

DESENVOLVIMENTO DE UM DISPOSITIVO ELETRÔNICO PARA CARACTERIZAÇÃO DE PAINÉIS FOTOVOLTAICOS

Richard G. Cornelius¹, Amanda C. Maia¹, Ana Paula C. de Mello², José W. M. Kaehler¹, Guilherme S. da Silva¹

Grupo de Exploração Integrada de Recursos Energéticos – EIRE¹

Grupo de Energia e Sistemas Elétricos de Potência – GESEP²

Universidade Federal do Pampa – UNIPAMPA

Alegrete, Rio Grande do Sul, Brasil

richardgc98@gmail.com, amanda_maia15@hotmail.com, wagnerkaehler@gmail.com, guilhermesds@gmail.com

Resumo — A curva I-V é um parâmetro importante por conter as características de um painel fotovoltaico. Por isso, há a necessidade de obter a curva de forma experimental, onde neste artigo é utilizado o método baseado em carga eletrônica. A constituição do protótipo para esse método é apresentada através de uma metodologia de projeto do caracterizador. Com o propósito de validar o protótipo desenvolvido, os parâmetros do painel são obtidos pelo método iterativo do *Newton-Raphson*. Por fim, as curvas obtidas matematicamente são comparadas com as curvas obtidas experimentalmente e também com as fornecidas pelo fabricante.

Palavras-chave — Caracterizador, Curva I-V, *Newton-Raphson*, Painel Fotovoltaico, Transistor.

I. INTRODUÇÃO

O ser humano está cada vez mais dependente da eletricidade, acarretando em uma demanda cada vez maior da mesma. Para suprir essa demanda buscam-se diversas fontes renováveis para gerar energia elétrica sem que haja degradação do meio ambiente. Neste sentido, a energia fotovoltaica destaca-se por converter a energia proveniente do sol, através de uma célula fotovoltaica (FV), em potencial elétrico, permitindo a redução da dependência em relação aos combustíveis fósseis [1].

Por conseguinte, é essencial conhecer as características reais de um painel FV (conjunto de células fotovoltaicas) para a obtenção de modelos matemáticos com elevada fidelidade. De modo que, os principais fatores que definem um painel fotovoltaico podem ser conhecidos através da curva característica de corrente *versus* tensão (curva I-V) [2].

A curva I-V apresenta a mesma forma geral para qualquer painel FV e relaciona parâmetros como irradiância e temperatura. De forma que, a alteração dos parâmetros modifica o comportamento do painel FV, assim como, sua curva característica. Pode-se utilizá-la para encontrar o ponto de maior transferência de potência, e se há sombreamento ou danos estruturais no painel FV [3].

Desta forma, é necessária uma caracterização precisa da curva I-V para que os parâmetros do painel FV possam ser extraídos corretamente, assim, foi feito um estudo dos principais métodos de caracterização experimental da curva. Em [4] é feita uma análise de parâmetros como custo, precisão, capacidade de processamento de potência, conhecimentos específicos e desempenho, e propõe que o com melhores características é a caracterização empregando uma carga eletrônica.

Portanto, esse artigo apresenta o circuito para caracterização da curva I-V, seu princípio de funcionamento e uma metodologia de projeto, descrevendo sua estrutura e as principais

partes do circuito. Entretanto, para validar o modelo de caracterização é fundamental obter os parâmetros do painel FV, que foram adquiridos através do método do *Newton-Raphson*. O resultado obtido é comparado com a curva fornecida pelo fabricante e com curva adquirida matematicamente para validação. O protótipo do caracterizador é utilizado na obtenção dos resultados para validação da metodologia proposta.

II. DESCRIÇÃO DA TOPOLOGIA EM ESTUDO

Para a caracterização da curva I-V, será utilizado o método de caracterização baseado em carga eletrônica, que se constitui de componentes eletrônicos convencionais, como amplificadores operacionais e transistores. Este método consiste em conectar o painel fotovoltaico a um circuito que funcionará de forma semelhante a uma resistência variável, modificando o ponto de operação na curva I-V do painel desde a condição de curto-circuito (resistência zero) até a condição de circuito aberto (resistência próxima do infinito).

