




Received October 18, 2023; accepted January 03, 2024; Date of publication March 31, 2024.   
The review of this paper was arranged by Associate Editor Roberto Coelho  and Editor-in-Chief Telles Brunelli Lazzarin .

Digital Object Identifier <http://doi.org/10.18618/REP.2024.1.0029>

# Avaliação Estática e Dinâmica de Fontes Emuladoras Solares Comerciais e seus Impactos em Estudos de MPPT

Valdemar M. Cavalcante Junior <sup>1</sup>, Tiago A. Fernandes <sup>1</sup>, Rafael Cavalcanti Neto <sup>1</sup>,  
Eduardo J. Barbosa <sup>1</sup>, Fabrício Bradaschia <sup>1</sup>, Marcelo C. Cavalcanti <sup>1</sup>

<sup>1</sup> Universidade Federal de Pernambuco, Departamento de Engenharia Elétrica, Centro de Tecnologia e Geociências, Recife – PE, Brasil.

e-mail: valdemar.moreira@ufpe.br, tiago.alvesfernandes@ufpe.br, rafael.cavalcantineto@ufpe.br, eduardo.josebarbosa@ufpe.br, fabricio.bradaschia@ufpe.br, marcelo.cavalcanti@ufpe.br

**RESUMO** Neste artigo, é realizada uma avaliação de desempenho de duas fontes emuladoras comerciais de módulos fotovoltaicos amplamente utilizadas para teste de inversores, bem como para o desenvolvimento de técnicas de MPPT em diversos cenários. O foco desta análise é examinar o comportamento estático e dinâmico dessas fontes, visando garantir que esses dispositivos emuladores emulem com exatidão painéis solares reais em condições tanto de estado estacionário quanto transitórias, a fim de se obter resultados confiáveis e representativos em estudos experimentais. Além disso, discute-se a importância de atentar-se ao controlador contido nos inversores, com o objetivo de otimizá-lo para possuir uma dinâmica que seja mais próxima do real.

**PALAVRAS-CHAVE** Curva I-V, Dinâmica, Fonte Emuladora, Fotovoltaica, MPPT.

## Static and Dynamic Evaluation of Commercial Solar Emulator Sources and their Impacts on MPPT Studies

**ABSTRACT** In this article, a performance evaluation is carried out on commercially available emulating sources of photovoltaic modules widely used for inverter testing, as well as for the development of MPPT techniques in various scenarios. The focus of this analysis is to examine the static and dynamic behavior of these sources, aiming to ensure that these emulating devices accurately emulate real solar panels under both steady-state and transient conditions, in order to obtain reliable and representative results in experimental studies. Additionally, the importance of paying attention to the controller contained in the inverters is discussed, with the objective of optimizing it to have a dynamics that is closer to reality.

**KEYWORDS** Dynamic, Emulating Source, I-V Curve, MPPT, Photovoltaic.

## I. INTRODUÇÃO

A busca de fontes de energia alternativa tem se intensificado devido ao aumento global na demanda energética impulsionada pelo progresso tecnológico, crescimento industrial e expansão populacional [1], [2], [3]. Esse cenário tem despertado preocupações acerca do esgotamento das reservas convencionais de energia e dos impactos ambientais associados, como a poluição [4]. Nesse contexto, a energia solar tem atraído considerável atenção em escala mundial devido ao seu imenso potencial e caráter inesgotável, apresentando-se como uma opção ecologicamente correta e livre de ameaças ambientais [5].

O inversor é um componente essencial do sistema fotovoltaico (FV) conectado à rede elétrica, responsável por converter a energia gerada pelos painéis solares em uma forma adequada para ser injetada na rede elétrica [6]. No entanto, antes de implementar os conversores de energia na prática, é imprescindível submetê-los a uma série de testes abrangentes, visando avaliar sua capacidade de resistir a diferentes falhas e distúrbios na rede, garantindo, assim, sua confiabilidade. No contexto dos testes em ambiente real, os fabricantes de inversores solares deparam-se com desafios relacionados aos custos elevados envolvidos e às exigências complexas de espaço, principalmente no que diz respeito a ensaios feitos em laboratórios [1], [4], [5], [7]. Os inversores

fotovoltaicos são submetidos a uma série de exaustivos testes, a fim de garantir a melhor eficiência desses produtos quando expostos às situações reais. Além dos testes previstos em normas, os fabricantes comprometidos com elevados padrões de qualidade, realizam ensaios extras, com o objetivo de assegurar que em hipótese alguma, os produtos não atinjam os níveis de confiabilidade exigidos pelo mercado. Além disso, um segundo obstáculo surge devido à natureza variável e imprevisível da irradiação solar ao longo do dia, com seus níveis flutuantes e difíceis de serem previstos [4], [5], [7].

Diversas pesquisas são desenvolvidas a cada ano nessa área de conhecimento, normalmente avaliando o impacto de diferentes configurações de conversores estáticos ou de diferentes técnicas de MPPT (*Maximum Power Point Tracking*) na geração solar [8], [9]. Contudo, de maneira geral, a disponibilidade de um sistema adequado para validação experimental impacta a prontidão de pesquisas em sistemas solares fotovoltaicos em tempo real. Portanto, em teoria, para viabilizar pesquisas nessa área, é imprescindível dispor de painéis fotovoltaicos em um ambiente com espectro luminoso controlável [5]. Porém, é importante perceber que essa solução normalmente apresenta custos elevados, é volumosa e difícil de ser alterada para a realização de múltiplos testes considerando mudanças nas condições de sombreamento, arranjos ou características dos módulos fotovoltaicos.

Como alternativa viável, a norma IEC 61683 propõe a utilização de um dispositivo conhecido como simulador de matriz solar (SAS – *Solar Array Simulator*) durante os testes de certificação [5], nesta norma o conceito de SAS é definido como “simulador que possui característica  $I \times V$  equivalente à um arranjo fotovoltaico”. Além disso, neste documento é possível encontrar diretrizes para a realização de testes e ensaios de eficiência dos inversores, assim como definições dos instrumentos de medições, suas faixas de incerteza e precisão necessárias. Diferentemente dos métodos convencionais, o SAS apresenta a vantagem de eliminar restrições tanto espaciais quanto temporais, permitindo a realização dos testes necessários para atender aos requisitos das normas [4]. Assim, um emulador FV surge como uma ferramenta de grande utilidade para avaliar o desempenho dos conversores de energia durante as fases de projeto e desenvolvimento, proporcionando uma abordagem mais eficiente e flexível [5].

O emulador FV desempenha um papel crucial na fase experimental do desenvolvimento de sistemas de geração de energia solar. Sua função é atuar como uma fonte de alimentação não linear, reproduzindo com alta precisão as características da curva corrente-tensão (I-V) dos módulos FV [6], [7]. Ao simular condições desejadas em um ambiente laboratorial, como irradiação solar, temperatura e sombreamento parcial, o emulador FV permite a realização de testes repetíveis e eficientes. Isso proporciona flexibilidade para trabalhar com diferentes níveis de potência e testar inversores com diversas potências nominais [4], [6], [7]. Assim como são empregados na validação e teste de equipamentos como

inversores para geração de energia fotovoltaica, também são utilizados para estudar comportamentos específicos dos módulos ou simular arranjos de módulos para realizar ensaios de técnicas de MPPT e outros testes, sem a necessidade de adquirir os módulos e instalar um sistema completo.

Devido a essas aplicações, é de extrema importância garantir que esses equipamentos se comportem de forma semelhante aos painéis fotovoltaicos reais em todos os momentos, tanto em regime permanente da fonte como em situações transitórias. Dessa forma, é possível obter resultados confiáveis e representativos durante os experimentos realizados com o emulador FV. Portanto, o presente artigo tem como principal objetivo realizar uma comparação abrangente do desempenho de diferentes fontes emuladoras comerciais em uma variedade de cenários distintos. Assim, o foco central dessa análise está em examinar tanto o comportamento estático quanto o dinâmico dessas fontes, a fim de determinar se elas são capazes de representar de maneira fidedigna um módulo fotovoltaico real.

O artigo está organizado da seguinte forma: A Seção II descreve as funções básicas de fontes emuladoras FV comerciais. A Seção III descreve a metodologia utilizada no presente estudo e as características das fontes avaliadas, enquanto a Seção IV descreve a bancada experimental utilizada. Os comportamentos estáticos e dinâmicos das fontes emuladoras FV avaliadas são apresentadas na Seção V. Por fim, na Seção VI, são apresentadas as principais conclusões deste trabalho.

## II. FONTES EMULADORAS SOLARES

O SAS, ou sistema de emulação solar, é um conversor eletrônico de potência projetado para reproduzir com precisão as características de saída de uma matriz solar real em diferentes condições de operação. Algumas das condições que podem ser avaliadas incluem sombreamento, temperatura, irradiação e outras variáveis que afetam o desempenho dos painéis solares, garantindo flexibilidade e adaptabilidade aos diferentes sistemas fotovoltaicos [10].

No SAS, a curva característica I-V (corrente-tensão) que caracterizar um módulo fotovoltaico pode ser gerada por meio de uma tabela de consulta (*lookup table*) ou por um modelo FV, permitindo uma simulação precisa do comportamento do painel solar [11]. Com isso, engenheiros e pesquisadores podem avaliar e comparar o desempenho de diferentes sistemas FV, facilitando a tomada de decisões sobre o projeto e implementação desses sistemas.

De modo geral, os sistemas de emulação solar são implementados em fontes CC controladas, as quais são chamadas neste trabalho por Fontes Emuladoras. O conversor buck-boost é uma das topologias que são empregados na implementação dos emuladores FV, sendo utilizados em condições de seguimento de GMPP [12]. Outros conversores podem ser utilizados para a mesma aplicação tais como Cúk ou Sepic, porém são mais caros e mais complexos do que o conversor *buck-boost*. Assim, uma fonte emu-

ladora é composta por três componentes principais, conforme Figura 1: o estágio de potência; o estágio de controle; e a interface gráfica de supervisão. Esses três componentes e as características operacionais comuns das fontes emuladoras comerciais são brevemente descritos a seguir.

