



Received December 09, 2025; accepted January 08, 2025; Date of publication February 17, 2025.
The review of this paper was arranged by Associate Editor Roberto F. Coelho[✉] and Editor-in-Chief Telles B. Lazzarin[✉]

Digital Object Identifier <http://doi.org/10.18618/REP.e202519>

Desenvolvimento de um Sistema Traçador de Curvas Características de Módulos Fotovoltaicos com Ajuste Dinâmico

Luis G. T. Campos^{✉1,*}, Victor P. Dardengo^{✉1}, Dayane do C. Mendonça^{✉2},
Erick M. da S. Brito^{✉3}, Allan F. Cupertino^{✉4}, Heverton A. Pereira^{✉1}

¹Universidade Federal de Viçosa, Departamento de Engenharia Elétrica, Viçosa, MG, Brasil.

²Universidade Federal de Minas Gerais, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Belo Horizonte, MG, Brasil.

³Universidade Federal de Viçosa, Instituto de Ciências Exatas e Tecnológicas, Florestal, MG, Brasil.

⁴Universidade Federal de Juiz de Fora, Departamento de Energia Elétrica, Juiz de Fora, MG, Brasil.

e-mail: luis.campos@ufv.br*, victor.dardengo@ufv.br, dayane.carmo.mend@gmail.com,
erick.brito@ufv.br, allan.cupertino@ufjf.br, heverton.pereira@ufv.br.

* Corresponding author.

RESUMO Traçadores de curvas características de módulos fotovoltaicos são uma importante ferramenta para monitoramento e avaliação do desempenho de usinas solares. Entretanto, dimensionar o tempo de aquisição de dados é uma tarefa complexa e um valor inadequado pode resultar em curvas características incompletas ou com sobreamostragem na região de tensão de circuito aberto (V_{oc}). O objetivo desta metodologia é o dimensionamento correto do tempo de aquisição dos dados. Assim, um fator de ajuste, calculado através de um ciclo de carga do capacitor, é proposto. Este trabalho apresenta uma metodologia de aquisição de dados com ajuste dinâmico, usando um protótipo de traçador de curvas características de módulos fotovoltaicos baseado em carga capacitiva. Os resultados mostram curvas características com uma distribuição mais uniforme dos pontos amostrados, permitindo maior resolução no ponto de máxima potência (P_{max}).

PALAVRAS-CHAVE Traçador fotovoltaico, Curvas características, Módulo fotovoltaico, Tempo de aquisição.

Development of a Curve Tracing System for Photovoltaic Modules with Dynamic Adjustment

ABSTRACT Characteristic curve tracers for photovoltaic modules are a critical tool for monitoring and evaluating solar power plant performance. However, dimensioning the data acquisition time is a complex task, and an inappropriate value can result in incomplete characteristic curves or oversampling in the open-circuit voltage (V_{oc}) region. The objective of this methodology is to correctly dimension data acquisition time. Therefore, an adjustment factor, calculated through a capacitor charging cycle, is proposed. This work presents a data acquisition methodology with dynamic adjustment, using a characteristic curve tracer prototype for photovoltaic modules based on capacitive charging. The results demonstrate characteristic curves with a more uniform distribution of sampled points, enabling higher resolution at the maximum power point (P_{max}).

KEYWORDS PV tracer, Characteristic curves, Photovoltaic module, Acquisition time.

I. INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, com o aumento da demanda energética e a maior preocupação ambiental, atreladas à redução do uso de combustíveis fósseis e da emissão de CO_2 . Surgem, em um aspecto global, uma necessidade crescente de utilização das fontes de energia renováveis [1]. No Brasil, embora a matriz energética seja majoritariamente composta pela geração de energia proveniente das usinas hidrelétricas, as frequentes temporadas de seca e a escassez de água dos últimos anos têm impactado diretamente a geração e o custo da produção de energia, tornando necessária sua diversificação.

Entre as fontes de energia renováveis, a energia solar fotovoltaica (FV) tem se destacado devido aos incentivos governamentais, a ser sustentável e apresentar baixo custo de operação e manutenção [2]–[4]. Contudo, sua geração apresenta eficiência limitada, sendo influenciada por fatores como irradiância solar, temperatura do módulo, degradação, umidade, eventuais sombreamentos e sujidade em sua superfície [5]. Assim, é crucial que os módulos fotovoltaicos sejam continuamente monitorados e inspecionados, implementando as manutenções necessárias a fim de minimizar a queda de desempenho e aumentar sua confiabilidade [6], [7]. Neste contexto, através das curvas características I-V

(corrente \times tensão) e P-V (potência \times tensão), importantes parâmetros como corrente de curto-circuito (I_{sc}), tensão de circuito aberto (V_{oc}) e ponto de máxima potência (P_{max}) podem ser obtidos. Com esses dados, é possível realizar o monitoramento dos módulos, com o objetivo de identificar perda de eficiência e anomalias. Isso inclui falhas de conexão, sombreamento e sujidade nos módulos fotovoltaicos [2].

A obtenção das curvas características é realizada através dos denominados traçadores de curvas fotovoltaicos, os quais realizam o monitoramento da corrente fornecida pelo módulo durante uma variação da tensão de zero até a tensão de circuito aberto, geralmente utilizando uma carga variável em sua saída. Essas cargas podem apresentar topologias mais simples, como as baseadas em cargas resistivas variáveis ou capacitivas, ou então topologias mais elaboradas, como cargas eletrônicas com transistores, amplificadores de potência e/ou conversores CC/CC [8]–[10].

Neste trabalho, devido à sua precisão, simplicidade de construção e baixo custo, um traçador fotovoltaico baseado em carga capacitiva é adotado [11]–[13]. Para que as curvas características sejam obtidas corretamente, o tempo de aquisição de dados deve ser ajustado de maneira a modelar todo o período transitório de carga do capacitor. Assim, dados de tensão e corrente são medidos desde a condição de curto-circuito (capacitor completamente descarregado) até a condição de circuito aberto (capacitor totalmente carregado).

Muitos trabalhos concentram-se predominantemente nos aspectos de *hardware* [14], [15], negligenciando um elemento crucial para aplicações práticas: a eficiência do software. Em sistemas que utilizam microcontroladores de baixo custo com memória limitada, torna-se fundamental desenvolver estratégias otimizadas de coleta de dados.

O dimensionamento do tempo de aquisição de dados revela-se crítico nesse contexto. Um tempo subdimensionado pode resultar no preenchimento total da memória do dispositivo antes da carga completa do capacitor, gerando curvas características incompletas. Em contrapartida, um tempo sobredimensionado concentra a maioria dos pontos amostrados na região próxima a V_{oc} , quando o capacitor já está completamente carregado. A Fig. 1 ilustra os valores de tensão amostrados ao longo do tempo para diferentes cenários de carga do capacitor. O dimensionamento inadequado do tempo de aquisição pode provocar uma distribuição ineficiente dos pontos ao longo das curvas, comprometendo a qualidade da análise. Consequentemente, podem surgir curvas com baixa resolução em regiões de interesse críticas, especialmente próximas aos valores de tensão (V_{MP}) e corrente (I_{MP}) correspondentes ao ponto de máxima potência do módulo.

