

DESENVOLVIMENTO DE UMA PLATAFORMA COMPUTACIONAL GRÁFICA DEDICADA AO ENSINO DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS USANDO UM EMULADOR ELETRÔNICO

Leonardo P. Sampaio, Sérgio A. Oliveira da Silva, Alessandro N. Vargas
Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, Cornélio Procopio – PR, Brasil
e-mail: sampaio@utfpr.edu.br, augus@utfpr.edu.br, avargas@utfpr.edu.br

Resumo – Este trabalho apresenta o desenvolvimento de um emulador eletrônico fotovoltaico (PV - *photovoltaic*), que opera em conjunto com uma plataforma gráfica computacional, auxiliando em procedimentos de ensino teóricos e práticos de tópicos relacionados a sistemas PV abordados em cursos de graduação e pós-graduação. O emulador eletrônico é composto por um retificador monofásico controlado e um conversor CC-CC Buck, cujo objetivo é sintetizar em seus terminais de saída diversas curvas características de um determinado arranjo PV, garantindo que a corrente drenada da rede elétrica seja senoidal e com fator de potência unitário. A emulação da curva característica do módulo PV é implementada em controlador digital de sinal a partir do modelo matemático que representa o circuito elétrico de uma célula PV. Utilizando a linguagem de programação Java, é desenvolvida uma plataforma computacional interativa e dinâmica, a qual permite o controle e monitoramento em tempo real do emulador eletrônico. A ferramenta gráfica permite: i. modificar o modelo da célula PV; ii. alterar a quantidade de módulos PV; iii. variar a temperatura e a irradiância solar incidentes nos módulos PV; e iv. visualizar a tensão e a corrente sintetizada pelo emulador eletrônico. A partir de resultados experimentais, o emulador eletrônico é avaliado considerando variações climáticas envolvendo irradiância solar e temperatura, bem como por meio de transitórios de carga, cuja finalidade é validar o desenvolvimento teórico.

Palavras-Chave – Conversores de Potência, Eletrônica de Potência, Emulador Fotovoltaico, Ferramenta Educacional.

DEVELOPMENT OF A GRAPHIC COMPUTATIONAL PLATFORM DEDICATED TO TEACHING OF PHOTOVOLTAIC SYSTEMS USING AN ELECTRONIC EMULATOR

Abstract – This work presents the development of an electronic photovoltaic (PV) emulator, which operates in conjunction with a graphic computational platform,

assisting in theoretical and practical teaching procedures involving topics related to PV systems covered in both undergraduate and postgraduate courses. The electronic PV emulator is composed of a controlled single-phase rectifier and a Buck DC-DC converter, aiming to synthesize in its output terminals several characteristic curves of any specific PV arrangement, ensuring that the current drained from the utility grid is always sinusoidal with unit power factor. The emulation of the PV module characteristic curve is implemented into a digital signal controller by means of a mathematical model that represents the electrical circuit of a PV cell. Using Java programming language, an interactive and dynamic graphical computational platform is developed, allowing control and monitoring of the electronic emulator in real time. The referred graphical tool allows: i. modify the PV cell model; ii. vary the number of PV modules; iii. change the temperature and solar radiation in which the PV modules are subjected; and iv. view the current and voltage waveforms synthesized by the electronic emulator. By means of experimental results, the electronic emulator is evaluated, considering climate changes involving solar radiation and temperature, as well as load transients, whose purpose is the validation of the theoretical development.

Keywords – Educational Tools, Photovoltaic emulator, Power Electronics, Power Converters.

I. INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas, as fontes alternativas e renováveis de energia elétrica vêm ganhando cada vez mais importância em âmbito mundial no atual cenário de geração de energia, dada à crescente demanda por energia elétrica, assim como pela necessidade eminente de gerar energia elétrica com menor impacto e interferências ao meio ambiente [1], [2]. Dentre as diversas fontes alternativas e renováveis de energia elétrica existentes, a energia fotovoltaica vem se destacando das demais, principalmente pela incidência solar ser abundante e constante ao longo do ano na maioria das regiões do globo terrestre [3].

Artigo submetido em 23/06/2016. Primeira revisão em 25/09/2016. Aceito para publicação em 11/11/2016 por recomendação do Editor Marcelo Cabral Cavalcanti.

Face à crescente utilização das fontes renováveis de energia elétrica, assim como o avanço tecnológico ocorrido nas últimas décadas, a eletrônica de potência tem exercido um papel de destaque nesta área, contribuindo no desenvolvimento de técnicas e métodos para a extração da máxima potência gerada pelos arranjos fotovoltaicos (PV - *photovoltaic*) [4]-[7]. Pode-se destacar o desenvolvimento de técnicas de controle e gerenciamento da energia gerada, as novas topologias de conversores estáticos, dentre outros, visando sempre otimizar e melhorar a eficiência no processo de conversão da energia solar em elétrica [7]-[12].

Desta forma, conteúdos acadêmicos ministrados em cursos de graduação e/ou pós-graduação, precisam estar em constante atualização, de forma a acompanhar os avanços tecnológicos que envolvem as aplicações relacionadas com a de geração de energia por meio do uso de energias renováveis. Dentro deste contexto, as disciplinas que abordam estudos na área de eletrônica de potência têm se destacado, pelo fato destas terem uma conexão estreita com aplicações tecnológicas eficientes e sustentáveis englobando fontes alternativas e renováveis de energia [13], [14]. Portanto, abordagens modernas no ensino relacionadas ao contexto apresentado, as quais possam auxiliar nas tratativas de conteúdos envolvendo energias renováveis aos estudantes de cursos de engenharia e pós-graduação, tornam-se cada vez mais preponderante no processo de ensino-aprendizagem [15]-[20].

Considerando especificamente o ensino de eletrônica de potência, ao longo dos últimos anos tem-se desenvolvido e propostas diversas ferramentas computacionais capazes de demonstrar de forma interativa e dinâmica o funcionamento dos principais conversores estáticos de potência, assim como o funcionamento de fontes renováveis de energia elétrica [21]. Em complemento às aulas presenciais, diversos trabalhos têm apresentado o desenvolvimento de laboratórios virtuais para o ensino remoto de conversores estáticos, nos quais o estudante pode modificar parâmetros e visualizar formas de ondas de tensão e corrente pertinentes aos tópicos abordados nas experiências práticas [22], [23].

