

FERRAMENTAS COMPUTACIONAIS APLICADAS AO ENSINO DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS

Leonardo P. Sampaio¹, Moacyr A. G. de Brito², Carlos A. Canesin³

¹Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, Cornélio Procópio – PR, Brasil

² Universidade Federal do Mato Grosso do Sul – UFMS, Campo Grande – MS, Brasil

³Universidade Estadual Paulista – UNESP, Ilha Solteira – SP, Brasil

e-mail: sampaio@utfpr.du.br, moacyr.brito@ufms.br, canesin@dee.feis.unesp.br

Resumo – Este trabalho apresenta um conjunto de ferramentas computacionais para o auxílio no ensino de temas relacionados às energias renováveis, envolvendo sistemas fotovoltaicos (FV). O comportamento estático e dinâmico do arranjo FV, suas funcionalidades e interações com as principais topologias de conversores de potência são abordadas e consideradas nas ferramentas propostas. As principais curvas características do arranjo FV, como corrente e potência por tensão (IxV e PxV) estão presentes e podem ser modificadas de forma dinâmica e interativa, auxiliando ambos, professores e estudantes no processo de ensino e aprendizagem. Adicionalmente, as ferramentas apresentam o funcionamento dinâmico dos sistemas FVs no seguimento da máxima potência extraível, a fim de permitir, de forma fácil e rápida, o completo estudo e análise de um sistema FV real. A partir de resultados experimentais e de simulação, os resultados provenientes da ferramenta proposta são comparados e confrontados, validando sua aplicabilidade. Finalmente, o conjunto de ferramentas educacionais para o ensino de sistemas FVs pode ser empregado tanto em sala de aula teórica, quanto em atividades práticas, auxiliando no aprendizado de sistemas FV.

Palavras-Chave – Algoritmos de MPPT, Eletrônica de Potência, Ferramentas de Simulação, Ferramentas Educacionais, Sistemas Fotovoltaicos.

COMPUTATIONAL TOOLS APPLIED TO TEACHING PHOTOVOLTAIC SYSTEMS

Abstract – This paper presents a set of computational simulation tools to aid the teaching of topics related to renewable energies, involving photovoltaic (PV) systems. The static and dynamic behavior of the PV array, its functionality, and interactions with the main power converters topologies are covered and taken into account. The main PV array characteristic curves, such as current and power versus voltage (IxV and PxV) are included, which can be dynamically and interactively modified, helping both lecturers and apprentices in the teaching and learning processes. In addition, these tools show the PV systems dynamic operation for tracking the maximum available power in order to allow easy and

fastest learning and analysis of the entire system. Considering Matlab/Simulink and experimental results, the results from the proposed tools are compared and confronted, validating its operational feasibility. Finally, the set of educational tools support the teaching of PV systems in both theoretical and experimental activities for learning improvement.

Keywords - Educational Tools, MPPT Algorithms, Photovoltaic Systems, Power Electronics, Simulation Tools.

I. INTRODUÇÃO

A disciplina de eletrônica de potência e correlatas que fazem parte dos cursos de graduação e pós-graduação em engenharias precisam de atualização constante, devido à evolução tecnológica e o desenvolvimento/modernização ocorridos na área de eletrônica de potência [1], [2].

Dentre os avanços tecnológicos, pode-se considerar as recentes pesquisas que trazem o conceito de minimização da interferência humana no meio ambiente, principalmente no que tange ao processo de geração de energia. Assim, a busca por fontes de geração de energia elétrica menos poluente está em destaque e vem sendo amplamente abordada no atual cenário de geração distribuída de energia elétrica [3], [4]. Neste contexto, diversos estudos demonstram que a ampliação do aproveitamento da energia solar fotovoltaica (FV) em muito contribuirá para este processo [5].

Consequentemente, considerando as características de funcionamento de um módulo FV para a geração de energia elétrica, há a necessidade da utilização de técnicas para o seguimento da máxima potência (MPPT – *Maximum Power Point Tracking*) extraível de um módulo ou arranjo FV, fazendo uso de conversores com alta eficiência [6], [7]. Adicionalmente, para a conexão do arranjo FV à rede elétrica é necessário obedecer a diversos requisitos de segurança além de prover índices de qualidade para a energia injetada ao sistema, motivando e desafiando pesquisadores. Desta forma, as recentes pesquisas envolvendo sistemas FVs envolvem uma variedade de assuntos, considerando tanto técnicas para a construção da célula FV quanto a evolução da eletrônica de potência para um melhor aproveitamento desta energia a partir dos conversores estáticos e, obviamente de seus sistemas de controle.

Portanto, a abordagem da energia FV em tópicos de eletrônica de potência e disciplinas correlatas precisa envolver as recentes pesquisas e principais tecnologias emergentes empregadas nas principais aplicações pertinentes.

¹Artigo submetido em 28/02/2018. Primeira revisão em 06/04/2018. Aceito para publicação em 28/06/2018 por recomendação do Editor Marcello Mezaroba. <http://dx.doi.org/10.18618/REP.2018.4.2798>

Desta forma, este processo pode ser um tanto quanto trabalhoso, uma vez que os professores precisam ensinar desde conceitos tradicionais até os mais modernos, envolvendo as principais aplicações da eletrônica de potência, de uma forma dinâmica e clara para os alunos. Uma possibilidade de melhorar este processo é o de utilizar novas metodologias educacionais envolvendo o uso de ferramentas computacionais para auxiliar o ensino de forma dinâmica e interativa [8], [9].

Neste sentido, o avanço nos recursos computacionais possibilitou uma série de desenvolvimentos de ferramentas educacionais voltadas para o auxílio ao ensino, as quais vêm ao longo dos últimos anos sendo muito utilizadas no processo educacional em engenharia, podendo ser utilizadas como complemento à aula teórica, ou até mesmo em laboratório virtual [10]-[13]. Por outro lado, os avanços tecnológicos têm se expandido de forma muito rápida, dificultando o desenvolvimento de ferramentas educacionais que abordem dentre outros conceitos, as novas fontes de energia elétrica e a evolução tecnológica, o que resulta na necessidade de ferramentas computacionais que abordem conteúdos fundamentais da área.

Consequentemente, é natural que durante o ensino de eletrônica de potência e de disciplinas correlatas, sejam abordados o funcionamento e as principais aplicações das energias renováveis. Desta forma, o emprego de ferramentas computacionais são bem-vindas e podem agregar muito valor ao ensino deste tópico. Por meio destas ferramentas, pode-se explicar os assuntos pertinentes às energias renováveis de forma interativa e atraente para os estudantes e, como consequência, estes podem entender os conceitos de forma mais clara e rápida, melhorando a qualidade do aprendizado.

Portanto, as ferramentas educacionais podem ser utilizadas, tanto pelos professores quanto pelos estudantes, com o objetivo de melhorar a explicação/demonstração de determinado tópico da disciplina, no auxílio/elaboração de projetos, na resolução de exercícios, ou até mesmo, como material complementar durante o momento de estudo teórico da disciplina [14].

No contexto das ferramentas educacionais, em [9] foram propostas ferramentas para o auxílio no ensino de sistemas FVs, que podem ser utilizadas em computadores pessoais. Esta ferramenta computacional ilustra o funcionamento de um arranjo FV e o emprego do conversor Boost, permitindo verificar as principais formas de ondas do conversor e interagir com as principais curvas características do sistema (IxV e PxV).