O tempo de carga do capacitor (t_c) varia na ordem de micro a milissegundos, e defini-lo não é um processo trivial, uma vez que é função da tensão e corrente de saída do módulo FV, variando portanto, com o nível de irradiação, sombreamento, sujidade, temperatura ambiente e do módulo.

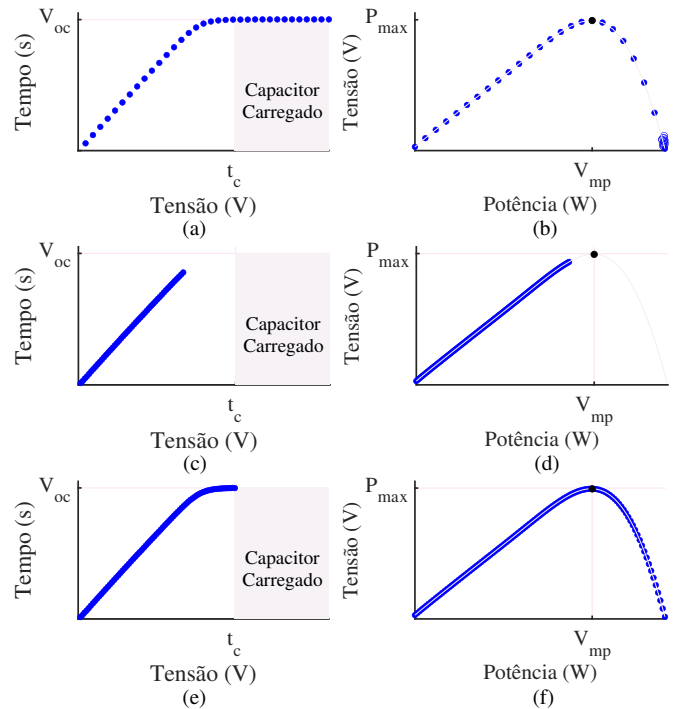


Figura 1. Curva Tensão \times Tempo com o tempo de amostragem: (a) Grande. (c) Pequeno. (e) Adequado. Curva P-V com o tempo de amostragem: (b) Grande. (d) Pequeno. (f) Adequado.

Na literatura [16], [17], diversas abordagens estimam este tempo através da relação entre a capacitância (C), V_{oc} , I_{sc} e um fator de ajuste, denominado k .

Tais abordagens tradicionalmente empregam um valor de k fixo, que não se adapta às variações da condição ambiental ou às características específicas do módulo. Consequentemente, isso resulta em tempos de carga do capacitor nem sempre otimizados. Nesse cenário, torna-se imperativo desenvolver metodologias que garantam um tempo de aquisição de dados adaptativo e otimizado. O objetivo principal é assegurar que a curva característica do módulo apresente uma distribuição mais uniforme de pontos, proporcionando, assim, uma modelagem mais precisa. Neste contexto, este trabalho apresenta tanto o desenvolvimento quanto os resultados experimentais de um sistema traçador de curvas características capaz de se adaptar de acordo com as condições do momento da medição.

O trabalho é estruturado da seguinte forma: Na Seção II, o princípio de funcionamento de um traçador fotovoltaico baseado em carga capacitiva é apresentado. Na Seção III, uma análise do tempo de carregamento de um capacitor e suas respectivas consequências para a obtenção das curvas características é realizada. A metodologia proposta é definida na Seção IV. Na Seção V, é mostrado o *hardware* utilizado nas validações. Os resultados são apresentados na Seção VI. Por fim, na Seção VII, destacam-se as principais conclusões do trabalho.

II. TRAÇADOR FOTOVOLTAICO BASEADO EM CARGA CAPACITIVA

O traçador fotovoltaico utilizado neste trabalho, o qual foi conectado a um módulo fotovoltaico, é ilustrado na Fig. 2. Os IGBTs 1 e 2 representam os semicondutores, D um diodo para proteção contra corrente reversa, C a capacitância do capacitor, ST e SC , respectivamente, os sensores de tensão e corrente, e R a resistência utilizada para descarga do capacitor.

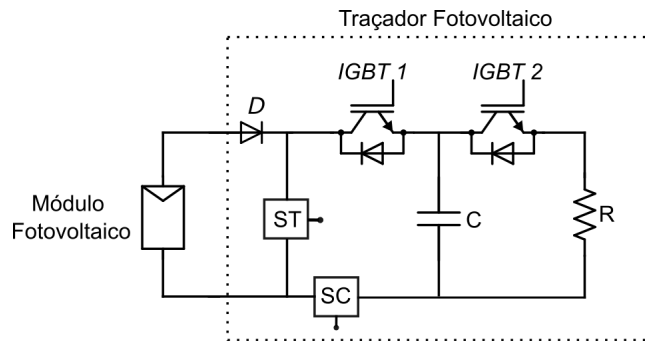


Figura 2. Traçador fotovoltaico baseado em carga capacitiva.

O processo de medição da corrente de curto-circuito (I_{sc}) é realizado acionando o IGBT 1, enquanto o IGBT 2 permanece aberto. Nesse estado, mede-se a corrente inicial de carregamento do capacitor, que constitui uma aproximação de I_{sc} , considerando as quedas de tensão na chave, no diodo e as resistências internas dos componentes. A descarga do capacitor ocorre através do resistor R , com o acionamento do IGBT 2, mantendo o IGBT 1 aberto. Inversamente, durante o processo de carga, o IGBT 1 é ativado, permanecendo o IGBT 2 aberto. Neste processo, a corrente varia de I_{sc} a 0, enquanto a tensão progride de 0 a V_{oc} , conforme ilustrado na Fig. 3. Ressalta-se a importância de um tempo de carga do capacitor suficientemente rápido para manter constantes as condições de operação durante as medições [18]. A partir dos dados de tensão e corrente amostrados, obtêm-se as curvas características I-V e P-V, representadas na Fig. 4, onde V_{MP} e I_{MP} representam, respectivamente, a tensão e a corrente associadas a P_{max} .

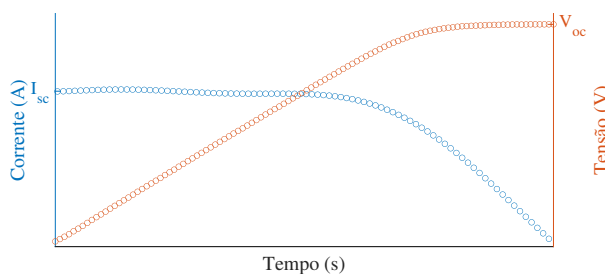


Figura 3. Variação da corrente e tensão no capacitor em função do tempo.