Dentro deste cenário, novas ferramentas computacionais podem ser desenvolvidas, sendo estas muito úteis no auxílio ao aprendizado do aluno, de forma a facilitar a apresentação e consolidação de conceitos fundamentais relacionados à geração de energia elétrica a partir fontes alternativas e renováveis de energia. Sendo assim, pode-se demonstrar o funcionamento de um determinado sistema em estudo, bem como suas principais aplicações, inseridas no conteúdo da disciplina de eletrônica de potência ou em disciplinas correlatas. A partir destas ferramentas é possível explicar o conteúdo de forma interativa e atraente aos estudantes, criando um ambiente no qual se possa consolidar o conhecimento adquirido de forma clara, rápida e objetiva, melhorando a qualidade da aula, acelerando o processo de aprendizado do aluno e aumentando a eficiência do professor em sala de aula [24]-[27].

Sendo assim, este trabalho visa contribuir na área educacional por meio de estudos de sistemas fotovoltaicos (PV), os quais possibilitam envolver procedimentos de ensino, tanto teóricos quanto práticos, com foco direcionado para aplicações de eletrônica de potência.

A partir do estudo e desenvolvimento de um emulador eletrônico fotovoltaico (EEPV), este será capaz de reproduzir em seus terminais de saída as curvas características de painéis PV, bem como apresentar com exatidão seus respectivos níveis de tensão e corrente mediante variações de carga e/ou condições climáticas, tais como irradiância solar e temperatura.

Desta forma, é utilizado o conversor CC-CC Buck para sintetizar as curvas características do arranjo PV, onde a corrente de saída é controlada a partir da referência gerada por um modelo matemático que representa o circuito elétrico de um sistema PV, cujas variáveis de entrada são a irradiância solar, temperatura e tensão de saída do conversor.

Adicionalmente, uma interface gráfica desenvolvida na linguagem de programação Java apresenta um ambiente computacional interativo e dinâmico, onde o estudante/usuário pode, em tempo real, definir e/ou escolher o painel PV que deseja emular, alterar os parâmetros do sistema, tais como irradiância solar e temperatura, e visualizar as formas de ondas de tensão, corrente e potência de saída do arranjo PV emulado. Além disso, o barramento CC do conversor Buck é regulado por um retificador controlado, que drena uma corrente senoidal da rede elétrica para o funcionamento do sistema educacional, obtendo-se assim fator de potência unitário.

Neste trabalho, com o objetivo de avaliar e validar o desenvolvimento do EEPV proposto, diversos ensaios experimentais são realizados incluindo variações de carga e de condições climáticas.

Este artigo está organizado como segue: A Seção II descreve as características do EEPV, incluindo o modelo PV adotado, o controle do retificador controlado, o controle do conversor Buck e o sistema PLL (*Phase-Locked-Loop*) adotado neste trabalho. Os principais resultados experimentais que demonstram e avaliam o sistema proposto são apresentados na seção III. Na seção IV é apresentada a interface gráfica para controlar e gerenciar o EEPV. Finalmente, na Seção V são apresentadas as conclusões do trabalho.

II. DESCRIÇÃO DO EMULADOR ELETRÔNICO FOTOVOLTAICO PROPOSTO

O esquema completo do EEPV proposto está apresentado na Figura 1, o qual é composto por um retificador monofásico controlado seguido por um conversor CC-CC abaixador denominado conversor Buck. O conjunto experimental implementado utiliza um DSC (*Digital Signal Controller*), onde são embarcados os algoritmos do modelo matemático que descreve o comportamento do arranjo PV e do sistema PLL, o controlador ressonante de corrente do retificador, o controlador de corrente de saída do conversor CC-CC, o controlador de tensão do barramento CC, bem como a comunicação USB.

Parte dos algoritmos embarcados no DSC são descritos nesta seção. A comunicação USB e a ferramenta gráfica que permitem o gerenciamento e controle do sistema são apresentados na seção IV.

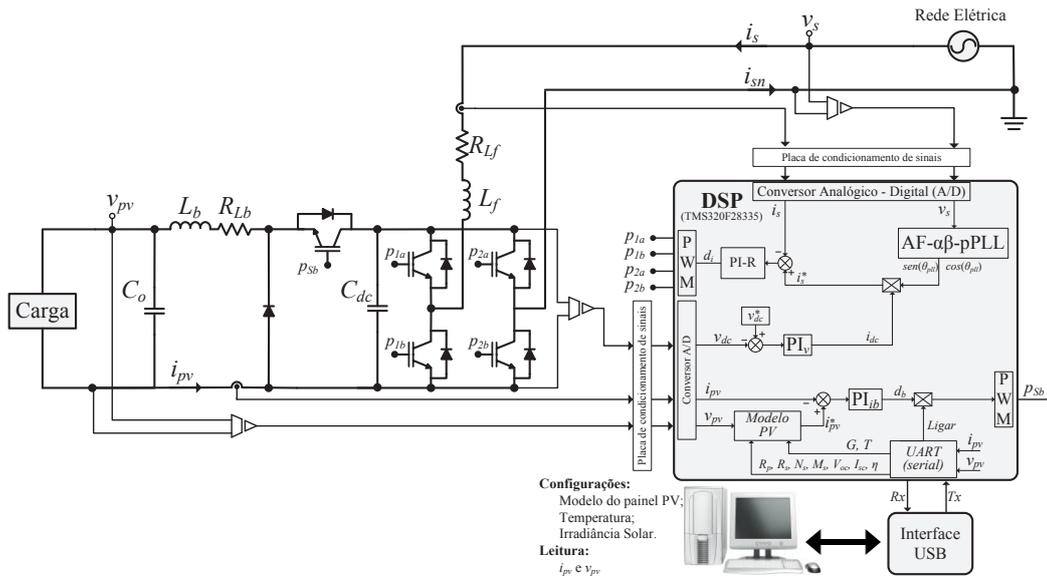


Fig. 1. Esquema completo do EEPV.

A. Modelo do Painel Fotovoltaico

Primeiramente, para realizar o estudo e implementação do EEPV, é necessário apresentar um circuito elétrico equivalente que represente uma célula PV.

O modelo matemático obtido nesta seção é utilizado para gerar a referência de corrente de saída do conversor CC-CC Buck, a qual representa a corrente do arranjo PV para uma determinada tensão, irradiância solar e temperatura. Por fim, o referido modelo é embarcado em um DSC.

