

# ANÁLISE E APLICAÇÃO DO MÉTODO DE NEWTON-RAPHSON NA DETERMINAÇÃO DOS PARÂMETROS DO CIRCUITO EQUIVALENTE DE CÉLULAS SOLARES

## ANALYSIS AND APPLICATION OF THE NEWTON-RAPHSON METHOD IN DETERMINING THE EQUIVALENT CIRCUIT PARAMETERS OF SOLAR CELLS

Luís Fabiano Barone Martins<sup>1</sup> 

**Resumo:** Neste estudo, foi avaliado o método de Newton-Raphson para a determinação dos parâmetros do circuito equivalente de células solares, particularmente no contexto do modelo de diodo único composto por cinco parâmetros. Um dos desafios enfrentados foi a dificuldade em encontrar valores iniciais próximos o suficiente da solução para garantir a convergência do método de Newton-Raphson. Para superar essa dificuldade, foi apresentado um procedimento para modelagem e simulação de módulos fotovoltaicos comerciais, que foi cuidadosamente validado por meio da comparação com as curvas corrente-tensão (I-V) fornecidas pelos fabricantes. Nesse contexto, a inovação apresentada nesta metodologia envolveu a proposição de novas equações destinadas a calcular as variáveis iniciais necessárias para a aplicação do método de Newton-Raphson. Além disso, foi introduzida uma constante redutora, a fim de mitigar potenciais problemas de convergência, com a intenção de aprimorar a eficiência do método. Essas abordagens combinadas possibilitaram uma análise detalhada da dinâmica de convergência do método de Newton-Raphson, realçando sua notável capacidade de se aproximar de soluções precisas, mesmo quando confrontado com a dificuldade inerente de encontrar valores iniciais adequados. Essa abordagem se mostrou promissora para a determinação de parâmetros do circuito equivalente de células solares, destacando a necessidade de compreender as complexidades e limitações subjacentes aos modelos teóricos.

**Palavras-chave:** Células solares. Método de Newton-Raphson. Circuito equivalente com diodo único. Solução inicial.

**Abstract:** In this study, the Newton-Raphson method was evaluated for determining the parameters of the equivalent circuit of solar cells, particularly in the context of the single diode model composed of five parameters. One of the challenges faced was the difficulty in finding initial values close enough to the solution to guarantee the convergence of the Newton-Raphson method. To overcome this difficulty, a procedure for modeling and simulating commercial photovoltaic modules was presented, which was carefully validated by comparing it with the current-voltage (I-V) curves provided by the manufacturers. In this context, the innovation presented in this methodology involved proposing new equations to calculate the initial variables needed to apply the Newton-Raphson method. In addition, a reduction constant was introduced to mitigate potential convergence problems, to improve the efficiency of the method. These combined approaches enabled a detailed analysis of the convergence dynamics of the Newton-Raphson method, highlighting its remarkable ability to approach accurate solutions, even when faced with the inherent difficulty of finding suitable initial values. This approach proved promising for determining the equivalent circuit parameters of solar cells, highlighting the need to understand the complexities and limitations underlying theoretical models.

**Keywords:** Solar cells. Newton-Raphson method. Equivalent circuit with single diode. Initial solution.

---

<sup>1</sup> Doutor em Engenharia Elétrica, Instituto Federal do Paraná, luis.martins@ifpr.edu.br.

# 1 INTRODUÇÃO

O aumento das emissões de gases de efeito estufa causado pelo uso em larga escala de combustíveis fósseis com cotações cada vez mais altas impulsionam o desenvolvimento de fontes de energia mais limpas e renováveis. Entre elas, destaca-se a energia produzida por sistemas fotovoltaicos (EL-NAGGAR et al., 2012).

Os sistemas fotovoltaicos possuem, entre seus principais componentes, o painel solar, que geralmente é constituído por matrizes de células solares interconectadas. Os painéis são então conectados em diferentes configurações em série e paralelo formando arranjos fotovoltaicos para atingir o nível desejado de tensão e corrente na saída (AWADALLAH; VENKATESH, 2015).

A relação I-V de uma célula solar possui características não lineares devido, principalmente, a propriedades intrínsecas dos semicondutores (ORTIZCONDE; GARCIASANCHEZ; MUCI, 2006) e a fatores ambientais, como irradiância solar e temperatura (SITES; TAVAKOLIAN; SASALA, 1990).

Para operação e controle dos arranjos fotovoltaicos é desejável dispor de um modelo que se ajuste aos dados I-V medidos em todas as condições operacionais (CHIN; SALAM; ISHAQUE, 2015). A modelagem mais popular emprega um circuito elétrico equivalente cuja topologia pode ser definida de acordo com a precisão desejada e, em geral, utiliza um (PHANG; CHAN; PHILLIPS, 1981) ou dois diodos (CHAN; PHANG, 1987a).