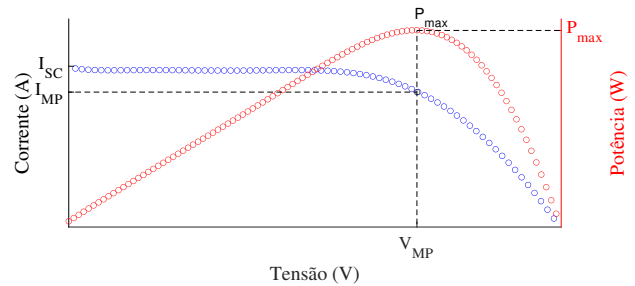


Figura 4. Curvas características I - V e P - V, de um módulo fotovoltaico.

III. ANÁLISE DO TEMPO DE CARGA DE UM CAPACITOR

O tempo de carga do capacitor é definido por (1), que resulta de simplificações tanto do modelo do módulo quanto da curva de carga do capacitor. Essas simplificações introduzem erros inerentes ao cálculo de t_c [19]. Além disso, a definição do valor de k não é consensual. Em [20], [21], k foi definido como 1. Em [22], o valor de k é 1,1, enquanto em [19] e [17], k é definido como 1,82.

$$t_c = k \frac{V_{oc}}{I_{sc}} C \quad (1)$$

Considerando o intervalo de medição entre duas amostras, denominado período de amostragem p_{am} , o tempo de amostragem (t_a) é dado por uma relação entre a quantidade de pontos a serem amostrados (n) e p_{am} , como em (2). A fim de obter as curvas características do módulo com uma distribuição mais uniforme, é recomendável definir t_a como o momento mais próximo do instante onde o capacitor se encontra completamente carregado, isto é $t_a = t_c$.

$$t_a = t_c = np_{am} \quad (2)$$

A Fig. 1 (a) mostra que um valor elevado de t_a (sobredimensionado) assegura que, ao término da janela de aquisição de dados, o capacitor esteja completamente carregado. Entretanto, neste caso, muitos pontos são amostrados em uma região onde o capacitor já está completamente carregado, resultando em uma curva característica P-V, Fig 1 (b), com concentração maior de pontos na região próxima a V_{oc} , e poucos pontos na região do início da curva.

Para um valor subdimensionado de t_a , ao final do processo de aquisição de dados, o capacitor não está completamente carregado, como mostra a Fig. 1 (c), resultando em uma curva característica incompleta, Fig. 1 (d). Neste caso, por exemplo, o ponto de máxima potência não foi modelado. Por fim, para o valor de t_a adequadamente ajustado, a janela de aquisição de dados encerra-se imediatamente após o capacitor estar completamente carregado, Fig. 1 (e). Neste cenário, a curva característica é modelada de maneira precisa, com pontos bem distribuídos por toda faixa de potência do módulo, conforme mostrado na Fig. 1 (f). Apesar das análises terem sido realizadas para a curva característica P-V, sem perda de generalidade, podem ser estendidas à curva I-V.

IV. METODOLOGIA PARA AJUSTE DINÂMICO DO FATOR

k

Na literatura, o valor de k é fixo e definido previamente, independe das condições ambientes do módulo. Na metodologia proposta, um valor de k dinâmico é definido, denominado k_n , o qual varia de acordo com as condições do ensaio. O ajuste de k_n é realizado utilizando um ciclo de carga do capacitor. O fluxograma da Fig. 5 demonstra a metodologia proposta e será detalhado a seguir.

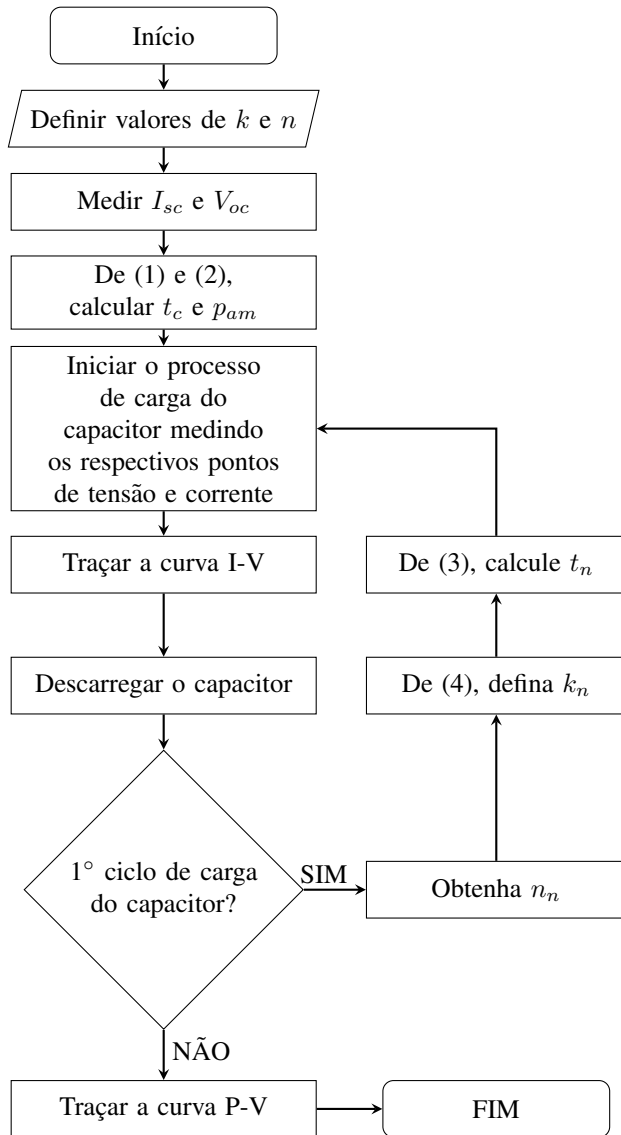


Figura 5. Fluxograma da metodologia proposta.

Inicialmente, define-se um valor de k que garanta o carregamento completo do capacitor, ou seja, assegura que a curva de carga alcance o valor de V_{oc} . Simultaneamente, determina-se a quantidade de pontos (n) a serem alocados em cada curva, diretamente relacionada à memória interna do microcontrolador. Na sequência, procedem-se as medições de V_{oc} e I_{sc} , conforme descrito na Seção II. Utilizando

as equações 1 e 2, calculam-se t_c e p_{am} , respectivamente. Inicia-se o primeiro processo de carregamento do capacitor, realizando a medição dos dados de tensão e corrente até sua carga completa, seguido pelo processo de descarga.

A curva Tensão \times Tempo obtida é então empregada para calcular o novo fator de ajuste, denominado k_n . Pela Equação 3, o tempo de carga é recalculado, agora utilizando k_n no lugar de k^1 . Subsequentemente, executa-se um novo processo de carga.