Para isso, varia-se a tensão de entrada linearmente, e posteriormente, mede-se a corrente e a tensão de saída para a obtenção da curva I-V.

A. Princípio de funcionamento

A caracterização experimental por carga eletrônica é composta por duas partes principais, circuito que emula uma resistência variável e um circuito coletor de informações conectado ao painel FV. Assim, nesta subseção são descritos o modelo de um painel fotovoltaico e a sua curva I-V, como também, as principais partes do caracterizador de painéis fotovoltaicos.

1) 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 [5].

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 Fig. 1 [6].

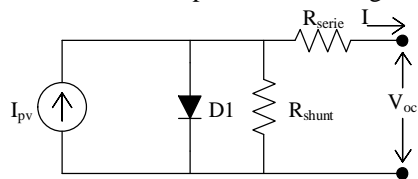


Fig. 1. Circuito equivalente da célula fotovoltaica.

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 Fig. 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 [6]-[7].

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 Fig. 2.

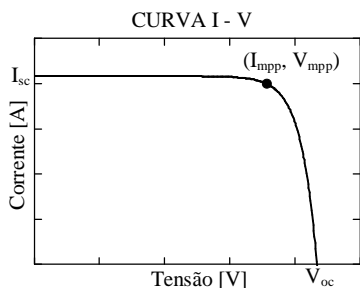


Fig. 2. Curva característica I-V de um painel fotovoltaico.

2) Descrição dos estágios do método de caracterização baseado em carga eletrônica

A curva característica de um painel fotovoltaico reflete as condições em que este se encontra, podendo detectar se há algum defeito no painel, sombreamentos ou analisar características elétricas, sendo imprescindível traçar a curva I-V.

O circuito da carga eletrônica é representado pela Fig. 3, a qual possui três estágios principais conectados ao painel FV: gerador de sinal, estágio de amplificação e o estágio do transistor.

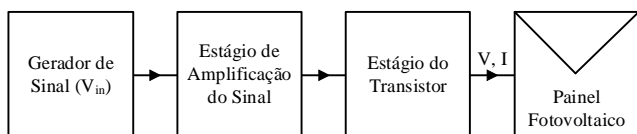


Fig. 3. Topologia do caracterizador proposto.

a) Gerador de Sinal

No primeiro estágio do método encontra-se o gerador de sinais, que é responsável pela inserção do sinal de entrada, o qual implicará diretamente no estágio do transistor. O sinal

aplicado é uma onda dente de serra com 1% de descida, de 0 até $-V_{in}$, e 99% de subida. Na Fig. 4 é apresentada a forma de onda genérica de tensão aplicada ao estágio de amplificação.

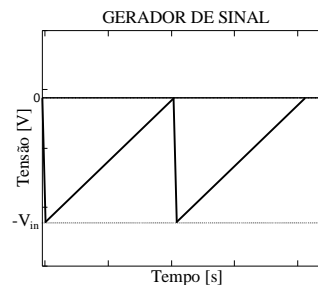


Fig. 4. Sinal de entrada do Caracterizador.

b) Estágio de Amplificação

Para que o transistor funcione corretamente é necessário aplicar um sinal em formato de rampa, responsável por variar a corrente na base do mesmo para a obtenção dos pontos de corrente e tensão da curva I-V desde a condição de curto-circuito a condição de circuito aberto. Por isso, o estágio de amplificação é composto por um amplificador operacional inversor.

Ao aplicar o sinal gerado no primeiro estágio à entrada do amplificador, a tensão de saída é representada em (2), e observada na Fig. 5.

$$V_{out} = A \cdot V_{in} \quad (2)$$

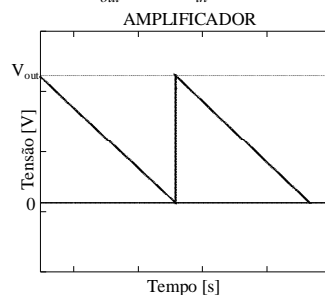


Fig. 5. Tensão de saída do amplificador operacional.

c) Estágio do Transistor

Nesse estágio ocorre a variação gradual da tensão na base de um transistor com intuito de variar a corrente que flui do coletor até o emissor, e simultaneamente medir cada ponto dessa variação.