Por outro lado, em [10] foi proposto um emulador fotovoltaico eletrônico, o qual foi construído utilizando o conversor Buck e possui uma interface gráfica desenvolvida voltada para o ensino/aprendizado de sistema FV. Porém, por se tratar de um equipamento eletrônico, é necessário que o aluno/professor disponha de um laboratório para estudo/utilização e tenha recursos financeiros para implementar ou adquirir este tipo de solução, já as ferramentas apresentadas em [9] precisam somente de um computador e podem ser utilizadas em diversos ambientes, atuando de forma complementar ao estudo de sistemas FV.

Ainda neste contexto, este trabalho apresenta uma evolução das ferramentas apresentadas em [9], incluindo o

emprego dos conversores Buck e Buck-Boost, o emprego de técnicas de seguimento do ponto de máxima potência, além da determinação das resistências empregadas no modelo matemático da célula FV.

Portanto, as ferramentas propostas têm o objetivo de apresentar uma abordagem interativa ao ensino de sistemas FVs, a fim de demonstrar as curvas características de um módulo FV e apresentar as principais formas de ondas envolvidas no estudo do sistema variando-se pontos de operação. Salienta-se que é possível verificar tanto o comportamento estático ou dinâmico do sistema (conversor e módulo), quando um ou mais parâmetros são modificados.

Finalmente, as ferramentas computacionais para o auxílio do ensino de sistemas FVs foram desenvolvidas utilizando a linguagem de programação Java, e apresentam os principais comportamentos de um arranjo fotovoltaico e a sua interação com o conversor estático de potência, incluindo: estágios de operação do conversor, animações, fluxo de corrente no circuito, formas de ondas de corrente e tensão sobre os componentes, ábacos interativos e estudo de algoritmos empregados para a busca do MPP.

II. MODELO FV E FERRAMENTAS DE SIMULAÇÃO

Primeiramente, para entender o funcionamento de um sistema FV é necessário conhecer a estrutura de uma célula fotovoltaica, seu comportamento, bem como possíveis associações e interação com um conversor de potência. A célula FV pode ser representada por um circuito elétrico equivalente: uma fonte de corrente associada com diodo em antiparalelo, uma resistência série e outra em paralelo [15], [16], conforme ilustrado na Figura 1. A equação principal que rege o circuito elétrico equivalente de uma célula FV é apresentada em:

$$I = I_{ph} - I_r \left[e^{q(V+IR_s)/\eta kT} - 1 \right] - \frac{V + IR_s}{R_p} \quad (1)$$

onde I_{ph} é a fotocorrente; I representa a corrente de saída da célula FV; V é a tensão de saída da célula FV; I_r é a corrente de saturação reversa, q é a carga do elétron ($1,6 \times 10^{-19}$ C); η é o fator de idealidade da junção p-n; k é a constante de Boltzmann ($1,38 \times 10^{-23}$ J/K); T é a temperatura ambiente dada em kelvin (K). A corrente I_r e I_{ph} podem ser determinadas por:

$$I_{ph} = [I_{SC} + K_i(T - T_r)] \frac{G}{1000} \quad (2)$$

$$I_r = I_{r(STC)} \left(\frac{T}{T_r} \right)^3 e^{\left[\frac{qE_g}{\eta k} \left(\frac{1}{T_r} - \frac{1}{T} \right) \right]} \quad (3)$$

$$I_{r(STC)} = \frac{I_{SC} - \frac{V_{oc}}{R_p}}{e^{\frac{qV_{oc}}{\eta k T_r}} - 1} \quad (4)$$

onde T_r é a temperatura nominal, em kelvin (298 K); $I_{r(STC)}$ é a corrente de saturação reversa em STC (*Standard Test*

Condition), I_{SC} é a corrente de curto-circuito em STC ($T_r = 298\text{ K}$ e $G = 1000\text{ W/m}^2$); K_i é o coeficiente de temperatura (A/K); E_g é a energia da banda (1,124 eV) e V_{oc} é a tensão de circuito aberto da célula fotovoltaica.

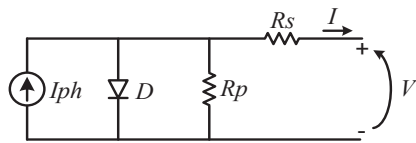


Fig. 1. Circuito elétrico equivalente de uma célula solar FV.

A tensão e corrente de um *array* FV são determinados em função do número de células fotovoltaicas (N_s), do número de módulos associados em série (M_s) e paralelo (M_p), conforme:

$$V_{pv} = N_s M_s V \quad (5)$$

$$I_{pv} = M_p \cdot \quad (6)$$

Observa-se que (1) é uma equação não-linear e necessita da solução de outras equações para a determinação da corrente de saída de uma célula FV em função de um ponto de operação. Desta forma, a solução desta equação requer o uso de metodologias computacionais empregando cálculo numérico, tais como: Newton-Raphson, Biseção, entre outras técnicas. Adicionalmente, o método numérico pode ser implementado em diversas linguagens de programação (C++, Fortran, Pascal, Java, dentre outras) [15].

A Figura 2 ilustra a seção principal da ferramenta educacional para o ensino de sistemas fotovoltaicos (FESFV), a qual reúne recursos que permitem o estudo do comportamento de um módulo ou arranjo FV; análise dos conversores Buck, Boost e Buck-Boost empregados em conjunto com arranjos FVs, o estudo e análise de um sistema a dois estágios injetando a energia extraída do arranjo FV na rede elétrica.

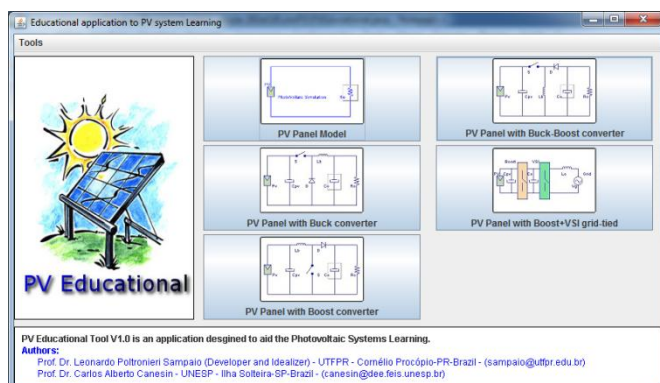


Fig. 2. Tela principal do aplicativo educacional para o ensino de sistemas fotovoltaicos.

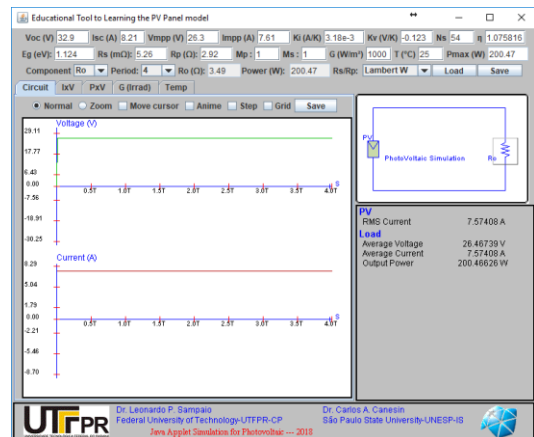
A Figura 3 apresenta a visão geral da FESFV proposta para o auxílio no ensino de sistemas FV, *i.e.*, a operação de um modelo de módulo FV considerando suas principais curvas características, principais formas de ondas de tensão e corrente dos dispositivos elétricos/eletrônicos que compõem

o sistema FV, parâmetros e principais medições de tensão e corrente do sistema, entre outros.