Essa abordagem permite a obtenção de curvas com tempo de aquisição adequado, evitando acúmulo excessivo de pontos na região de V_{oc} . É fundamental que todo o processo de carga do capacitor, bem como o processamento entre as medições, ocorra de forma ágil, garantindo que as condições de irradiância, sombreamento, temperatura e demais fatores permaneçam constantes durante ambas as medições [18].

$$t_n = k_n \frac{V_{oc}}{I_{sc}} C \quad (3)$$

Para definição do valor de k_n , é realizado o seguinte procedimento: De posse do vetor de tensão da primeira medição, procura-se pelo primeiro valor de tensão que seja superior a $0,99V_{oc}$, então a posição que este elemento se encontra é chamada de n_n . Assim, o valor de k_n é definido sendo uma proporção de k , dada pela razão entre o número de dados necessários para atingir o valor de V_{oc} (n_n) e o número total de pontos coletados (n), conforme 4.

$$k_n = k \frac{n_n}{n} \quad (4)$$

V. IMPLEMENTAÇÃO DA METODOLOGIA PROPOSTA NO TRAÇADOR FOTOVOLTAICO GTRACER

A metodologia proposta foi implementada em um traçador fotovoltaico, denominado GTracer, o qual foi desenvolvido pelo grupo de pesquisa GESEP (Gerência de Especialistas em Sistemas Elétricos de Potência), vinculado à Universidade Federal de Viçosa (UFV) [23]. A Fig.2 mostra de forma simplificada o diagrama do circuito interno do GTracer. As leituras de corrente e tensão medidas pelos sensores SC e ST, respectivamente, enviam suas leituras ao microcontrolador PIC18F4550. O PIC, além de controlar todo o processo de carga e descarga do capacitor, é também responsável por armazenar em sua memória interna as leituras de corrente e tensão, e ao fim de cada ciclo de carga do capacitor, enviar via *bluetooth*, os dados armazenados ao *Software* MATLAB, onde é realizada toda a parte de interface gráfica.

O traçador é composto por quatro capacitores de $2200 \mu F$ em paralelo, um sensor de corrente de efeito Hall modelo HO 15-NP-0000, fabricado pela empresa LEM USA Inc. Para a medição de tensão, foi utilizado um circuito para condicionar a tensão do módulo, composto por um circuito divisor de tensão associado a um amplificador operacional (Amp-op)

¹Os dois ciclos de carga do capacitor ocorrem em sequência e de forma rápida, sem variações nos valores de V_{oc} e I_{sc} , dispensando novas medições.

na configuração seguidor de tensão, assim é possível medir a tensão utilizando o conversor analógico-digital do próprio microcontrolador. Por fim, uma resistência de 100Ω foi utilizada para a descarga dos capacitores. A Fig. 6 mostra o equipamento desenvolvido.



Figura 6. Traçador fotovoltaico desenvolvido - GTracer.

Tabela 1. Dados do Módulo Fotovoltaico Jinko JKM330P no STC (Irradiância 1000 W/m^2 e Temperatura de 25°C).

Parâmetro	Símbolo	Valor
Potência máxima (W)	P_{max}	330 W
Tensão de máxima potência (V)	V_{MP}	37,8 V
Corrente de máxima potência (A)	I_{MP}	8,74 A
Tensão de circuito aberto (V)	V_{oc}	46,9 V
Corrente de curto-circuito (A)	I_{sc}	9,14 A

VI. RESULTADOS

Utilizando-se do GTracer, testes práticos foram realizados de forma a validar a metodologia proposta. Para isso, um módulo fotovoltaico de 330 Wp da marca *Jinko Solar* foi utilizado. Seus principais parâmetros são mostrados na Tabela 1. Os resultados foram obtidos para diferentes níveis de irradiância e sombreamento. Em todos os testes, foi adotado o valor de $k = 7$. Esse valor é superdimensionado para assegurar que o capacitor atinja a tensão de circuito aberto (V_{oc}) e foi escolhido de modo empírico.

A cada ciclo de carga do capacitor, foram coletados 400 pontos para tensão e 400 para corrente, e cada valor medido ocupa 2 bytes da memória. Considerando também as variáveis auxiliares utilizadas, a escolha de $n = 400$ resulta na utilização de aproximadamente 83% da memória interna. Serão apresentadas as curvas de Tensão \times Tempo e Corrente \times Tempo, bem como as curvas P-V e I-V, para uma análise mais detalhada dos resultados.

O histograma com os dados de potência também será apresentado, mostrando a relação entre o número de pontos coletados em cada faixa de potência do módulo. Foram estabelecidas três faixas de potência denominadas regiões

de baixa, média e alta potência. Cada uma correspondendo a um terço da potência máxima. A faixa de baixa potência é representada pela cor azul, a faixa de média potência pela cor verde e a faixa de alta potência pela cor roxa.

A montagem dos equipamentos para a realização dos experimentos foi feita conforme a Fig. 7. Para medição de temperatura e irradiância, foi usado o medidor *Solar Survey 200R*, da marca *Seaward*.

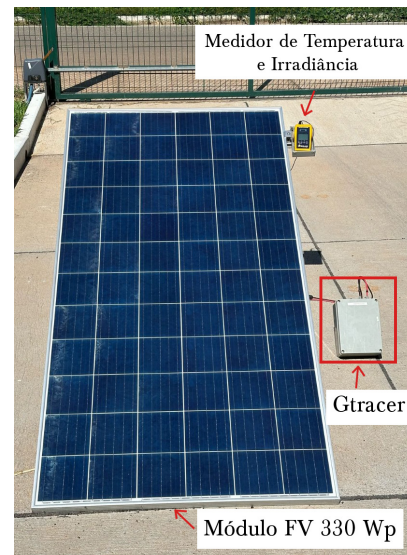


Figura 7. Montagem experimental.

A. Testes sem sombreamento

Para o módulo a uma temperatura de 53°C , sem sombreamento e sob uma irradiância de 905 W/m^2 foram traçadas as curvas Corrente \times Tempo, Tensão \times Tempo, P-V e I-V. A Fig. 8 mostra os resultados obtidos.

Para $k = 7$, a maior parte dos pontos amostrados encontra-se na região onde o capacitor já está completamente carregado, o que indica uma corrente nula e uma tensão estabilizada em $V_{oc} = 42,90 \text{ V}$, como mostram as Figs. 8(a) e (c). A região destacada em vermelho representa os pontos coletados de forma desnecessária, na região onde o capacitor já se encontrava totalmente carregado. Como consequência, a modelagem das curvas I-V (Fig. 8(e)) e P-V (Fig. 8(g)) apresentam uma concentração maior de pontos na sua porção final, em uma região próxima à potência nula. Este comportamento pode ser analisado através do histograma dos dados de potência, como mostra a Fig. 9 (a). Dos 400 pontos obtidos, mais de 300 desses valores representam valores de potência inferior a aproximadamente 50 W, isto é, a grande maioria dos pontos foi amostrada na região de baixa potência (em azul). Por outro lado, apenas cerca de 29 dados modelaram a região em roxo, de maior potência.