O circuito elétrico equivalente de uma célula PV é ilustrado na Figura 2 [28], onde I_{ph} é a fotocorrente; i_{Dpv} é a corrente do diodo; i_{pv} representa a corrente de saída da célula PV; v_{pv_c} é a tensão de saída da célula PV. Além disso, as resistências série e paralela são representadas por R_s e R_p , respectivamente.

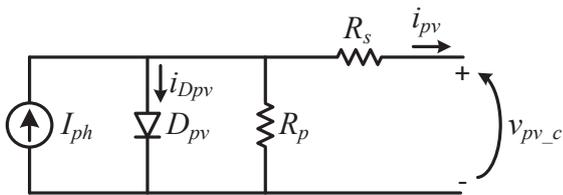


Fig. 2. Circuito equivalente da célula fotovoltaica.

As grandezas i_{pv} e I_{ph} , a corrente de saturação reversa I_r , a corrente de saturação reversa ($I_{r(STC)}$), em STC (*Standard Test Condition*), a tensão do módulo PV (v_{pv_m}) e a tensão de circuito aberto do arranjo fotovoltaico (V_{oc_m}) podem ser encontradas por (1), (2), (3), (4), (5) e (6), respectivamente, onde q é a carga do elétron; η é o fator de idealidade da junção p-n; k é a constante de Boltzmann; T_r é a temperatura nominal, em kelvin (298 K); I_{SC} é a corrente de curto-circuito em STC ($T_r = 298$ K e $G = 1000$ W/m²); α é o coeficiente de temperatura; E_g é a energia da banda (1,1 eV); V_{oc_c} é a tensão de circuito aberto da célula fotovoltaica; e N_s é o número de células fotovoltaicas.

$$i_{pv} = I_{ph} - I_r \left[e^{\frac{q v_{pv_c} + i_{pv} R_s}{\eta k T}} - 1 \right] - \frac{v_{pv_c} + i_{pv} R_s}{R_p} \quad (1)$$

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

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

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

$$v_{pv_m} = v_{pv_c} N_s \quad (5)$$

$$V_{oc_m} = V_{oc_c} N_s \quad (6)$$

No intuito de resolver o conjunto de equações de (1) a (6) é necessário empregar um método numérico. Como forma de determinar a corrente da célula para um dado ponto de operação, neste trabalho foi adotado o método de *Newton-Raphson* representado por (7), onde n é a n -ésima iteração do algoritmo e $f'(i_{pv_n})$ é a derivada da corrente i_{pv} correspondente a iteração n . Desse modo, (8) e (9) são empregadas na determinação da corrente da célula fotovoltaica para uma dada iteração.

$$i_{pv_{n+1}} = i_{pv_n} - \frac{f(i_{pv_n})}{f'(i_{pv_n})} \quad (7)$$

$$f(i_{pv_n}) = I_{ph} - i_{pv_n} - I_r \left[e^{\frac{q v_{pv_c} + i_{pv_n} R_s}{\eta k T}} - 1 \right] - \frac{v_{pv_c} + i_{pv_n} R_s}{R_p} \quad (8)$$

$$f'(i_{pv_n}) = -1 - I_r e^{q \frac{v_{pv_c} + i_{pv_n} R_s}{\eta k T}} \frac{q i_{pv_n} R_s}{\eta k T} - \frac{R_s}{R_p} \quad (9)$$

Por fim, a partir do conjunto de equações descrito anteriormente, a tensão (v_{pv}) e a corrente (i_{pv}), resultantes da concepção de um determinado arranjo série e/ou paralelo de módulos PV, podem ser determinados.

B. Retificador Controlado

Analisando a Figura 1 e considerando somente a operação do retificador controlado, pode-se obter um circuito equivalente conforme ilustrado na Figura 3, onde a corrente drenada pelo retificador controlado (i_s) pode ser encontrada por (10). Assim, aplicando a técnica de modelagem de pequenos sinais em (10), desprezando as perturbações na tensão da rede elétrica (v_s) e do barramento CC (v_{dc}), pode-se obter a função de transferência definida por (11), a qual relaciona a corrente de entrada do retificador (i_s) e a razão cíclica (d_i) do inversor PWM.

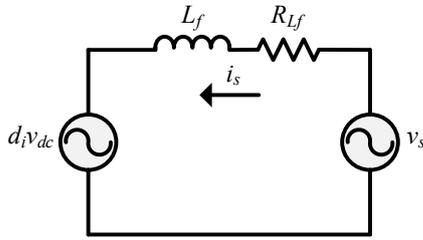


Fig. 3. Circuito elétrico equivalente do retificador controlado.

$$v_s - (L_f s + R_{L_f}) i_s - d_i v_{dc} = 0 \quad (10)$$

$$G_{i_s d_i}(s) = \frac{\hat{i}_s(s)}{\hat{d}_i(s)} = \frac{V_{dc}}{L_f s + R_{L_f}} \quad (11)$$

O controlador de corrente de entrada do retificador e o controlador de tensão do barramento CC estão representados pelo diagrama em blocos da Figura 4, onde L_f e R_{L_f} representam, respectivamente, a indutância e a resistência do indutor de filtragem conectado à rede elétrica, enquanto K_{PWM} representa o ganho estático do modulador por largura de pulsos, o qual é calculado considerando o inverso do valor de pico da portadora triangular.

