de circuito equivalente com representação das perdas de uma célula fotovoltaica é apresentado na Fig. 1. A corrente elétrica fotogerada,  $I_{ph}$ , representa o comportamento da célula fotovoltaica devido ao fenômeno de absorção da irradiação solar incidente. O diodo em paralelo com a fonte de corrente retrata o comportamento da corrente de saturação reversa da junção P-N, ao passo que a resistência do circuito retrata as perdas ôhmicas da célula e dos demais contatos metálicos.

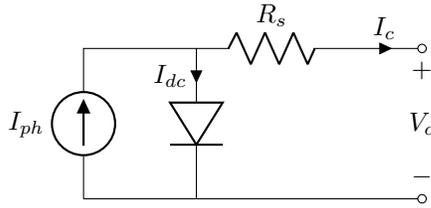


Fig. 1. Circuito equivalente da célula fotovoltaica.

Aplicando a lei das correntes de *Kirchhoff*, a corrente de saída da célula é dada pela Eq. (1).

$$I_c = I_{ph} - I_{dc} \quad (1)$$

sendo  $I_{dc}$  a corrente no diodo dada pela equação de Shockley representada pela Eq. (2):

$$I_{dc} = I_0 \left[ \exp\left(\frac{V_c + I_c R_s}{n V_T}\right) - 1 \right] \quad (2)$$

em que:

- $I_0$  - corrente de saturação reversa;
- $V_c$  - tensão nos terminais de saída da célula;
- $R_s$  - resistência série;
- $n$  - fator de idealidade;
- $V_T$  - tensão térmica do diodo, dada pela Eq. (3):

$$V_T = \frac{kT}{q} \quad (3)$$

sendo  $q$  a carga do elétron,  $k$  a constante de *Boltzmann* e  $T$  a temperatura do diodo.

Presumindo que a corrente fotogerada equivale, aproximadamente, a corrente de curto-circuito da célula [17], a corrente

de saída do circuito equivalente da célula pode ser expressa como mostra a Eq. (4).

$$I_c = I_{sc} - I_0 \left[ \exp\left(\frac{V_c + I_c R_s}{n V_T}\right) - 1 \right] \quad (4)$$

Esse modelo representativo da célula fotovoltaica também é chamado de modelo a quatro parâmetros, pois sua equação é função de  $I_{sc}$ ,  $I_0$ ,  $n$  e  $R_s$ . Nota-se que a equação que representa a célula é não linear e transcendental, dificultando a análise de circuitos de módulos fotovoltaicos através das técnicas de solução de circuitos lineares, a exemplo da análise nodal.

### B. Representação de Módulos Fotovoltaicos

Um módulo fotovoltaico consiste na associação de células fotovoltaicas a fim de atingir elevados níveis de tensão e de corrente. A maioria dos módulos atuais empregam uma configuração em que as células estão associadas em série, como por exemplo os módulos vistos em [18], [19] e [20], que contém 60 células. A Fig. 2 mostra o circuito equivalente do modelo a quatro parâmetros de um módulo fotovoltaico em que suas células estão sob as mesmas condições de temperatura e irradiância.

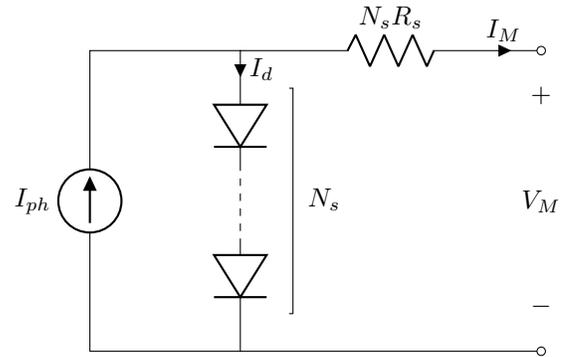


Fig. 2. Circuito equivalente do módulo fotovoltaico.

De maneira análoga ao caso da célula, aplicando a lei das correntes de *Kirchhoff* ao circuito da Fig. 2, obtém-se a Eq. (5):

$$I_d = I_{ph} - I_d \quad (5)$$

Dessa forma, a corrente de saída é dada pela Eq. (6):

$$I_d = I_{ph} - I_0 \left[ \exp\left(\frac{V_M + I_M R_s}{N_s n V_T}\right) - 1 \right] \quad (6)$$

em que:

- $I_d$  - corrente de saída do módulo fotovoltaico;
- $V_M$  - tensão nos terminais de saída do módulo fotovoltaico;
- $N_s$  - número de células em série no módulo fotovoltaico.

### C. Representação da Dependência da Temperatura e Irradiância

A partir do levantamento experimental das curvas características das células fotovoltaicas, sabe-se que a corrente de

curto-circuito e a tensão de circuito aberto são funções da temperatura e irradiância. Assim, é natural que a dependência da temperatura e da irradiância sejam inseridas nas variáveis do modelo, a partir de correções de dados observados nas condições de teste padrão fornecidos pelos fabricantes.

Uma estimativa da temperatura da célula,  $T$ , para condições de operação diferentes das STC (*Standard Technical Conditions*), pode ser obtida pela Eq. (7) [21]:

$$T = T_{amb} + \left( \frac{NOCT - 20 \text{ } ^\circ\text{C}}{0,8} \right) G \quad (7)$$

em que:

$T_{amb}$  - temperatura ambiente;

$NOCT$  - temperatura nominal de operação (do inglês, *Nominal Operation Cell Temperature*);

$G$  - irradiância solar a temperatura ambiente.