Quando o valor de k_n é ajustado para 1,47, percebe-se que a janela de dados é calculada de maneira que o processo de medição é finalizado em um valor bem próximo do instante

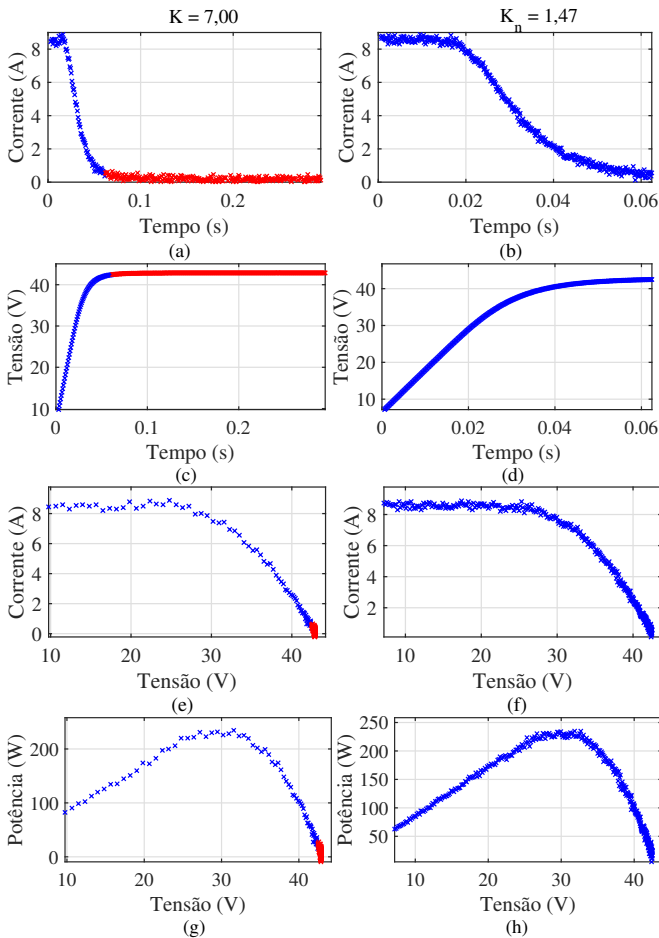


Figura 8. Curvas características com irradiância de 905 W/m². (a), (c), (e) e (g) com $k=7$. (b), (d), (f) e (h) com $k_n = 1,47$.

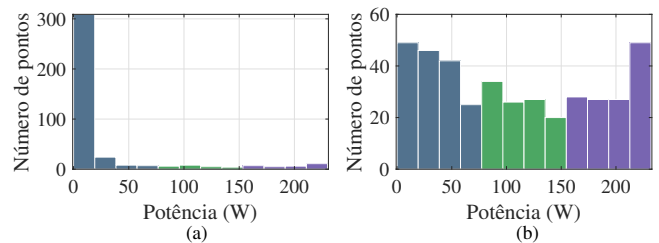


Figura 9. Histograma dos dados de Potência para irradiância = 905 W/m². (a) $k=7$. (b) $k_n = 1,47$.

de carga completa do capacitor, como mostram as Figs. 8(b) e (d). Comparando-se as curvas I-V e P-V, para $k = 7$, Figs. 8(e) e (g), com as curvas I-V e P-V de $k_n = 1,47$, Figs. 8(f) e (h), utilizando-se o menor valor para a constante de ajuste, as curvas características obtidas apresentam uma distribuição mais uniforme para toda a curva, apresentando uma modelagem mais precisa e eficiente, inclusive para o ponto de máxima potência. Analisando o histograma dos dados de potência para $k = 1,47$, Fig. 9 (b), é possível identificar uma distribuição de pontos mais uniforme por toda a faixa de potência do módulo. A região de potência nas vizinhanças de P_{max} , destacada em roxo na Fig. 9, foi

modelada com aproximadamente 131 pontos, enquanto para $k = 7$ a região foi modelada com 29 pontos.

Testes também foram realizados com um nível de irradiância mais baixo. A Fig. 10 mostra os resultados obtidos para um nível de irradiância igual a 427 W/m², temperatura do módulo de 42 °C e temperatura ambiente de 32 °C. As curvas obtidas utilizando o valor de ajuste (k_n) recalculado pelo método proposto, apresentam novamente uma melhor distribuição de pontos que para $k = 7$. Analisando por exemplo a Fig. 10(c), do total de 400 pontos amostrados, 2/3 desses (aproximadamente 267 pontos) foram amostrados para valores de tensão maiores que 42 V (o qual representa um valor aproximado de V_{oc}). Já para $k_n = 1,14$, Fig.10(d) o número de pontos na região próxima a V_{oc} foi reduzido.

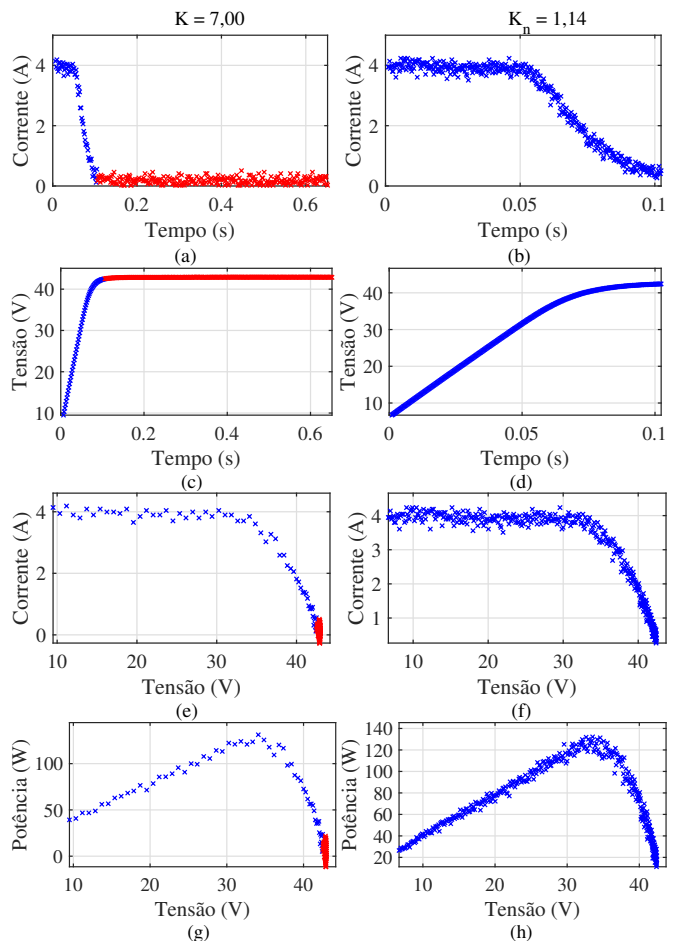


Figura 10. Curvas características com irradiância de 427 W/m². (a), (c), (e) e (g) com $k=7$. (b), (d), (f) e (h) com $k_n = 1,14$.

A Fig. 11 (a) e (b) mostram os histogramas dos dados de potência para a irradiância de 427 W/m², respectivamente para $k = 7$ e $k = 1,14$. Para $k = 7$, a grande maioria dos pontos amostrados é referente a valores de baixa potência, o que, analisando o gráfico da Fig. 10(e) implica em um acúmulo de pontos ao final da curva. Além disso, apenas 24 pontos foram amostrados para a região de alta potência;

em comparação, para $k = 1, 14$, 136 pontos estavam nesta região.

