

CONSTRUÇÃO DA CURVA CARACTERÍSTICA DE UM PAINEL FOTOVOLTAICO UTILIZANDO MÉTODO DE NEWTON-RAPHSON E ALGORITMOS GENÉTICOS

Richard Gonçalves Cornelius¹

Amanda Costa Maia²

Guilherme Sebastião da Silva³

José Wagner Maciel Kaehler⁴

Resumo:

Visando a constante inclusão de energias renováveis no sistema elétrico, se faz necessário o conhecimento de seu funcionamento pontual, para então analisar seu comportamento de maneira global. Além disso, os painéis fotovoltaicos (FV) dispõem energia de forma descentralizada, o que incentivou o desenvolvimento dessa tecnologia. Com isso, para análise de um módulo solar, utiliza-se a sua curva de corrente por tensão (I-V), a qual expressa sucintamente seus parâmetros de maior importância. Essa curva está presente na folha de dados (datasheet) dos painéis (FV) para condições específicas trabalhadas em laboratório, levando em consideração que o módulo solar estará exposto a diversas condições no meio ambiente, a sua curva de (I-V) instantânea pode não corresponder com a disposta pelo datasheet. Portanto, ao representar o painel por um de seus modelos equivalentes, equações matemáticas podem ser obtidas, e a partir dessas equações, encontrar parâmetros do painel como suas resistências, e então conseguir replicar a curva I-V do mesmo, o objetivo do trabalho é utilizar o método iterativo de Newton-Raphson e Algoritmos Genéticos (AGs) para obter uma curva I-V teórica do painel. Para isso, é utilizado o modelo equivalente de um diodo do módulo, e a partir dele são retiradas suas equações, como a equação obtida é transcendental, um método numérico iterativo é proposto junto de AGs para otimizar os resultados. O trabalho apresenta compara a curva obtida com o Newton-Raphson e o AG com a curva disponibilizada pelo datasheet do painel FV KC40T, além de apresentar os parâmetros encontrados. O método proposto obteve erros relativamente baixos, resultando em uma curva I-V próxima a real.

Palavras-chave: Algoritmo Genético, Curva I-V, Painel Fotovoltaico, Newton-Raphson,

**CONSTRUÇÃO DA CURVA CARACTERÍSTICA DE UM PAINEL FOTOVOLTAICO
UTILIZANDO MÉTODO DE NEWTON-RAPHSON E ALGORITMOS GENÉTICOS**

¹ Aluno de graduação. richardgc98@gmail.com. Autor principal

² Aluno de Graduação. maiacamanda15@gmail.com. Co-autor

³ Docente. guilhermesds@gmail.com. Orientador

⁴ Docente. wagnerkaehler@gmail.com. Co-orientador

CONSTRUÇÃO DA CURVA CARACTERÍSTICA DE UM PAINEL FOTOVOLTAICO UTILIZANDO MÉTODO DE NEWTON-RAPHSON E ALGORITMO GENÉTICO

1 INTRODUÇÃO

O avanço tecnológico demanda energia de qualidade e o aumento da eficiência no seu uso para prorrogar os investimentos com novas fontes de geração. As fontes renováveis de energia se tornam essenciais nesse avanço, levando em consideração que elas permitem a descentralização energética e a redução da degradação do meio ambiente. Neste contexto, destaca-se a energia solar fotovoltaica (FV) que transforma a energia proveniente do sol em energia elétrica através de uma célula FV (Gazeta da Física, 2006).

Por conseguinte, é essencial conhecer as características reais de um painel FV, visando a melhor implantação e conhecimento dessa tecnologia. Painéis solares contêm uma curva característica de corrente *versus* tensão (I-V), que é capaz de representar seus principais parâmetros, a curva I-V de um painel FV é disponibilizada pela folha de dados dos fabricantes para condições específicas, sendo difícil obter informações de corrente e tensão para outras eventuais situações (VALENTE, 2011).

Para isso, pode-se representar um painel FV por modelos elétricos equivalentes, e a partir desses modelos, é possível obter equações matemáticas, e implementar um algoritmo iterativo para encontrar os parâmetros do painel e traçar sua curva característica para diversas condições de operação.