A partir da corrente de curto-circuito nas STC, a correção para valores de temperatura e irradiância diferentes das STC, é obtida pela Eq. (8) [22]:

$$I_{sc} = I_{sc\_Ref} [1 + \alpha_{sc}(T - T_{Ref})] \left( \frac{G}{G_{Ref}} \right) \quad (8)$$

em que:

$T_{c\_Ref}$  - temperatura de referência nas STC;

$I_{sc\_Ref}$  - corrente de curto-circuito nas STC;

$\alpha_{sc}$  - coeficiente de temperatura da corrente de curto-circuito;

$G_{Ref}$  - irradiância de referência nas STC;

$I_{sc}$  - corrente de curto-circuito para condições diferentes das STC.

A tensão de circuito aberto varia com a temperatura e irradiância de forma semelhante à corrente de curto-circuito. Essa influência é estimada pela Eq. (9) [22]:

$$V_{oc} = [1 + \beta_T(T - T_{Ref})] V_{oc\_Ref} + \ln \left( \frac{G}{G_{Ref}} \right) \quad (9)$$

em que:

$V_{oc\_Ref}$  - tensão de circuito aberto nas STC;

$\beta_T$  - coeficiente de temperatura absoluta da tensão de circuito aberto;

$V_{oc}$  - tensão de circuito aberto para condições diferente das STC.

Já a correção da corrente de saturação reversa para variação da temperatura da junção é dada pela Eq. (10) [23]:

$$I_o = I_{o\_Ref} \left( \frac{T}{T_{Ref}} \right)^{\left( \frac{3}{n} \right)} \exp \left[ \frac{E_g}{nV_T} \left( \frac{T}{T_{Ref}} - 1 \right) \right] \quad (10)$$

em que  $E_g$  é dado pela Eq. (11):

$$E_g = 1,16 - 7,02 \times 10^{-4} \left( \frac{T^2}{T - 1108} \right) \quad (11)$$

sendo:

$I_{o\_Ref}$  - corrente de saturação nas STC.

$I_o$  - corrente de saturação para condições diferentes das STC.

#### D. Metodologia de Estimação dos Parâmetros

Uma forma objetiva de estimar os parâmetros é fazer uso de informações disponibilizadas pelos fabricantes, que são fornecidas nas STC. Como as STC são utilizadas durante a estimação paramétrica, a partir das Eqs. (8)-(10), tem-se  $V_{oc} = V_{oc\_Ref}$ ,  $I_{sc} = I_{sc\_Ref}$  e  $I_o = I_{o\_Ref}$ .

Aplicando um curto-circuito nos terminais de saída do circuito equivalente do modelo apresentado na Fig. 2, pode-se chegar a Eq. (12):

$$I_{ph} \approx I_{sc} \quad (12)$$

Quando os terminais de saída do módulo fotovoltaico são deixados em aberto, é possível obter a Eq. (13):

$$I_o = \frac{I_{sc}}{\exp \left( \frac{V_{oc}}{N_s n V_T} \right) - 1} \quad (13)$$

Uma forma simplificada e eficiente de se obter  $R_s$  foi proposta em [24]. Na metodologia, apenas informações de circuito aberto, curto-circuito, bem como a inclinação da curva I-V no ponto de circuito aberto são suficientes para a obtenção daquele parâmetro, como mostra a Eq. (14):

$$R_s = - \frac{dV_{oc}}{dI} - \frac{1}{X_v} \quad (14)$$

sendo  $X_v$  dado pela Eq. (15):

$$X_v = \left[ \frac{I_o}{nV_T} \right] \exp \left( \frac{V_{oc}}{N_s n V_T} \right) \quad (15)$$

Na forma como se apresenta, o cálculo de  $R_s$  já leva em consideração as dependências da irradiância e temperatura do módulo fotovoltaico. A parcela  $\frac{dV_{oc}}{dI}$  é o coeficiente de inclinação da curva característica obtida das curvas apresentadas no *datasheet*. Portanto, trata-se de um parâmetro dinâmico que deve ser atualizado de acordo com as condições meteorológicas.

### III. MODELO DISCRETO DO MÓDULO FOTOVOLTAICO

Para realizar análises no domínio do tempo de redes elétricas contendo elementos armazenadores de energia e geradores fotovoltaicos, faz-se necessária a solução das equações diferenciais e algébricas não lineares. Em [25] foi desenvolvida uma metodologia que permitiu implementar um programa computacional para o cálculo de transitórios eletromagnéticos em circuitos que contêm elementos como resistores, indutores, capacitores, bem como componentes mais complexos como linhas de transmissão.

Diferentemente de indutores e capacitores, a relação entre a corrente de saída e a tensão terminal de um módulo fotovoltaico é algébrica e não linear, sendo o diodo o elemento do circuito responsável pela não linearidade. Portanto, uma solução simples para obter uma representação linear para um módulo fotovoltaico, é realizar a linearização do diodo em torno de um ponto de operação, por exemplo, empregando o método numérico de Newton-Raphson (NR).