### A. Estágio de Potência

Com relação ao estágio de potência, pode-se classificá-lo de acordo com o tipo de conversor utilizado, sendo esse um conversor de potência linear ou um conversor de potência comutada. Embora os circuitos lineares possam oferecer uma resposta dinâmica rápida, eles apresentam baixa eficiência, faixa de potência limitada, dissipação de calor elevada e dimensões volumosas, o que os torna inadequados para aplicações de alta potência. Portanto, em conversores de alta potência incluindo o estágio de potência das fontes emuladoras), utiliza-se um conversor de potência comutada para gerar a forma de onda desejada de tensão-corrente na saída [4].

### B. Estágio de Controle

Em termos de controle, a fonte emuladora tem como objetivo reproduzir a característica I-V de um painel solar, onde a corrente de saída deve ser cuidadosamente controlada. A referência de corrente é calculada com base na tensão de saída, a qual é controlada por um conversor estático externo, conectado na saída da fonte emuladora. No entanto, o cálculo da referência de corrente pode ser complexo devido ao comportamento não linear dos painéis solares [6].

Para atingir esse objetivo, geralmente são empregados duas malhas de controle. A malha interna é responsável por controlar a corrente de saída do SAS, enquanto a malha externa gera a referência para a malha interna. Essa estrutura de controle garante um funcionamento preciso e confiável da fonte emuladora, permitindo que ela reproduza de forma fiel as características de um painel solar real [4]. Essa abordagem

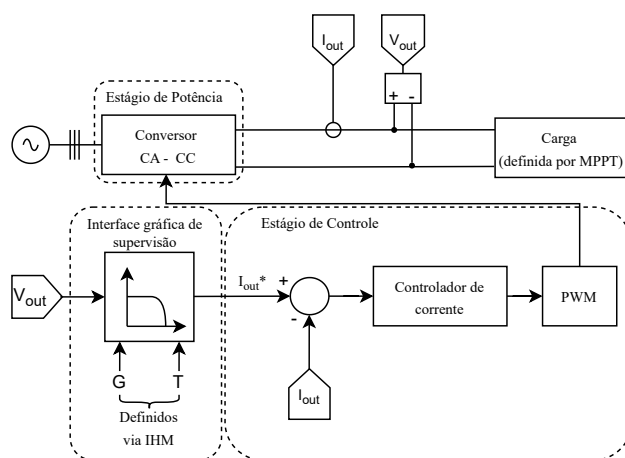


FIGURA 1: Estrutura padrão de uma fonte emuladora.

é fundamental para garantir resultados confiáveis e precisos durante as simulações e testes realizados com a fonte.

Com frequência, a malha externa é implementada utilizando *lookup tables*. Essas tabelas de consultas são normalmente definidas pelo usuário na interface gráfica de supervisão da fonte emuladora.

### C. Interface Gráfica de Supervisão

A interface gráfica de supervisão permite ao usuário definir as condições ambientais de operação e os parâmetros do módulo ou matriz solar real a serem emulados. Com base nessas especificações fornecidas pelo usuário, o SAS é capaz de gerar as características não lineares de saída de um módulo real [4]. Além disso, alguns fabricantes permitem ao usuário definir os valores de ganho para as diferentes malhas de controle da fonte através da interface gráfica de supervisão. Por fim, os *softwares* de controle e monitoramento das fontes permitem a geração, medição e exibição em tempo real do status do rastreamento de potência máxima, além de registrar os valores para análise posterior, conforme mostrado na Figura 2.

### D. Características Comuns das Fontes Emuladoras

Os SASs são frequentemente utilizados para realizar testes de MPPT estáticos e dinâmicos, que são fundamentais para garantir a eficiência dos sistemas FV. Aliado ao *hardware*, as fontes emuladoras possuem *softwares* de fácil utilização com diversas opções de simulação, cada uma com suas próprias características e aplicações exclusivas (referidos acima como interface gráfica de supervisão). Nesse contexto, esses sistemas possuem um conjunto de características comuns a todos os fabricantes, tais como:

- Um algoritmo interno que gera uma tabela de pontos I-V com base em parâmetros de entrada, tais como tensão de circuito aberto ( $V_{oc}$ ), corrente de curto-circuito ( $I_{sc}$ ), corrente no ponto de potência máxima ( $I_{mp}$ ) e tensão no ponto de potência máxima ( $V_{mp}$ ) do módulo FV. Esse recurso permite uma aproximação rápida e fácil da curva sem a necessidade de um computador para realizar a simulação.
- Um algoritmo que possibilita o usuário definir uma tabela personalizada de pontos para determinar a curva I-V (*lookup table* definida pelo usuário). Esse recurso permite que os usuários tenham controle total sobre a simulação e possam criar tabelas específicas para suas necessidades de projeto. Além disso, as tabelas personalizadas podem ser armazenadas na memória interna do sistema, tornando fácil o acesso e reutilização em futuras simulações.
- Um modo de sombreamento que permite simular condições de sombra, possibilitando avaliar o impacto delas na produção de energia dos sistemas FV. O modo de lista é usado para gerar uma lista de pontos de operação da curva I-V de um painel solar em difer-

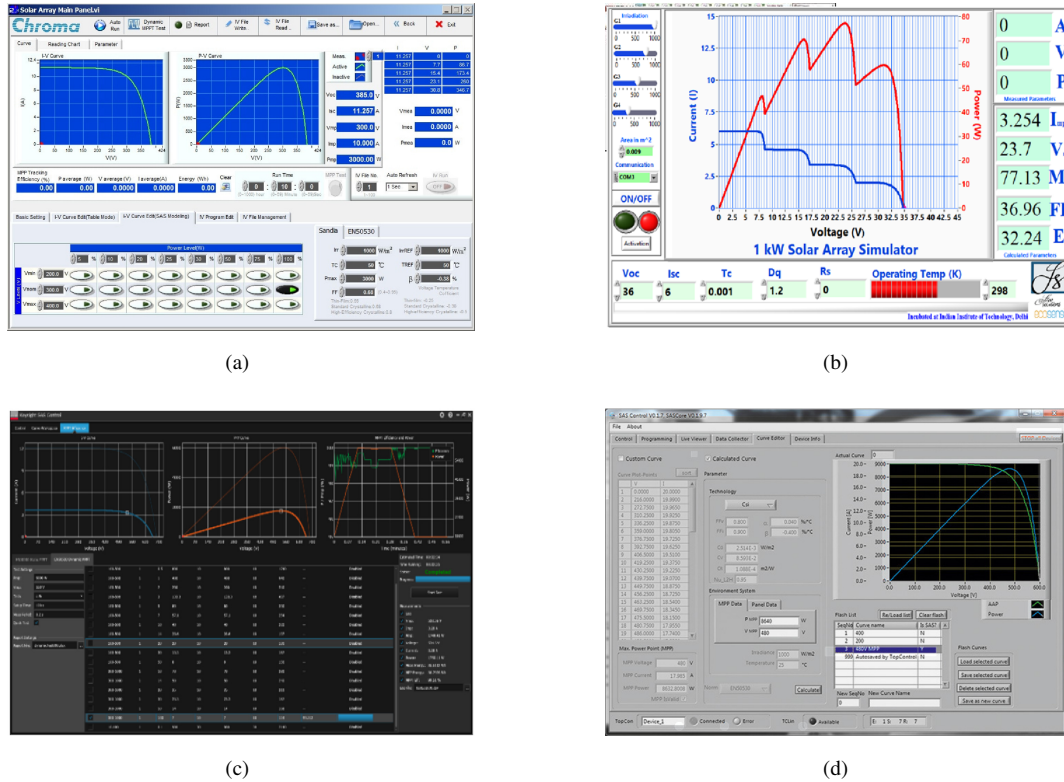


FIGURA 2: Interface gráfica das fontes emuladoras : (a) Chroma [13]. (b) Ecosense [14] (c) Keysight [15] (d) Regatron [16].

entes condições, o que é essencial para determinar a eficiência do painel em diferentes situações.

Ao escolher um SAS, é importante considerar as necessidades específicas do projeto e da aplicação. O modo de simulação escolhido deve oferecer precisão e flexibilidade para avaliar o desempenho do sistema FV em diferentes condições. Além disso, a capacidade de armazenar e reutilizar *lookup tables* pode economizar tempo e aumentar a eficiência do processo de simulação.

### III. METODOLOGIA E CARACTERIZAÇÃO DAS FONTES EMULADORAS AVALIADAS

Para avaliar tanto o comportamento estático quanto o dinâmico das fontes emuladoras em relação à representação fiel de um módulo FV, uma série abrangente de cenários são considerados no presente estudo. Esses cenários englobam uma variedade de situações que podem influenciar o desempenho das fontes emuladoras. Entre os cenários avaliados, estão:

- 1) **Operação em Regime permanente:** Nesse cenário, as fontes emuladoras foram testadas em condições de operação estáveis, considerando os módulos FV sujeitos a uma irradiação solar constante e uma temperatura constante. Ao fazer isso, torna-se possível avaliar como as fontes respondem e seguem o ponto

de máxima potência global (GMPP) em regime permanente.

- 2) **Mudança de curva por sombreamento:** Esse cenário simula uma situação em que parte do módulo FV é sombreado, resultando em uma mudança na sua curva característica de potência. Ao fazer isso, torna-se possível avaliar como as fontes emuladoras respondem a essa mudança e se conseguem rastrear adequadamente o novo ponto de máxima potência.
- 3) **Desempenho durante transições de curvas:** Nesse cenário, são consideradas transições rápidas e suaves entre diferentes pontos de operação do módulo FV. Isso pode ocorrer, por exemplo, devido a mudanças rápidas na irradiação solar ou na temperatura ambiente. Ao fazer isso, torna-se possível analisar se as fontes emuladoras conseguem acompanhar essas transições de forma precisa e capturar as variações do GMPP.