Os parâmetros do circuito equivalente podem ser obtidos a partir de metodologias analíticas alimentadas por dados obtidos de ensaios experimentais (CHAN; PHANG, 1987b; CHENNI et al., 2007) ou de informações fornecidas na folha de dados do fabricante (CHATTERJEE; KEYHANI; KAPOOR, 2011; FARIVAR; ASAEI, 2011).

Essas metodologias geralmente envolvem a solução de um sistema de equações não lineares que, por sua complexidade, pode demandar algoritmos numéricos iterativos, sendo o de Newton-Raphson (NR) um dos mais utilizados (ENEBISH et al., 1993; QUASCHNING; HANITSCH, 1996).

O método de NR é uma técnica poderosa para resolver equações não lineares. Ele converge quadraticamente (BONKOUNGOU; KOALAGA; NJOMO, 2013), ou seja, a aproximação da solução melhora rapidamente a cada iteração. No entanto, também pode ter um alto custo computacional e requer condições iniciais suficientemente próximas da solução para fornecer resultados satisfatórios (CHAN; PHILLIPS; PHANG, 1986; SANDROLINI; ARTIOLI; REGGIANI, 2010).

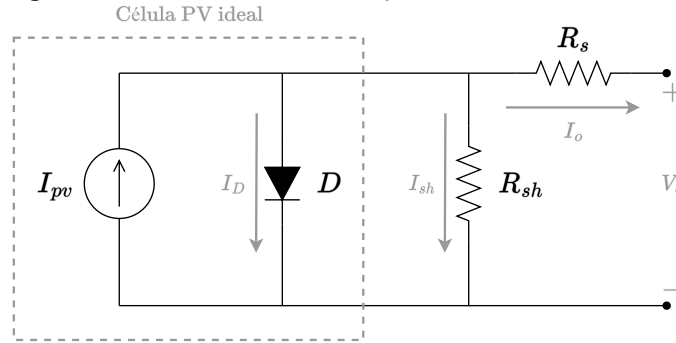
Neste trabalho, é apresentado um novo conjunto de equações para determinar as condições iniciais do método de Newton-Raphson (NR). As equações são baseadas na análise do circuito equivalente do painel solar e levam em consideração as características elétricas do dispositivo. Além disso, propõe-se uma modificação neste método, visando reduzir o passo de atualização do algoritmo. A modificação é feita por meio da introdução de um fator de correção no passo de atualização. Esse fator é calculado a partir das características elétricas do painel solar e da precisão desejada na determinação dos parâmetros do circuito equivalente. A alteração tem como objetivo aprimorar a convergência do método NR e melhorar a precisão na determinação dos parâmetros do circuito equivalente do painel solar.

O conteúdo deste trabalho é dividido em cinco sessões: A Sessão 2 aborda o circuito equivalente da célula solar; a Sessão 4 apresenta um conjunto de equações simplificadas para determinar os valores iniciais do método de NR; a Sessão 3 traz o método de NR e uma proposta de modificação; essa alteração é validada em estudos de caso na Sessão 5 e; a Sessão 6 apresenta as conclusões obtidas com este trabalho.

## **2 MODELO DE CIRCUITO EQUIVALENTE**

O modelo de circuito equivalente com diodo único, mostrado na Figura 1, é composto por uma fonte de corrente e um resistor em paralelo a um diodo e uma resistência em série na saída.

**Figura 1** – Modelo de circuito equivalente com diodo único.



**Fonte:** Dos autores.

Sob iluminação, as características I–V de uma célula solar de junção p–n na polarização direta podem ser representadas pela seguinte equação de modelo de diodo único:

$$I_o = I_{pv} - I_S \left( e^{\frac{I_o R_s + V_o}{a N V_t}} - 1 \right) - \frac{I_o R_s + V_o}{R_{sh}} \quad (1)$$

Na equação (1), a fonte de corrente  $I_{pv}$  representa a corrente fotogerada que varia linearmente com a irradiação solar, as resistências parasitas,  $R_s$  e  $R_{sh}$ , representam as perdas ôhmicas no semicondutor e nos contatos metálicos, e as fugas de corrente através da junção p-n, respectivamente. O diodo, cuja corrente é indicada por  $I_D$  na Figura 1 contribui para a equação (1) com o termo exponencial que inclui  $I_S$ , denominada corrente de saturação reversa do diodo, o fator de idealidade do diodo representado por  $a$ , o número de células no painel conectadas em série  $N$  e a tensão térmica  $V_t$ . É importante comentar que  $I_S$  e  $a$  dependem das propriedades do material semicondutor da célula e que o último fornece informações sobre a qualidade da junção. Finalizando,  $I_o$  e  $V_o$  são, nesta ordem, a corrente e a tensão fornecidas pela célula solar. Em (1),  $V_t$  é definido pela equação (2).

$$V_t = \frac{k}{q} T_{STC} \quad (2)$$

Na equação (2),  $k = 1,381 \cdot 10^{-23}$  J/C é a constante de Boltzmann,  $q = 1,602 \cdot 10^{-19}$  C é a carga do elétron e  $T_{STC}$  em Kelvin é a temperatura nas condições de referência ou STC (Standard Test Conditions). Para determinar o circuito equivalente de diodo único utilizando as especificações descritas na

folha de dados é necessário a determinação de cinco parâmetros:  $I_{pv}$ ;  $I_s$ ;  $a$ ;  $R_s$  e;  $R_{sh}$ , a partir de um conjunto de cinco equações.