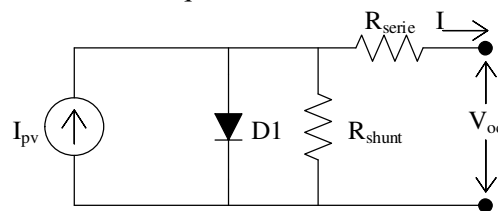
Esse trabalho tem por objetivo determinar os parâmetros de um painel FV através do método iterativo de *Newton-Raphson* e com o auxílio de Algoritmos Genéticos (AG), e a partir desses parâmetros, traçar a curva I-V para diferentes níveis de irradiância e temperatura comparando-as com as curvas disponibilizadas por fabricantes.

2 DESCRIÇÃO DO MODELO DO PAINEL

Os modelos de células de painéis fotovoltaicos podem ser representados teoricamente por meio de circuitos equivalentes, e a partir destes são obtidas as equações matemáticas a fim de visualizar seu comportamento por meio de simulações computacionais.

Um dos modelos existentes é o modelo de um diodo, o qual é o modelo simplificado mais sucinto na representação física da célula fotovoltaica, apresentado na Figura 1 (LUNA, 2013).

Figura 1 – Circuito equivalente da célula fotovoltaica.



Neste modelo, I_{pv} é uma fonte de corrente que representa a corrente fotogerada pela célula fotovoltaica, em paralelo encontra-se um diodo que representa a junção *pn* no escuro (junção da camada do tipo *p* e da camada do tipo *n*), o qual leva em consideração o efeito de difusão ou efeito térmico, efeito que os portadores minoritários penetram na região de transição dos elétrons. Além disso, tem-se na Figura 1 a resistência *shunt* (R_{shunt}), que caracteriza as impurezas e defeitos da estrutura próximo as bordas e a resistência série (R_{serie}), representando as perdas nas junções das ligações metálicas (LUNA, 2013 e CARVALHO, 2014).

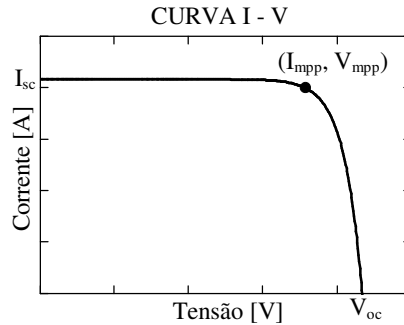
A partir da *Lei de Kirchhoff das Correntes* obtém-se (1), equação transcendental que representa a corrente do painel.

$$I = I_{pv} - I_0 \cdot \left(e^{\frac{q \cdot (V + I \cdot R_{serie})}{a \cdot k \cdot T}} - 1 \right) - \frac{V + I \cdot R_{serie}}{R_{shunt}} \quad (1)$$

Onde I é a corrente de saída em A, I_{pv} é a corrente fotogerada A, I_0 é a corrente de saturação reversa do diodo A, q é a carga do elétron ($1,62 \cdot 10^{-19}$ C), k é a constante de Boltzmann ($1,38 \cdot 10^{-23}$ m²kg/s²K), a é o fator de idealidade, T é temperatura em K, V é a tensão V, R_{serie} a resistência série Ω e R_{shunt} é a resistência em derivação Ω .

Com (1) é possível traçar a curva característica de um painel fotovoltaico, também conhecida como curva I-V, representada na Figura 2.

Figura 2 – Curva Característica I-V de um painel FV.



A curva I-V representa graficamente as principais características do painel FV, essa curva e parâmetros como máxima potência do painel (P_{max}), corrente de curto circuito (I_{sc}), tensão de circuito aberto (V_{oc}), pontos de máxima potência (I_{mpp} , V_{mpp}) e coeficientes de temperatura estão presentes na folha de dados do módulo solar. Entretanto, valores representativos de suas resistências internas (R_{serie} e R_{shunt}) necessitam de cálculos para serem obtidos, e o método iterativo *Newton-Raphson* se mostra eficiente para esse problema. O trabalho apresentado se beneficia de GAs para otimizar o resultado a ser obtido.

3 DEFINIÇÃO DOS PARÂMETROS DO MODELO DO PAINEL

Em função de (1) ser uma equação transcendental, sua solução pode ser encontrada através de um método iterativo. Para esta aplicação será utilizado o método do *Newton-Raphson*. E para otimizar o resultado a ser encontrando, buscando minimizar o erro, pode-se utilizar algoritmos genéticos, que trabalham com uma população de pontos, o que torna a busca por uma solução ótima abrangente.