Ao explorar esses diferentes cenários, é possível realizar uma análise abrangente do desempenho das fontes emuladoras comerciais, identificando suas capacidades e limitações em relação à representação fidedigna do comportamento de um módulo FV. Consequentemente, o presente estudo contribui para o avanço da pesquisa e desenvolvimento nessa área, fornecendo informações valiosas para o desenvolvimento de fontes emuladoras mais eficientes e confiáveis,

além da análise do impacto do uso de fontes comerciais para validação de técnicas de rastreamento do GMPP.

#### A. Caracterização das Fontes Emuladoras Avaliadas

Neste trabalho, o principal objeto de estudo são as fontes emuladoras, que desempenham um papel fundamental no ambiente laboratorial ao emular o comportamento de módulos FV. Para realizar as investigações necessárias, duas fontes comerciais foram utilizadas. Por questões éticas, essas fontes são referidas ao longo deste trabalho como **Fonte A** e **Fonte B**. A seguir, é apresentada uma breve descrição das características dessas fontes emuladoras.

- A **Fonte A** é uma fonte emuladora que possui um controle digital de 16 bits incorporado, juntamente com circuitos de medição de tensão e corrente. Segundo o fabricante, essa fonte é especialmente adequada para análises em tempo real do rastreamento do ponto de máxima potência (MPPT) e para o monitoramento do rastreamento de inversores. No entanto, essa fonte não possibilita ao usuário modificar os ganhos internos de controle. Os resultados obtidos com a **Fonte A** são representados graficamente na cor azul nas próximas seções deste trabalho.
- A **Fonte B** é uma fonte emuladora completamente programável. Sua dinâmica é determinada pelos ganhos de controle impostos pelo usuário na interface gráfica de supervisão, permitindo ajustes digitais para propriedades como tensão, corrente e potência. Além disso, essa fonte oferece uma simulação ajustável de resistência interna. A arquitetura de multiprocessamento da **Fonte B** permite não apenas a combinação de diferentes perfis de controle, mas também o processamento de dados em tempo real. Os resultados obtidos com a **Fonte B** são representados graficamente na cor vermelha nas próximas seções deste trabalho.

No contexto do controle das fontes emuladoras, é adotada uma abordagem diferente para cada uma delas. Como a **Fonte A** não permite que o usuário altere os ganhos da sua malha de controle, foram mantidos os parâmetros de fábrica durante as análises realizadas neste trabalho. No entanto, para a **Fonte B**, foram feitas modificações nos ganhos da malha de controle de corrente, definindo o ganho proporcional como 50 e o ganho integral como 5. Essas alterações foram feitas visando aprimorar o desempenho da fonte e obter resultados mais precisos e confiáveis, além de possibilitar avaliações mais profundas sobre o comportamento da fonte.

É importante ressaltar que ambos os modelos de fontes emuladoras comerciais, **Fonte A** e **Fonte B**, apresentam especificações gerais, que são apresentadas na Tabela 1, compatíveis com aplicações experimentais em laboratórios de pesquisa. Essas especificações fornecem informações importantes sobre as características e capacidades das fontes emuladoras. A omissão da cotação de preços de ambas as

TABELA 1: Comparações entre as Fontes Emuladoras Avaliadas

| Parâmetros              | Fonte A   | Fonte B   |
|-------------------------|-----------|-----------|
| Potência                | 0-5kW     | 0-10kW    |
| Corrente                | 0-8,5A    | 0-13A     |
| Máxima tensão de saída  | 600V      | 1.000V    |
| Armazenamento de curvas | 100*      | 1.000     |
| Capacidade de Pontos    | 128       | 64        |
| Ripple de tensão rms    | 0,11 % FS | 0,40 % FS |
| Ruído de tensão de pico | 1,50V     | 1,50 V    |

\* Memória volátil.

\*\* Full-Scale (FS).

fontes no trabalho foi intencional, pois tais informações não acrescentariam de maneira significativa à comparação em análise. O foco principal reside na avaliação de desempenho, e a inclusão desses detalhes financeiros não se alinha diretamente aos objetivos estabelecidos.

#### IV. EQUIPAMENTOS E CONFIGURAÇÕES UTILIZADAS PARA AVALIAÇÃO DAS FONTES EMULADORAS

Com o intuito de assegurar a realização dos experimentos, é imprescindível a estruturação adequada dos instrumentos e da bancada experimental a serem utilizados. Para esse fim, dois componentes foram utilizados para avaliar o desempenho das fontes, são eles: uma carga RC e um conversor Buck-boost. Esses dois componentes são descritos brevemente a seguir.

##### A. Configuração 1: Carga RC

Essa configuração é utilizada para avaliar o tempo de resposta dos sistemas de controle das fontes emuladoras, a fim de caracterizar o comportamento dinâmico das fontes. Para isso, essa configuração conta com um conjunto de resistências e capacitâncias conectados às fontes em questão, conforme ilustrado na Figura 3. Dessa forma, aplicando diferentes degraus de carga com constantes de tempo  $\tau$  conhecidas, torna-se possível estimar o tempo de resposta da fonte emuladora. Para carga resistiva, sua resistência foi variada de 2,666  $\Omega$  à 8  $\Omega$ , enquanto a capacitiva foi variada de 4,7 mF à 47 mF.

##### B. Configuração 2: Conversor Buck-Boost

Conversores do tipo CC-CC podem ter sua razão cíclica controlada, quando conectados a um módulo FV, de modo a fazer a varredura de tensão nos terminais do módulo, partindo desde 0 V até  $V_{oc}$ . Ao fazer isso, a partir da medição de tensão e corrente na entrada do conversor, torna-se possível gerar a curva I-V que caracteriza o módulo FV, para as condições de irradiância e temperatura consideradas. Ou seja, à medida que a razão cíclica assume novos valores, o módulo FV interpreta que o conversor age como carga

resistiva e para cada valor terá uma tensão e corrente atribuída [17].

Ao optar por um conversor CC em vez de uma carga estática, como um resistor que apenas observaria um único ponto de operação, torna-se viável a realização de varreduras na curva I-V. Contudo, é fundamental ressaltar que essa capacidade específica está presente exclusivamente nas topologias de conversores *buck-boost*. A configuração do conversor Buck não permite a obtenção de pontos próximos à corrente de curto-circuito ( $I_{sc}$ ), ao passo que os conversores com características Boost não conseguem alcançar pontos próximos à tensão de circuito aberto ( $V_{oc}$ ) [18].

A Figura 4 representa o diagrama do protótipo experimental utilizado em laboratório para o cenário 3, onde o conversor *buck-boost* funciona como primeiro estágio de um inversor FV de dois estágios, sendo responsável por conectar o módulo FV ao barramento CC. Para analisar as fontes emuladoras, o módulo FV dessa montagem pode ser emulado tanto pela **Fonte A** quanto pela **Fonte B**. Nessa montagem, o barramento CC também é implementado por uma fonte CC, que também pode ser a **Fonte A** ou a **Fonte B**. No entanto, como essas fontes normalmente são unidirecionais, é acrescentada uma resistência no barramento CC para consumir a potência gerada pelo módulo FV. Os diodos próximos da fonte emuladora e da fonte que estabelece a tensão do barramento CC são utilizados para garantir que esses equipamentos não absorvam potência.

Essa configuração permite testar a emulação de diferentes níveis de tensão, possibilitando avaliar diferentes tipos de arranjos FV. A Tabela 2 lista as especificações do conversor *buck-boost*, e a Tabela 3 descreve os valores dos componentes utilizados para confeccionar esse conversor.

Outro detalhe importante que deve ser mencionado é a escolha da carga,  $R_o$ , e da tensão do barramento CC,  $V_o$ , ambos indicados na Figura 4. Na próxima seção, que detalha os experimentos realizados e discute os resultados obtidos, ao utilizar a configuração 2 (uso do conversor *buck-boost*), são avaliados dois arranjos de módulos FV emulados

TABELA 2: Especificações do Conversor *Buck-Boost*

| Parâmetro       | Descrição                     | Valor  |
|-----------------|-------------------------------|--------|
| $P_o$           | Máxima potência de saída      | 4000 W |
| $V_{fv}$        | Máxima tensão de entrada      | 500 V  |
| $V_o$           | Máxima tensão de saída        | 500 V  |
| $\Delta I_{fv}$ | Ripple de corrente de entrada | 0,2 %  |
| $\Delta I_o$    | Ripple de corrente de saída   | 0,04 % |
| $F_{ch}$        | Frequência de chaveamento     | 20 kHz |

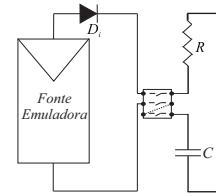


FIGURA 3: Configuração 1 – Esquemático para os experimento relacionado ao comportamento das fontes (Fonte emuladora + carga RC).

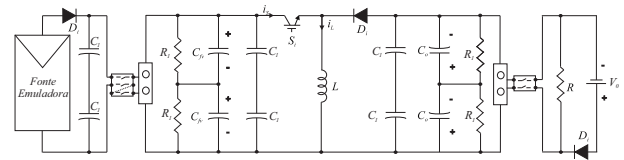


FIGURA 4: Configuração 2 – Esquemático para os experimento relacionado ao comportamento das fontes (Fonte emuladora + conversor *buck-boost*).

pela fonte emuladora. Isso significa que dois cenários, com potências nominais distintas, são avaliados. Dessa forma, as escolhas do  $R_o$  e do  $V_o$  são feitas de forma que o conjunto, conversor mais fonte, consiga operar na maior faixa de operação possível, contemplando todos os níveis de irradiância avaliados.

## V. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nesta seção, são apresentados os principais resultados obtidos a partir dos experimentos realizados para analisar o comportamento estacionário e dinâmico das fontes emuladoras. A partir desses resultados, é realizada uma breve discussão sobre o desempenho das fontes avaliadas.