Considerando as folhas de dados fornecidas pelos fabricantes é possível transformar a equação (1) no conjunto de equações (3)-(5) pela substituição de três pontos-chave da curva I-V a saber: curto-circuito ( $I_{sc}, 0$ ), máxima potência ( $I_m, V_m$ ) e circuito aberto ( $0, V_{oc}$ ).

$$I_{sc} = I_{pv} - I_s \left( e^{\frac{I_{sc}R_s}{aNV_t}} - 1 \right) - \frac{I_{sc}R_s}{R_{sh}} \quad (3)$$

$$I_m = I_{pv} - I_s \left( e^{\frac{I_mR_s + V_m}{aNV_t}} - 1 \right) - \frac{I_mR_s + V_m}{R_{sh}} \quad (4)$$

$$0 = I_{pv} - I_s \left( e^{\frac{V_{oc}}{aNV_t}} - 1 \right) - \frac{V_{oc}}{R_{sh}} \quad (5)$$

A quarta equação pode ser derivada usando o fato de que na característica P-V do painel, no ponto de máxima potência, a derivada da potência em relação a tensão é zero como exibido em (6).

$$\left. \frac{dP}{dV_o} \right|_{\substack{V_o=V_m \\ I_o=I_m}} = \frac{d}{dV_o} (I_o \cdot V_o) = I_o + \frac{dI_o}{dV_o} V_o = 0 \quad (6)$$

A última equação, (7), é encontrada utilizando a derivada da corrente em relação a tensão no ponto de curto-circuito, que é função de  $R_{sh}$  (CHAN; PHANG, 1987b).

$$\left. \frac{dI_o}{dV_o} \right|_{I_o=I_{sc}} \approx -\frac{1}{R_{sh}} \quad (7)$$

Para obter a derivada da potência no ponto máximo da curva P-V, deve-se derivar a equação (1) com relação a tensão de saída e substituir a tensão e corrente de saída por seus valores máximos  $V_m$  e  $I_m$ . No entanto, (1) é uma função implícita que pode ser escrita na forma  $I_o = f(I_o, V_o)$  que pode ser derivada como na expressão (8). Após rearranjá-la, obtemos uma expressão como mostrado na equação (9).

$$dl_o = dl_o \frac{\partial}{\partial l_o} f(l_o, V_o) + dV_o \frac{\partial}{\partial V_o} f(l_o, V_o) \quad (8)$$

$$\frac{dl_o}{dV_o} = \frac{\frac{\partial}{\partial V_o} f(l_o, V_o)}{1 - \frac{\partial}{\partial l_o} f(l_o, V_o)} \quad (9)$$

Substituindo (9) em (6) resulta na expressão (10).

$$\frac{dP}{dV_o} = I_m + \frac{\frac{\partial}{\partial V_o} f(l_o, V_o)}{1 - \frac{\partial}{\partial l_o} f(l_o, V_o)} V_m = 0 \quad (10)$$

Resolvendo (9) e (10) chega-se as equações (11) e (12) que associadas ao sistema de equações (3)-(5) compõem o conjunto de expressões necessárias para calcular os cinco parâmetros desconhecidos do modelo de circuito equivalente de diodo único já mencionados.

$$\left. \frac{dl_o}{dV_o} \right|_{\substack{V_o=0 \\ I_o=I_{sc}}} = \frac{1}{R_{sh}} = \frac{\frac{I_{sc} R_s}{I_s e^{aNV_t}} + \frac{1}{R_{sh}}}{1 + \frac{I_{sc} R_s}{I_s e^{aNV_t}} R_s + \frac{R_s}{R_{sh}}} \quad (11)$$

$$\left. \frac{dP}{dV_o} \right|_{\substack{V_o=V_m \\ I_o=I_m}} = I_m - \frac{\frac{I_{sc} R_s}{I_s e^{aNV_t}} + \frac{1}{R_{sh}}}{1 + \frac{I_{sc} R_s}{I_s e^{aNV_t}} R_s + \frac{R_s}{R_{sh}}} V_m = 0 \quad (12)$$

O sistema de equações (3)-(5), (11) e (12) não permitem a separação dos parâmetros  $I_{pv}$ ,  $I_s$ ,  $a$ ,  $R_s$  e  $R_{sh}$  através da solução analítica. Por esta razão, será utilizado o método de Newton-Raphson para determiná-los.

### 3 MÉTODO DE NEWTON

O conjunto de equações (3)-(5), (11) e (12) é muito difícil de resolver analiticamente. Isso ocorre da impossibilidade de separar e isolar as variáveis de interesse em cada lado das equações usando funções elementares. Essas

equações, além de serem funções implícitas, são equações do tipo transcendentais, ou seja, não possuem soluções exatas (BASHIROV, 2014).