Com o objetivo de controlar a corrente drenada da rede pelo retificador de entrada, um controlador proporcional-integral-ressonante (PI-R) é utilizado neste trabalho [28]. Uma vez que a referência de controle desta corrente possui formato senoidal, a utilização somente de um controlador PI não garantiria erro nulo em regime permanente. Portanto, a função de transferência do controlador PI-R adotada neste trabalho é dada por (12), onde k_{pi} e k_{ii} são os respectivos ganhos proporcional e integral do controlador; k_1 representa o ganho do controlador ressonante na frequência de ressonância fundamental; e ω_o é a frequência angular de ressonância. Fazendo $\omega_1 = \omega_o$, onde ω_1 é a frequência angular fundamental da rede elétrica, o controlador ressonante terá um ganho de malha aberta infinito na frequência de ressonância (fundamental), resultando, teoricamente, erro nulo em regime permanente. O ganho do controlador ressonante é determinado considerando que a frequência de cruzamento

(ω_{cr}), em 0 dB, referente ao controlador ressonante é igual à frequência de cruzamento (ω_{ci}) estipulada ao controlador proporcional-integral, ou seja, $\omega_{cr} = \omega_{ci}$.

$$G_{PI-R}(s) = k_{pi} + \frac{k_{ii}}{s} + \frac{k_1 s}{s^2 + \omega_o^2} \quad (12)$$

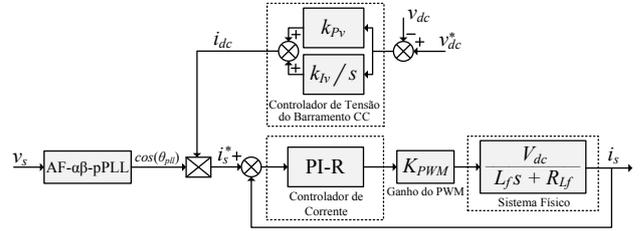


Fig. 4. Diagrama em bloco da malha de controle de corrente do retificador e tensão do barramento CC

O objetivo principal do controlador do barramento CC é manter regulada a tensão v_{dc} que alimenta o conversor Buck, de modo a encontrar a corrente i_{dc} , como mostrado na Figura 4. Esta corrente tem a função de manter a tensão do barramento CC regulada, bem como controlar a amplitude da corrente drenada da rede elétrica i_s a fim de fornecer a energia necessária para operação do EEPV. Um algoritmo PLL é usado para a obtenção de uma corrente senoidal de referência (i_s^*), a qual é usada no controlador da malha de corrente do retificador de entrada (Figura 4). Assim, desprezando as perdas de comutação, assim como dos elementos passivos, a potência ativa da rede elétrica deve ser igual à potência disponível no barramento CC como representado por:

$$\frac{V_{sp} I_{sp}}{2} = v_{dc} i_{dc} \quad (13)$$

Considerando que a corrente que flui pelo capacitor do barramento CC é dada por (14), pode-se obter a função de transferência para controle do barramento CC representada por (15) [30]:

$$i_{dc} = C_{dc} \frac{dv_{dc}}{dt} \quad (14)$$

$$G_{v_{dc} i_{dc}}(s) = \frac{\hat{v}_{dc}}{\hat{i}_{dc}} = \frac{V_{sp}}{2 C_{dc} V_{dc} s} \quad (15)$$

onde V_{sp} e I_{sp} representam a tensão e a corrente de pico da rede elétrica, respectivamente, e C_{dc} é a capacitância do barramento CC.

C. Conversor Buck

O conversor Buck é utilizado no EEPV para gerar a curva característica de um determinado arranjo PV, considerando diferentes níveis de irradiância solar e temperatura. A partir do modelo matemático apresentado na Seção II.A, é obtida a corrente de referência (i_{pv}^*) para o conversor Buck em função da tensão de saída do EEPV (v_{pv}), da irradiância solar (G) e da temperatura (T). Desta forma, o objetivo do controlador proporcional-integral da malha de corrente do conversor Buck é a de rastrear a corrente de referência (i_{pv}^*), conforme ilustra a Figura 5.

A partir da aplicação da técnica de modelagem, podem ser obtidas as equações dinâmicas média do conversor Buck operando no modo de condução contínua. Assim, as expressões da corrente no indutor (i_{pv}) e da tensão de saída (v_{pv}) do conversor são dadas, respectivamente, por:

$$i_{pv} = \frac{d_b v_{dc} - v_{pv}}{sL_b + R_b} \quad (16)$$

$$v_{pv} = \frac{i_{pv}}{sC_o} - \frac{v_{pv}}{sR_o C_o} \quad (17)$$

onde R_o representa a resistência de carga; R_b é a resistência equivalente do indutor de saída do conversor Buck (L_b); d_b representa a razão cíclica utilizada na modulação do conversor Buck.

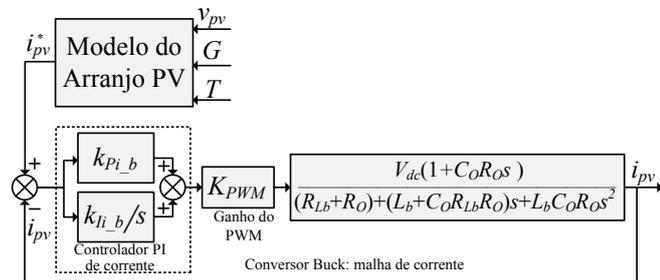


Fig. 5. Diagrama em bloco da malha de controle de corrente do conversor Buck.

Portanto, linearizando (16) e (17), obtém-se a função de transferência para o controle da corrente de saída (i_{pv}) do conversor em função da razão cíclica (d_b), como descrito por:

$$G_{i_{pv}d}(s) = \frac{\hat{i}_{pv}(s)}{\hat{d}_b(s)} = \frac{V_{dc}(1 + C_o R_o s)}{(R_{L_b} + R_o) + (L_b + C_o R_{L_b} R_o)s + L_b C_o R_o s^2} \quad (18)$$

D. Sistema PLL

Neste trabalho foi empregado um sistema PLL para estimar o ângulo de fase da tensão na rede, o qual é utilizado para determinar as coordenadas do vetor síncrono unitário que permitem o cálculo da corrente senoidal de referência i_s^* a ser sintetizada pelo retificador controlado.

O sistema PLL monofásico adotado neste trabalho está mostrado na Figura 6, onde sua descrição completa é detalhada em [31]. No esquema PLL mencionado, um filtro adaptativo não autônomo opera em conjunto com o esquema $\alpha\beta$ -pPLL, a fim de melhorar seu desempenho frente aos possíveis distúrbios que a tensão da rede elétrica, tais como harmônicos de tensão, afundamentos e elevações de tensão, salto do ângulo de fase e variações de frequência. Além disso, em [31], são apresentados os requisitos e procedimentos para determinar os ganhos proporcional (k_{ppll}) e integral (k_{ipll}) do controlador PI do PLL, de forma a garantir a sua estabilidade, assim como a determinação da constante K_c que representa o ganho do filtro adaptativo, sendo este definido pela relação entre o passo de adaptação μ e o tempo de amostragem do DSC T_s , ou seja $K_c = \mu/T_s$.