TABELA 3: Especificações dos Componentes do Conversor *Buck-Boost*

| Parâmetro     | Descrição  | Valor         |
|---------------|--|---------------|
| L             | Indutância   | 6 mH          |
| $I_l$         | Máxima corrente no indutor                                   | 25 A          |
| $C_{fv}$      | Capacitores eletrolíticos de entrada                         | 470 $\mu$ F   |
| $C_o$         | Capacitores eletrolíticos de saída                           | 330 $\mu$ F   |
| $C_1$ a $C_4$ | Capacitores de poliéster (desacoplamento de alta frequência) | 4,7 $\mu$ F   |
| $R_1$ a $R_4$ | Resistores de descarga dos barramentos                       | 20 k $\Omega$ |

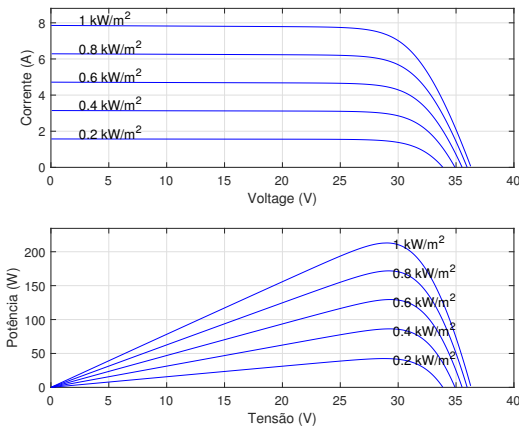


FIGURA 5: Curvas I-V e P-V para temperatura fixa em 25°C e considerando as irradiância de 200, 400, 600, 800 e 1000 W/m<sup>2</sup> para um único módulo.

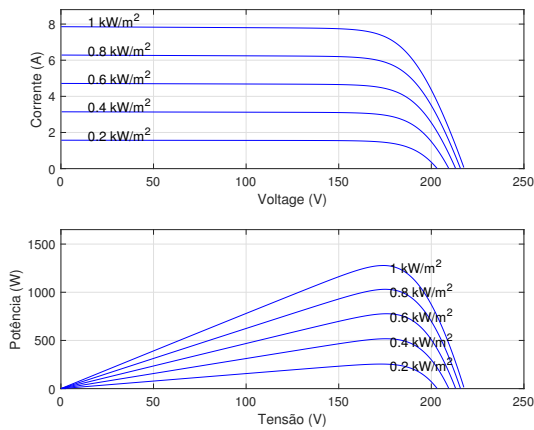


FIGURA 6: Curvas I-V e P-V para temperatura fixa em 25°C e considerando as irradiância de 200, 400, 600, 800 e 1000 W/m<sup>2</sup> para um seis módulos.

### A. Comportamento Estacionário das Fontes Emuladoras

A fim de investigar o comportamento estacionário das fontes, as curvas de referência foram obtidas com o *software MATLAB/Simulink* através do bloco *PV Array*, que disponibiliza uma grande biblioteca de módulos. O módulo escolhido para este estudo foi o Kyocera KC200GT, e as curvas de referência foram obtidas mantendo a temperatura fixa em 25°C e considerando cinco diferentes níveis de irradiância: 200, 400, 600, 800 e 1000 W/m<sup>2</sup>, tanto para um único módulo (Figura 5) quanto para seis módulos em série (Figura 6).

Na simulação para obtenção das curvas de referência, uma fonte de tensão controlada é conectada aos terminais do *PV Array*, variando a tensão de 0 até  $V_{oc}$  tem, o que resulta na corrente de  $I_{sc}$  até 0. Dessa forma, é possível obter a curva de referência do módulo escolhido para uma determinada irradiância e número de módulos. Os pontos avaliados da curva são espaçados linearmente para preencher a *lookup table* que cada uma das fontes suporta.

O experimentos realizados para analisar o comportamento estacionário consistem na obtenção das curvas I-V e P-V, utilizando um conversor *Buck-Boost*. As curvas obtidas durante esses procedimentos são avaliadas utilizando dois critérios de erro amplamente utilizados para avaliar o desempenho das curvas I-V, em que a quantidade de pontos medidos é denotada como  $N_{pontos}$ . Os critérios de erro são o Erro Médio Absoluto em Potência Normalizado (EMAPN) [19] e Desvio Médio Quadrático Normalizado (*Normalized Root Mean Square Error* – NRMSE) [20].

O EMAPN tem como objetivo padronizar os erros em potência, permitindo a comparação de duas ou mais curvas P-V de módulos FV. O EMAPN é calculado utilizando a seguinte fórmula:

$$EMAPN = \frac{\sum_{j=1}^{N_{pontos}} |P_{ref} - P_{med}|}{N_{pontos} \cdot P_{mp}} \cdot 100\% \quad (1)$$

em que:

- $P_{ref}$  é a potência das curvas de referência;
- $P_{med}$  é a potência obtida das medições realizadas; e
- $P_{mp}$  é a potência máxima da curva de referência.

Por outro lado, o NRMSE é utilizado para avaliar os erros em corrente, sendo definido como:

$$NRMSE = \frac{\sqrt{\frac{\sum_{j=1}^{N_{pontos}} (I_{ref} - I_{med})^2}{N_{pontos}}}}{I_{sc}} \cdot 100\% \quad (2)$$

em que:

- $I_{ref}$  é a corrente das curvas de referência;
- $I_{med}$  é a corrente obtida das medições realizadas; e
- $I_{sc}$  é a corrente máxima da curva de referência.

1) Resultados das fontes em medições com o ciclo de trabalho do conversor buck-boost variando linearmente

O procedimento consistiu na obtenção das curvas I-V e P-V utilizando o conversor *buck-boost* apresentado na Figura 4. Nesse procedimento, o ciclo de trabalho foi variado linearmente de 0 a 0,7 e, em seguida, de 0,7 a 0. Cada varredura foi realizada em intervalos de 10 segundos, totalizando 20 segundos. Esse procedimento foi repetido 5 vezes para cada curva, resultando em um tempo total de 100 segundos por ensaio. Essa repetição foi feita para obter mais dados e, conseqüentemente, observar a repetibilidade das medições ao longo do tempo.

É importante ressaltar que o desempenho do conversor *buck-boost* não exerce influência nas características evidenciadas nos resultados desta avaliação. Isso se deve ao fato de que tais resultados foram obtidos ao explorar diversos pontos de operação quando o conversor já havia atingido um regime permanente. Assim sendo, as características dinâmicas do conversor não têm qualquer impacto nos resultados desta avaliação.

Outro detalhe importante a ser observado é a escolha da carga,  $R$ , e a escolha da tensão do barramento CC,  $V_o$ , ambos indicados na Figura 4. Quando emulando a configuração de um único módulo, é utilizada uma carga de  $6 \Omega$  e uma tensão de 20V no barramento CC. Por outro lado, para a configuração de 6 módulos, é utilizada uma carga de  $36 \Omega$  e uma tensão de 200V. Essas escolhas são feitas de forma que o conjunto, composto pelo conversor e pela fonte, consiga operar em toda faixa de operação possível (razão cíclica entre 0 e 0,7), contemplando assim todos os níveis de irradiância avaliados.

O conversor conseguiu realizar a medição para todas as configurações de referência propostas, isto é, tanto para a condição de um único módulo quanto para a condição de uma série FV de 6 módulos. Dessa forma, é possível avaliar o trajeto percorrido nas curvas I-V e P-V, a fim de verificar se a fonte opera em cima da curva de referência.

Os resultados da medição de um módulo utilizando a variação linear do ciclo de trabalho do conversor *buck-boost* estão expressos graficamente nas Figuras 7 e 8, representando os dados da curva I-V e P-V, respectivamente. Percebe-se que, para este resultado experimental, um nível de potência mais alto faz a **Fonte A** entrar em uma região de instabilidade e, conseqüentemente, perde-se da referência aplicada em sua configuração. Além disso, é possível observar que as fontes não apresentam bom desempenho após o joelho das curvas, principalmente para correntes mais elevadas, pois o controle estará operando para emular módulos em uma região não-linear onde a corrente não terá um comportamento constante.

Os resultados da medição de seis módulos utilizando a variação linear do ciclo de trabalho do conversor *buck-boost* são mostrados graficamente nas Figuras 9 e 10, representando os dados da curva I-V e P-V, respectivamente. A partir dessa análise, pode-se observar que, para ambas as fontes, uma maior quantidade de módulos em série resulta em um melhor desempenho. Isso é um indício que o controle de ambas as fontes possui pontos de operações que apresentam melhor desempenho.

O EMAPN e NRMSE das medições do conversor para um módulo estão organizados na Tabela 4 e 5. Para a condição de um módulo, a média do EMAPN para **Fonte B** foi de 7,55%, enquanto para a **Fonte A** foi de 9,23%, resultando em uma diferença de 1,68% em favor da **Fonte B**. Em relação ao NRMSE, a **Fonte B** atingiu o valor médio de 0,0025%, enquanto a **Fonte A** obteve 0,0164%, totalizando uma diferença de 0,0139% em favor da **Fonte B**.

O EMAPN e NRMSE das medições do conversor para seis módulos estão organizados nas Tabelas 6 e 7. Para este resultado, a média do EMAPN para a **Fonte B** foi de 1,66%, enquanto para a **Fonte A** foi de 4,32%, resultando em uma diferença de 2,66% em favor da **Fonte B**. Em relação ao NRMSE, a **Fonte B** atingiu o valor médio de 0,00062%, enquanto a **Fonte A** obteve 0,0013%, totalizando uma diferença de 0,00068% em favor da **Fonte B**.

Para níveis de potência mais altos, ambas as fontes apresentaram melhor desempenho. No entanto, em todos os testes realizados, a **Fonte B** demonstrou-se superior à **Fonte A**.

## 2) Avaliação dos resultados de regime permanente

Durante a análise do comportamento estacionário das fontes emuladoras, observou-se que erros significativos na reprodução da curva I-V ao emular apenas um módulo FV, especialmente próximo ao joelho da curva, onde se encontra o ponto de máxima potência. Além disso, foi notada a dificuldade das fontes em representar a região não-linear entre o joelho da curva I-V e o ponto de  $V_{oc}$ , onde a corrente não é constante. Esses resultados ressaltam a necessidade de melhorias nas fontes emuladoras, a fim de garantir uma reprodução mais fiel e precisa das curvas I-V em diferentes pontos de operação.

É fundamental destacar que a reprodução precisa da curva I-V é essencial para o uso das fontes emuladoras na avaliação do desempenho e da eficiência de técnicas de MPPT. Os erros observados na região do joelho e na região não-linear da curva I-V podem comprometer a precisão das medições, afetando principalmente as técnicas de MPPT baseadas em modelo.