No entanto, é possível utilizar métodos numéricos para encontrar soluções aproximadas para as variáveis de interesse. Um desses métodos é o algoritmo de Newton-Raphson, que é uma técnica computacional com convergência quadrática usada para calcular raízes de uma função (UOYA; KOIZUMI, 2015).

A expressão matricial para o método de Newton-Raphson é definida pela equação (13). Utilizando esse método, é possível obter uma solução dentro de uma tolerância desejada que satisfaça o sistema de equações não lineares apresentado e, assim, encontrar os valores aproximados das variáveis I e V que atendam à equação (1).

$$\mathbf{x}^{(k+1)} = \mathbf{x}^{(k)} - \mathbf{J}^{-1}(\mathbf{x}^{(k)}) \cdot \mathbf{F}(\mathbf{x}^{(k)}) \quad (13)$$

Em (13),  $\mathbf{x}^{(k+1)}$  representa o vetor de valores estimados para as variáveis na iteração atual,  $\mathbf{x}^{(k)}$  é o vetor de valores obtido na iteração anterior,  $\mathbf{F}(\mathbf{x}^{(k)})$  é o sistema de equações inicializado com  $\mathbf{x}^{(k)}$  e  $\mathbf{J}(\mathbf{x}^{(k)})$  é a matriz Jacobiana inicializada com  $\mathbf{x}^{(k)}$ .

A escolha dos valores iniciais para o método de Newton é uma consideração crítica que pode ter um impacto significativo na convergência do algoritmo. Quando os valores iniciais não estão suficientemente próximos de uma raiz da função, o método pode apresentar comportamento não desejado ou até mesmo falhar em convergir para a solução correta. Para contornar esse problema, é possível utilizar uma constante redutora  $\alpha$  com valores entre 0 e 1 como mostrado em (14).

$$\mathbf{x}^{(k+1)} = \mathbf{x}^{(k)} - \alpha \cdot \mathbf{J}^{-1}(\mathbf{x}^{(k)}) \cdot \mathbf{F}(\mathbf{x}^{(k)}) \quad (14)$$

## 4 CÁLCULO DOS VALORES INICIAIS

Escolher os valores iniciais apropriados para o método de Newton é uma etapa crítica para garantir a convergência eficiente e precisa do algoritmo. Neste

sentido, será apresentado a seguir um conjunto de equações para determinar os valores iniciais  $I_{pv}^{(0)}$ ;  $I_s^{(0)}$ ;  $a^{(0)}$ ;  $R_s^{(0)}$  e;  $R_{sh}^{(0)}$ .

Graças a relação exponencial existente entre a corrente e a tensão em uma junção p-n é possível relacionar dois pontos de operação  $(I_1, V_1)$  e  $(I_2, V_2)$  de um diodo como em (15).

$$V_2 - V_1 = aNV_t \ln\left(\frac{I_2}{I_1}\right) \quad (15)$$

Desta forma, considerando a célula solar operando nos pontos de máxima potência e de circuito aberto, pode-se reescrever (15) como em (16).

$$-I_m R_s - V_m + V_{oc} = aNV_t \ln\left(\frac{I_{pv} - \frac{V_{oc}}{R_{sh}}}{I_{pv} - I_m - \frac{I_m R_s + V_m}{R_{sh}}}\right) \quad (16)$$

A partir das aproximações:  $I_{pv} \approx I_{sc}$ ,  $I_{sc} \gg V_{oc}/R_{sh}$  e  $(I_{pv} - I_m) \gg (I_m \cdot R_s + V_m)/R_{sh}$  é possível simplificar (16) como mostrado na equação (17) e encontrar o valor inicial para  $R_s$  como em (18).

$$-I_m R_s - V_m + V_{oc} = aNV_t \ln\left(\frac{I_{sc}}{I_{sc} - I_m}\right) \quad (17)$$

$$R_s^{(0)} = -\frac{aNV_t \ln\left(\frac{I_{sc}}{I_{sc} - I_m}\right) + V_m - V_{oc}}{I_m} \quad (18)$$

Os valores das resistências  $R_s$  e  $R_{sh}$  são avaliados em torno dos pontos de circuito aberto e de curto-circuito, respectivamente. Por comodidade, a equação (11) pode ser reescrita como em (19) com  $k$  sendo definido como em (20).

$$\frac{1}{R_{sh}} = \frac{k + \frac{1}{R_{sh}}}{1 + kR_s + \frac{R_s}{R_{sh}}} \quad (19)$$

$$k = \frac{I_s}{aNV_t} e^{\frac{I_{sc} R_s}{aNV_t}} \quad (20)$$

Resolvendo a expressão (19) para  $R_{sh} > 0$  obtém-se a resistência de derivação em função de  $I_S$  como exibido em (21).