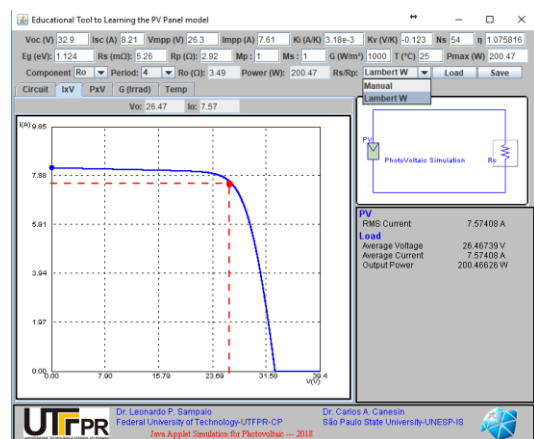
A Figura 3 ilustra a janela onde podem ser exploradas as formas de ondas para o estudo do modelo do módulo FV, composto por determinado número de células. Através da ferramenta pode-se modificar qualquer parâmetro do sistema com a finalidade de obter os principais resultados em regime permanente de forma instantânea, isto é, em tempo real. As ferramentas em sua configuração padrão vêm com valores pré-carregados referente ao modelo do módulo solar da Kyocera modelo KC200GT.

Na ferramenta proposta é possível introduzir dados para o modelo do módulo FV desejado para estudos, a partir da alteração dos parâmetros e, de forma interativa e dinâmica, é possível inserir os valores das resistências série e paralela, assim como estes valores podem ser determinados pela própria ferramenta por meio das equações (1)-(6).

Além disso, os estudantes/professores podem interagir com diferentes ábacos matemáticos ($I \times V$, $P \times V$, Irradiação Solar (G) e Temperatura ($Temp$)) apresentados nas ferramentas. O conjunto de ábacos possui parâmetros em comum, assim, quando um parâmetro é modificado tanto nas curvas, quanto nas caixas de textos, a operação do sistema em análise é recalculada e determinada sua nova condição de operação. Portanto, pode-se modificar e ajustar os parâmetros arrastando e soltando os cursores presentes nas curvas (cursores vermelho e azul) interativas, como mostrado na Figura 3.



(a)



(b)

Fig. 3. FESFV: (a) Tela Principal; (b) Ábaco de $I \times V$.

III. UTILIZAÇÃO DA FERRAMENTA EDUCACIONAL

Esta seção tem por objetivo apresentar os recursos computacionais educacionais disponíveis na FESFV, portanto, na sequência é demonstrada a metodologia empregada na definição e no ajuste de um determinado modelo de módulo FV.

Inicialmente, é necessário especificar os parâmetros do módulo FV e das condições climáticas, considerando os dados climatológicos locais em STC (*Standard Test Conditions*), tais como a irradiância solar (G) e a temperatura ambiente (T). Em sequência, os demais parâmetros podem ser obtidos através dos dados fornecidos nos manuais do fabricante.

A posteriori, deve-se informar os valores de tensão de circuito aberto (V_{oc}), corrente de curto circuito (I_{sc}) e número de células em série (N_s) do FV. Os parâmetros básicos do módulo FV KC200GT são pré-carregados em todas as ferramentas; assim os parâmetros R_s e R_p podem ser determinados empiricamente, ajustando-se estes valores até que as curvas características I_xV e P_xV apresentadas nas ferramentas tenham características similares ao apresentado nas folhas de dados do fabricante. Metodologias numéricas também podem ser empregadas para a determinação destas resistências [17], [18].

Desta forma, uma das possibilidades que a ferramenta proporciona é a interação do estudante (usuário) na determinação dos valores das resistências que compõem o modelo matemático do módulo FV. Logo, o estudante pode fixar o valor de R_p entre 0 e 20 Ω e ajustar o valor de R_s , enquanto visualiza a curva característica I_xV ou P_xV e, simultaneamente, verificar se os valores de tensão V e corrente I de saída do módulo FV, os quais são exibidos no aplicativo, correspondem aos valores de máxima potência indicados na folha de dados do fabricante.

Por outro lado, os valores das resistências R_s e R_p podem ser determinados pela FESFV considerando-se o sistema em STC. Neste caso, deve-se informar os valores da tensão e corrente no MPP (V_{mpp} e I_{mpp}) e selecionar a solução por “Lambert W”, assim, os valores das resistências são determinados de forma analítica usando a função Lambert W [19]. A Figura 3 ilustra a caixa de seleção na qual o estudante/professor pode selecionar a solução empírica (“Manual”) ou analítica (“Lambert W”) para a obtenção dos valores das resistências.

Além disso, a FESFV possibilita que as informações de um determinado módulo FV possa ser arquivada em formato texto, usando o botão “Save”, de forma que o estudante/professor possa carregar estes valores a posteriori utilizando o botão “Load”.

As Figuras 4 e 5 ilustram a interação com as curvas características do módulo FV, tais como: corrente por tensão (I_xV); potência por tensão (P_xV); I_xV para diferentes valores de irradiância solar (Irrad); I_xV para diferentes valores de Temperatura (Temp). Em cada um dos ábacos matemáticos há cursores que permitem a interação do estudante com as curvas características. O cursor vermelho possibilita a modificação dos atuais valores de tensão e corrente do módulo FV considerando fixas as condições climáticas (irradiância e temperatura). Este cursor vermelho pode ser

movimentado sobre a curva azul utilizando o primeiro botão do mouse, e é muito útil para se verificar valores da resistência de carga empregada no circuito, assim como o ponto de operação dos conversores estáticos.

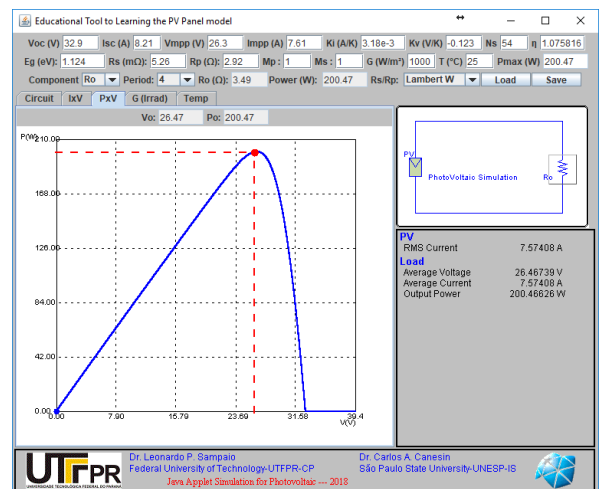
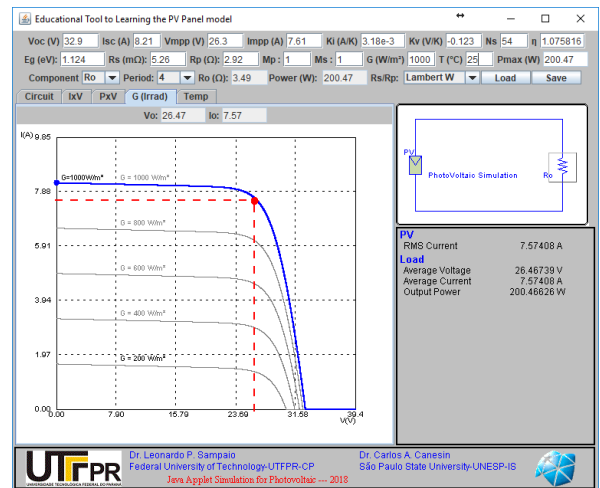
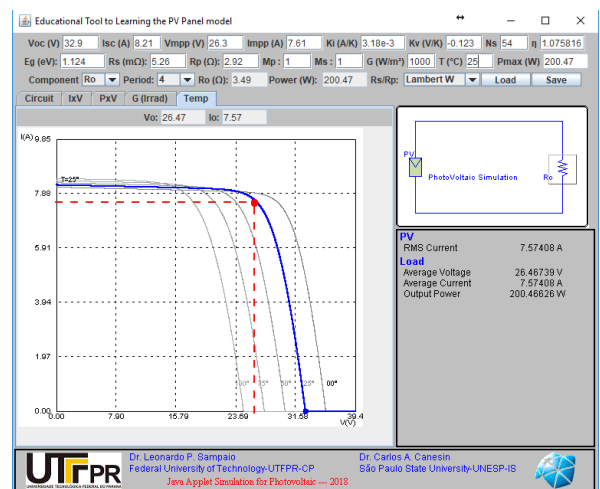