O circuito não linear representado pela Fig. 2 é utilizado como referência durante o desenvolvimento do modelo discreto do módulo fotovoltaico, mas que pode ser facilmente estendido para representação de arranjos fotovoltaicos. Denominando de  $V_d$  a tensão sob os diodos, a aplicação da análise nodal ao circuito permite escrever a Eq. (16):

$$I_{ph} = I_d + \frac{V_d - V_M}{N_s R_s} \quad (16)$$

Através da Eq. (16), não é possível obter a solução analítica para  $V_d$ , pois se trata de uma equação transcendente não linear. Reescrevendo essa equação em uma forma mais conveniente para aplicação do método NR, tem-se a Eq. (17):

$$f(V_d) = I_d + \frac{V_d - V_M}{N_s R_s} - I_{ph} \quad (17)$$

Expressando a Eq. (17) na forma padrão do método NR, uma aproximação para tensão nodal pode ser obtida pela Eq. (18):

$$V_d^{(k+1)} = V_d^{(k)} - \frac{f(V_d^{(k)})}{f'(V_d^{(k)})} \quad (18)$$

sendo  $f'(V_d^{(k)})$  dado pela Eq. (19):

$$\begin{aligned} f'(V_d^{(k)}) &= \left. \frac{df(V_d)}{dV_d} \right|_{V_d=V_d^{(k)}} \\ &= \frac{1}{N_s R_s} + G_d^{(k)} \end{aligned} \quad (19)$$

em que  $G_d^{(k)}$  é dado pela Eq. (20):

$$G_d^{(k)} = \frac{I_0}{N_s n V_T} \exp\left(\frac{V_d^{(k)}}{N_s n V_T}\right) \quad (20)$$

A partir das Eqs. (17), (18), (19) e (20) é possível escrever a Eq. (21):

$$\begin{aligned} \left(G_d^{(k)} + \frac{1}{N_s R_s}\right) V_d^{(k+1)} &= I_{ph} - \left(I_d^{(k)} - G_d^{(k)} V_d^{(k)}\right) \\ &\quad + \frac{V_M}{N_s R_s} \end{aligned} \quad (21)$$

Tomando-se as substituições de variáveis  $R_d^{(k)} = \frac{1}{G_d^{(k)}}$  e  $k = K - 1$ , A Eq. (21) pode ser expressa através da Eq. (22):

$$\begin{aligned} \frac{V_d^{(K)}}{R_d^{(K-1)}} + I_M &= I_{ph} - \left(I_d^{(K-1)} - \frac{V_d^{(K-1)}}{R_d^{(K-1)}}\right) \\ &= I_{ph} - I_{hist}^{(K-1)} \end{aligned} \quad (22)$$

sendo  $R_d^{(K-1)}$  e  $I_{hist}^{(K-1)}$  grandezas históricas e, portanto, devendo ser atualizadas a cada iteração. A denominação histórica foi empregada devido ao fato dessas variáveis serem determinados com base nos valores calculados nos passos anteriores.

Por inspeção, observa-se que a Eq. (22) pode ser descrita pelo circuito elétrico equivalente apresentado na Fig. 3. Nota-se que o diodo foi representado por uma resistência dinâmica em paralelo com uma fonte de corrente histórica, sendo

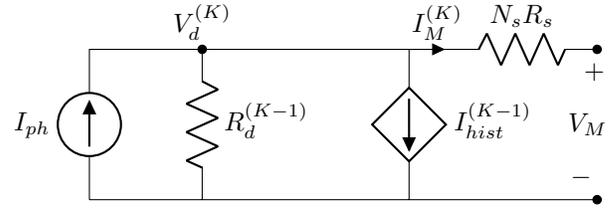


Fig. 3. Circuito equivalente discreto do módulo fotovoltaico.

ambas dependentes das características físicas do diodo, bem como de uma amostra passada da tensão nodal. Portanto, sob a ótica dos terminais de saída, o modelo discreto do módulo fotovoltaico é não linear variante no tempo. Contudo, para pequenas variações na irradiância, temperatura e tensão terminal, a resistência dinâmica e a fonte de corrente histórica são constantes, caracterizando o circuito como linear e invariante no tempo. Tal natureza permite representar o gerador fotovoltaico em estruturas de controle que requerem análises no domínio da frequência, a exemplo daquelas onde os controladores são parametrizados com base nas informações da reposta em frequência.

Com as fontes de corrente conhecidas ou atualizadas, a tensão nodal é obtida e a corrente de saída do módulo fotovoltaico, na  $K$ -ésima iteração, pode ser obtida pela Eq. (23):

$$I_M^{(K)} = I_{ph} - (V_d^{(K)} - V_M)/(N_s R_s) \quad (23)$$

#### IV. ANÁLISES COMPUTACIONAIS

##### A. Curvas Características de Geradores Fotovoltaicos

A fim de investigar a metodologia de discretização de um gerador fotovoltaico, nesta seção serão apresentadas as curvas características de um módulo fotovoltaico comercial, obtidas através do uso de um algoritmo computacional descrito pelo fluxograma representado pela Fig. 4.

Na ocorrência de alterações das condições meteorológicas, os parâmetros do circuito são reajustados, a saber: a resistência série é recalculada, as fontes de corrente são atualizadas, as tensões nodais calculadas e a resistência dinâmica atualizada. Após algumas iterações, as grandezas irão convergir para os novos valores que caracterizam o novo ponto de operação estacionário. Quando o ponto de regime é alcançado, o modelo linear está automaticamente ajustado.

Para a simulação, foi utilizado o módulo fotovoltaico QUARTECH CS6P de 265 W [19], cujos parâmetros utilizados como referência estão apresentados na Tabela I. Vale ressaltar que módulos fotovoltaicos desse modelo podem ser encontrados operando em campo atualmente. Além disso, a simulação pode ser feita para qualquer tipo de módulo fotovoltaico, desde que a parametrização tenha sido feita corretamente baseada na sua folha de dados e na sua condição de operação.