Inicialmente, a corrente na base do transistor será máxima, e o mesmo se comportará como uma chave fechada, isso ocorrerá quando o sinal de entrada emitido pelo gerador de sinal for igual a $-V_{in}$. Portanto, tem-se aproximadamente a corrente de curto-circuito do painel fotovoltaico.

No final da curva I-V, a corrente na base do transistor será mínima, então, o transistor se comportará como uma chave aberta. Neste estágio, a corrente medida será de 0A e a tensão de saída do painel será a tensão de circuito aberto (V_{oc}). Na transição entre a corrente máxima e a mínima obtém-se os demais pontos da curva, onde o transistor operará na região linear.

O resultado esperado nesse estágio é representado na Fig. 6.

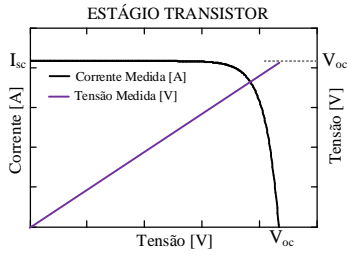


Fig. 6. Resultado do estágio do transistor.

B. Definição dos parâmetros do modelo do painel

Em função de (1) ser uma equação transcendental, sua solução é encontrada através de um método iterativo. Para esta aplicação será utilizado o método do *Newton-Raphson*. Assim, considera-se que a corrente da próxima iteração é dada por (3) [8]-[9].

$$I_{k+1} = I_k - \frac{G(I)}{G'(I)} \quad (3)$$

Além disso, a função $G(I)$ é representada por (4) e $G'(I)$ por (5) [8]-[9].

$$G(I) = I_{pv} - I_0 \cdot \left(e^{\frac{V+I \cdot R_{serie}}{a \cdot N \cdot k \cdot T}} - 1 \right) - \frac{V + I \cdot R_{serie}}{R_{shunt}} - I \quad (4)$$

$$G'(I) = \frac{-q \cdot I_0 \cdot R_{serie}}{a \cdot N \cdot k \cdot T} \cdot e^{\frac{V+I \cdot R_{serie}}{a \cdot N \cdot k \cdot T}} - \frac{R_{serie}}{R_{shunt}} - 1 \quad (5)$$

Este 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 .

Além disso, o método pode ser representado pelo fluxograma da Fig. 7.

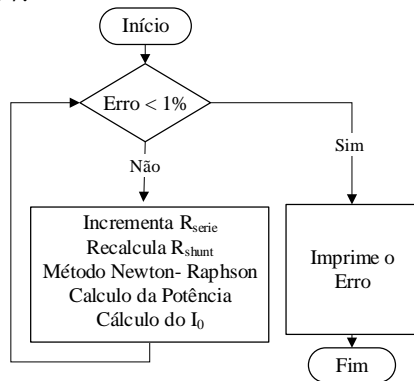


Fig. 7. Diagrama de blocos do método Newton-Raphson para obtenção das resistências série e *shunt* do painel fotovoltaico.

Contudo, para calcular R_{shunt} utiliza-se (1) e $V=V_{mpp}$ e $I=I_{mpp}$, tendo como resultado (6) e (7) [8]-[9].

$$R_{shunt} = \frac{V_{mpp} + I_{mpp} \cdot R_{serie}}{I_{sc} - I_{mpp} - I_0 \cdot (e^n - 1)} \quad (6)$$

$$n = q \cdot \frac{V_{mpp} + I_{mpp} \cdot R_{serie}}{a \cdot N \cdot k \cdot T} \quad (7)$$

O cálculo de I_0 é descrito por (8).

$$I_0 = \frac{I_{sc} - \frac{V_{oc}}{R_{shunt}}}{e^{\frac{q \cdot V_{oc}}{a \cdot N \cdot k \cdot T}} - 1} \quad (8)$$

C. Resultados da validação

Levando em consideração o exposto anteriormente, para a realização da simulação utilizando o modelo do *Newton-Raphson* 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 de acordo com a tecnologia do material do módulo, o qual é polí-cristalino, dados que estão expostos na Tabela I.