O método do *Newton-Raphson* utiliza a função e sua derivada para convergir para um resultado, trabalhando de forma pontual. Assim, considera-se que a corrente da próxima iteração é dada por (2) (WANG, 2016)

$$I_{k+1} = I_k - \frac{G(I)}{G'(I)} \quad (2)$$

Além disso, a função $G(I)$ é representada por (3) e $G'(I)$ por (4) [7]-[8].

$$G(I) = I_{pv} - I_0 \cdot \left(e^{\frac{q \cdot (V + I \cdot R_{serie})}{a \cdot N \cdot k \cdot T}} - 1 \right) - \frac{V + I \cdot R_{serie}}{R_{shunt}} - I \quad (3)$$

$$G'(I) = \frac{-q \cdot I_0 \cdot R_{serie}}{a \cdot N \cdot k \cdot T} \cdot e^{\frac{q \cdot (V + I \cdot R_{serie})}{a \cdot N \cdot k \cdot T}} - \frac{R_{serie}}{R_{shunt}} - 1 \quad (4)$$

Essa etapa do método consiste em, primeiramente, calcular um valor mínimo para R_{shunt} , um valor máximo de R_{serie} e um valor inicial para I_0 . Para a primeira iteração, utiliza-se o valor de R_{shunt} mínimo calculado e $R_{serie}=0$ para calcular $I_{(1)}$, e em seguida, calcula-se a corrente de saturação reversa.

Para as demais iterações o R_{serie} é incrementado e, através deste valor, recalcula-se R_{shunt} , I e I_0 . Contudo, para calcular R_{shunt} utiliza-se (1) e $V=V_{mpp}$ e $I=I_{mpp}$, tendo como resultado (5) e (6) (WANG, 2016)

$$R_{shunt} = \frac{V_{mpp} + I_{mpp} \cdot R_{serie}}{I_{sc} - I_{mpp} - I_0 \cdot (e^n - 1)} \quad (5)$$

$$n = q \cdot \frac{V_{mpp} + I_{mpp} \cdot R_{serie}}{a \cdot N \cdot k \cdot T} \quad (6)$$

O cálculo de I_0 é descrito por (7).

$$I_0 = \frac{I_{sc} - \frac{V_{oc}}{R_{shunt}}}{e^{\frac{q \cdot V_{oc}}{a \cdot N \cdot k \cdot T}} - 1} \quad (7)$$

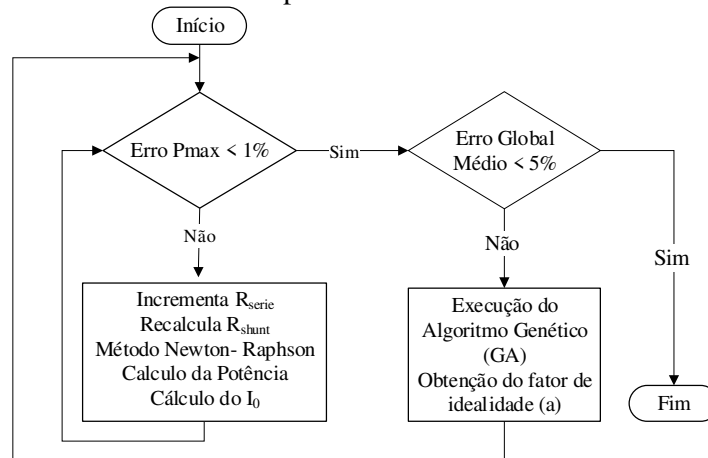
O código do *Newton-Raphson* irá operar até atingir um erro menor que 1% para o ponto de máxima potência do painel FV.

Após isso, os pontos obtidos entram no AG, e são comparados com os pontos do módulo solar, a fim de encontrar o fator de idealidade (a) que minimize a distância entre a curva real do módulo solar e a curva obtida por modelos matemáticos (PUC-Rio).

Os AGs utilizam regras de transição probabilísticas e não derivadas, evitando possíveis restrições de descontinuidade. No seu funcionamento básico, deve-se definir o tamanho da população, onde se alocará as possíveis soluções do problema, durante o processo evolutivo, a população é avaliada, e para cada indivíduo é dado um índice. No seguir, uma porcentagem dos membros mais adaptados é mantida e outra é descartada, esses membros mantidos podem sofrer alterações através de mutações ou cruzamentos. E esse processo é repetido até chegar-se em um resultado satisfatório (PUC-Rio).