A Fig. 5 apresenta um circuito equivalente discreto empregado para levantar as curvas  $I-V$  e  $P-V$  do módulo fotovoltaico. Com elementos de rede representados pelo equivalente de Norton, o conceito de equação nodal deve ser utilizado para solução da rede.

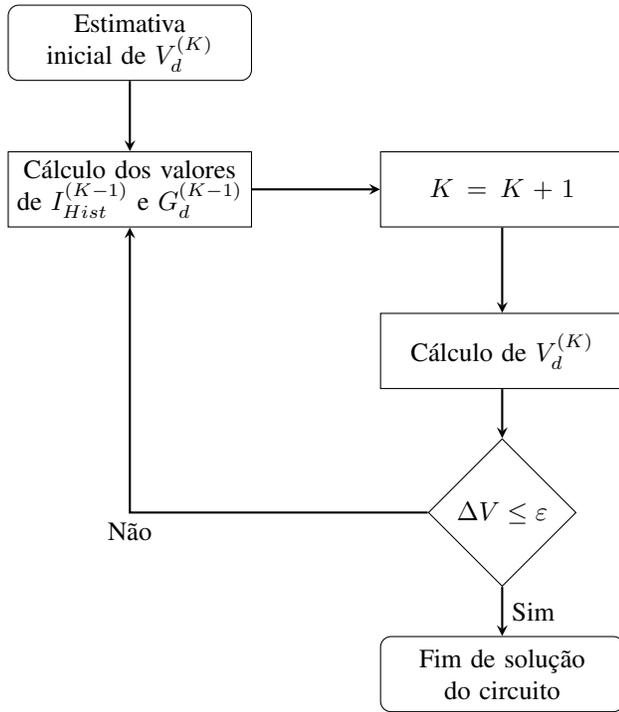


Fig. 4. Fluxograma para solução do circuito discreto.

 TABELA I  
 CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DO MÓDULO FOTOVOLTAICO  
 CS6P 265 W.

Especificação	Dado
Potência nominal máxima	265 W
Tensão de máxima potência	30,6 V
Corrente de máxima potência	8,66 A
Tensão de circuito aberto	37,7 V
Corrente de curto circuito	9,23 A
Número de células em série	60
Coefficiente de temperatura ( $V_{oc}$ )	-0,31 %/°C
Coefficiente de temperatura ( $I_{sc}$ )	0,053 %/°C
NOCT	45 °C

Por inspeção do circuito exibido na Fig. 5, tem-se a Eq. (24):

$$\frac{V_d^{(K)}}{R_d^{(K-1)}} + \frac{V_d^{(K)} - V_M}{N_s R_s} = I_{ph} - I_{hist}^{(K-1)} \quad (24)$$

Empregando as correções das condições meteorológicas e o método de estimação apresentado na seção II-D, é possível

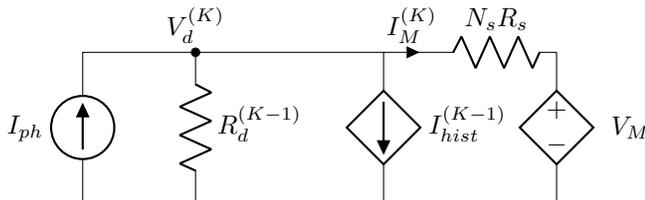


Fig. 5. Circuito equivalente discreto do módulo fotovoltaico conectado a uma fonte de tensão.

realizar simulações com condições meteorológicas dinâmicas. Entretanto, para fins de verificação da metodologia proposta, foram levantados as curvas características I-V e P-V conforme apresentadas nas Fig. 6 e Fig. 7. Para uma melhor verificação do modelo discreto, foram escolhidas as condições de irradiância fornecidas na folha de dados do fabricante, dessa forma os gráficos construídos e as curvas disponibilizadas no *datasheet* do módulo fotovoltaico foram sobrepostas para facilitar a comparação.

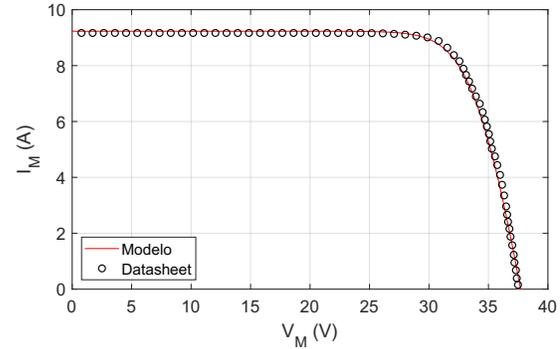


Fig. 6. Curva I-V simulada e fornecida pelo fabricante.

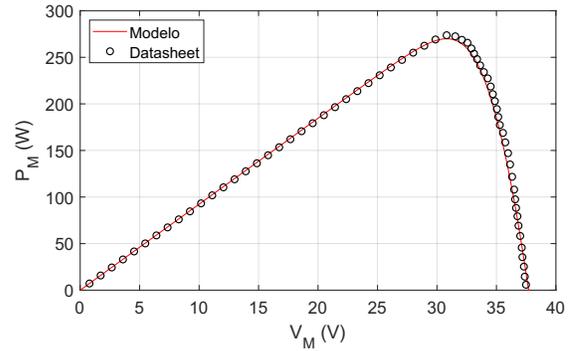


Fig. 7. Curva P-V simulada e a fornecida pelo fabricante.