TABELA I. VALORES UTILIZADOS PARA O MÉTODO DO *NEWTON-RAPHSON*

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	$V_{oc} = 21,7V$
Corrente de Curto-Circuito	$I_{sc} = 2,65A$
Número de Células	$N = 36$
Fator de Idealidade	$a = 1,3$
Constante de Boltzmann	$k = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ m}^2\text{kg/s}^2\text{K}$
Carga do elétron	$q = 1,6021 \cdot 10^{-19} \text{ C}$
Temperatura	$T = 298 \text{ K}$

Logo após, para a execução do código, 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 das resistências série e *shunt* expostas na Tabela II.

TABELA II. RESULTADO DO DAS RESISTÊNCIAS CALCULADAS UTILIZANDO O MÉTODO DE *NEWTON-RAPHSON*

DESCRIÇÃO	VALOR
Resistência Série	$R_s = 0,122 \Omega$
Resistência <i>Shunt</i>	$R_{sh} = 224,4268 \Omega$

A Fig. 8 apresenta a comparação da curva presente na folha de dados do módulo em estudo, replicada a partir da função interpolada pelos pontos retirados do gráfico disponibilizado no datasheet e apresentada em (9), com seus parâmetros descritos na Tabela III. E a curva obtida a partir de (1), utilizando os valores de resistências calculados.

$$I(V) = p_1 \cdot V^9 + p_2 \cdot V^8 + p_3 \cdot V^7 + p_4 \cdot V^6 + p_5 \cdot V^5 + p_6 \cdot V^4 + p_7 \cdot V^3 + p_8 \cdot V^2 + p_9 \cdot V + p_{10} \quad (9)$$

TABELA III. PARÂMETROS DA FUNÇÃO REPRESENTATIVA DOS PONTOS DA FOLHA DE DADOS DO PAINEL FV KC40T

$p_1 = 2,226 \cdot 10^{-11}$	$p_6 = 0,002911$
$p_2 = 5,231 \cdot 10^{-09}$	$p_7 = -0,01442$
$p_3 = -5,294 \cdot 10^{-07}$	$p_8 = 0,03481$
$p_4 = 1,834 \cdot 10^{-05}$	$p_9 = -0,03662$
$p_5 = -0,0003145$	$p_{10} = 2,492$

Diante do resultado acima, pode-se fazer uma análise do modelo, quantificando a diferença entre as curvas, em que observa tanto na Fig. 8 quanto na Fig. 9 que a partir do ponto

de máxima potência, os pontos simulados começaram a divergir dos pontos retirados da folha de dados. Isto ocorre em função, que o fator de idealidade é mantido fixo.

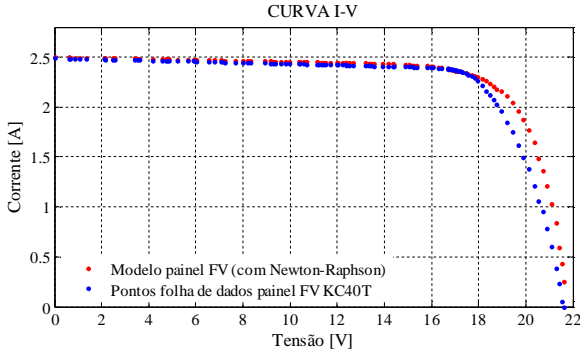


Fig. 8. Comparação entre curva dos pontos da folha de dados KC40T e curva do modelo do painel utilizando *Newton Raphson*.

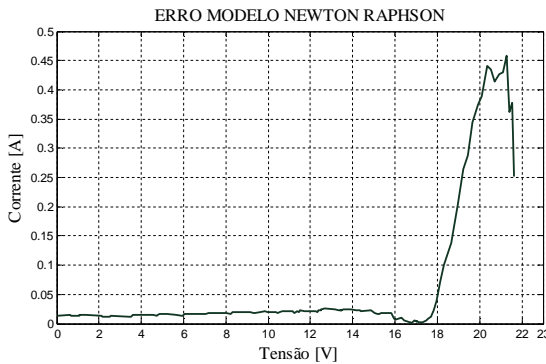


Fig. 9. Erro calculado entre a curva com resistências obtidas com o método de *Newton-Raphson* e Folha de dados.

III. METODOLOGIA DE PROJETO

O modelo proposto é constituído por um circuito capaz de emular uma resistência variável, e possui três estágios principais, descritos anteriormente. O funcionamento correto deste circuito depende diretamente do dimensionamento dos elementos ativos e passivos contidos em cada parcela da estrutura.