$$R_{sh} = \frac{kR_s + \sqrt{k^2R_s^2 + 4kR_s}}{2k} \quad (21)$$

Isolando  $I_S$  na condição de curto-circuito representada por (5) e, considerando  $I_{pv} \approx I_{sc}$  e  $e^{\frac{V_{oc}}{aNV_t}} \gg 1$  obtém-se a expressão (22).

$$I_S = \left( I_{sc} - \frac{V_{oc}}{R_{sh}} \right) e^{\frac{-V_{oc}}{aNV_t}} \quad (22)$$

Como  $I_{sc} \gg V_{oc}/R_{sh}$ , pode-se reescrever (22) para encontrar a equação (23) que determina o valor inicial da corrente de saturação do diodo.

$$I_S^{(0)} = I_{sc} e^{\frac{-V_{oc}}{aNV_t}} \quad (23)$$

Substituindo  $k$  dado em (20) na equação (21), considerando  $R_{sh} \gg R_s$  e isolando  $I_S$ , é possível determinar (24).

$$I_S = \frac{R_s}{R_{sh}^2} aNV_t e^{\frac{-I_{sc}R_s}{aNV_t}} \quad (24)$$

Finalmente, igualando (22) a (24) chega-se ao valor inicial para a resistência de derivação na expressão (25).

$$R_{sh}^{(0)} = \frac{V_{oc} \pm e^{\frac{-I_{sc}R_s}{aNV_t}} \sqrt{4aNV_t I_{sc} R_s e^{\frac{-I_{sc}R_s + V_{oc}}{aNV_t}} + V_{oc}^2 e^{\frac{2I_{sc}R_s}{aNV_t}}}}{2I_{sc}} \quad (25)$$

Mas, como  $R_{sh}^{(0)} > 0$  e  $e^{\frac{V_{oc}}{aNV_t}} \gg e^{\frac{2I_{sc}R_s}{aNV_t}}$  a equação (25) pode ser simplificada gerando (26).

$$R_{sh}^{(0)} = \frac{V_{oc} + 2e^{\frac{-I_{sc}R_s}{aNV_t}} \sqrt{aNV_t I_{sc} R_s e^{\frac{-I_{sc}R_s + V_{oc}}{aNV_t}}}}{2I_{sc}} \quad (26)$$

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Com o propósito de verificar a eficácia do método de modelagem e simulação proposto para módulos fotovoltaicos, é realizado um confronto entre

os resultados do modelo proposto e as curvas fornecidas pelos fabricantes. Esse processo de comparação é aplicado a dois módulos fotovoltaicos policristalinos disponíveis comercialmente: o primeiro é o modelo PV-MF165EB3 da Mitsubishi Electric, com uma capacidade de 165 Wp, constituído por 50 células solares conectadas em série; o segundo é o modelo MSX 120 da BP Solar, com 120 Wp, composto por 72 células solares conectadas em série. Os cinco parâmetros dos módulos necessários para este trabalho e fornecidos nas folhas de dados dos fabricantes nas condições de referência estão impressos na Tabela 1.

A simulação do modelo desenvolvido foi realizada em ambiente Matlab® nas condições de referência, ou seja, para irradiância  $G = 1000 \text{ W/m}^2$  e  $T = 25^\circ\text{C}$ .

**Tabela 1** – Especificações de fabricante dos módulos fotovoltaicos nas condições de referência.

	$I_{sc} \text{ (A)}$	$V_{oc} \text{ (V)}$	$I_m \text{ (A)}$	$V_m \text{ (V)}$	$N$
PV-MF165EB3	7,36	30,4	6,83	24,2	50
MSX 120	3,87	42,1	3,56	33,7	72

**Fonte:** Dos autores.

São especificados na Tabela 2 os valores iniciais dos parâmetros  $R_s^{(0)}$ ,  $I_S^{(0)}$  e  $R_{sh}^{(0)}$  relativos ao circuito equivalente para o método de Newton-Raphson calculados por meio das equações (18), (23) e (26), respectivamente. Os valores iniciais para a corrente fotogerada e o fator de idealidade do diodo são estabelecidos como:  $I_{pv}^{(0)} = I_{sc}$  e  $\alpha^{(0)} = 1$ .

**Tabela 2** – Valor inicial dos parâmetros do método Newton-Raphson.

	$I_S^{(0)} \text{ (}\mu\text{A)}$	$I_{pv}^{(0)} \text{ (V)}$	$R_s^{(0)} \text{ (}\Omega\text{)}$	$R_{sh}^{(0)} \text{ (}\Omega\text{)}$	$\alpha^{(0)}$
PV-MF165EB3	$3,8404 \cdot 10^{-4}$	7,36	0,4132	11375	1
MSX 120	$4,9999 \cdot 10^{-4}$	3,87	1,0484	20791	1

**Fonte:** Dos autores.

Na Tabela 3, constam os valores dos parâmetros do circuito equivalente obtidos por meio do método proposto dos módulos solares PV-MF165EB3 e MSX 120. Para alcançar estes resultados foi suposto a constante redutora da equação (14) com valor  $\alpha = 0,3$ . É importante observar que sem esta redução, ou seja, fazendo  $\alpha = 1$ , o método de NR não converge para  $\alpha^{(0)} = 1$ . Nesse

caso, seria necessário empregar uma abordagem que permitisse estabelecer um fator de idealidade inicial mais próximo da solução.