Fig. 4. FESFV: Ilustração da curva interativa $P \times V$.



(a)



(b)

Fig. 5. FESFV: interação nos ábacos: (a) Curva I_xV para diferentes valores de irradiância solar; (b) Curva I_xV para diferentes valores de temperatura.

As curvas características apresentadas na aba “Irrad” e “Temp” apresentam dois cursores de navegação, o cursor azul (acessado pelo segundo botão do mouse), o qual permite a alteração das condições climáticas como irradiância e temperatura, respectivamente, enquanto o cursor vermelho permite realizar a interação entre os valores de tensão e corrente de saída do módulo FV sobre a curva em análise.

Na Figura 5.a é possível verificar a influência da variação da irradiância solar, na qual se verifica uma série de curvas plotadas como plano de fundo com valores variando entre 0 W/m² e 1000 W/m², na curva característica IxV, enquanto a temperatura é mantida constante. Já na Figura 5.b pode-se analisar o efeito da temperatura no arranjo FV, enquanto a irradiância é mantida constante. Ambos os ábacos ilustrados na Figura 5 apresentam curvas plotadas na cor cinza em plano de fundo de forma a dar uma visão geral de como as condições climáticas podem influenciar no comportamento das curvas características do arranjo FV em estudo.

Por outro lado, a Figura 6 ilustra a FESFV para o conversor Boost conectado a um módulo FV [20]-[23], uma vez que a grande parte das aplicações envolvendo sistemas FV, seja a nível residencial, comercial ou industrial, utilizam conversores estáticos a fim de adequar os níveis de tensão, realizar o MPPT, assim como a conversão de corrente contínua para alternada [20], [21].

Portanto, esta ferramenta permite visualizar a operação em regime permanente do sistema, visualizar as formas de onda de tensão e corrente (em regime) dos componentes presentes no circuito elétrico, assim como interagir com os ábacos matemáticos, visualizando o efeito das mudanças no ponto de operação do conversor, além da possibilidade de modificar os parâmetros do conversor estático. Destaca-se que a FESFV realiza o projeto do conversor no modo de condução contínua e ao modificar qualquer parâmetro, o sistema irá definir as condições para operação em condições de máxima potência.

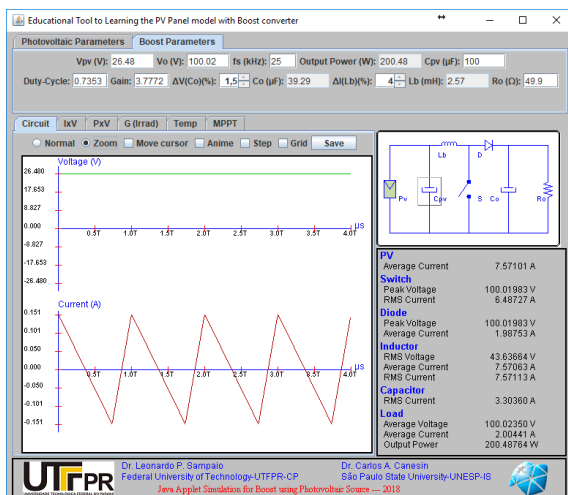


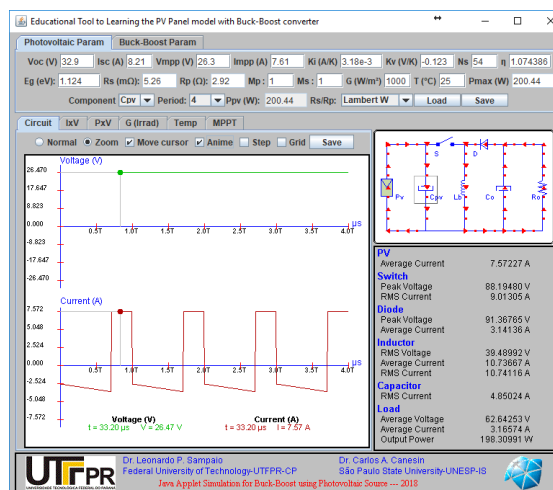
Fig. 6. FESFV para o auxílio no ensino e no projeto do conversor Boost operando em conjunto com o módulo FV, exibindo as formas de ondas de tensão e corrente no capacitor de desacoplamento.

Seguindo o mesmo padrão, foram desenvolvidas ferramentas educacionais demonstrando o funcionamento dos conversores Buck e Buck-Boost em conjunto com o módulo FV, conforme pode ser observado na Figura 7. Desta

forma, pode-se verificar a descontinuidade da corrente drenada pelos conversores e a necessidade do uso de capacitores de filtro (desacoplamento) em paralelo com o arranjo FV para reduzir as oscilações de corrente drenada pelo conversor e, efetivamente, operar o sistema no MPP.



(a)



(b)

Fig. 7. FESFV: (a) Emprego do conversor Buck mostrando as formas de ondas referentes ao interruptor semiconductor e também a animação do fluxo de corrente; (b) Emprego do conversor Buck-Boost mostrando as formas de ondas para o capacitor de filtragem do módulo FV e a opção de zoom na ferramenta.

A Figura 8 ilustra a ferramenta educacional para o caso da utilização do sistema a dois estágios, com a associação em cascata do conversor elevador Boost com o inversor monofásico em ponte completa - VSI. Para este sistema considerou-se a funcionalidade da injeção de corrente na rede a partir da extração da energia proveniente de um arranjo FV (associação de módulos), assim, para simplicidade da análise, foram omitidas as oscilações oriundas das frequências de chaveamento, tanto no Boost quanto no VSI.

Neste sentido, a principal motivação da ferramenta educacional para o sistema à dois estágios é a de fornecer ao estudante uma visão geral do funcionamento de um sistema real conectado à rede elétrica e possibilitar a visualização da tensão e corrente nos principais elementos: arranjo FV,

capacitor de desacoplamento C_{pv} , capacitor do barramento CC (nesta etapa a corrente ilustrada refere-se ao valor médio em um semiciclo da rede), indutor de conexão à rede; além da tensão de saída do inversor e da corrente injetada na rede elétrica.