A. Descrição da topologia

A Fig. 10 representa o circuito para caracterização experimental da curva I-V, baseado em uma carga eletrônica [4]. E, por sua vez, possui três partes principais, onde parâmetros de segmento foram dimensionados separadamente.

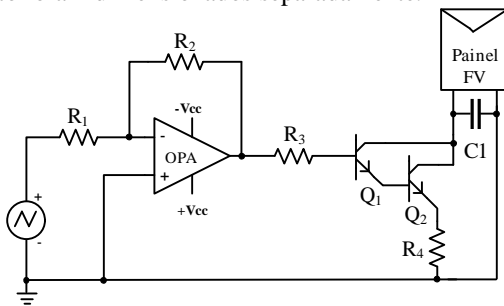


Fig. 10. Circuito carga eletrônica.

O primeiro estágio gera uma onda em formato de rampa, e, para isso, pode-se utilizar um gerador de funções para fornecê-la. O segundo estágio é composto por um amplificador, e para

seu funcionamento é necessária uma fonte de alimentação com tensão contínua e simétrica. Já no terceiro estágio, pode-se substituir os dois transistores em cascata por um transistor do tipo *Darlington npn*.

1) Circuito do amplificador operacional

O amplificador utilizado é o LM741, ele é um dispositivo que trabalha de forma linear quando atendido suas prescrições de alimentação e frequência de operação, garantindo que a forma de onda de saída seja em forma de rampa.

O ganho estipulado no projeto é de dez vezes entre a tensão de saída e a tensão de entrada. Qualquer valor de resistores que possuam essa relação pode ser utilizado. Para este projeto os valores de resistências foram de 1,1k Ω e 6,6k Ω respectivamente.

2) Circuito com transistor

O projeto do circuito com o transistor é dividido em duas partes onde serão analisados os resistores R_3 e R_4 da Fig.10, para que o transistor opere na região linear.

Ao projetar R_4 é necessário traçar a curva de corrente do coletor (I_c) pela tensão entre o coletor e o emissor (V_{ce}). Além disso, para garantir que o transistor funcionará somente em sua região linear, é fundamental estabelecer a tensão V_{ce} que o circuito opera, neste caso V_{oc} . Como também, a corrente I_c , sendo esta I_{sc} . Por conseguinte, esboça-se uma reta entre esses pontos.

Este ensaio foi realizado através do software MULTISIM e utilizou-se o transistor TIP100. O resultado é observado na Fig. 11.

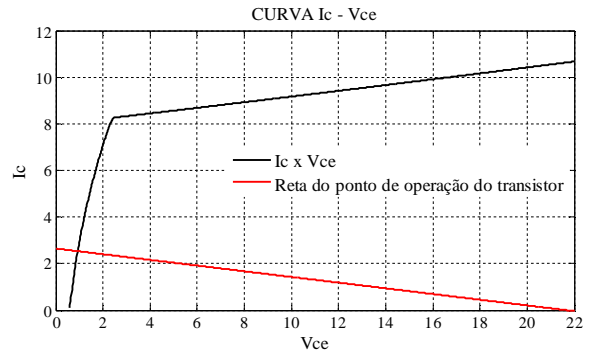


Fig. 11. Curva I_c - V_{ce} do transistor TIP100.

Os valores de V_{ce} e I_c do ponto de interseção são utilizados em (10).

$$R_4 = \frac{V_{OC} - V_{CE}}{I_C} \approx 8\Omega \quad (10)$$

Por outro lado, para estabelecer R_3 ou resistência de base, se faz necessário a construção da curva I_b - V_{be} (corrente de base do transistor e a tensão entre a base e o emissor) do transistor, o ensaio para a sua construção também se realizou através do software MULTISIM, e apresenta-se na Fig.12.