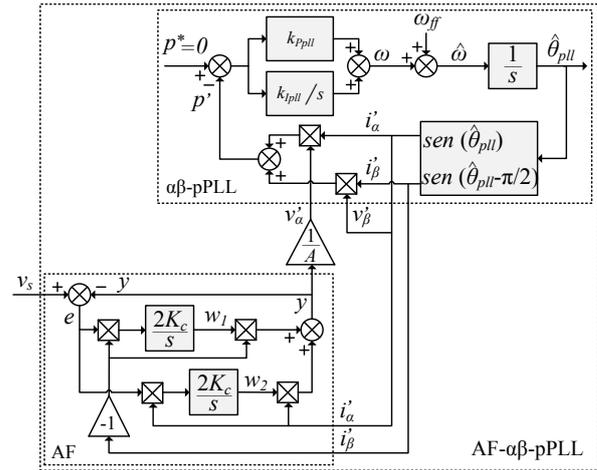


Fig. 6. Esquema de detecção de ângulo de fase AF- $\alpha\beta$ -pPLL.

III. RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Nesta seção, resultados experimentais são apresentados e discutidos com o objetivo de demonstrar e avaliar a eficácia e o desempenho do sistema educacional fotovoltaico baseado no EEPV apresentado na Figura 1. O EEPV foi implementado utilizando módulos IGBT (SK40GB 123, SEMIKRON) e seus drivers, para a implementação do retificador controlado. Já para a implementação do conversor Buck, IGBTs discretos (IRGP50B60PD1PBF, VISHAY) e diodos discretos (HFA30PB120PBF, VISHAY) foram empregados. Os algoritmos para a determinação da corrente de referência do EEPV, o algoritmo PLL, a geração da corrente de referência para a obtenção da corrente senoidal drenada da rede elétrica, o controlador de tensão do barramento CC e os controladores de corrente (retificador e Buck) foram embarcados digitalmente utilizando um controlador digital de sinais de ponto flutuante (TMS320F28335). Além disso, transdutores de corrente (LEM LA 55-P) e tensão (LEM LV 25-P) foram usados na medição das grandezas de corrente e tensão, respectivamente.

A plataforma gráfica computacional (PGC) voltada ao ensino de sistemas PV é analisada e avaliada considerando o modelo do painel PV SW 245 produzido pela Solarworld, onde seus parâmetros, os quais foram utilizados no modelo matemático do EEPV, estão descritos na Tabela I. Já os parâmetros utilizados na PGC encontram-se descritos na Tabela II. Ressalta-se que neste trabalho foi adotado um arranjo PV composto por quatro painéis conectados em série.

O comportamento e desempenho do EEPV foi avaliado mediante variações na irradiância solar, como pode ser observado na Figura 7. Para realizar este procedimento foi alterada a irradiância solar, variando de 0 a 1000W/m², com degraus de 200W/m², onde a temperatura e a resistência de carga foram mantidas constantes em $T = 25^\circ\text{C}$ e $R_{pv} = 15,7\Omega$, respectivamente.

Na Tabela III é realizada a comparação entre os resultados obtidos na experimentação, e os resultados teóricos obtidos pelo modelo teórico do arranjo PV. Verifica-se que o EEPV consegue sintetizar a curva característica do arranjo PV programado, com um erro inferior a 1,5% para todas as faixas de operação.

TABELA I

Parâmetros Adotados na Emulação do Painel PV SW 245 da SolarWorld em Condições de Testes Padrão (STC)

Máxima potência do arranjo PV	$P_{mpp} = 245 \text{ W}$
Tensão no ponto de máxima potência	$V_{mpp} = 30,8 \text{ V}$
Corrente no ponto de máxima potência	$I_{mpp} = 7,96 \text{ A}$
Tensão de circuito aberto	$V_{oc} = 37,5 \text{ V}$
Corrente de curto circuito	$I_{sc} = 8,49 \text{ A}$
Carga do elétron	$q = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$
Constante de Boltzmann	$k = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ J/K}$
Coefficiente de temperatura	$\alpha = 6 \text{ mA/}^\circ\text{C}$
Energia de banda	$E_g = 1,1 \text{ eV}$
Número de células	$N_s = 60$
Resistência série	$R_s = 3,05 \text{ m}\Omega$
Resistência paralela	$R_p = 18 \Omega$
Fator de idealidade da junção p-n	$\eta = 1,2$

TABELA II

Parâmetros do Emulador Eletrônico Fotovoltaico Adotados nos Ensaios Experimentais

Tensão nominal da rede elétrica (eficaz)	$V_s = 127 \text{ V}$
Frequência nominal da rede elétrica	$f_s = 60 \text{ Hz}$
Frequências de chaveamentos dos conversores PWM	$f_{sw} = 20 \text{ kHz}$
(Retificador controlado e conversor Buck)	
Potência nominal do Emulador Eletrônico	$S_N = 980 \text{ VA}$
Corrente eficaz nominal drenada da rede elétrica	$I_s = 7,7 \text{ A}$
Filtro Indutivo	$L_f = 1,5 \text{ mH}$
Resistência do Filtro Indutivo	$R_{Lf} = 0,20 \Omega$
Tensão média do barramento CC	$V_{dc} = 250 \text{ V}$
Capacitância do barramento CC	$C_{dc} = 2115 \mu\text{F}$
Filtro capacitivo do conversor Buck	$C_o = 200 \mu\text{F}$
Filtro indutivo do conversor Buck	$L_b = 2,0 \text{ mH}$
Resistência do filtro indutivo do conversor Buck	$R_{Lb} = 0,2 \Omega$
Resistência nominal de carga usado no conversor Buck	$R_o = 15 \Omega$
Frequência de amostragem do conversor A/D	$f = 60 \text{ kHz}$
Ganho do PWM	$K_{PWM} = 5,33 \times 10^{-4}$
Ganhos dos controladores de corrente PI-R	$k_{pi} = 175,25; k_{ri} = 29727; k_1 = 15700$
Frequência de cruzamento (PI de corrente)	$\omega_{ci} = 15708 \text{ rad/s}$
Margem de fase (PI de corrente)	$PM_i = 89,9^\circ$
Ganhos do controlador PI (barramento CC)	$k_{pv} = 0,0996; k_{iv} = 0,0902$
Frequência de cruzamento (controlador PI de tensão do barramento CC)	$\omega_{cv} = 16,33 \text{ rad/s}$
Margem de fase (PI do barramento CC)	$PM_v = 86,83^\circ$
Ganhos do controlador PI do PLL	$k_{ppll} = 424,3; k_{ipll} = 32234$
Frequência de cruzamento (PI-PLL)	$\omega_{cpll} = 430,874 \text{ rad/s}$
Margem de fase (PI do controlador PLL)	$PM_{pll} = 80^\circ$
Passo do filtro adaptativo (AF- $\alpha\beta$ -pPLL)	$\mu = 0,007$
Frequência de amostragem (AF- $\alpha\beta$ -pPLL)	$T = 16,66 \mu\text{s}$
Ganho do filtro adaptativo (AF- $\alpha\beta$ -pPLL)	$K_c = 420$
Frequência de corte do algoritmo SRF (FPB Butterworth de 2ª ordem)	$f_c = 30 \text{ Hz}$
Ganhos do controlador PI de corrente do conversor Buck	$k_{pi,b} = 84,64; k_{il,b} = 170880$
Frequência de cruzamento (PI de corrente do conversor Buck)	$\omega_{c,l,b} = 3833 \text{ rad/s}$
Margem de Fase (PI de corrente do conversor Buck)	$PM_{i,b} = 65^\circ$