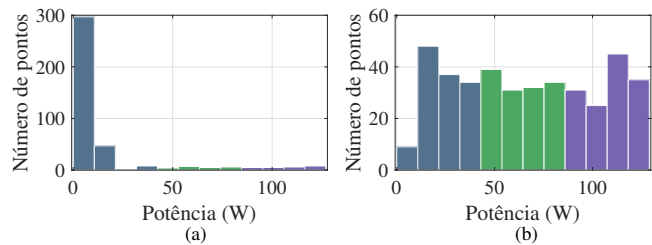


Figura 11. Histograma dos dados de Potência para irradiância = 427 W/m². (a) $k = 7$. (b) $k_n = 1,14$.

A Tabela 2 apresenta, de forma resumida, os resultados dos testes sem sombreamento previamente discutidos e também com variações no valor de k . Os parâmetros %r1, %r2 e %r3 representam, respectivamente, a porcentagem de pontos nas regiões de baixa, média e alta potência. A curva otimizada é definida como aquela em que a curva de tensão atinge o valor de V_{oc} sem acúmulo de pontos nessa região. Na análise dos dados, evidenciou-se uma dependência do valor de k_n em relação à irradiância no momento da medição. Esse resultado indica que a utilização de um valor constante não é adequada para todas as situações. Além disso, observou-se a influência do valor de k no processo. Ao utilizar o valor de 1,1, a curva resultante do segundo ciclo de carga não foi otimizada. Esse comportamento ocorre porque o tempo calculado em 1 não é suficiente para carregar completamente o capacitor (devido ao valor reduzido de k).

Outro possível caso de falha ocorre sob irradiância extremamente baixa ou sombreamento total do módulo. Nessas condições, mesmo com $k = 7$, o primeiro ciclo de carga pode não alcançar V_{oc} , comprometendo o recálculo da constante de ajuste.

Tabela 2. Dados da Curva Otimizada para condição sem sombreamento.

Irr	k	k_n	%r1	%r2	%r3	Curva otimizada?
905	7,00	1,47	0,390	0,278	0,333	✓
899	1,80	1,32	0,305	0,325	0,370	✓
903	1,10	1,02	0,113	0,418	0,470	✗
427	7,00	1,14	0,325	0,413	0,263	✓
407	1,80	1,10	0,338	0,425	0,238	✓
415	1,10	0,99	0,265	0,448	0,288	✗

B. Testes com sombreamento

A metodologia proposta também foi avaliada sob condições de sombreamento. A Fig. 13 apresenta as curvas obtidas para uma irradiância de 872 W/m², na Fig. 12 é exibida a condição de sombreamento durante o teste realizado. Ao analisar a Fig. 13, é possível identificar o comportamento característico associado ao sombreamento parcial do módulo. Assim como nos testes anteriores, a metodologia proposta demonstrou



Figura 12. Módulo sob condição de sombreamento parcial.

capacidade de adaptação, permitindo a coleta de dados de forma otimizada, sem acúmulo de pontos na região de V_{oc} .

Por outro lado, ao examinar a Fig. 14, observamos um comportamento distinto em comparação aos testes anteriores. Devido ao sombreamento, a dinâmica de carregamento do capacitor é alterada, resultando em um tempo maior para alcançar a região de máxima potência. Conseqüentemente, há um aumento no número de pontos na região de média potência. Entretanto, essa característica pode variar conforme os diferentes tipos de sombreamento aplicados ao módulo.

VII. CONCLUSÕES

Este trabalho apresenta uma nova metodologia para a definição do tempo de aquisição de dados em traçadores fotovoltaicos baseados em carga capacitiva. Os resultados experimentais demonstram que a adequada determinação desse tempo resultou em curvas características com distribuição mais uniforme dos pontos, permitindo uma modelagem mais precisa.

Para alcançar esse objetivo, foi proposto um fator de ajuste denominado k_n , calculado a partir da curva I-V obtida no primeiro ciclo de carga do capacitor. O correto funcionamento da metodologia requer que a curva de tensão do primeiro ciclo atinja o valor de V_{oc} , exigindo a escolha de um valor adequado para k . Recomenda-se, portanto, o uso do valor $k = 7$.

A existência de um algoritmo capaz de realizar a modelagem de forma precisa, distribuindo os pontos uniformemente, permite que essa modelagem seja executada utilizando menos pontos. Essa característica viabiliza a utilização de microcontroladores de baixo custo. Quando testada sob condição de sombreamento, a metodologia proposta mostrou-se novamente eficaz, sendo capaz de ajustar corretamente o tempo de aquisição.

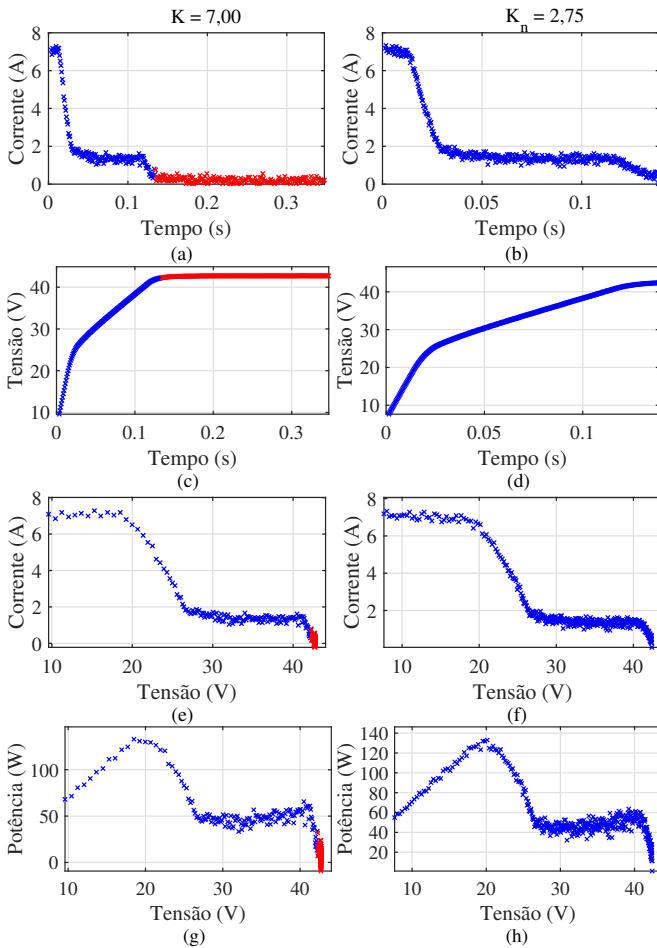


Figura 13. Curvas características com irradiância de 872 W/m² e sombreamento parcial. (a), (c), (e) e (g) com $k_n=7$. (b), (d), (f) e (h) com $k_n = 2,75$.