Das Figs. 6 e 7 é possível observar que a metodologia empregada é capaz de reproduzir as curvas I-V e P-V com boa precisão, sendo a raiz do erro médio quadrático percentual de 2,2% para a curva I-V e 2,5% para a curva P-V.

O comportamento da resistência dinâmica, da resistência estática ( $V_M/I_M$ ) e da potência de saída do gerador fotovoltaico, durante a obtenção da curva I-V, para  $G = 1000 \text{ W.m}^2$  e  $T = 25 \text{ }^\circ\text{C}$  é exibido na Fig. 8, sendo adotados os seguintes valores de base:  $V_{base} = V_{oc}$ ,  $P_{base} = V_{mp}I_{mp}$  e  $R_{base} = V_{mp}/I_{mp}$ . Nota-se que a resistência dinâmica apresenta uma grande variação quando a tensão terminal do gerador passa da condição de curto-circuito para circuito aberto. Também é possível observar que a resistência estática caracteriza a condição terminal do gerador, sendo nula para a condição de curto-circuito e tendendo ao infinito para a condição de circuito aberto. Além disso, é notório que a máxima potência é alcançada quando  $R_d = R_{pv}$ , corroborando com o teorema da máxima transferência de potência.

Comparando o modelo clássico a quatro parâmetros (Fig. 2) e o modelo discreto (Fig. 3), é notório que o diodo foi representado pela conexão em paralelo de uma fonte de corrente histórica e a resistência dinâmica. Os resultados apresentados na Fig. 9 corroboram a representação utilizada, pois se observa que a fonte de corrente histórica e a corrente na resistência dinâmica crescem com sinais opostos, mas cuja sobreposição resulta na corrente do diodo, como esperado.

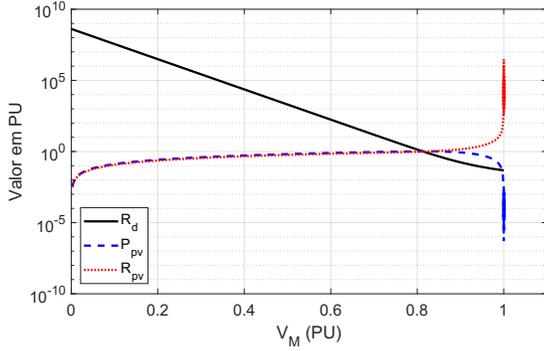


Fig. 8. Comportamento da resistência dinâmica, da resistência estática e da potência de saída do gerador fotovoltaico para  $G = 1000 \text{ W.m}^2$  e  $T = 25^\circ \text{C}$ .

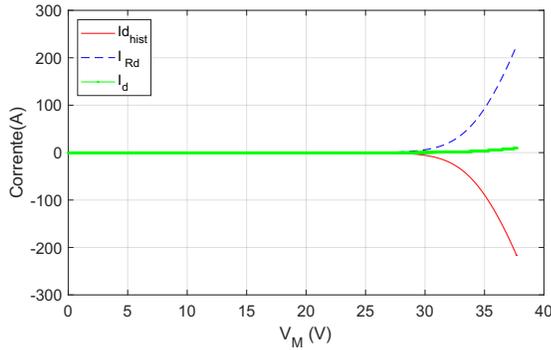


Fig. 9. Comportamento das correntes do modelo discreto em função da tensão terminal.

### B. Rede RLC com Gerador Fotovoltaico Acoplado

Com o objetivo de investigar o comportamento do módulo fotovoltaico quando a ele são acoplados elementos passivos, foi conectado ao sistema um circuito RLC de teste. Diante disso, foi possível desenvolver um algoritmo capaz de computar a evolução temporal da tensão e da corrente nos terminais de saída do módulo fotovoltaico. O circuito esquemático dessa configuração está apresentado na Fig. 10. Em que:  $R_{cp} = 100 \text{ m}\Omega$ ;  $R_{lp} = 0,25(V_{mp}/I_{mp}) \Omega$ ;  $C = 10 \mu\text{F}$ ;  $L = 100 \mu\text{H}$ ;

Utilizando o método de integração trapezoidal para discretizar o indutor e o capacitor [25], a Fig. 11 mostra circuito o equivalente discreto dessa rede RLC de teste, em que  $R_1 = R_{cp} + R_C$  e  $R_2 = R_{lp} + R_L$ , sendo  $R_C = \frac{\Delta t}{2C}$ ,  $R_L = \frac{2L}{\Delta t}$  e  $\Delta t$  o passo de discretização. O equivalente discreto para a

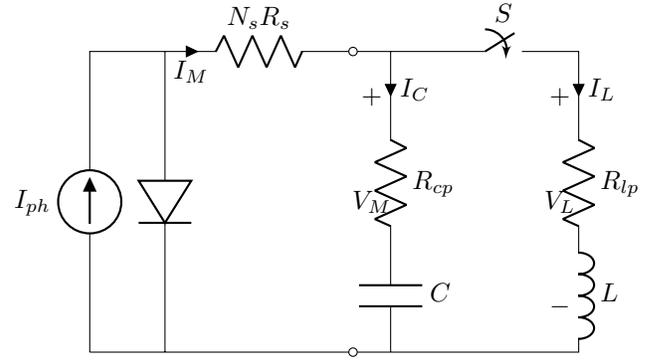


Fig. 10. Circuito equivalente do módulo fotovoltaico com rede RLC acoplada.