Com a Fig.12. e a tensão de base definida como de 12V, pode-se calcular a resistência de base através de (11).

$$R_3 = \frac{V_b - V_{be}}{I_b} \approx 620\Omega \quad (11)$$

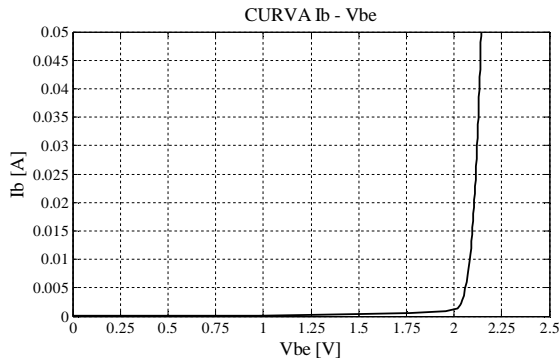


Fig. 12. Curva $I_b - V_{be}$ do transistor TIP100.

3) Fonte de alimentação

Para o protótipo montado, a fonte tem o objetivo de alimentar o amplificador operacional. Então, o dimensionamento do filtro da fonte deve corresponder aos critérios de corrente do mesmo, ou especificações de carga máxima que se quer alimentar com esse dispositivo. O circuito da fonte de alimentação montado é representado pela Fig. 13 [10].

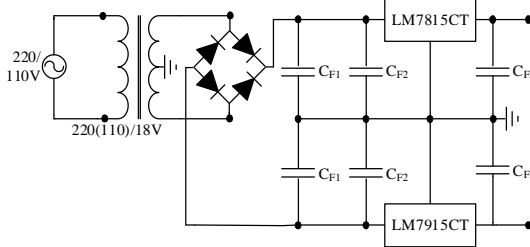


Fig. 13. Circuito Fonte de Alimentação

Onde, C_{F1} é o valor da capacitância, é aconselhável utilizar um filtro a capacitor cerâmico C_{F2} para filtrar sinais de outras frequências, e outro capacitor na saída do regulador de tensão, o qual será utilizado o LM7815CT, com baixa capacitância C_{F3} pela recomendação da folha de dados do mesmo. Os valores das capacitâncias estão descritos na Tabela V.

TABELA V. VALORES DAS CAPACITÂNCIAS DO CIRCUITO DA FONTE

DESCRIÇÃO	VALOR
Filtro a capacitor eletrolítico	$C_{F1} = 1,1\text{mF}$
Filtro a capacitor de poliéster	$C_{F2} = 10\text{nF}$
Filtro de rejeição de ripple	$C_{F3} = 1\mu\text{F}$

IV. RESULTADOS

Logo após o dimensionamento do circuito eletrônico completo, montou-se o circuito da Fig. 10 no software PSIM para obter a curva I-V. E utilizou-se o modelo físico de um painel FV disponibilizado pelo programa para representar o módulo fotovoltaico *KC40T*.

Do mesmo modo, para construção do protótipo utilizou-se uma placa de circuito impresso (PCI) para a montagem do circuito.

A. Descrição do Protótipo

A primeira versão do protótipo para traçar experimentalmente a curva de um painel fotovoltaico é composto por duas placas de circuito impresso, o circuito principal da Fig. 10 e um circuito secundário da fonte de alimentação do amplificador operacional da Fig. 13.

O circuito principal possui conexões externas, para o gerador de funções, a fonte de alimentação e o painel FV. Este circuito pode ser dividido em duas partes de acordo com o nível de corrente. A primeira antes do transistor, que possui um nível de corrente baixo, e a segunda depois transistor, que seu nível de corrente depende diretamente da corrente máxima gerada pelo painel utilizado. Este modelo foi dimensionado para o módulo *KC40T*.

B. Resultados de simulação da comparação entre curvas I-V

Para obtenção da curva I-V, através da simulação do circuito, mediu-se a corrente e a tensão de saída do painel fotovoltaico. Com o resultado da simulação mostrado na Fig. 14, comparou-se com o resultado obtido utilizando o método do *Newton-Raphson* e a curva disponibilizada pelo fabricante para 1000 W/m^2 .