**Tabela 3** – Parâmetros extraídos nas condições de referência usando o modelo proposto.

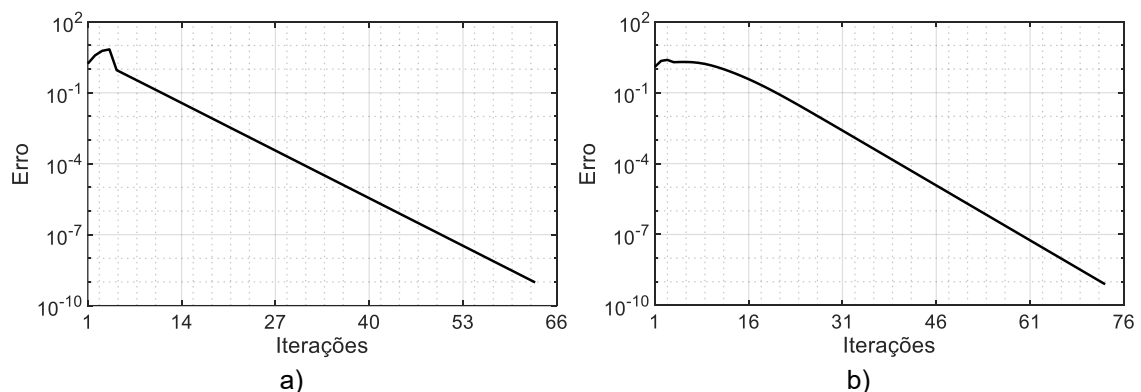
	$I_s$ ( $\mu A$ )	$I_{pv}$ (V)	$R_s$ ( $\Omega$ )	$R_{sh}$ ( $\Omega$ )	$a$
PV-MF165EB3	0,1034	7,3616	0,2510	1166,7	1,3097
MSX 120	0,3227	3,8713	0,4728	1365,8	1,3976

Fonte: Dos autores.

A dinâmica da redução do erro máximo em relação ao número de iterações ao aplicar o método de Newton-Raphson para determinar os parâmetros do circuito equivalente de células solares é aptamente retratada por um gráfico logarítmico ao longo do eixo vertical. De maneira geral, o erro exibe uma diminuição exponencial à medida que o número de iterações aumenta.

As curvas que ilustram a evolução do erro máximo em relação ao número de iterações para os dois módulos estudados, PV-MF165EB3 e MSX 120, são apresentadas nas Figura 2a e 2b, respectivamente. O erro  $\varepsilon = x_{n+1} - x_n$  é calculado em cada iteração para cada uma das cinco equações utilizadas no método de Newton-Raphson, sendo seu valor máximo registrado no gráfico. Para o módulo PV-MF165EB3, foi necessário um total de 63 iterações para atingir um erro máximo menor que  $1 \times 10^{-9}$ , enquanto para o MSX 120, foram requeridas 73 iterações para alcançar essa mesma tolerância.

**Figura 2** – Erro máximo em relação ao número de iterações para o método NR na determinação dos parâmetros de circuito equivalente dos módulos solares: a) PV-MF165EB3 e; b) MSX 120.

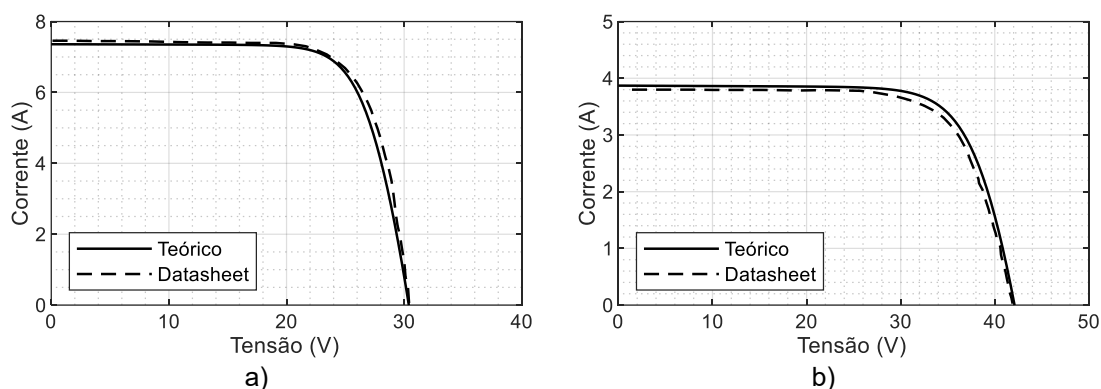


Fonte: Dos autores.