## B. Comportamento Transitório das Fontes Emuladoras

Para avaliar o comportamento transitório das fontes emuladoras, foram realizados mais três experimentos. Os resultados desses experimentos, juntamente com a discussão dos resultados obtidos, são apresentados a seguir. É relevante ressaltar que os dois primeiros experimentos descritos foram realizados para o cenário de pior caso da avaliação do comportamento estacionário, ou seja, para um único módulo com uma irradiância de  $1000 W/m^2$ .

### 1) Transitório para fonte conectada em carga RC

Conforme discutido na Subseção V.A, durante a avaliação do comportamento estacionário, constatou-se que as fontes apresentavam dificuldade de reproduzir fielmente as curvas I-V solicitadas, especialmente quando emulando um único módulo FV. Levando isso em consideração, um segundo experimento foi feito para descartar a possibilidade das fontes não conseguirem acompanhar uma alta variação de corrente, que ocorre após o joelho das curvas I-V. Essas limitações nas taxas de variação de corrente e tensão são referidas nos manuais das fontes emuladoras como *slew rate*.

Para descartar a possibilidade de problemas associados a *slew rates*, optou-se por avaliar a resposta das fontes emuladoras para um degrau de carga RC. Dessa forma, ao variar a resistência e a capacitância da carga, é possível ajustar a constante de tempo  $\tau$  da carga e tornar a dinâmica mais lenta. Isso torna possível observar o comportamento transitório das fontes emuladoras de forma mais detalhada e



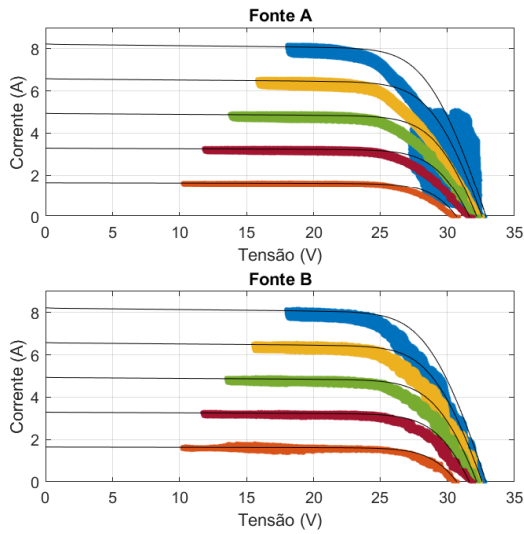


FIGURA 7: Avaliação do comportamento estacionário das fontes emuladoras: obtenção das Curvas I-V com o conversor *buck-boost* para a configuração de um módulo com irradiâncias de 200 a 1000W/m<sup>2</sup>.

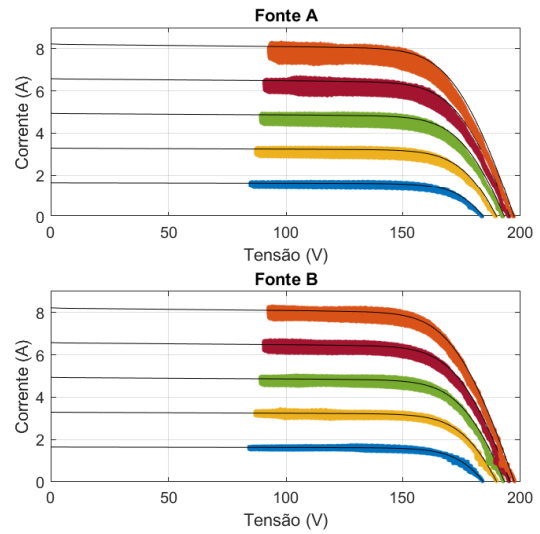


FIGURA 9: Avaliação do comportamento estacionário das fontes emuladoras: obtenção das Curvas I-V com o conversor *buck-boost* para a configuração de seis módulos com irradiâncias de 200 a 1000W/m<sup>2</sup>.

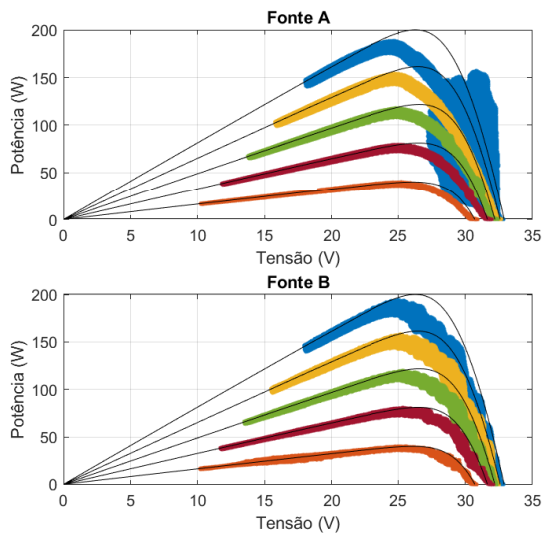


FIGURA 8: Avaliação do comportamento estacionário das fontes emuladoras: obtenção das Curvas P-V com o conversor *buck-boost* para a configuração de um módulo com irradiâncias de 200 a 1000W/m<sup>2</sup>.

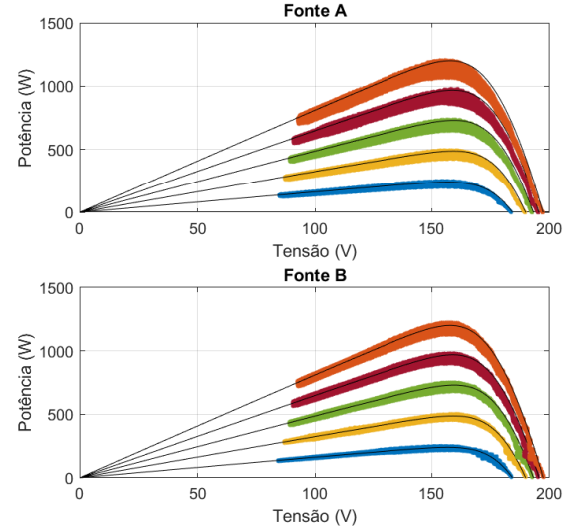


FIGURA 10: Avaliação do comportamento estacionário das fontes emuladoras: obtenção das Curvas P-V com o conversor *buck-boost* para a configuração de seis módulos com irradiâncias de 200 a 1000W/m<sup>2</sup>.

TABELA 4: Avaliação do EMAPN Usando o Conversor *Buck-Boost*, para um Módulo FV

| Curva   | Curva 1<br>200 W/m <sup>2</sup> | Curva 2<br>400 W/m <sup>2</sup> | Curva 3<br>600 W/m <sup>2</sup> | Curva 4<br>800 W/m <sup>2</sup> | Curva 5<br>1 kW/m <sup>2</sup> |
|---------|---------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|--------------------------------|
| Fonte A | 7,1760                          | 7,9615                          | 8,1349                          | 9,8986                          | 12,9918                        |
| Fonte B | 4,4700                          | 8,4491                          | 5,5101                          | 9,4378                          | 9,8855                         |

TABELA 5: Avaliação do NRMSE Usando o Conversor *Buck-Boost*, para um Módulo FV

| Curva   | Curva 1<br>200 W/m <sup>2</sup> | Curva 2<br>400 W/m <sup>2</sup> | Curva 3<br>600 W/m <sup>2</sup> | Curva 4<br>800 W/m <sup>2</sup> | Curva 5<br>1 kW/m <sup>2</sup> |
|---------|---------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|--------------------------------|
| Fonte A | 0,0027                          | 0,0028                          | 0,0029                          | 0,0035                          | 0,0045                         |
| Fonte B | 0,0017                          | 0,0027                          | 0,0022                          | 0,0029                          | 0,0031                         |

TABELA 6: Avaliação do EMAPN Usando o Conversor *Buck-Boost*, para Seis Módulos FV

| Curva   | Curva 1<br>200 W/m <sup>2</sup> | Curva 2<br>400 W/m <sup>2</sup> | Curva 3<br>600 W/m <sup>2</sup> | Curva 4<br>800 W/m <sup>2</sup> | Curva 5<br>1 kW/m <sup>2</sup> |
|---------|---------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|--------------------------------|
| Fonte A | 5,3046                          | 4,3502                          | 5,0178                          | 3,9010                          | 3,0319                         |
| Fonte B | 1,3504                          | 1,6747                          | 2,1754                          | 1,5903                          | 1,5471                         |

TABELA 7: Avaliação do NRMSE Usando o Conversor *Buck-Boost*, para Seis Módulos FV

| Curva   | Curva 1<br>200 W/m <sup>2</sup> | Curva 2<br>400 W/m <sup>2</sup> | Curva 3<br>600 W/m <sup>2</sup> | Curva 4<br>800 W/m <sup>2</sup> | Curva 5<br>1 kW/m <sup>2</sup> |
|---------|---------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|--------------------------------|
| Fonte A | 0,0016                          | 0,0013                          | 0,0014                          | 0,0012                          | 0,0010                         |
| Fonte B | 0,0006                          | 0,0006                          | 0,0007                          | 0,0006                          | 0,0006                         |

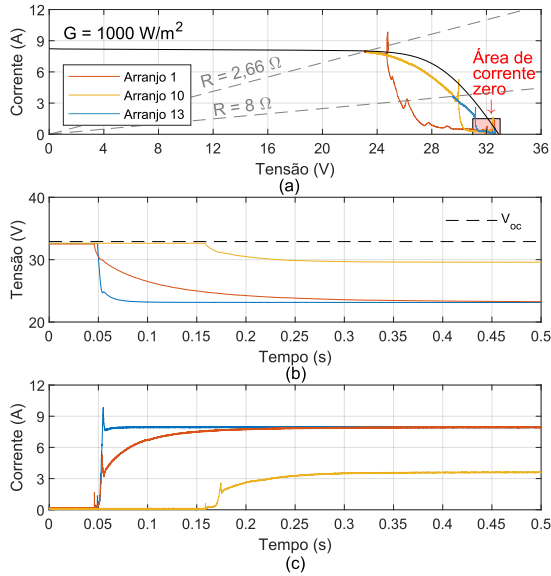


FIGURA 11: Comportamento da **Fonte A** em resposta a um degrau de carga RC, aplicando cargas com diferentes constantes de tempo ( $\tau$ ): 12,53 ms (Arranjo 1), 125,30 ms (Arranjo 10) e 376,00 ms (Arranjo 13). Para: (a) O percurso na curva I-V, (b) Variação de tensão, (c) Variação de corrente.