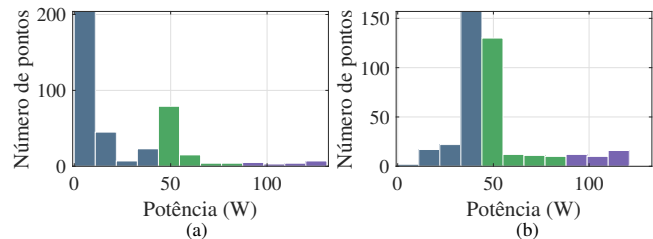


Figura 14. Histograma dos dados de Potência para irradiância = 872 W/m² e com sombreamento parcial. (a) $k=7$. (b) $k_n = 2,75$.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o suporte fornecido pelo projeto de PD ANEEL/CEMIG D0727, CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico) - projetos 307172/2022-8, 407926/2023-2 e 443170/2023-1, FAPEMIG (Fundação de Amparo a Pesquisa de Minas Gerais) - projeto RED-00216-23, APQ-03164-24 e pelo Instituto Nacional de Energia Elétrica (INERGE). Além disso, este trabalho contou com suporte da CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior) - Código de financiamento 001.

CONTRIBUIÇÕES DOS AUTORES

L. G. T. Campos: Conceitualização, Curadoria de dados, Análise de dados, Metodologia, Validação de dados e experimentos, Design da apresentação de dados, Redação do manuscrito original, Redação - revisão e edição. **V. P. Dardengo:** Conceitualização, Curadoria de dados, Análise de dados, Pesquisa, Metodologia, Administração do projeto, Supervisão, Validação de dados e experimentos Design da apresentação de dados, Redação - revisão e edição. **D. C. Mendonça:** Conceitualização, Análise de dados, Validação de dados e experimentos, Design da apresentação de dados, Redação - revisão e edição. **E. M. S. Brito:** Conceitualização, Análise de dados, Validação de dados e experimentos Design da apresentação de dados, Redação - revisão e edição. **A. F. Cupertino:** Conceitualização, Análise de dados, Metodologia, Validação de dados e experimentos Design da apresentação de dados, Redação - revisão e edição. **H. A. Pereira:** Conceitualização, Curadoria de dados, Análise de dados, Recebimento de financiamento, Pesquisa, Metodologia, Administração do projeto, Disponibilização de ferramentas, Supervisão, Validação de dados e experimentos Design da apresentação de dados, Redação - revisão e edição.

PLÁGIO E SIMILARIDADE

O artigo foi submetido para verificação de similaridade no sistema Crossref Similarity Check (iThenticate).

Referências

- [1] J. Sayyad, P. Nasikkar, "Design and Development of Low Cost, Portable, On-Field I-V Curve Tracer Based on Capacitor Loading for High Power Rated Solar Photovoltaic Modules", *IEEE Access*, vol. 9, pp. 70715–70731, 2021, doi:10.1109/ACCESS.2021.3078532.
- [2] F. Silva, P. S. Vicente, F. L. Tofoli, E. M. Vicente, "Portable and low cost photovoltaic curve tracer", in *2017 Brazilian Power Electronics Conference (COBEP)*, pp. 1–6, 2017, doi:10.1109/COBEP.2017.8257413.
- [3] L. V. Bellinaso, R. S. Figueredo, M. P. Almeida, R. J. F. Bortolini, I. Bet, L. Michels, R. Zilles, "Strategies to Deal with Ground Faults in Grid-Connected Transformerless Photovoltaic Converters with Battery Energy Storage System", *Eletrônica de Potência*, vol. 24, no. 3, p. 314–322, Sep. 2019, doi:10.18618/REP.2019.3.0015, URL: <https://journal.sobraep.org.br/index.php/rep/article/view/287>.
- [4] D. B. Chaves, F. B. Grigoletto, "Space Vector Modulation Techniques for Common-Mode Voltage Reduction in Three-Phase Transformerless Split-Source Inverters", *Eletrônica de Potência*, vol. 25, no. 1, p. 30–40, Mar. 2020, doi:10.18618/REP.2020.1.0065, URL: <https://journal.sobraep.org.br/index.php/rep/article/view/53>.
- [5] G. G. Kim, J. H. Hyun, J. H. Choi, S.-H. ahn, B. G. Bhang, H.-K. Ahn, "Quality Analysis of Photovoltaic System Using Descriptive Statistics of Power Performance Index", *IEEE Access*, vol. 11, pp. 28427–28438, 2023, doi:10.1109/ACCESS.2023.3257373.
- [6] V. Kongphet, A. Migan-Dubois, C. Delpha, J.-Y. Lechenadec, D. D-allo, "Low-Cost I-V Tracer for PV Fault Diagnosis Using Single-Diode Model Parameters and I-V Curve Characteristics", *Energies*, vol. 15, no. 15, 2022, doi:10.3390/en15155350.
- [7] V. M. Cavalcante, C. A. Caldeira, R. M. de Souza, A. M. S. Furtado, F. Bradaschia, M. C. Cavalcanti, "I-V Curve Tracer Development For The Performance Analysis Of A Photovoltaic Module", in *2023 Workshop on Communication Networks and Power Systems (WCNPS)*, pp. 1–7, 2023, doi:10.1109/WCNPS60622.2023.10344918.
- [8] T. Antonio Pereira, W. Marques dos Santos, D. Cruz Martins, R. Francisco Coelho, "Caracterizador Elétrico De Módulos Fotovoltaicos Utilizando O Conversor CC-CC Ćuk", *Eletrônica de Potência*, vol. 22, no. 2, p. 139–147, Jun. 2017, doi:10.18618/REP.2017.2.2661.