Os gráficos evidenciam que o erro decresce exponencialmente em consonância com o aumento do número de iterações. Após algumas iterações, o erro torna-se suficientemente pequeno a ponto de ser considerado insignificante. Isso demonstra que o método de Newton-Raphson pode ser empregado com precisão na determinação dos parâmetros do circuito equivalente de células solares, tornando-se uma ferramenta robusta para tais cálculos.

Na Figura 3a, são apresentadas as curvas I-V geradas utilizando os parâmetros do circuito equivalente do módulo PV-MF165EB3. Esses parâmetros foram calculados por meio da metodologia sugerida e a partir da curva disponibilizada no datasheet fornecido pelo fabricante. Essa análise foi conduzida considerando uma temperatura de 25°C e uma irradiância de 1000 W/m<sup>2</sup>. Da mesma forma, na Figura 3b, as curvas I-V correspondentes ao módulo MSX 120 são exibidas.

**Figura 3** – Curvas I-V obtidas a partir da metodologia proposta (teórico) e do *datasheet* dos fabricantes para os módulos: a) PV-MF165EB3 e; b) MSX 120.



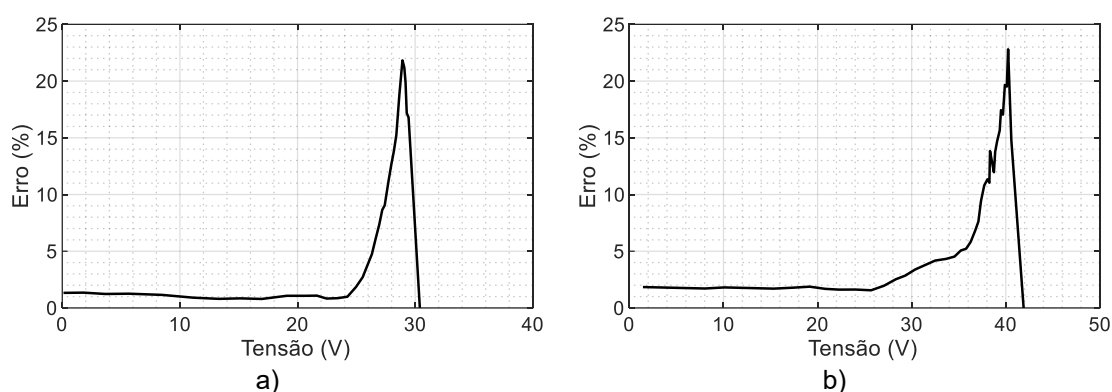
**Fonte:** Dos autores.

Para uma avaliação mais precisa das discrepâncias e convergências entre as curvas I-V teóricas (calculadas pela metodologia proposta) e as reais (extraídas do *datasheet*), foram ilustrados na Figura 4a e Figura 4b os desvios percentuais entre os valores calculados teoricamente e os valores reais de corrente, tanto para o módulo PV-MF165EB3 quanto para o MSX 120.

As discrepâncias entre as correntes calculadas pela metodologia proposta e as extraídas do *datasheet* dos fabricantes, especialmente próximas da região da tensão de circuito aberto, são influenciadas pela não linearidade da curva I-V

a partir do ponto de máxima potência e pela limitação do número de pontos utilizados para a construção da curva teórica, levando a imprecisões em regiões intermediárias. Esses aspectos ressaltam a complexidade do comportamento real das células solares e as limitações dos modelos teóricos.

**Figura 4** – Desvio percentual calculado a partir das intensidades de corrente obtidas das curva I-V teórica e do *datasheet* dos módulos: (a) PV-MF165EB3; (b) MSX 120.



Fonte: Dos autores.

## 6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste trabalho, é apresentado um procedimento para a simulação de módulos fotovoltaicos comerciais. Esta metodologia utiliza o método de Newton-Raphson para determinar os parâmetros do circuito equivalente de diodo único com cinco parâmetros. Uma contribuição relevante é a introdução de novas equações para calcular as variáveis iniciais utilizadas pelo método de Newton-Raphson, acompanhada por uma constante redutora que visa aprimorar a eficiência e mitigar problemas de convergência.

A metodologia é aplicada para determinar os parâmetros do circuito equivalente dos módulos fotovoltaicos conforme os dados fornecidos pelos fabricantes em seus datasheets. De forma eficaz, constata-se que o modelo de diodo único caracteriza a curva I-V com um nível aceitável de precisão. A aplicação prática é demonstrada através da avaliação de dois módulos comerciais: o PV-MF165EB3 da Mitsubishi Electric e o MSX 120 da BP Solar. Os resultados evidenciam que essa abordagem é adaptável a diversos tipos de células solares.

A análise das curvas I-V permitiu compreender as discrepâncias entre as correntes teóricas e reais, especialmente nas proximidades da região de tensão de circuito aberto. A não linearidade intrínseca à curva I-V e a limitação dos pontos de construção da curva teórica foram fatores cruciais para essas discrepâncias. Essas complexidades ressaltam as limitações dos modelos teóricos existentes e a importância de considerar a interação entre os parâmetros nas análises.