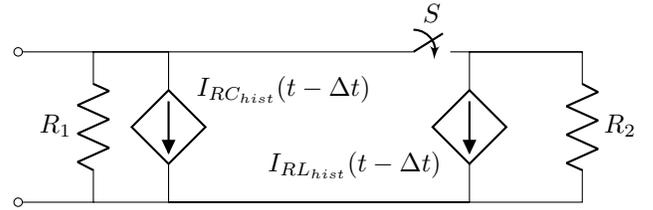


Fig. 11. Representação da rede RLC através de elementos discretos.

Fig. 10, pode ser obtido através da conexão em cascata dos circuitos apresentados pela Fig. 11 e pela Fig. 3.

Aplicando o conceito de análise nodal à rede composta pelos circuitos equivalentes discretos, tem-se o sistema linear dado pela Eq. (25):

$$\mathbf{GV} = \mathbf{I} \quad (25)$$

Tomando-se, inicialmente,  $t = \Delta t$ , tem-se as Eqs. (26), (27) e (28):

$$\mathbf{G} = \begin{bmatrix} \frac{1}{R_d^{(K-1)}} + \frac{1}{N_s R_s} & -\frac{1}{N_s R_s} \\ -\frac{1}{N_s R_s} & \frac{1}{N_s R_s} + \frac{1}{R_{cp}} + \frac{1}{R_{lp} + R_L + R_c} \end{bmatrix} \quad (26)$$

$$\mathbf{V} = \begin{bmatrix} V_1(\Delta t) \\ V_2(\Delta t) \end{bmatrix} \quad (27)$$

$$\mathbf{I} = \begin{bmatrix} I_{ph} - I_{hist}^{(K-1)} \\ -I_{RC_{hist}}(t - \Delta t) - I_{RL_{hist}}(t - \Delta t) \end{bmatrix} \quad (28)$$

Representando a rede através de equivalentes discretos, nota-se que as condições iniciais de tensão no capacitor e de corrente no indutor estão introduzidas na forma de corrente histórica dos elementos. Definida a condição inicial dos elementos armazenadores de energia, bem como a estimativa inicial da tensão no diodo, o modelo discreto do gerador fotovoltaico deve ser atualizado, de forma iterativa, até que a convergência seja alcançada para o tempo  $t = \Delta t$ . Durante essa fase, as tensões nodais dos elementos lineares são mantidas constantes, portanto a Eq. (22) pode ser utilizada para determinar a tensão nodal do gerador fotovoltaico. Quando a convergência é alcançada, o sistema de equações nodais da rede é solucionado, as variáveis de memória são atualizadas e o tempo é avançado para  $t = 2\Delta t$ . O procedimento iterativo de atualização do modelo discreto do gerador fotovoltaico

é retomado e o processo de cálculo das tensões nodais é repetido. Essa metodologia é resumida pelo fluxograma da Fig. 12.

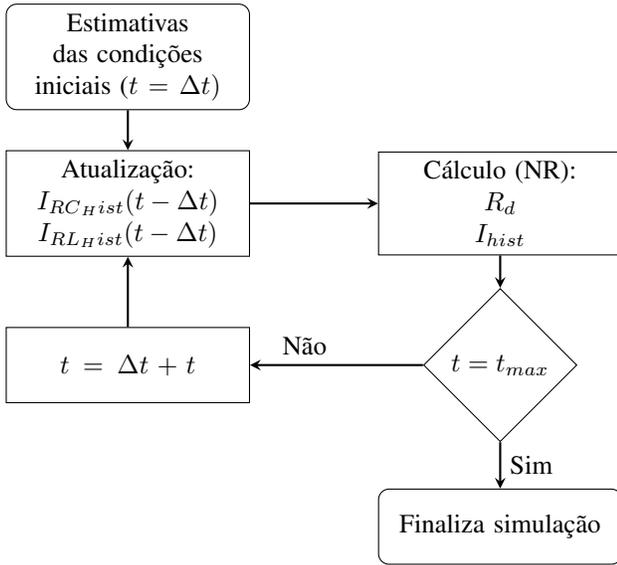


Fig. 12. Fluxograma para solução no tempo do sistema composto pelo gerador fotovoltaico e rede RLC.

Os resultados apresentados nas Figs. 13 e 14 caracterizam o desempenho do modelo discreto do gerador fotovoltaico operando nas STC, sendo adotados os seguintes valores durante a normalização:  $V_{base} = V_{oc}$ ,  $I_{base} = I_{sc}$  e  $P_{base} = V_{mp}I_{mp}$ . No intervalo de tempo  $t < 1,0ms$ , a chave S designada no circuito da Fig. 10 está aberta, propiciando resultados de tensão, corrente e potência característicos do gerador operando em circuito aberto, conforme se pode observar na Fig. 13. No intervalo  $1\text{ ms} < t < 2\text{ ms}$ , o ramo RL que representa uma carga controlada por um conversor de interface (elemento não representado) é conectado ao gerador fotovoltaico, passando o circuito a operar como um sistema amortecido de segunda ordem. Com a carga conectada e operando em regime estacionário, no instante  $t = 2,0ms$ , a resistência  $R_{lp}$  é alterada para  $0,5(V_{mp}/I_{mp})$ , emulando uma possível ação de controle do ciclo de trabalho do conversor de interface, o qual objetiva rastrear o ponto de máxima potência do gerador. Com o aumento na resistência de carga, observa-se que a potência de saída aumenta, ao passo que a resistência dinâmica diminui, aproximando-se da resistência de carga. No intuito de rastrear o ponto de máxima potência, foram abstraídas duas novas ações de controle sob o ciclo de trabalho do conversor de interface, as quais foram emuladas por aumentos sucessivos na resistência de carga, a saber:  $0,75(V_{mp}/I_{mp})$  e  $V_{mp}/I_{mp}$  nos instantes  $t = 3,0ms$  e  $t = 4,0ms$ , respectivamente. Por se tratar de um circuito CC, em regime permanente de operação, a corrente no capacitor é nula e, como esperado, quando a resistência de carga iguala-se a resistência dinâmica do gerador, o ponto de máxima transferência de potência é alcançado.