Como demonstrado por meio das Figuras 3 a 8 as ferramentas propostas permitem: visualizar as formas de ondas de tensão e corrente através dos componentes em regime permanente; interagir com os ábacos matemáticos e modificar os parâmetros tanto nas curvas quanto nas caixas de textos; visualizar os valores médios e eficazes de tensão e corrente através dos componentes presentes no sistema em análise; interagir entre os parâmetros do módulo FV através da aba “Photovoltaic Array Parameters”; interagir com os parâmetros do conversor (“Buck Parameters”, “Boost Parameters”, “Buck-Boost Parameters” e “VSI Parameters”).

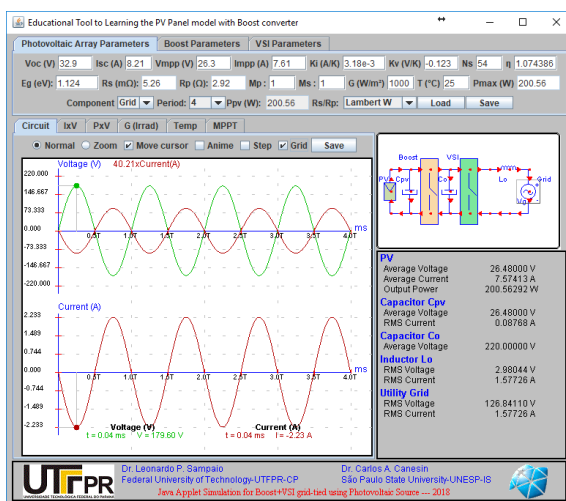


Fig. 8. FESFV: considerando o Sistema FV a dois estágios (Boost+VSI), formas de ondas de tensão na saída do inversor (em verde) e corrente injetada na rede (em vermelha).

Desta forma, o aluno conta com uma boa variedade de funcionalidades e interações que foram desenvolvidas para auxiliar e maximizar o aprendizado do aluno durante o estudo de sistemas fotovoltaicos.

IV. ABORDAGEM DA TÉCNICA DE MPPT

Considerando as mudanças nas condições climáticas, tais como irradiância solar e temperatura, ou mesmo por sombreamentos, o arranjo FV pode apresentar diferentes perfis na curva $I \times V$, além da mudança do ponto onde ocorre a máxima potência (MPP). Conseqüentemente, ao fazer uso da energia fotovoltaica os sistemas empregados precisam adotar metodologias de forma a garantir que a máxima potência possa ser extraída, técnicas essas conhecidas, como já salientado, como algoritmos de MPPT (*Maximum Power Point Tracking*).

Desta forma e com o objetivo de expandir as funcionalidades da FESFV, as principais técnicas envolvendo os algoritmos de MPPT foram incluídas na ferramenta para permitir o ensino interativo e dinâmico deste tópico (acessadas pela aba “MPPT”). Nas ferramentas é possível estudar as seguintes técnicas de MPPT: Razão Cíclica Constante; Tensão Constante; Perturbação e

Observação (P&O); Condutância Incremental e Beta, as quais foram inseridas na FESFV de acordo com os algoritmos apresentados em [6].

Para implementar essa funcionalidade foi levado em consideração o comportamento dinâmico do conversor estático empregado; assim, a análise do circuito elétrico equivalente considera a média das equações de estado em função da razão cíclica e do modo de operação (MCC). Desta forma, considerando o conversor Boost operando com o módulo FV e carga resistiva ilustrado na Figura 9 pode-se determinar as principais equações que regem o funcionamento deste sistema, conforme [24]:

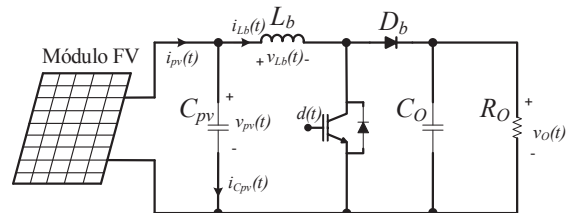


Fig. 9. Conversor Boost em um sistema FV com carga local resistiva.

$$C_{pv} \frac{dv_{pv}(t)}{dt} = i_{pv}(t) - i_{Lb}(t) \quad (7)$$

$$L_b \frac{di_{Lb}(t)}{dt} = v_{pv}(t) - v_o(t)(1-d(t)) \quad (8)$$

$$C_o \frac{dv_o(t)}{dt} = i_{Lb}(t)d(t) - \frac{v_o(t)}{R_o} \quad (9)$$

Para solucionar o conjunto de equações diferenciais acima é necessário o uso de uma metodologia numérica. Desta forma, a fim de resolvê-las em ambiente computacional pode-se empregar técnicas como: Euler, Ponto Médio, Runge-Kutta, entre outros. Neste sentido e por simplicidade, empregou-se o método de Euler nas (7)-(9), obtendo-se:

$$v_{pv}(k_2) = v_{pv}(k_1) + \frac{T_a}{C_{pv}} [i_{pv}(k_1) - i_{Lb}(k_1)] \quad (10)$$

$$i_{Lb}(k_2) = i_{Lb}(k_1) + \frac{T_a}{L_b} \{v_{pv}(k_1) - v_o(k_1)[1-d(k_1)]\} \quad (11)$$

$$v_o(k_2) = v_o(k_1) + \frac{T_a}{C_o} \left[i_{Lb}(k_1)d(k_1) - \frac{v_o(k_1)}{R_o} \right] \quad (12)$$

onde T_a é o tempo de cálculo do método, k_2 representa o índice da amostragem atual e k_1 representa o índice da amostragem anterior ($k_2 = k_1 - 1$).

A partir de (10)-(12) pode-se obter os valores da tensão e da corrente drenada do módulo FV e, com estas, pode-se empregar o algoritmo desejado para realizar o MPPT. Neste ponto, destaca-se o método P&O, como detalhado pelo fluxograma da Figura 10. É importante destacar que a cada execução do algoritmo a razão cíclica será atualizada para um novo valor e, conseqüentemente, o conversor empregado no circuito levará um tempo para entrar em regime permanente, assim, o tempo de execução do MPPT (T_{MPPT})

deve ser maior que o tempo transitório a fim do algoritmo obter os valores de tensão e corrente em regime.

A Figura 11 demonstra a análise do algoritmo P&O usado para rastrear o MPP operando em conjunto com o conversor Boost. Na FESFV é possível definir até quatro valores diferentes de irradiância solar e de temperatura, além disso são pré-carregados o passo de cálculo (*Simulation Step Size*), condição inicial para a razão cíclica (*Initial D*), passo de incremento da razão cíclica (*D Step*) e o tempo total de simulação (*Simulation Time*). Estes parâmetros são necessários para a determinação do comportamento dinâmico do sistema, e podem ser alterados e ajustados conforme a necessidade do usuário.