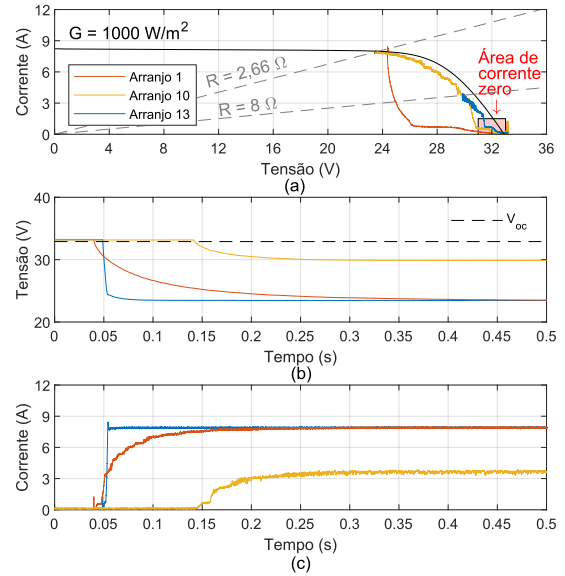


FIGURA 12: Comportamento da **Fonte B** em resposta a um degrau de carga RC, aplicando cargas com diferentes constantes de tempo ( $\tau$ ): 12,53 ms (Arranjo 1), 125,30 ms (Arranjo 10) e 376,00 ms (Arranjo 13). Para: (a) O percurso na curva I-V, (b) Variação de tensão, (c) Variação de corrente.

verificar se elas conseguem acompanhar adequadamente as variações de carga. Os valores específicos das cargas resistivas e capacitivas usadas nessa avaliação estão disponíveis na Tabela 8.

Nesse contexto, conforme mostrado na Tabela 8, foi possível variar  $\tau$ , constante de tempo do circuito apresentado na Figura 3, dentro da faixa de valores de 12,53 ms a 376 ms. Os arranjos 1, 2, 3, apresentados na Tabela 8, foram utilizados para avaliar o impacto do uso de cargas RC com diferentes constantes de tempo sendo conectadas às fontes. Os resultados representados na Figura 11 foram obtidos para a **Fonte A**, enquanto a Figura 12 representa o uso da **Fonte B**.

Nesse experimento, cada fonte emuladora foi iniciada sem estar conectada com a carga RC, sendo configurada para operar segundo a curva I-V de referência de um único módulo FV com irradiância de  $G = 1000 \text{ W/m}^2$  (curvas em preto nas Figuras 11.a e 12.b). Em seguida, cada uma das três cargas RC avaliadas foi conectada aos terminais da fonte emuladora. Com isso, a fonte passou a operar, em regime permanente, em um ponto determinado pelo cruzamento entre a curva I-V de referência e a reta que representa a parcela resistiva da carga RC (linha tracejada nas Figuras 11.a e 12.a).

Idealmente, ao conectar uma carga nos terminais da fonte emuladora, espera-se que a fonte deixe de operar no ponto de operação inicial para operar no ponto de operação final, seguindo o trajeto definido pela curva I-V. No entanto, ao analisar os resultados apresentados nas Figuras 11.a e

12.a, observa-se que a tensão começa a diminuir antes da corrente começar a aumentar, o que resulta em uma faixa de valores que faz a trajetória da mudança de ponto de operação passar por uma região de corrente baixa (indicada pela área sombreada em vermelho nas Figuras 11.a e 12.a) antes de tentar acompanhar a curva I-V. Além disso, após essa região de corrente baixa, são observados erros significativos na região do joelho e na região não linear da curva, como mencionado na Subseção V.A.

As variações de tensão e corrente em função do tempo para a **Fonte A** e a **Fonte B** são mostradas nas Figuras 11.b, 11.c, 12.b e 12.c. Ao analisar essas curvas, pode-se observar que inicialmente as fontes respondem a variações de tensão e, em seguida, respondem a variações de corrente. Além disso, é importante ressaltar que a resposta das fontes pode ser influenciada pela sua característica de *slew rate* de tensão e corrente, o que pode afetar o tempo de resposta das fontes. Baseado nesses pontos, observa-se que quanto maior for a constante de tempo da carga (ou do sistema) conectada à fonte emuladora, melhor será a capacidade da fonte de seguir o trajeto definido pela curva I-V de referência. Isso indica que uma dinâmica mais lenta pode resultar em uma resposta mais precisa das fontes.

Por fim, ao comparar os resultados, observa-se que ambas as fontes apresentam comportamentos semelhantes. No entanto, a **Fonte A** apresenta um sobressinal de corrente alto para todos os valores de  $\tau$ , o que resulta em um trajeto que passa por pontos acima da curva de referência. Além

TABELA 8: Valores Discretos de  $R$  e  $C$  Utilizados para a Configuração 1

| #  | Resistência ( $\Omega$ ) | Capacitância (mF) | Constante de Tempo (ms) |
|----|--------------------------|-------------------|-------------------------|
| 1  | 2,66                     | 4,70              | 12,50                   |
| 2  | 2,66                     | 9,40              | 25,06                   |
| 3  | 2,66                     | 14,10             | 37,59                   |
| 4  | 2,66                     | 18,80             | 50,12                   |
| 5  | 2,66                     | 23,50             | 62,65                   |
| 6  | 2,66                     | 28,20             | 75,18                   |
| 7  | 2,66                     | 32,90             | 87,71                   |
| 8  | 2,66                     | 37,60             | 100,24                  |
| 9  | 2,66                     | 42,30             | 112,77                  |
| 10 | 2,66                     | 47,00             | 125,30                  |
| 11 | 3,43                     | 47,00             | 161,11                  |
| 12 | 4,80                     | 47,00             | 225,60                  |
| 13 | 8,00                     | 47,00             | 376,00                  |

do sobressinal, mesmo com comportamentos semelhantes, a **Fonte B** consegue fornecer curvas I-V mais próximas da curva de referência em comparação com a **Fonte A**.

## 2) Transitório com GMPPT

A partir do primeiro experimento, verificou-se a relevância de avaliar o impacto da variação do tempo de resposta dos controladores das fontes emuladoras, bem como o impacto dessas fontes na validação de técnicas de MPPT baseadas em modelo. Além disso, também foi considerado importante analisar o comportamento das fontes em relação a cargas que requerem diferentes tempos de resposta. Com base nesses pontos, o segundo experimento foi realizado com o propósito de investigar essas questões.

O segundo experimento tem como objetivo analisar o comportamento em transitório das fontes durante transições de curvas de referência. Entretanto, são utilizadas curvas com sombreamentos e também é aplicada a técnica de Máxima Potência da Curva Característica Global (MPCCG) proposta por [9]. Assim, o experimento consiste em conectar cada fonte ao conversor *buck-boost* (controlado em malha fechada) e a uma carga resistiva. Durante as medições, foram realizadas alterações nos controladores do conversor, configurando-o para mais lenta. Nesse contexto, foram avaliados os seguintes cenários:

- **CASO 1 – Controle do conversor com tempo de resposta regular:** Nessa aplicação, o projeto da malha de controle da tensão de entrada do conversor (tensão na saída da fonte emuladora) foi feito para que o sistema apresentasse erro nulo em regime permanente, frequência de cruzamento por 0 dB de 3 kHz, margem de fase de 67,1° e margem de ganho infinita. Para tanto, foi utilizado um controlador PI com ganhos  $k_{p1}$

= 0,00012 e  $k_{i1} = 0,0318$ . A frequência de cruzamento por 0 dB foi selecionada de modo a ser dez vezes menor que a frequência de chaveamento, prática comum em conversores estáticos com apenas uma malha de controle.

- **CASO 2 – Controle do conversor com tempo de resposta lento:** Nessa aplicação, os ganhos do controlador PI foram diminuídos, de modo diminuir a frequência de cruzamento por 0 dB do sistema, deixando sua dinâmica mais lenta. Para tanto, foi utilizado um controlador PI com ganhos  $k_{p3} = 7,5 \cdot 10^{-6}$  e  $k_{i3} = 0,0019875$ .

Como o conversor *buck-boost* está operando em malha fechada, mesmo que ocorra uma mudança abrupta na curva I-V de referência, o sistema de controle do conversor tentará manter a tensão de entrada regulada até que o algoritmo de MPCCG um novo ponto de operação. Isso significa que, durante o transitório, é esperado que a fonte emuladora transicione de uma curva para outra mantendo sua tensão constante e, em seguida, rastreie o ponto de máxima potência global da nova curva I-V. Contudo, a interação entre o conversor *buck-boost* e a fonte emuladora pode acabar fazendo com que a transição de pontos de operação não ocorra como esperado, conforme discutido a seguir.

Ao utilizar o controlador que proporciona um tempo de resposta regular no conversor *buck-boost* (Caso 1), é possível observar quatro faixas distintas de operação em suas curvas de tensão e corrente (Figura 13). A primeira faixa, representada na Figura 13 por ①, mostra a fonte operando no ponto de máxima potência global da primeira curva I-V, obtido para  $V_{inicial} = 345,12$  V e  $I_{inicial} = 2,76$  A. Com a transição de curvas, a fonte passa a se comportar conforme indicado na Figura 13 por ②. Nessa região, observa-se que a mudança de curva causa um distúrbio na tensão de saída da fonte, porém, ela ainda continua regulada para o valor de tensão do intervalo ①, enquanto a corrente decresce para um novo ponto de operação intermediário. Nesse ponto intermediário, o algoritmo de MPCCG busca o ponto de operação final (ponto de máxima potência global da segunda curva I-V), resultando no intervalo ③ que exibe a resposta da tensão e da corrente da fonte emuladora enquanto ela tenta rastrear o ponto de máxima potência global. Finalmente, após um determinado tempo, a curva atinge o ponto de operação final ( $V_{final} = 108,39$  V e  $I_{final} = 4,60$  A) conforme indicado no intervalo ④.