- [9] I. W. Reischauer, A. J. Rix, "Design of a low cost multi-module capacitive IV curve tracer for PV module mismatch characterisation", in *2019 Southern African Universities Power Engineering Conference/Robotics and Mechatronics/Pattern Recognition Association of South Africa (SAUPEC/RobMech/PRASA)*, pp. 340–346, 2019, doi:10.1109/RoboMech.2019.8704809.
- [10] R. dos Santos, J. Ferreira, G. Martins, K. de Souza, E. Sá, "Low Cost Educational Tool to Trace the Curves PV Modules", *IEEE Latin America Transactions*, vol. 15, no. 8, pp. 1392–1399, 2017, doi:10.1109/TLA.2017.7994784.
- [11] E. A. Bastos, C. Meira Amaral da Luz, T. M. Oliveira, L. Ana Rodarte Rios, E. M. Vicente, F. Lessa Tofoli, "A Curve Tracer for Photovoltaic Modules Based on The Capacitive Load Method", in *2019 IEEE 15th Brazilian Power Electronics Conference and 5th IEEE Southern Power Electronics Conference (COBEP/SPEC)*, pp. 1–6, 2019, doi:10.1109/COBEP/SPEC44138.2019.9065553.
- [12] A. Cimaroli, "How Useful is a Field-Operable I-V Curve Tracer?", in *2023 IEEE 50th Photovoltaic Specialists Conference (PVSC)*, pp. 1–3, 2023, doi:10.1109/PVSC48320.2023.10359755.
- [13] E. M. d. S. Brito, H. A. Pereira, A. Ribeiro, A. F. Cupertino, "CARACTERIZAÇÃO DE CURVAS DE PAINÉIS FOTOVOLTAICOS BASEADO EM CARGA CAPACITIVA: ANÁLISE DO TRANSITÓRIO DO CAPACITOR", *Anais Congresso Brasileiro de Energia Solar - CBENS*, p. 1–8, dez. 2016, doi:10.59627/cbens.2016.2030, URL: <https://anaiscbens.emnuvens.com.br/cbens/article/view/2030>.
- [14] Z. Chen, W. Lin, L. Wu, C. Long, P. Lin, S. Cheng, "A capacitor based fast I-V characteristics tester for photovoltaic arrays", *Energy Procedia*, vol. 145, pp. 381–387, 2018, doi:https://doi.org/10.1016/j.egypro.2018.04.032.
- [15] F. S. de Oliveira, G. A. Rampinelli, A. Krenzinger, "Desenvolvimento de um traçador de curvas iv para arranjos fotovoltaicos", *Revista Brasileira de Energia Solar*, vol. 7, no. 2, pp. 82–90, 2016.
- [16] C. Londoño, J. Cano, E. Velilla, "Capacitive tracer design to mitigate incomplete I-V curves in outdoor tests", *Solar Energy*, vol. 243, pp. 361–369, 2022, doi:https://doi.org/10.1016/j.solener.2022.08.021, URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0038092X22005679>.
- [17] J. Sayyad, P. Nasikkar, "Capacitor Load Based I-V Curve Tracer for Performance Characterisation of the Solar Photovoltaic System", *Applied Solar Energy*, vol. 56, pp. 168–177, 05 2020, doi:https://doi.org/10.3103/S0003701X2003010X.
- [18] T. A. dos Santos Lopes, *Proposta de Caracterizador de Curva de Módulos Fotovoltaicos Adaptativo a Condições de Sombreamento*, Mestrado em engenharia elétrica, Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2021.
- [19] F. Spertino, J. Ahmad, A. Ciocia, P. Di Leo, A. F. Murtaza, M. Chiaberge, "Capacitor charging method for I-V curve tracer and MPPT in photovoltaic systems", *Solar Energy*, vol. 119, pp. 461–473, 2015, doi:https://doi.org/10.1016/j.solener.2015.06.032.
- [20] T. Warner, C. Cox, "A high power current-voltage curve tracer employing a capacitive load", *Solar Cells*, vol. 7, no. 1, pp. 175–181, 1982, doi:https://doi.org/10.1016/0379-6787(82)90102-8.
- [21] J. Muñoz, E. Lorenzo, "Capacitive load based on IGBTs for on-site characterization of PV arrays", *Solar Energy*, vol. 80, no. 11, pp. 1489–1497, 2006, doi:https://doi.org/10.1016/j.solener.2005.09.013, european Solar Conference (EuroSun 2004).
- [22] Y. Erkaya, I. Flory, S. X. Marsillac, "Development of a string level I-V curve tracer", in *2014 IEEE 40th Photovoltaic Specialist Conference (PVSC)*, pp. 3104–3107, 2014, doi:10.1109/PVSC.2014.6925594.
- [23] E. M. da Silveira Brito, *Construção de um caracterizador solar baseado em carga capacitiva*, Trabalho final de curso, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2014.
- Victor Pellanda Dardengo** Graduou-se em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Viçosa em 2011. Obteve seu título de mestre e doutor pela Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP), respectivamente em 2013 e 2018, ambos realizados na área de Energia Elétrica, e seu pós-doutorado pela Universidade Federal do Espírito Santo (UFES). Atualmente, é integrante da Gerência de Especialistas em Sistemas Elétricos de Potência (GESEP), onde desenvolve trabalhos na área de sistemas fotovoltaicos.
- Dayane do Carmo Mendonça** Graduou-se em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Viçosa, 2019. Em 2021, recebeu o título de Mestre em Engenharia Elétrica pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica do CEFET-MG/UFSJ. Em 2024, recebeu o título de Doutora em Engenharia Elétrica pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Minas Gerais. Atualmente, é especialista da Gerência de Especialistas em Sistemas Elétricos de Potência (GESEP-UFV). Seus principais interesses de pesquisa incluem conversores modulares multinível e sistemas de geração de energia renovável.
- Erick Matheus da Silveira Brito** Graduou-se em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Viçosa em 2014, onde também obteve o título de Mestre em Engenharia Agrícola em 2016. Em 2021, recebeu o título de Doutor em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Minas Gerais. Entre 2023 e 2024, realizou pós-doutorado no laboratório LAPLACE, do Institut National Polytechnique (INP) de Toulouse-França. Desde 2011, faz parte da Gerência de Especialistas em Sistemas Elétricos de Potência (GESEP-UFV), onde atua como especialista senior, desenvolvendo trabalhos e pesquisas na área de Eletrônica de Potência, com ênfase em sistemas fotovoltaicos, confiabilidade e qualidade de energia. Desde 2019 é professor EBTT na Universidade Federal de Viçosa - Campus Florestal Suas principais linhas de pesquisa incluem energia solar fotovoltaica, qualidade de energia e confiabilidade de conversores eletrônicos.
- Allan Fagner Cupertino** Recebeu o grau de Bacharel em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Viçosa, em 2013, e os graus de Mestrado e Doutorado em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Minas Gerais em 2015 e 2019, respectivamente. Foi doutorando visitante no Departamento de Tecnologia de Energia da Universidade de Aalborg de 2018 a 2019. De 2014 a 2022, foi Professor Assistente no Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais. Desde 2023, está no Departamento de Energia Elétrica da Universidade Federal de Juiz de Fora. Seus principais interesses de pesquisa incluem sistemas de conversão de energia renovável, sistemas de armazenamento de energia em baterias inteligentes, conversores multilevel em cascata e confiabilidade. O Prof. Cupertino foi agraciado com a Medalha de Prata Presidente Bernardes em 2013, o Prêmio de Tese de Doutorado da SOBRAEP em 2020 e o Concurso de Tese de Doutorado IAS CMD em 2021. Ele é membro da Sociedade Brasileira de Eletrônica de Potência e da Sociedade Brasileira de Automática.
- Heverton Augusto Pereira** Obteve o grau de Bacharel em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Viçosa, Brasil, em 2007, o título de Mestre pela Universidade Estadual de Campinas, em 2009, e o título de Doutor pela Universidade Federal de Minas Gerais, em 2015, todos na área de Engenharia Elétrica. Foi pesquisador visitante no Departamento de Tecnologia Energética da Universidade de Aalborg, Dinamarca, em 2014. Atua como Professor Adjunto no Departamento de Engenharia Elétrica da UFV desde 2009. Seus principais interesses de pesquisa incluem conversores conectados à rede para sistemas de energia solar, e sistemas de armazenamento de energia.

BIOGRAFIAS

Luis Gustavo Teixeira Campos Nascido em 20 de janeiro de 2003 na cidade de Ubá, MG, é aluno de Engenharia Elétrica na Universidade Federal de Viçosa. Atualmente, é aluno de iniciação científica e participa do grupo de pesquisa GESEP. Suas áreas de interesse incluem eletrônica de potência, energias renováveis, instrumentação eletrônica e controle.