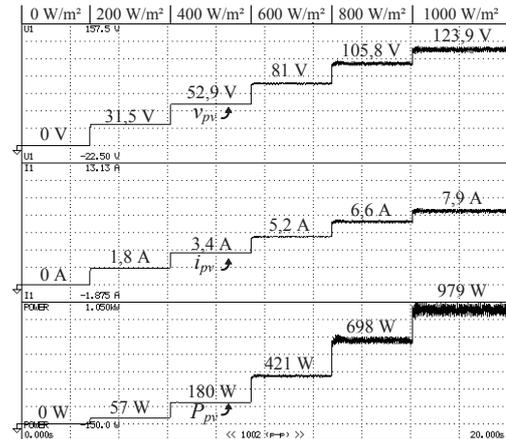


Fig. 7. Resultados experimentais de variação na irradiância solar, considerando uma carga fixa e temperatura constante ($R_o=15,7\Omega$ e $T=25^\circ\text{C}$): tensão de saída do EEPV (v_{pv}), corrente de saída do EEPV (i_{pv}), potência fornecida pelo EEPV (P_{pv}) (22,5V/div, 1,875A/div, 150W/div; 2s/div).

TABELA III

Comparação Entre Valores Teóricos e Práticos Mediante Alteração da Irradiância Solar, com Resistência Constante em 15,7 Ω e Temperatura em 25 °C

Irradiância (W/m²)	i_{pv}			v_{pv}		
	Teórico (A)	Prático (A)	Erro (%)	Teórico (V)	Práticos (V)	Erro (%)
200	1,7	1,7	0,0	26,6	27,0	1,5
400	3,38	3,4	0,6	53,1	52,9	-0,4
600	5,1	5,1	0,0	79,7	79,4	-0,4
800	6,7	6,6	1,5	105,6	105,8	0,2
1000	7,9	7,9	0,0	124,1	123,9	0,2

Na sequência, o sistema proposto foi avaliado mediante variações na resistência de carga, mantendo os parâmetros de irradiância solar e temperatura constantes em 1000W/m² e 25°C, respectivamente, conforme mostrado na Figura 8. O principal objetivo neste teste é avaliar se o EEPV é capaz de reproduzir as grandezas de tensão e corrente para uma determinada curva característica $i_{pv} \times v_{pv}$ desejada.

Percebe-se que ao variar a carga, o ponto de operação do emulador PV é alterado. Desta forma, este teste é importante para elucidar a relação não linear corrente-tensão de um painel PV, bem como demonstrar como a busca do ponto de máxima potência de um determinado arranjo PV pode ser realizada.

A Tabela IV apresenta um resumo comparativo entre os valores teóricos e práticos da corrente i_{pv} e da tensão v_{pv} do EEPV, os quais foram obtidos por meio dos resultados mostrados na Figura 8.

Na Figura 9 é apresentada a curva característica $i_{pv} \times v_{pv}$ teórica do arranjo PV (cor azul) e sobre esta são inseridos os resultados obtidos experimentalmente (cor vermelha), mediante variações na resistência de carga, considerando a irradiância solar e a temperatura constantes ($G=1000 \text{ W/m}^2$ e $T=25^\circ\text{C}$). Pode-se observar que o sistema educacional proposto consegue reproduzir a curva $i_{pv} \times v_{pv}$ para um arranjo PV desejado com um erro máximo de 3,4% (0,1 A) para a corrente e inferior a 1,6% (1,7 V) para a tensão. Isto demonstra que o EEPV tem um bom desempenho estático e boa capacidade na sintetização das curvas desejadas.

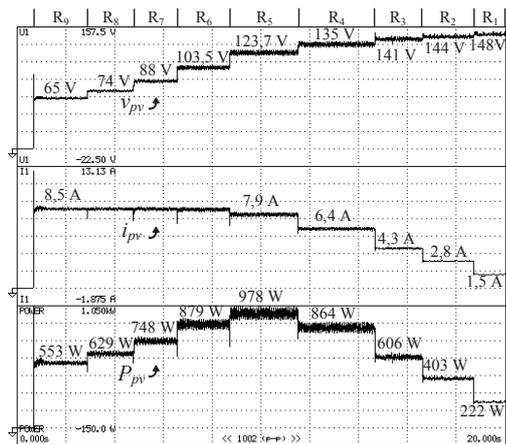


Fig. 8. Resultados experimentais considerando variações na carga, mantendo a irradiância solar e temperatura constantes ($G=1000\text{W/m}^2$ e $T=25^\circ\text{C}$): tensão de saída do EEPV (v_{pv}), corrente de saída do EEPV (i_{pv}), potência fornecida pelo EEPV (p_{pv}) (22,5V/div, 1,875A/div, 150W/div; 2s/div).