Como resultado das curvas de tensão e corrente apresentadas na Figura 13, pode-se observar o trajeto percorrido pelas fontes, saindo do ponto “Início” e chegando no ponto “Fim”, conforme exibido na Figura 14 (trajeto plotado para curva P-V). Inicialmente, observa-se, na Figura 14, que nenhuma das duas fontes segue perfeitamente o trajeto esperado. No momento da transição de curvas percebe-se que o trajeto percorrido pela fonte durante o seguimento do GMPP está acima da curva de referência, fazendo a fonte emuladora produzir mais potência do que aquela que

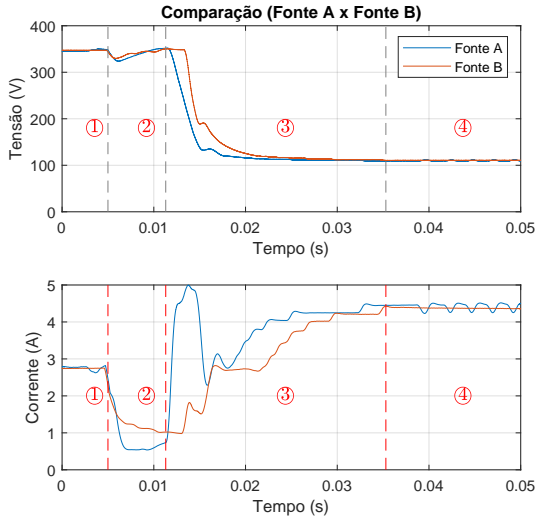


FIGURA 13: Transiente da corrente e da tensão das fontes avaliadas para curvas sombreadas utilizando uma técnica de MPCCG (Caso 1).

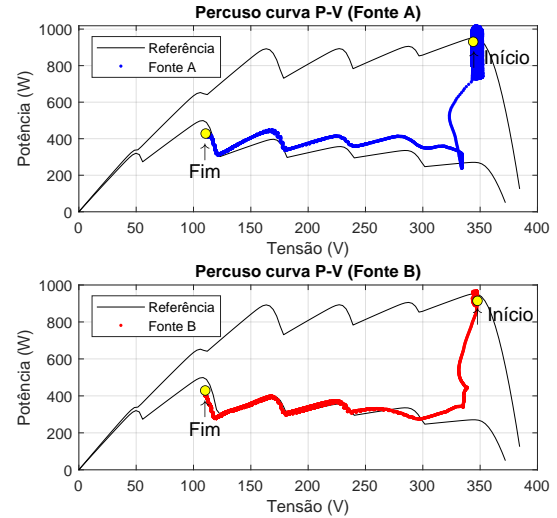


FIGURA 15: Trajeto percorrido pelas fontes avaliadas em relação às curvas P-V, considerando curvas com sombreamento e utilizando uma técnica de MPCCG (Caso 2).

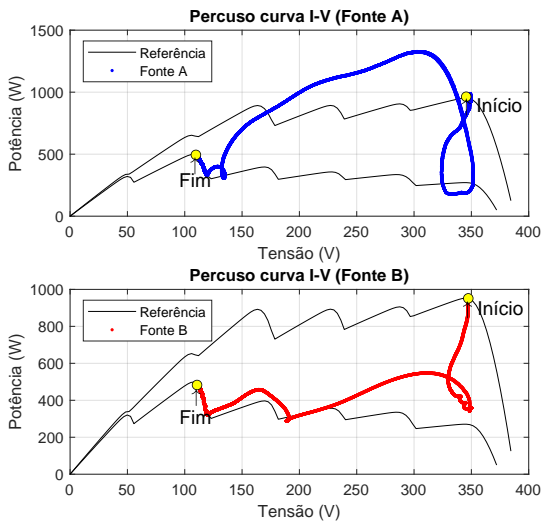


FIGURA 14: Trajeto percorrido pelas fontes avaliadas em relação às curvas P-V, considerando curvas com sombreamento e utilizando uma técnica de MPCCG (Caso 1).

seria fornecida em por um módulo FV real. De fato, para estas condições de controle projetadas o tempo de resposta do sistema não consegue ser acompanhado pelas fontes o que acaba degradando a capacidade das fontes de representa módulos FV reais.

Apesar de ambas as fontes não seguirem bem a curva de referência (Figura 14), a **Fonte B** consegue acompanhar mais fielmente o percurso do MPP, enquanto que a **Fonte A** se distancia demais de ambas as curvas de referência. Portanto, para resultados relacionados a seguimento de GMPP utilizando ambas as fontes, a **Fonte B** mostra um melhor desempenho tendo resultados mais realistas para análise de

comparação de técnicas de GMPP, porém com um erro ainda considerável. É importante considerar esses resultados ao utilizar as fontes emuladoras para avaliar técnicas de GMPP, pois as diferenças nas respostas das fontes podem afetar significativamente os resultados obtidos.

Para melhorar o desempenho do seguimento de GMPP, os parâmetros do controlador do conversor foram alterados com o intuito de obter uma condição limite de operação das fontes emuladoras avaliadas (Caso 2). Dessa forma, o sistema de controle do conversor tornou-se mais lento, fazendo a tensão variar de forma mais gradual e, conseqüentemente, fazendo a corrente também variar de forma mais suave, o que acaba respeitando os *slew rates* de tensão e corrente indicados nos manuais das fontes. Os resultados para essa avaliação são exibidos na Figura 15.

Embora os resultados de ambas as fontes tenham melhorado significativamente, ao deixar o controle do conversor mais lento as técnicas baseadas em modelo são prejudicadas, pois agora elas passarão mais tempo para achar o GMPP, estabelecendo uma comparação não justa entre os algoritmos. Uma solução seria fazer uma mudança de curvas/irradiância em rampa, porém a mudança não seria de forma brusca, como um degrau, e as fontes não estão habilitadas para esta função caso se queira utilizar as curvas de referência escolhidas.

Assim, técnicas que utilizarem estas fontes para a obtenção de resultados experimentais irão calcular parâmetros (por meio de figuras de mérito) que não correspondem à realidade, bonificando as técnicas que geram um  $dv/dt$  grande e por isso os resultados de simulação passam a ser mais fiéis.

### 3) Avaliação dos resultados de transitório

Durante a análise do comportamento transitório feito na Subseção V.B, constatou-se que nenhuma das fontes avaliadas foi capaz de acompanhar adequadamente as curvas de referência durante a mudança. Ambas apresentaram comportamentos muito distintos do esperado de módulos FV. Os sistemas de controle das fontes emuladoras, junto com suas limitações de *slew rate*, acabam restringido o funcionamento ideal das fontes durante o transitório.

Ao avaliar o desempenho das fontes junto a um conversor estático controlado em malha fechada e com algoritmo de MPPT baseado em modelo, erros ainda maiores foram observados. De fato, devido à incapacidade de representar corretamente a transição de curvas, essas fontes mostraram-se inadequadas para a avaliação de características transitórias dessa classe de algoritmos de MPPT, uma vez que o maior benefício dessa classe de algoritmos é conseguir identificar rapidamente, após uma transição, o ponto de máxima potência da nova curva I-V de referência e transacionar para esse ponto corretamente. Para essa classe de algoritmos, uma avaliação com simulação em *software* matemático ou aplicação em módulos FV reais se torna mais apropriada.

## VI. CONCLUSÃO

O presente artigo apresenta uma análise comparativa entre duas fontes emuladoras FV comerciais, com foco nas operações estática e dinâmica. Diversos experimentos foram conduzidos para investigar a fidedignidade das curvas I-V geradas pelas fontes em relação aos painéis FV reais, o tempo de resposta dos sistemas de controle das fontes e o comportamento tanto em regime estacionário quanto durante transições de curvas de referência. Devido a disponibilidade em laboratório foram utilizadas apenas duas fontes. Vale a pena ressaltar que caso fossem utilizadas mais fontes emuladoras de módulos FV, mais resultados experimentais seriam obtidos de maneira que os resultados para contribuição deste artigo seriam ainda mais enriquecedores.

Após minuciosas análises, constatou-se que:

- Em relação à análise estática: as fontes emuladoras analisadas apresentaram imprecisões na região do joelho e na região não-linear da curva I-V, especialmente quando configuradas para emular apenas um módulo. No entanto, notou-se que o aumento do número de módulos tende a reduzir significativamente as imprecisões.
- Em relação à análise dinâmica: as fontes emuladoras analisadas enfrentaram dificuldades em acompanhar as curvas de referência durante transições. Suas características dinâmicas (decorrentes do sistema de controle) e suas limitações de *slew rate* acabaram gerando comportamentos divergentes do esperado para módulos FV. Essa limitação é especialmente crítica ao avaliar algoritmos de MPPT baseados em modelos, pois a capacidade de identificar rapidamente o ponto de máxima potência após uma mudança na curva I-

V é determinante para a eficiência dessa classe de algoritmos.

Dessa maneira, pode-se concluir que a utilização de fontes emuladoras, principalmente as estudadas neste artigo, para avaliar o desempenho de técnicas de MPPT requer atenção com relação às suas limitações e imprecisões. Para obter resultados mais precisos e confiáveis, especialmente ao analisar algoritmos de MPPT baseados em modelos, outras abordagens, como simulações em *software* matemático ou a aplicação em módulos FV reais, podem ser mais adequadas.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPq (processos: 311084/2020-6, 313368/2021-0, 140226/2023-0) e à Fundação de Amparo à Ciência e Tecnologia de Pernambuco – FACEPE (processo: APQ-0896-3.04/14) pelo seu apoio financeiro.