O método como um todo pode-se observar no fluxograma da Figura 3.

Figura 3 – Fluxograma do processo para obtenção das resistências e do fator de idealidade do painel FV.



4 RESULTADOS DA VALIDAÇÃO

Levando em consideração o exposto anteriormente, para a realização da simulação utilizando o modelo do *Newton-Raphson* e o AG foram utilizados os dados do módulo fotovoltaico Kyocera KC40T para condições de temperatura de 25°C e irradiância de 1000 W/m², e definido o fator de idealidade inicial de acordo com a tecnologia do material do módulo, o qual é policristalino, dados que estão expostos na Tabela 1.

Tabela 1 – Valores utilizados para o método.

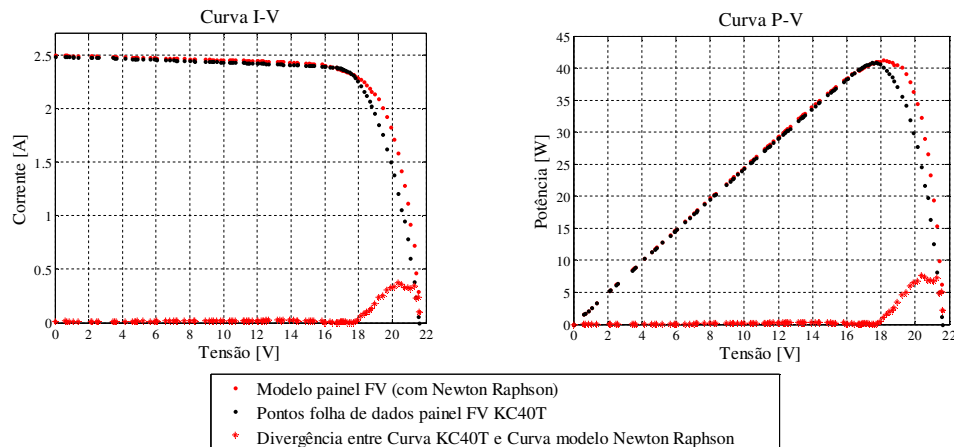
DESCRIÇÃO	VALOR
Máxima Potência	$P_{max} = 43W$
Tensão de Máxima Potência	$V_{mpp} = 17,4V$
Corrente de Máxima Potência	$I_{mpp} = 2,48A$

Tensão de Circuito Aberto
 Corrente de Curto-Circuito
 Número de Células
 Constante de Boltzmann
 Carga do elétron
 Temperatura
 Fator de idealidade inicial

$V_{oc} = 21,7V$
 $I_{sc} = 2,65$
 $N = 36$
 $k = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ m}^2\text{kg/s}^2\text{K}$
 $q = 1,6021 \cdot 10^{-19} \text{ C}$
 $T = 298K$
 $a = 1,3$

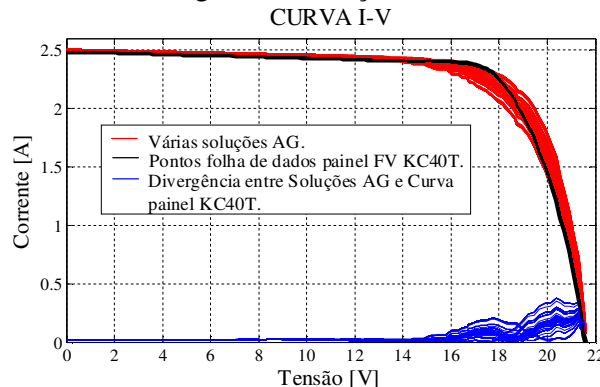
Logo após, para a execução do código do *Newton-Raphson*, o erro para o critério de parada foi definido como de 1% para o ponto de máxima potência do módulo fotovoltaico. Com isso, a simulação resultou nos valores $0,12\Omega$ para resistência série e $224,42\Omega$ para a resistência shunt 2, e a curva obtida expõe-se na Figura 4.

Figura 4 – Resultado da iteração via *Newton-Raphson*.



No seguimento, após a curva I-V da Figura 4 entrar no AG, várias soluções são procuradas de forma probabilística, presentes na Figura 5.