TABELA IV

Comparação Entre os Valores Teóricos e Práticos Mediante Variação na Carga, com Irradiância Solar e Temperatura Constantes ($G=1000\text{W/m}^2$ e $T=25^\circ\text{C}$)

Resistência de carga R_0 (Ω)	i_{pv}			v_{pv}			
	Teórico (A)	Prático (A)	Erro (%)	Teórico (V)	Prático (V)	Erro (%)	
R_1	100,0	1,5	1,5	0,0	147,5	148,0	0,3
R_2	50,0	2,9	2,8	-3,4	144,8	144,0	-0,5
R_3	33,3	4,2	4,3	2,4	141,7	141,0	-0,5
R_4	21,4	6,3	6,4	1,6	135,2	135,0	-0,2
R_5	15,7	7,9	7,9	0,0	124,1	123,7	-0,3
R_6	12,5	8,4	8,5	0,0	105,2	103,5	-1,6
R_7	10,3	8,5	8,5	0,0	87,2	88,0	0,9
R_8	8,8	8,5	8,5	0,0	74,5	74,0	-0,7
R_9	7,7	8,5	8,5	0,0	65,2	65,0	-0,3

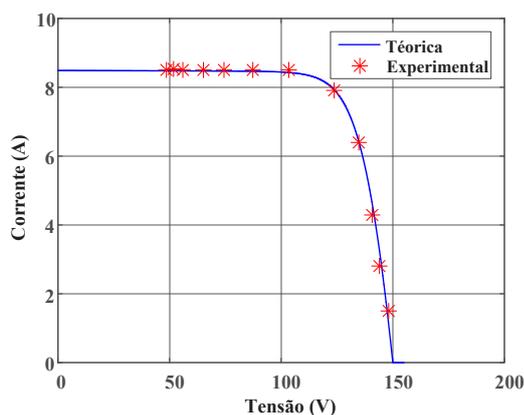


Fig. 9. Resultados experimentais: comparação entre a curva $i_{pv} \times v_{pv}$ teórica do arranjo PV e valores obtidos experimentalmente, considerando irradiância solar e temperatura constantes ($G=1000\text{W/m}^2$ e $T=25^\circ\text{C}$).

Na Figura 10 é mostrado o comportamento da tensão no barramento CC (v_{dc}) ao se realizar transitórios de potência de carga no EEPV, de 0 a 100% e de 100 a 0%. Verifica-se que o controlador do barramento CC consegue manter o valor médio da tensão especificado em projeto, ou seja, $v_{dc}^* = 250\text{V}$. Observa-se que, apesar das variações na tensão do barramento CC, não são causados distúrbios na sintetização

da tensão v_{pv} e corrente i_{pv} do arranjo PV emulado, uma vez que a tensão mínima do barramento CC é sempre superior à tensão máxima a ser sintetizada pelo EEPV.

O comportamento da corrente drenada pelo sistema educacional é mostrado na Figura 11. A partir deste resultado demonstra-se que o EEPV drena da rede elétrica uma corrente quase senoidal com taxa de distorção harmônica (TDH) medida igual a 1,5%. Já o fator de potência (FP) medido é próximo de um ($\text{FP}=0,99$). Desta forma, fica evidenciado que ao drenar uma corrente senoidal da rede elétrica com alto FP e baixa TDH, o EEPV não deteriora a qualidade da energia elétrica da rede.

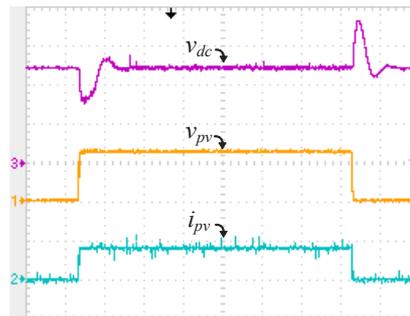


Fig. 10. Resultados experimentais demonstrando o comportamento dinâmico da tensão no barramento CC (v_{dc}) sob transientes na potência de saída do EEPV (100V/div, 10A/div, 1s/div).

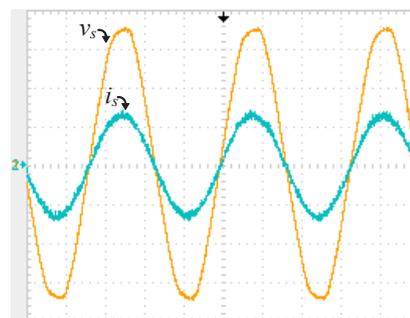


Fig. 11. Resultados experimentais demonstrando o comportamento senoidal da corrente drenada da rede elétrica (i_c) quando o EEPV opera em potência nominal (50V/div, 10A/div, 50ms/div).

IV. APLICATIVO EDUCACIONAL

Esta seção tem o objetivo de apresentar e elucidar a ferramenta computacional gráfica proposta para o ensino de sistemas PV. A PGC foi desenvolvida utilizando a linguagem de programação Java, e através de um conversor serial/USB (FT232R) é realizada a comunicação com o DSC, possibilitando o envio e recebimento de informações do EEPV, como pode ser observado na Figura 1. Sendo assim, a PGC recebe os valores de tensão (v_{pv}) e corrente (i_{pv}) do EEPV, os quais são obtidos por meio das leituras dos conversores A/D do DSC. Desse modo, os resultados apresentados na PGC, bem como nesta seção, se tratam de resultados experimentais.

Destaca-se que com o intuito de flexibilizar o ensino de sistemas PV a ferramenta proposta possui uma lista pré-definida com modelos comerciais de painéis PV, permitindo a seleção do modelo desejado. Adicionalmente, é possível emular um modelo não cadastrado no aplicativo, selecionando o modelo “Novo Modelo PV” nessa lista suspensa (último item da lista).

Ao selecionar um modelo cadastrado, parâmetros pré-definidos são carregados nas caixas de textos, os quais correspondem às especificações obtidas nas folhas de dados do fabricante, assim como as variáveis utilizadas no modelo matemático do painel PV. Desse modo, é necessário o preenchimento de todos os campos ao emular um modelo não cadastrado na PGC.

A ferramenta computacional possui armazenado os valores das resistências R_s e R_p referentes aos respectivos painéis PV cadastrados. Assim, para cada novo modelo de painel é necessário cadastrar novos valores de R_s e R_p , os quais podem ser determinados a partir das metodologias propostas em [32], [33] ou através de solução computacional [34].

A PGC disponibiliza dois ambientes de testes (AT) ao usuário, sendo eles o AT1 e o AT2.