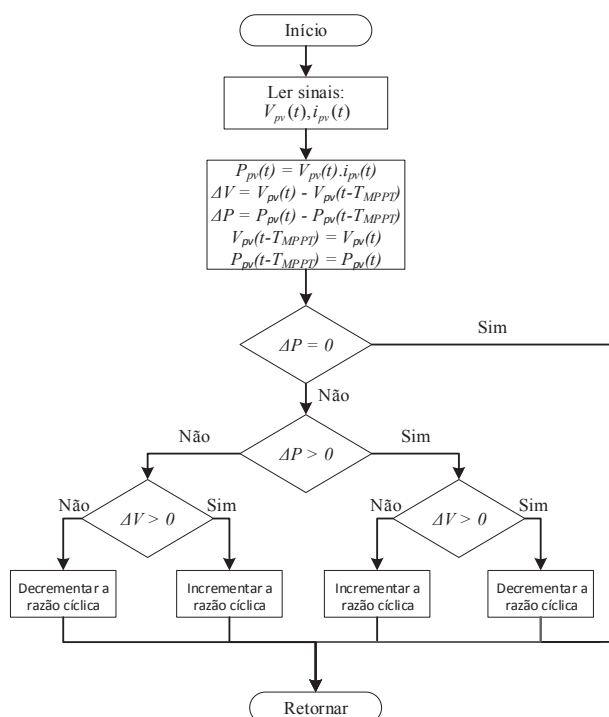


Fig. 10. Fluxograma do algoritmo de MPPT P&O.

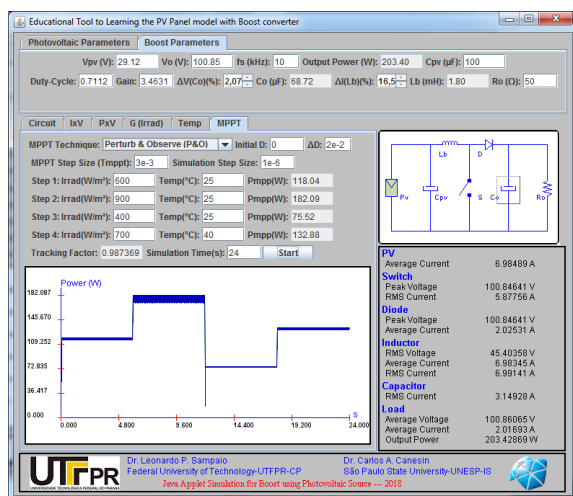


Fig. 11. FESFV: Exemplo de abordagem de MPPT empregando a técnica P&O.

A partir dos resultados exibidos na Figura 11, pode-se verificar o comportamento da técnica MPPT estudada, bem como os parâmetros empregados no método, através da comparação da máxima potência disponível no módulo FV (cor verde) com a potência extraída pelo algoritmo em uso (cor azul). Adicionalmente, é apresentado o fator de seguimento (TF – *Tracking Factor*) do método de MPPT empregado, o qual é calculado pela relação entre a potência extraída e a potência disponível acumulada ao longo da simulação.

V. ANÁLISES COMPARATIVAS

As ferramentas propostas foram avaliadas e comparadas por meio de resultados de simulação computacional e experimental. Os resultados práticos foram realizados empregando o conversor Boost com o emulador FV. A Tabela I exhibe os principais parâmetros empregados tanto na simulação quanto experimentalmente.

TABELA I
Principais Parâmetros do Sistema FV

Parâmetros	Valores
Módulo e Arranjo FV	
Tensão de circuito aberto – Voc	34,80 V
Corrente de curto circuito - Isc	3,80 A
Tensão de saída em MPP – V	29,00 V
Corrente de saída em MPP – I	3,50 A
Quantidade de arranjos em paralelo - Mp	2
Quantidade de arranjos em série-Ms	1
Conversor Boost	
Indutância – Lin	1,80 mH
Capacitância – Co	68 µF
Frequência de chaveamento – fs	10 kHz
Resistencia de carga	50 Ω
MPPT P&O	
Passo de Cálculo P&O (T _{MPPT})	3 ms
Incremento da Razão Cíclica (ΔD)	0,02

A Figura 12 apresenta as formas de onda de tensão e corrente na indutância do conversor Boost associado a um arranjo FV considerando a FESFV, simulação computacional (Matlab/Simulink) e experimental. Pode-se notar que a ferramenta educacional consegue traçar as formas de onda teóricas com boa aproximação, assim, a mesma pode ser empregada no ensino de sistemas FV tanto em salas de aulas teóricas quanto experimentais, com precisão.

Com o objetivo de verificar o desempenho da FESFV em relação às técnicas de MPPT, a técnica P&O foi implementada tanto em ambiente de simulação computacional (Matlab/Simulink) quanto na prática. Portanto, a comparação entre a ferramenta proposta e a simulação computacional para a técnica de MPPT P&O, empregada no conversor Boost em conjunto com o arranjo FV é apresentada na Figura 13.

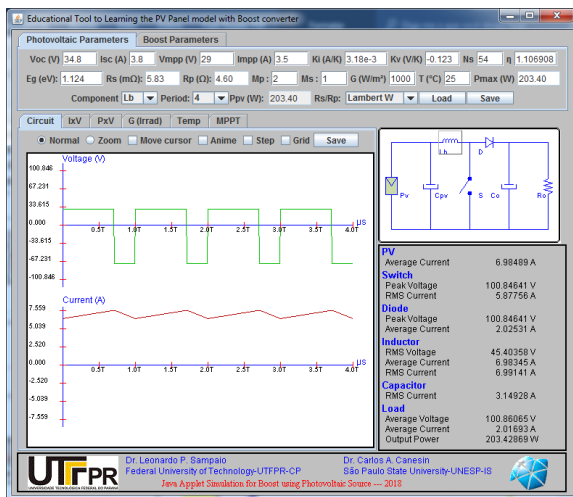
Como pode ser observado na Figura 13, a ferramenta educacional proposta consegue exibir o comportamento do sistema de forma dinâmica empregando o método MPPT de forma muito satisfatória. Desta forma, a ferramenta proporciona um ambiente dinâmico e interativo para o ensino e aprendizagem de técnicas de MPPT aplicadas à sistemas FV.

VI. CONCLUSÕES

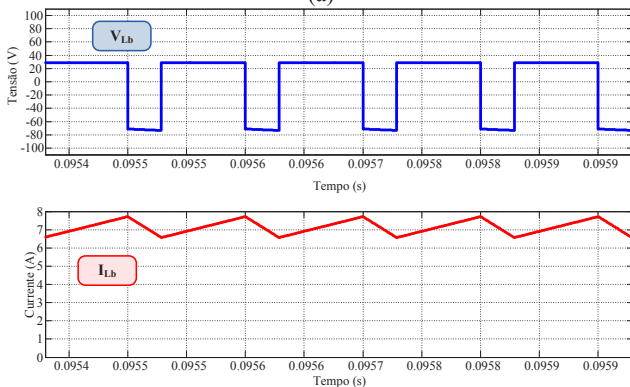
Este artigo apresentou um conjunto de ferramentas educacionais desenvolvidas em Java voltadas para o auxílio do ensino de sistemas fotovoltaicos. As ferramentas apresentaram de forma interativa e dinâmica o funcionamento dos principais conversores estáticos de potência operando em conjunto com módulo e arranjos FVs, de forma a alimentar cargas isoladas e também injetar energia na rede de distribuição.

A partir das ferramentas propostas é possível compreender e visualizar diversos comportamentos do sistema FV através da interação com as curvas dinâmicas do modelo matemático empregado, em função da irradiância solar e temperatura, além de possibilitar a interação com as formas de onda de tensão e corrente dos componentes elétrico/eletrônico presentes no sistema.