Na tentativa de aumentar ainda mais a potência de saída do gerador, no instante de  $t = 5,0ms$ , a resistência foi alterada para  $1,25(V_{mp}/I_{mp})$  propiciando um resultado adverso, pois

há uma redução na potência de saída, conforme se observa nos resultados exibidos na Fig. 13. Nessa condição de operação é possível observar um aumento na tensão terminal, mas há redução na corrente, indicando que o novo ponto de operação do gerador desloca-se para direita do ponto de máxima potência na curva I-V. Portanto, com o auxílio dos resultados exibidos na Fig. 14, pode-se constatar que “quando a resistência de carga é superior (inferior) à resistência dinâmica, o ponto de operação do gerador fotovoltaico estará localizado à direita (esquerda) do ponto de máxima potência representado na curva I-V”. Com base no princípio elucidado, a informação da resistência dinâmica do modelo discreto pode fomentar o aprimoramento ou desenvolvimento de uma nova técnica de controle do ciclo de trabalho dos conversores de interface, a fim destes apresentarem um melhor desempenho no rastreamento do ponto de máxima potência de geradores fotovoltaicos, para condições dinâmicas de irradiância e temperatura.

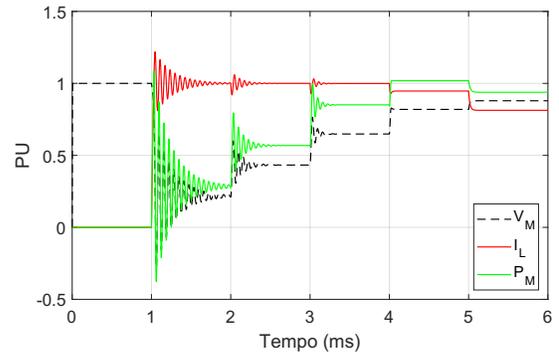


Fig. 13. Tensão, corrente e potência nos terminais de saída do módulo fotovoltaico em função do tempo.

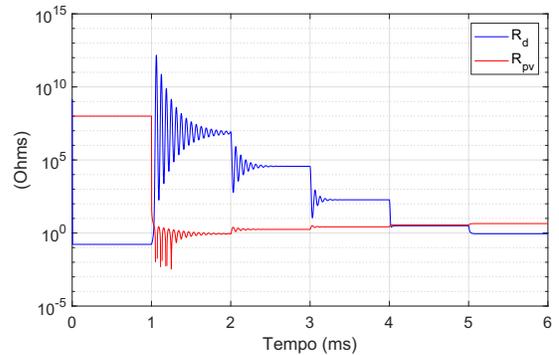


Fig. 14. Comportamento da resistência de carga e da resistência dinâmica ao longo do tempo.

## V. CONCLUSÃO

Este trabalho apresentou uma ferramenta capaz de facilitar o entendimento do comportamento de módulos fotovoltaicos. Para isso foi desenvolvido um método de discretização da equação da célula fotovoltaica, de modo que circuitos de módulos e arranjos podem ser resolvidos através de métodos clássicos de solução de sistemas. Para validar o algoritmo de

discretização, um módulo fotovoltaico comercial foi simulado através da técnica de discretização do diodo e os resultados obtidos mostraram-se condizentes com aqueles disponíveis na folha de dados. Por último, uma rede RLC foi acoplada ao sistema para a obtenção da resposta de corrente e tensão ao longo do tempo, proporcionando resultados coerentes com aqueles esperados. Portanto, a metodologia de discretização para representação computacional de um módulo fotovoltaico com elementos passivos conectados mostrou-se satisfatória.