O método de Newton-Raphson se destacou neste estudo pela sua rápida convergência na determinação dos parâmetros do circuito equivalente das células solares. Durante as iterações, a observação dos erros ao longo do processo forneceu percepções valiosas sobre a aplicabilidade do método pois foi possível avaliar sua capacidade de se aproximar de soluções precisas em diferentes cenários. Por outro lado, essa análise ajudou a identificar potenciais limitações ou casos em que o método poderia encontrar dificuldades de convergência.

Em suma, este trabalho contribui para o avanço na compreensão da determinação dos parâmetros do circuito equivalente de células solares e reforça a importância de considerar cuidadosamente as não linearidades e as limitações dos modelos teóricos. O método proposto, aliado ao entendimento das complexidades inerentes, pode ser uma ferramenta confiável para avaliações de células solares em aplicações futuras, além disso, como proposta para trabalhos futuros está a avaliação desta metodologia frente a outras existentes na literatura.

## REFERÊNCIAS

AWADALLAH, M. A.; VENKATESH, B. **Estimation of PV module parameters from datasheet information using optimization techniques**. 2015 IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT). **Anais...IEEE**, mar. 2015.

BASHIROV, A. Transcendental Functions. **Mathematical Analysis Fundamentals**, p. 253–305, 1 jan. 2014.

BONKOUNGOU, D.; KOALAGA, Z.; NJOMO, D. Modelling and Simulation of photovoltaic module considering single-diode equivalent circuit model in

MATLAB. **International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering**, v. 3, n. 3, 2013.

CHAN, D. S. H.; PHANG, J. C. H. Analytical Methods for the Extraction of Solar-Cell Single-and Double-Diode Model Parameters from I-V Characteristics. **IEEE Transactions on Electron Devices**, v. 34, n. 2, 1987a.

CHAN, D. S. H.; PHANG, J. C. H. Analytical methods for the extraction of solar-cell single- and double-diode model parameters from I-V characteristics. **IEEE Transactions on Electron Devices**, v. 34, n. 2, p. 286–293, fev. 1987b.

CHAN, D. S. H.; PHILLIPS, J. R.; PHANG, J. C. H. A comparative study of extraction methods for solar cell model parameters. **Solid State Electronics**, v. 29, n. 3, 1986.

CHATTERJEE, A.; KEYHANI, A.; KAPOOR, D. Identification of Photovoltaic Source Models. **IEEE Transactions on Energy Conversion**, v. 26, n. 3, p. 883–889, set. 2011.

CHENNI, R. et al. A detailed modeling method for photovoltaic cells. **Energy**, v. 32, n. 9, p. 1724–1730, set. 2007.

CHIN, V. J.; SALAM, Z.; ISHAQUE, K. Cell modelling and model parameters estimation techniques for photovoltaic simulator application: A review. **Applied Energy**, v. 154, p. 500–519, set. 2015.

EL-NAGGAR, K. M. et al. Simulated Annealing algorithm for photovoltaic parameters identification. **Solar Energy**, v. 86, n. 1, p. 266–274, jan. 2012.

ENEBISH, N. et al. Numerical analysis of solar cell current-voltage characteristics. **Solar Energy Materials and Solar Cells**, v. 29, n. 3, p. 201–208, abr. 1993.

FARIVAR, G.; ASAEI, B. A New Approach for Solar Module Temperature Estimation Using the Simple Diode Model. **IEEE Transactions on Energy Conversion**, v. 26, n. 4, p. 1118–1126, dez. 2011.

ORTIZCONDE, A.; GARCIASANCHEZ, F.; MUCI, J. New method to extract the model parameters of solar cells from the explicit analytic solutions of their illuminated characteristics. **Solar Energy Materials and Solar Cells**, v. 90, n. 3, p. 352–361, 15 fev. 2006.

PHANG, J. C. H.; CHAN, D. S. H.; PHILLIPS, J. R. A practical method of analysis of the current-voltage characteristics of solar cells. **Solar Cells**, v. 4, n. 2, p. 169–178, 1981.

QUASCHNING, V.; HANITSCH, R. Numerical simulation of current-voltage characteristics of photovoltaic systems with shaded solar cells. **Solar Energy**, v. 56, n. 6, p. 513–520, jun. 1996.

SANDROLINI, L.; ARTIOLI, M.; REGGIANI, U. Numerical method for the extraction of photovoltaic module double-diode model parameters through cluster analysis. **Applied Energy**, v. 87, n. 2, 2010.

SITES, J. R.; TAVAKOLIAN, H.; SASALA, R. A. Analysis of apparent quantum efficiency. **Solar Cells**, v. 29, n. 1, p. 39–48, jun. 1990.

UOYA, M.; KOIZUMI, H. A calculation method of photovoltaic array's operating point for MPPT evaluation based on one-dimensional Newton-Raphson method. **IEEE Transactions on Industry Applications**, v. 51, n. 1, 2015.