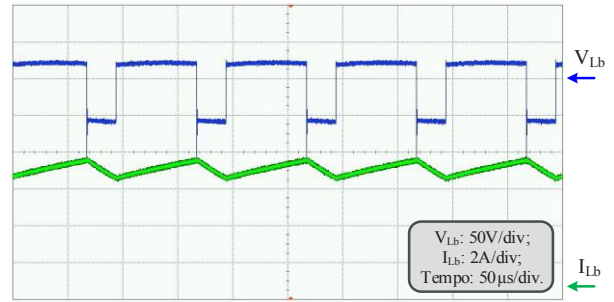
A partir das interações com diversos ábacos matemáticos, pode-se melhorar o processo de aprendizagem e a qualidade do ensino, utilizando o ambiente atrativo de estudo proposto pelas ferramentas. Adicionalmente, pode-se empregar as ferramentas durante as aulas teóricas e práticas em tópicos envolvendo energias renováveis de forma fácil e interativa, motivando os estudantes a estudarem conteúdos relacionados aos assuntos propostos.



(a)



(b)

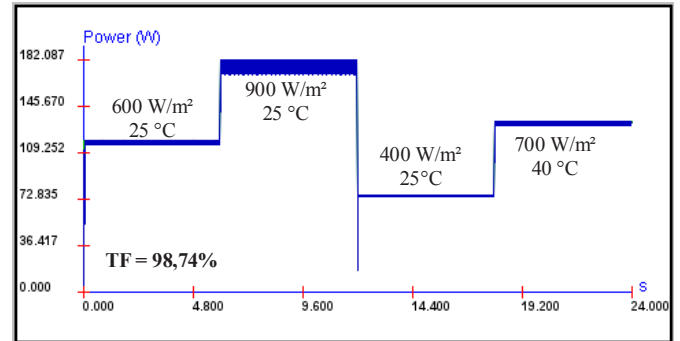


(c)

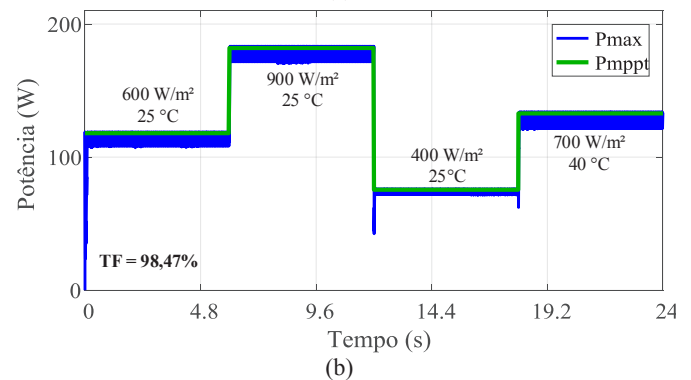
Fig. 12. Formas de onda de tensão e corrente no indutor do conversor Boost: (a) FESFV, (b) Matlab/Simulink e (c) Experimental.

Ademais, os resultados exibidos pelas ferramentas de simulação foram confrontados com o software de simulação (Matlab/Simulink), bem como por meio de experimentação. A partir dos resultados obtidos é possível observar que estes apresentam uma adequada precisão, permitindo concluir que a FESFV pode ser empregada para as mais distintas finalidades, tais como: (i) demonstração dos conteúdos relacionados a sistemas fotovoltaicos em classe teórica; (ii) durante as atividades de estudos pelos alunos; (iii) em aulas práticas pelos estudantes acompanhando e comparando os resultados teóricos/práticos e; (iv) auxílio nas etapas de projetos de sistemas fotovoltaicos.

A FESFV foi desenvolvida em linguagem Java e está disponível para a utilização gratuita, ou seja, sem custos [25].



(a)



(b)

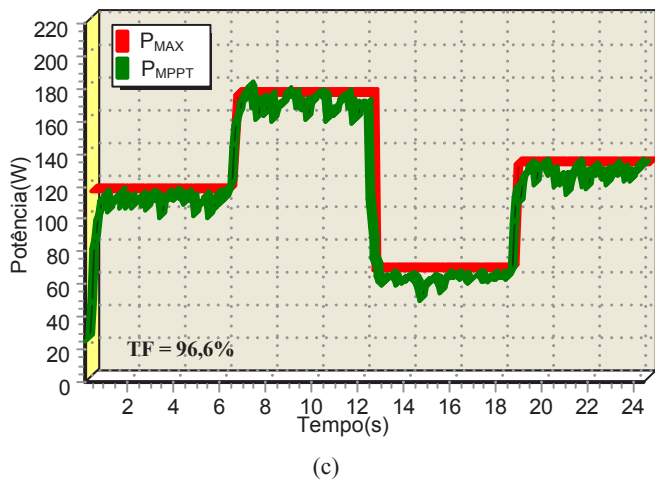


Fig. 13. Comparação dos resultados obtidos pela FESFV e simulação computacional, considerando o MPPT empregando a técnica P&O: (a) FESFV, (b) Matlab/Simulink e (c) Experimental.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao CNPq pelo suporte no desenvolvimento deste trabalho.