## CONTRIBUIÇÕES DOS AUTORES

Conceitualização, Curadoria de dados, Análise de dados, Pesquisa, Metodologia, Validação de dados e experimentos, Redação do manuscrito original, Redação - revisão e edição: CAVALCANTE JUNIOR, V.M.; FERNANDES, T.A.; CAV-ALCANTI NETO, R.; BARBOSA, E.J.; Conceitualização, Recebimento de financiamento, Pesquisa, Metodologia, supervisão, Redação do manuscrito original, Redação - revisão e edição: BRADASCHIA, F.; CAVALCANTI, M.C.

## PLÁGIO E SIMILARIDADE

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

## REFERÊNCIAS

- [1] S. M. Azharuddin, M. Vysakh, H. V. Thakur, B. Nishant, T. S. Babu, K. Muralidhar, D. Paul, B. Jacob, K. Balasubramanian, N. Rajasekar, "A Near Accurate Solar PV Emulator Using dSPACE Controller for Real-time Control", *Energy Procedia*, vol. 61, pp. 2640–2648, Mai. 2014, doi:10.1016/j.egypro.2014.12.266, International Conference on Applied Energy, ICAE2014.
- [2] H. B. Morari, R. J. F. Bortolini, L. V. Bellinaso, L. Michels, "Improved Methodology for Testing the Compliance of Residual Current Detection of Non-isolated Grid-connected Photovoltaic Inverters", *Eletrônica de Potência*, vol. 28, no. 3, pp. 256–263, Set. 2023, doi:10.18618/REP.2023.3.0008.
- [3] E. O. Prado, P. C. Bolsi, L. Aleixo, D. Vidor, H. C. Sartori, J. R. Pinheiro, "Conceito de Hold-up Time Dinâmico para Utilização de Sistemas PV em uma UPS de Dupla Conversão", *Eletrônica de Potência*, vol. 28, no. 3, pp. 264–275, Set. 2023, doi:10.18618/REP.2023.3.0015.
- [4] S. Farhangi, A. Nazer, G. R. Moradi, E. Asadi, "Improved Performance of Solar Array Simulator Based on Constant Voltage/Constant Current Full-Bridge Converter", in *11th Power Electronics, Drive Systems, and Technologies Conference (PEDSTC 2020)*, pp. 1–5, 2020, doi:10.1109/PEDSTC49159.2020.9088485.
- [5] J. P. Ram, H. Manghani, D. S. Pillai, T. S. Babu, M. Miyatake, N. Rajasekar, "Analysis on solar PV emulators: A review", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 81, pp. 149–160, Jan. 2018, doi:10.1016/j.rser.2017.07.039.
- [6] A. F. Cupertino, G. Y. Santos, E. N. Cardoso, H. A. Pereira, V. F. Mendes, "Modeling and design of a flexible solar array simulator topology", in *IEEE 13th Brazilian Power Electronics Conference and*

- 1st Southern Power Electronics Conference (COBEP/SPEC 2015), pp. 1–6, 2015, doi:10.1109/COBEP.2015.7420284.
- [7] R. Ayop, C. W. Tan, “A comprehensive review on photovoltaic emulator”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 80, pp. 430–452, Dez. 2017, doi:10.1016/j.rser.2017.05.217.
- [8] E. J. Barbosa, M. C. Cavalcanti, G. M. S. Azevedo, R. C. Neto, E. A. O. Barbosa, F. Bradaschia, “Hybrid GMPPT Technique for Photovoltaic Series Based on Fractional Characteristic Curve”, *IEEE Journal of Photovoltaics*, vol. 14, no. 1, pp. 170–177, Jan. 2024, doi:10.1109/JPHOTOV.2023.3323774.
- [9] E. J. Barbosa, M. C. Cavalcanti, G. M. S. Azevedo, E. A. O. Barbosa, F. Bradaschia, L. R. Limongi, “Global Hybrid Maximum Power Point Tracking for PV Modules Based on a Double-Diode Model”, *IEEE Access*, vol. 9, pp. 158440–158455, Nov. 2021, doi:10.1109/ACCESS.2021.3131096.
- [10] B. M. H. Jassim, H. M. Jasim, “Modelling of a solar array simulator based on multiple DC-DC converters”, *International Journal of Renewable Energy Research*, vol. 8, pp. 1038–1044, Jun. 2018, doi:10.20508/ijrer.v8i2.6916.g7412.
- [11] Y.-T. Seo, J.-Y. Park, S.-J. Choi, “A rapid I-V curve generation for PV model-based solar array simulators”, in *IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE 2016)*, pp. 1–5, 2016, doi:10.1109/ECCE.2016.7854764.
- [12] R. F. Coelho, F. Concer, D. C. Martins, “A study of the basic DC-DC converters applied in maximum power point tracking”, *Brazilian Power Electronics Conference*, pp. 673–678, 2009, doi:10.1109/COBEP.2009.5347723.
- [13] Chroma, *Solar Array Simulation Soft Panel*, 2014.
- [14] Ecosense, *Solar PV Emulator System (SPVE)*, 2021.
- [15] Keysight Technologies, *Keysight E4360 Modular Solar Array Simulators*, 2014.
- [16] Regatron, *SASControl Software Solar Array Simulation program Manual*, 2015.
- [17] M. Treter, L. Michels, “Métodos de aquisição experimental de curvas I-V de arranjos fotovoltaicos: Uma revisão”, in *11th Seminar on Power Electronics and Control (SEPOC 2018)*, 2018.
- [18] E. Duran, M. Piliouguine, M. S. de Cardona, J. Galan, J. M. Andujar, “Different methods to obtain the I-V curve of PV modules: A review”, in *Conference Record of the IEEE Photovoltaic Specialists Conference*, pp. 1–6, 2008, doi:10.1109/PVSC.2008.4922578.
- [19] E. A. Silva, F. Bradaschia, M. C. Cavalcanti, A. J. Nascimento, L. Michels, L. P. Pietta, “An Eight-Parameter Adaptive Model for the Single Diode Equivalent Circuit Based on the Photovoltaic Module’s Physics”, *IEEE Journal of Photovoltaics*, vol. 7, no. 4, pp. 1115–1123, Jul. 2017, doi:10.1109/JPHOTOV.2017.2703778.
- [20] D. Mathew, C. Rani, M. R. Kumar, Y. Wang, R. Binns, K. Busawon, “Wind-Driven Optimization Technique for Estimation of Solar Photovoltaic Parameters”, *IEEE Journal of Photovoltaics*, vol. 8, no. 1, pp. 248–256, Jan. 2018, doi:10.1109/JPHOTOV.2017.2769000.

## DADOS BIOGRÁFICOS

**Valdemar M. C. Junior** nascido em 1994 em garanhuns, é engenheiro de controle e automação (2020) e mestre em Engenharia Elétrica (2023) pela Universidade de Federal de Pernambuco. Seus principais interesses de pesquisa incluem modelagem de módulos fotovoltaicos, eletrônica de potência e sistemas de energia renovável.

**Tiago A. Fernandes** nascido em 2000 em Recife, é graduando em Engenharia Elétrica (2018) pela Universidade de Federal de Pernambuco.

Seus principais interesses de pesquisa incluem modelagem de módulos fotovoltaicos, eletrônica de potência e sistemas de energia renovável.

**Rafael C. Neto** nascido em 1991 em Cabo de Santo Agostinho, é engenheiro eletrônico (2016), mestre (2018) e doutor em Engenharia Elétrica (2020) pela Universidade de Federal de Pernambuco. Em 2016, trabalhou como pesquisador visitante (mestrado-sanduíche) na Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, Brasil. Desde dezembro de 2020, atua como professor adjunto no Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Pernambuco. Seus principais interesses de pesquisa incluem: qualidade da energia, controle digital de conversores estáticos, e sistemas de geração distribuída baseados em energias renováveis. Rafael Neto atualmente é membro do conselho deliberativo da Associação Brasileira de Eletrônica de Potência (SOBRAEP).

**Eduardo J. Barbosa** nascido em 1992 em Recife, é engenheiro eletricitista (2016), mestre (2018) e doutor em Engenharia Elétrica (2023) pela Universidade de Federal de Pernambuco. Desde 2022, ele está trabalhando como professor adjunto no Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Pernambuco. Seus principais interesses de pesquisa são em geração distribuída e sistemas fotovoltaicos incluem eletrônica de potência, sistemas de energia renovável e conversores CC-CC.

**Fabrcio Bradaschia** nascido em 1983 em São Paulo, é engenheiro eletricitista (2006), mestre (2008) e doutor em Engenharia Elétrica (2012) pela Universidade de Federal de Pernambuco. De agosto de 2008 a agosto de 2009, ele trabalhou como acadêmico visitante na Universidade de Alcalá, Madri, Espanha. Desde outubro de 2013, ele está trabalhando como professor adjunto no Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Pernambuco. Seus interesses de pesquisa são a aplicação de eletrônica de potência em sistemas fotovoltaicos e qualidade de energia, incluindo modulação por largura de pulso, topologias de conversores e métodos de sincronização de rede. Dr. Fabrcio Bradaschia é membro do conselho fiscal da SOBRAEP desde 2019. Na gestão 2018-2019, atuou como tesoureiro da SOBRAEP.

**Marcelo C. Cavalcanti** nascido em 1972 em Recife, é engenheiro eletricitista (1997) pela Universidade Federal de Pernambuco, mestre (1999) e doutor em Engenharia Elétrica (2003) pela Universidade Federal de Campina Grande. Fez Doutorado-sanduíche no Center for Power Electronics Systems, Virginia Tech, USA entre outubro de 2001 e agosto de 2002. Desde 2005, é Professor do Departamento de Engenharia Elétrica na UFPE, onde hoje é professor titular. Fez Pós-Doutorado na Universidad de Alcalá, Espanha entre setembro de 2012 e agosto de 2013. Seus interesses de pesquisa são a aplicação de eletrônica de potência em sistemas fotovoltaicos e qualidade de energia, incluindo modulação por largura de pulso e topologias de conversores. Dr. Marcelo C. Cavalcanti é membro do conselho deliberativo da SOBRAEP. Durante o período de 2016 a 2017 foi editor da revista Eletrônica de Potência da SOBRAEP e durante 2018 a 2019 foi presidente da SOBRAEP.