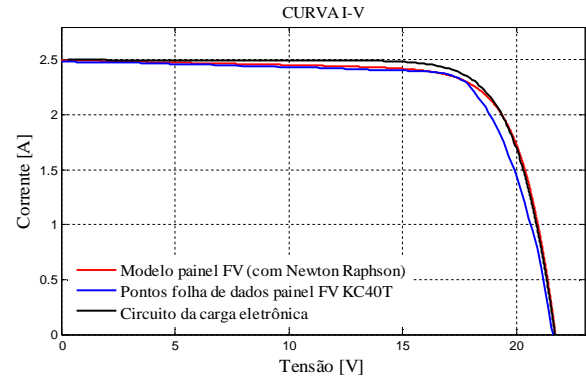


Fig. 14. Comparação das Curvas I-V

C. Resultados experimentais

Para os resultados iniciais da prototipagem de um dispositivo para caracterização de painéis FV, construiu-se a PCI da Fig.15 e testou-se seu funcionamento na prática, em que se utilizou um osciloscópio para a obtenção dos pontos medidos.

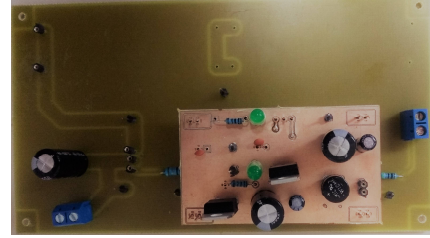


Fig. 15. PCI do circuito de carga eletrônica para caracterização de painéis FV.

O teste realizado resultou nas formas de onda da Fig.16 e Fig. 17. A forma de onda amarela (canal 1) é o sinal da ponteira amperífrica posta no terminal positivo do painel FV, a forma de onda azul (canal 2) é o sinal da tensão do painel FV, a forma de onda em roxo (canal 3) representa o sinal conectado na entrada do AMPOP, e a forma de onda verde (canal 4) é o sinal na saída do AMPOP.

As condições externas na hora do experimento era de 850 W/m^2 para a Fig.16 e 1050 W/m^2 para a Fig. 17, os dois casos com temperatura de 30°C

Observa-se através destes resultados que a relação I-V manteve-se de acordo, no ápice da corrente, tem-se o menor valor de tensão, conforme formas de onda teóricas apresentadas na seção II.

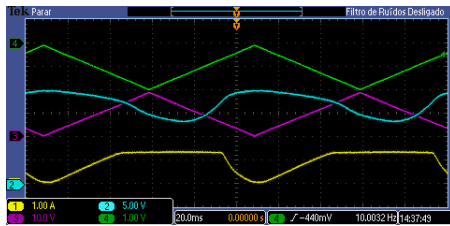


Fig. 16. Resultados do caracterizador para 850 W/m².

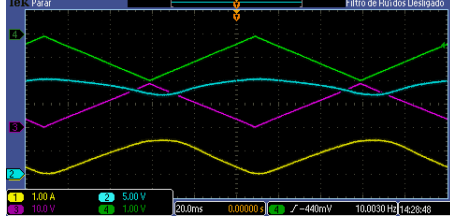


Fig. 17. Resultados do caracterizador para 1050 W/m².

O primeiro ensaio foi realizado para uma irradiação de 850W/m², e, através dos pontos de corrente e tensão fornecidos pelo osciloscópio construiu-se a curva I-V, e esta foi comparada com a simulação do circuito da carga eletrônica e com o modelo do *Newton-Raphson*, mostrado na Fig. 19.

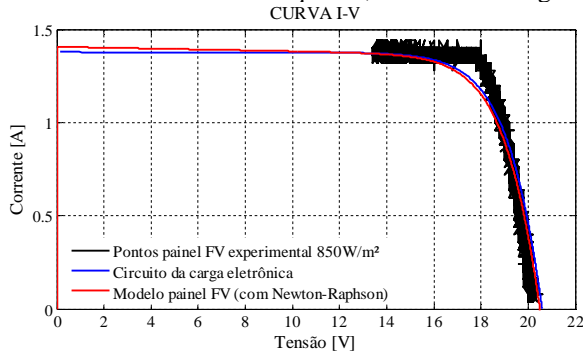


Fig. 18. Comparação das Curvas I-V para 850W/m².

Além disso, o segundo ensaio foi para uma irradiação de 1050W/m², e, assim como no ensaio anterior, a curva I-V resultante foi comparada com o modelo do *Newton-Raphson* e com a simulação do circuito da carga eletrônica, demonstrado na Fig. 19.