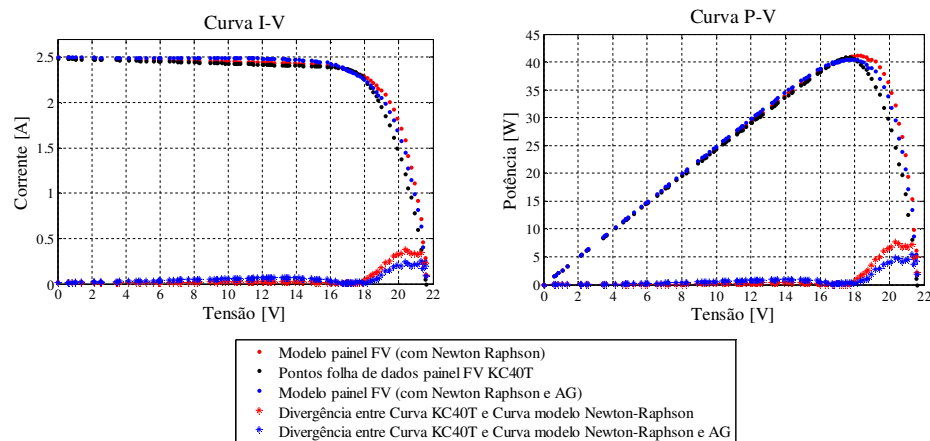
Figura 5 – Soluções AG.



No final da execução do AG, obteve-se um fator de idealidade de 1,61, com esse valor, o Newton-Raphson foi executado novamente obtendo os valores de resistência série igual a $0,12\Omega$ e resistência shunt igual a $1697,99\Omega$. A comparação dos resultados está presente na Figura 6.

O método do Newton-Raphson apresentou erro no ponto de máxima potência de 0,6383%, e erro médio global de 6,02%, com a execução do AG, o erro no ponto de máxima potência baixou para 0,2966% e o erro médio global diminuiu para 4,4%.

Figura 6 – Resultado da iteração via *Newton-Raphson* e AG.



5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Em virtude de a folha de dados do painel FV disponibilizar somente condições e curvas I-V específicas de operação, um modelo de que represente a curva característica desse módulo solar se torna importante. Pois, através desse modelo, pode-se obter resultados para pontos de irradiância e temperatura não convencionais, permitindo saber teoricamente o que o painel deve estar produzindo em tais pontos.

O método de *Newton-Raphson* consegue traçar a curva característica de um painel FV com erros relativamente baixos, e o mesmo depende somente de parâmetros disponibilizados na folha de dados (*datasheet*) do painel. Contudo, a otimização utilizando AG demonstrou-se satisfatória, sendo que diminuiu o erro no ponto de máxima potência e o erro médio global. Entretanto, para sua execução, é necessário ter a curva real do painel fotovoltaico como referência, proporcionando mais trabalho, pois a obtenção dos pontos da curva disponibilizada pelo *datasheet* é feita de forma manual.

Por fim, a partir de um modelo matemático que represente fielmente o comportamento real de um painel FV, pode-se construir um caracterizador solar, que capture a curva I-V na prática e validá-lo com o método proposto.

REFERÊNCIAS

- VALLÊRA, A. M.; BRITO, M. C. Meio século de história fotovoltaica. Revista Gazeta da Física, v. 29, p. 11-15, 2006.
- VALENTE, M. A. S. Caracterização Automática de um Pannel Fotovoltaico. Dissertação (Mestrado em Engenharia Eletrônica e Computadores) – Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, 2011.
- LUNA, M. L. M. Comparação e Validação de Modelos Elétricos de um Diodo e dois Diodos de um Módulo Fotovoltaico. 2013. 34f. Monografia (Graduação em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza (CE).
- CARVALHO, A. L. C de. Metodologia para análise, caracterização e simulação de células fotovoltaicas. 2014. 100p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte (MG).
- QIU, T.; WANG, G.; YANG, X.; ZHAO, K.; ZHAO, Y.; ZHAO, Y. The error analysis of the reverse saturation current of the diode in the modeling of photovoltaic modules. ELSEVIER, Energy 115, pp 478- 485, 2016.
- Técnicas de Inteligência Artificial – Algoritmos Genéticos. PUC-Rio. Disponível em: <http://www.maxwell.vrac.puc-rio.br/8622/8622_4.PDF>. Acesso em 11 set. 2018.