REFERÊNCIAS

- [1] D. Tan, "Emerging System Applications and Technological Trends in Power Electronics: Power Electronics is Increasingly Cutting Across Traditional Boundaries", *IEEE Power Electronics Magazine*, vol. 2, n° 2, pp. 38-47, Jun. 2015.
- [2] F. Blaabjerg, K. Ma, Y. Yang, "Power Electronics for Renewable Energy Systems - Status and Trends", in *Proc. of International Conference on Integrated Power Electronics Systems*, vol. 8, pp. 1-11, 2014.
- [3] A. Goel, R. P. Jamdagni, N. K. Mishra, "New Hope for Clean Energy Through Exploring Space", in *Proc. of Recent Advances in Space Technology Services and Climate Change - RSTSCC*, vol. 1, pp. 87-89, 2010.
- [4] S. R. Bull, "Renewable Energy Today and Tomorrow", *Proceedings of the IEEE*, vol. 89, n° 8, pp. 1216-1226, Aug. 2001.
- [5] F. Cucchiella, I. D'Adamo, M. Gastaldi, M., S. C. L. Koh, "A Photovoltaic System in a Residential Building: Environmental and Economic Optimization Analysis", in *Proc. of Supply Chain Management and Information Systems - SCMIS*, vol. 8, pp. 1-9, 2010.
- [6] M. A. G. de Brito, L. P. Sampaio, G. A. Melo, C. A. Canesin, "Contribuição ao Estudo dos Principais Algoritmos de Extração da Máxima Potência dos Painéis Fotovoltaicos", *Eletrônica de Potência-SOBRAEP*, vol. 17, n° 3, pp. 592-600, Ago. 2012.
- [7] P. P. Praça, D. Bruno S. Alves, D. S. Oliveira Jr, L. C. S. Mazza, L. H. S. C. Barreto, "Conversor CC-CC Bidirecional de Três Portas, Estágio Único e Alto Ganho de Tensão para Aplicações em Sistemas Fotovoltaicos", *Eletrônica de Potência-SOBRAEP*, vol. 22, n° 3, pp. 258-268, Set. 2017.
- [8] Z. Zhang, C. T. Hansen, M. A. E. Andersen, "Teaching Power Electronics with a Design-Oriented, Project-Based Learning Method at the Technical University of Denmark", *IEEE Transactions on Education*, vol. 59, n° 1, pp. 32-38, Feb. 2016.
- [9] L. P. Sampaio, M. A. G. de Brito, G. A. e Melo, C. A. Canesin, "Computer Tools to Aid the Learning and Design Steps for Photovoltaic Systems", in *Proc. of COBEP*, vol. 11, pp. 1021-1026, 2011.
- [10] L. P. Sampaio, S. A. O. Silva, A. N. Vargas, "Desenvolvimento de uma Plataforma Computacional Gráfica Dedicada ao Ensino de Sistemas Fotovoltaicos Usando um Emulador Eletrônico", *Eletrônica de Potência*, vol. 22, n° 1, pp. 91-101, Mar. 2017.
- [11] F. Martinez-Rodrigo, L. C. Herrero-De Lucas, S. de Pablo, A. B. Rey-Boue, "Using PBL to Improve Educational Outcomes and Student Satisfaction in the Teaching of DC/DC and DC/AC Converters", *IEEE Transactions on Education*, vol. 60, n° 3, pp. 229-237, Aug. 2017.
- [12] G. P. Landi, F. A. S. Gonçalves, F. P. Marafão, H. K. M. Paredes, "Interactive Android Application for Education in AC-to-DC Converters", in *Proc. of COBEP*, vol. 14, pp. 1-5, 2017.
- [13] D. S. Ochs, R. D. Miller, "Teaching Sustainable Energy and Power Electronics to Engineering Students in a Laboratory Environment Using Industry-Standard Tools", *IEEE Transactions on Education*, vol. 58, n° 3, pp. 173-178, Aug. 2015.
- [14] C. A. Canesin, F. A. S. Gonçalves, L. P. Sampaio, "Simulation tools for power electronics courses based in Java Technologies", *IEEE Transactions on Education*, vol. 53, pp. 580-586, Nov. 2010.
- [15] M. M. Casaro, D. C. Martins, "Modelo de Arranjo Fotovoltaico Destinado a Análises em Eletrônica de Potência via Simulação", *Eletrônica de Potência-SOBRAEP*, vol. 13, n° 3, pp. 141-146, Ago. 2008.
- [16] S. A. Rahman, R. K. Varma, T. Vanderheide, "Generalised Model of a Photovoltaic Panel", *IET Renewable Power Generation*, vol. 8, n° 3, pp. 217-229, Apr. 2014.
- [17] M. G. Villalva, J. R. Gazoli, E. R. Filho, "Comprehensive Approach to Modeling and Simulation of Photovoltaic Arrays", *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 24, n° 5, pp. 1198-1208, May 2009.
- [18] S. Cannizzaro, M. C. Di Piazza, M. Luna, G. Vitale, "PVID: An Interactive Matlab Application for Parameter Identification of Complete and Simplified Single-Diode PV Models", in *Proc. of COMPEL*, pp. 1-7, 2014.
- [19] I. Nassar-Eddine, A. Obbadi, Y. Errami, A. El fajri, M. Agunaou, "Parameter Estimation of Photovoltaic Modules Using Iterative Method and the Lambert W Function: A comparative study", *Energy Conversion and Management*, vol. 119, pp. 37-48, Jul. 2016.
- [20] M. A. G. Brito, L.P. Sampaio, J. C. U. Peña, C. A. Canesin, "Família de Inversores Integrados Monofásicos e Trifásicos", *Eletrônica de Potência-SOBRAEP*, vol. 19, n° 4, pp. 368-372, Set./Nov. 2014.

- [21] W. Xiao, M. S. El Moursi, O. Khan, D. Infield, “Review of Grid-Tied Converter Topologies Used in Photovoltaic Systems”, *IET Renewable Power Generation*, vol. 10, nº 10, pp. 1543-1551, Nov. 2016.
- [22] Y. K. Wu, J. H. Lin, H. J. Lin, “Standards and Guidelines for Grid-Connected Photovoltaic Generation Systems: A Review and Comparison”, *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 53, nº 4, pp. 3205-3216, Jul./Ago. 2017.
- [23] M. A. G. Brito, M. G. Alves, C. A. Canesin, “Análise de Estruturas Inversoras Não Isoladas Monofásicas para Geração Distribuída Fotovoltaica”, *Eletrônica de Potência*, vol. 22, nº 2, pp. 179-186, Jun. 2017.
- [24] R. W. Erickson, D. Maksimović, *Fundamentals of Power Electronics*, Kluwer Academic Publisher, 2nd Edition, USA, 2001.
- [25] Ferramenta Educacional para Ensino de Sistemas Fotovoltaicos, “FESFV 1.0”, 2018. [Online]. Disponível: paginapessoal.utfpr.edu.br/sampaio.

DADOS BIOGRÁFICOS

Leonardo Poltronieri Sampaio, nascido em São José do Rio Preto (SP), é engenheiro eletricista (2008), mestre e doutor em engenharia elétrica pela Universidade Estadual Paulista, *Campus* Ilha Solteira (UNESP/IS) em (2010) e (2013), respectivamente. É professor do Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, *Campus* Cornélio Procópio (UTFPR-CP) desde 2012. É membro do Laboratório de Eletrônica de Potência, Qualidade de Energia e Energias Renováveis (LEPQER). Seus principais interesses são: aproveitamento de energias alternativas e renováveis, aplicações fotovoltaicas, qualidade de energia, modelagem e controle de conversores estáticos, desenvolvimento de ferramentas educacionais e programação em Java, C e DSC. É membro da SOBRAEP.

Moacyr Aureliano Gomes de Brito, nascido em Andradina (SP) em 1982. É engenheiro eletricista (2005), mestre (2008), desenvolvendo projeto com reatores eletrônicos para múltiplas lâmpadas fluorescentes com correção ativa do fator de potência de entrada e doutor (2013), desenvolvendo projeto sobre inversores monofásicos e trifásicos integrados para aplicações fotovoltaicas conectadas à rede, ambos na área de eletrônica de potência, todos pela Universidade Estadual Paulista – UNESP-FE/IS, em Ilha Solteira (SP). Atualmente é professor Adjunto da Universidade Federal do Mato Grosso do Sul – Campus de Campo Grande- MS atuando nos cursos de Graduação em Engenharia Elétrica, Eletrotécnica Industrial e de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica. Suas áreas de interesse são: reatores eletrônicos, controle aplicado à Eletrônica de Potência, uso de FPGAs, inversores em conexão com a rede de energia elétrica para fontes alternativas de energia.

Carlos Alberto Canesin, nascido em Lavínia (SP), em 1961, é engenheiro eletricista (1984) pela Universidade Estadual Paulista – Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira (UNESP-FE/IS), mestre (1990) e doutor (1996) em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC INEP, Florianópolis-SC. Atualmente é professor titular do Departamento de Engenharia Elétrica (DEE) da UNESP-FE/IS. Foi editor geral da Revista Eletrônica de Potência (2003-2004), ex-presidente da SOBRAEP (11/2004 – 10/2006), é editor associado da IEEE Transactions on Power Electronics, desde 2003, e Membro do Conselho de Política Energética do Estado de São Paulo, desde 2010. Suas áreas de interesse incluem: energias renováveis e complementares, qualidade da energia elétrica, técnicas de comutações não-dissipativas, técnicas de correção ativa do fator de potência, veículos elétricos puros, reatores eletrônicos para iluminação e técnicas modernas para o ensino de eletrônica de potência.