#### REFERÊNCIAS

- [1] H. Chen, S. Jiao, M. Wang, A. A. Heidari, and X. Zhao, "Parameters identification of photovoltaic cells and modules using diversification-enriched harris hawks optimization with chaotic drifts." *J Clean Prod.*, 2019.
- [2] M. A. Green and S. P. Bremner, "Energy conversion approaches and materials for high-efficiency photovoltaics." *Nat Mater*, 2016.
- [3] *Solar energy perspectives: executive summary*, International Energy Agency, 2011.
- [4] K. Hussein, I. Muta, T. Hoshino, and Osakada, "Maximum photovoltaic power tracking: an algorithm for rapidly changing atmospheric conditions." *IEE Proceedings on Generation, Transmission, Distribution*, 142., pp. 59–64, 1995.
- [5] J. T. Pinho and M. A. Galdino, *Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos*. [S.I.], 2014.
- [6] T. Easwarakhanthan, J. Bottin, I. Bouhouch, and C. Boutrit, "Nonlinear minimization algorithm for determining the solar cell parameters with microcomputers." *International Journal of Solar Energy*, pp. 1–12, 2007.
- [7] T. R. Brito, R. L. Cavalcante, J. T. Pinho, and W. N. Macedo, "Análise da curva i-v de módulos multicristalinos a sol-real." *VII Congresso Brasileiro de Energia Solar*, 2018.
- [8] R. Moretón, E. Pigueiras, and J. Muñoz, "A 500-kw pv generator i-v curve," *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, vol. 22, 2013.
- [9] M. G. Villalva, J. R. Gazoli, and E. R. Filho, "Comprehensive approach to modeling and simulation of photovoltaic arrays," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 24, no. 5, pp. 1198–1208, 2009.
- [10] M. H. Qais, H. M. Hasanien, and S. Alghuwainem, "Identification of electrical parameters for three-diode photovoltaic model using analytical and sunflower optimization algorithm," *Applied Energy*, vol. 250, pp. 109–117, 2019.
- [11] —, "Parameters extraction of three-diode photovoltaic model using computation and harris hawks optimization," *Energy*, vol. 195, p. 117040, 2020.
- [12] H. M. Ridha, A. A. Heidari, M. Wang, and H. Chen, "Boosted mutation-based harris hawks optimizer for parameters identification of single-diode solar cell models," *Energy Conversion and Management*, vol. 209, p. 112660, 2020.
- [13] T. Ma, W. Gu, L. Shen, and M. Li, "An improved and comprehensive mathematical model for solar photovoltaic modules under real operating conditions," *Solar Energy*, vol. 184, pp. 292–304, 2019.
- [14] A. Dehghanzadeh, G. Farahani, and M. Maboodi, "A novel approximate explicit double-diode model of solar cells for use in simulation studies," *Renewable Energy*, vol. 103, pp. 468–477, 2017.
- [15] J. Ma, T. Guo, and S. Lun, "An new explicit i-v model based on chebyshev polynomials for two-diode model of photovoltaic modules," in *Proceedings of 2014 IEEE International Conference on Service Operations and Logistics, and Informatics*, 2014, pp. 362–367.
- [16] Z. Chen, Y. Chen, L. Wu, S. Cheng, P. Lin, and L. You, "Accurate modeling of photovoltaic modules using a 1-d deep residual network based on i-v characteristics," *Energy Conversion and Management*, vol. 186, pp. 168–187, 2019.
- [17] B. Fry, *Simulation of grid-tied building integrated photovoltaic systems*. University of Wisconsin, Madison: Dissertação (Mestrado), 1999.
- [18] Kyocera, "Kb-60 1000v series." [S.I.]: *Kyocera Solar do Brasil*, 2014.
- [19] C. Solar, "Pv module product datasheet quartech cs6p-260l265l270p." *Canadian Solar Inc.*, 2001.
- [20] Y. Solar, "Panda 60 células série 2." [S.I.]: *Yingli Green Energy do Brasil,S.A.*, 2017.
- [21] H. Tian, "A detailed performance model for photovoltaic systems," *Solar Energy Journal*, 2012.
- [22] NREL, "Photovoltaic research," National Renewable energy laboratory, 2017.
- [23] W. D. Soto, S. A. Klein, and W. Beckman, "Improvement and validation of a model for photovoltaic array performance," *Solar Energy*, pp. 78–88, 2006.
- [24] G. Walker, "Evaluating mppt converter topologies using a matlab pv model," *Journal of Electrical & Electronics Engineering*, pp. 49–55, 2001.
- [25] H. W. Dommel, "Digital computer solution of electromagnetic transients in single-and multiphase networks," *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, vol. PAS-88, no. 4, pp. 388–399, 1969.



**Ana Beatriz Rodrigues Massaranduba** formou-se em Engenharia Elétrica, no ano de 2021, pela Universidade Federal do Vale do São Francisco (UNIVASF). Atualmente é estudante de mestrado do Programa de Pós-Graduação Ciências da Saúde e Biológicas da UNIVASF. Suas áreas de pesquisa são análise de sinais, processamento de imagens e inteligência artificial, voltados principalmente para aplicações na área da saúde, além de modelagem de sistemas elétricos de potência.



**Bruno Fonseca Oliveira Coelho** é bacharel em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal do Vale do São Francisco (UNIVASF). Atualmente é mestrando no Programa de Pós-Graduação Ciências da Saúde e Biológicas da UNIVASF. Possui interesse nas áreas de processamento de sinais, inteligência artificial, desenvolvimento de hardware para aplicações biomédicas e modelagem de sistemas de potência.



**Eubis Pereira Machado** possui graduação, mestrado e doutorado em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Campina Grande em 2007, 2009 e 2013, respectivamente. Desde 2009 é professor na Universidade Federal do Vale do São Francisco, onde vem desenvolvendo pesquisas na área de proteção de sistemas elétricos e fontes alternativas de energia.



**Edival Carvalho da Silva** nasceu no Brasil em 1991. Ele recebeu o B.Sc. e M.Sc. graus em elétrica engenharia da Universidade Federal do Vale do São Francisco (UNIVASF), Juazeiro, Brasil, em 2018 e da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), Paraíba, Brasil, em 2021, respectivamente. Atualmente é aluno da Pós-Graduação do Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), Campina Grande, Brasil. Suas atividades de pesquisa se concentram principalmente no estudo dos modelos de representação e no processo de simulação computacional de módulos fotovoltaicos.



**Adeon Cecílio Pinto** graduado em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Uberlândia (1999), mestre e doutor também em Engenharia Elétrica, ambos pela Universidade Federal de Uberlândia, (2002) e (2007), respectivamente. Desde 2008 é professor na Universidade Federal do Vale do São Francisco, atuando nos temas: geração, transmissão e distribuição de energia elétrica; qualidade da energia; fontes alternativas de energia.