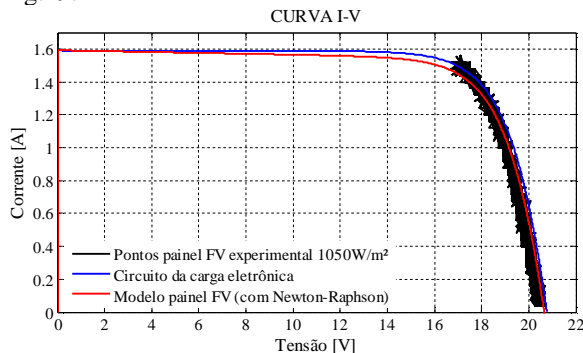


Fig. 19. Comparação das Curvas I-V para 1050W/m².

V. CONCLUSÕES

O trabalho apresentado faz uma validação do método de *Newton-Raphson* para caracterização iterativa da curva I-V, comparou-se seu resultado com curva construída com os pontos retirados da figura disponibilizada pelo *datasheet*. Em que a validação apresentou divergência a partir do ponto de máxima potência do módulo fotovoltaico, isso se deve ao fato de na construção do código, não se calculou o fator de idealidade e o mesmo deve ser considerado nos próximos estudos.

Em seguida, apresentou-se o projeto de um traçador FV da topologia de carga eletrônica. Simulou-se a topologia no software PSIM, utilizando os parâmetros calculados pelo método do *Newton-Raphson*, e com isso plotou-se as curvas I-V da folha de dados do painel FV, a obtida por meio do método de *Newton-Raphson* e a da simulação do traçador I-V. Os contrastes entre as curvas devem-se a parâmetros de simulação que falham em representar todos os critérios físicos do painel, para isso o estudo de códigos genéticos para otimização de erros deve ser implementado.

E por fim, apresentou-se resultados dos testes experimentais do caracterizador, o qual impurezas na superfície do painel utilizado interferiram na absorção da irradiância, reduzindo I_{sc} . Abaixo do ponto de máxima potência, houve uma baixa discrepância entre as curvas. Entretanto, devido a erros de dimensionamento, não se alcançou baixas tensões, o que impossibilitou a construção completa da curva I-V.

REFERÊNCIAS

- [1] I. E. Agency, "Photovoltaic Power Systems Programme," 2017, pp.15–31.
- [2] M. A. S. Valente, "Caracterização Automática de um Painel Fotovoltaico," Universidade Nova de Lisboa, pp. 4–6, 2011.
- [3] J. P. Tavares e M. A. Galdinho, "Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos" CEPTEL – CRESESB, Edição Revisada e Atualizada Rio de Janeiro, Março 2015, pp. 50-52.
- [4] A. C. Maia, R. G. Cornelius, J. W. M. Kaehler, V. C. Bender. "Painéis Fotovoltaicos: Uma Revisão dos Métodos de Caracterização para Obtenção da Curva I-V," Universidade Feredal do Pampa, pp. 1–5, Alegrete, 2017.
- [5] R. G. Cornelius, A. C. Maia, J. W. M. Kaehler, V. C. Bender. "Painéis Fotovoltaicos: Uma Revisão de Modelos Equivalentes para Representação da Característica de Corrente e Tensão," Universidade Feredal do Pampa, pp. 1–5, Alegrete, 2017.
- [6] M. L. M. Luna, "Comparação e Validação de Modelos Elétricos de um Diodo e dois Diodos de um Módulo Fotovoltaico", Fortaleza 2013, pp.7-10.
- [7] A. L. C. Carvalho, "Metodologia para análise, caracterização e simulação de células fotovoltaicas", Belo Horizonte 2014, pp.35-38.
- [8] G. Wang, K. Zhao, T. Qiu, X. Yang, Y. Zhang, Y. Zhao, "The error analysis of the reverse saturation current of the diode in the modeling of photovoltaic modules", Southwest Jiaotong University, Chengdu, China, 2016.
- [9] G. Farivar, B. Asaei, "Photovoltaic Module Single Diode Model Parameters Extraction Based on Manufacturer Datasheet Parameters", School of Electrical and Computer Engineering University of Tehran, Tehran, 2010.
- [10] R. L. Boylestad e L. Nashelsky, "Dispositivos Eletrônicos e Teoria de Circuitos", Editora Pearson, 8ª Edição, pp. 672, São Paulo, 2009.