A Figura 12 apresenta a tela principal da ferramenta computacional, a qual está relacionada ao AT1. Neste

ambiente é possível escolher um modelo pré-definido de painel PV estudado (neste trabalho o painel da *SolarWorld SW 245* foi adotado). Pode-se notar que os parâmetros apresentados na ferramenta computacional são os mesmos dados fornecidos pelo fabricante (Tabela I) e as variáveis apresentadas no modelo matemático do painel PV (Seção II.A).

Desta forma, o AT1 possibilita a interação com as curvas características corrente-tensão ($i_{pv} \times v_{pv}$) e potência-tensão ($p_{pv} \times v_{pv}$) do arranjo PV, as quais são obtidas a partir do modelo matemático. As referidas curvas são plotadas na cor verde, e sobre estas é plotado, na cor vermelha, o ponto de operação do sistema. Nota-se que é possível verificar se o sistema conectado ao EEPV (carga ou conversor CC-CA) está rastreando a máxima potência disponível no arranjo PV emulado, conforme mostram as Figuras 12.a e 12.b.



Fig. 12. Ferramenta Computacional Gráfica, Ambiente de Teste 1, variação na resistência de carga: (a) Curva ($p_{pv} \times v_{pv}$); (b) Curva ($i_{pv} \times v_{pv}$); (c) formas de onda de tensão e corrente na saída do EEPV; (d) forma de onda da potência de saída do EEPV.

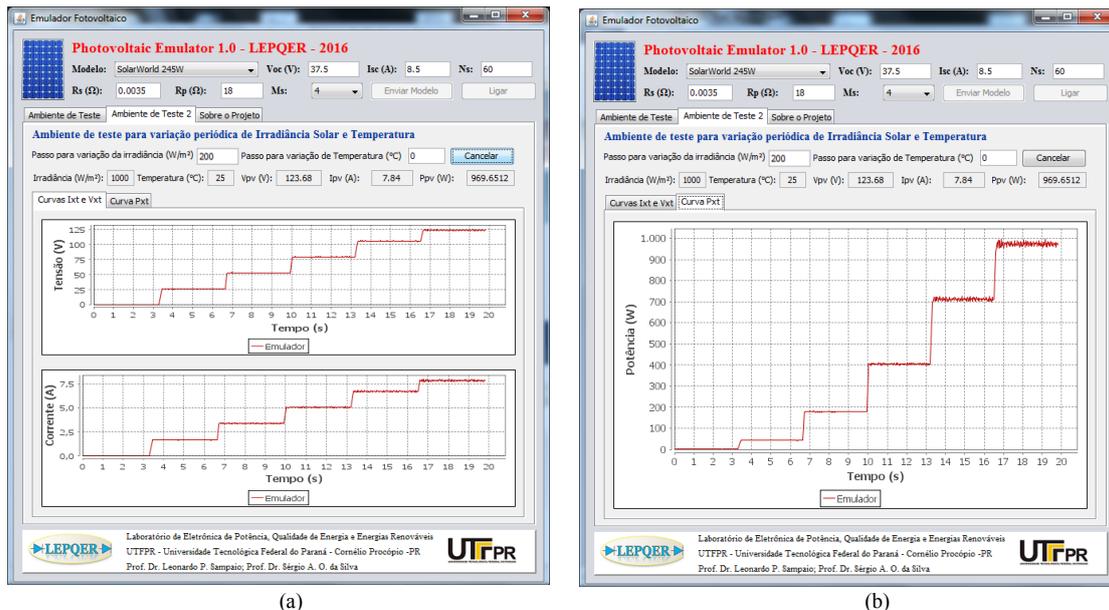


Fig. 13. Ferramenta Computacional Gráfica, Ambiente de Teste 2, variação na irradiância solar de 0 a 1000W/m²: (a) formas de onda de tensão e corrente na saída do EEPV; (b) forma de onda da potência de saída do EEPV.

Adicionalmente, o AT1 permite a alteração em tempo real da irradiância solar (G) e temperatura (T), com monitoramento da tensão e da corrente de saída do EEPV, permitindo visualizar as formas de ondas de tensão (v_{pv}), corrente (i_{pv}) e potência (p_{pv}) de saída do EEPV. As Figuras 12.c e 12.d apresentam o AT1 considerando a irradiância solar e temperatura fixados aos estabelecidos em STC, ou seja, $G = 1000\text{W/m}^2$ e $T = 25^\circ\text{C}$, enquanto são realizadas variações na resistência de carga. Este teste é idêntico ao apresentado na Figura 8, no entanto, os resultados agora podem ser visualizados no ambiente computacional proposto.

O procedimento proposto ao estudo do arranjo PV utilizando a ferramenta computacional operando no AT1 pode ser realizado seguindo as seguintes etapas: i. escolha do modelo do painel ou definição dos parâmetros do painel PV desejado; ii. aciona-se o botão “Enviar Modelo” de forma que os todos os parâmetros sejam enviados ao DSC; iii. aciona-se o botão “Ligar” de forma que os parâmetros relacionados ao modelo do painel PV sejam desabilitados e o EEPV possa entrar em operação em STC. Nesta etapa são habilitadas as modificações realizadas na irradiância solar e temperatura. Neste ambiente de testes, o usuário poderá alterar a irradiância solar e temperatura e visualizar as principais formas de ondas. Cabe ressaltar que enquanto o AT1 estiver ativado o AT2 estará desabilitado.

A Figura 13 exhibe a ferramenta computacional considerando o AT2. Neste ambiente é possível realizar a variação da irradiância solar e da temperatura de forma automatizada, adotando um degrau de incremento definido pelo estudante/usuário para ambas variáveis, ou seja, W/m^2 para a irradiância solar e $^\circ\text{C}$ para a temperatura. Estas variações são incrementadas em um intervalo de tempo equivalente a 3,3 segundos.

Na Figura 13 é mostrado um teste de variação na irradiância solar com incremento de 200W/m^2 , mantendo a temperatura constante em 25°C e uma carga de $15,7\ \Omega$, onde são

apresentadas as formas de ondas de tensão, corrente e potência de saída do EEPV.

O estudo do painel PV utilizando o AT2 pode ser realizado considerando as seguintes etapas: i. escolha do modelo do painel ou definição dos parâmetros para o painel PV desejado; ii. aciona-se o botão “Enviar Modelo” de forma que os parâmetros sejam enviados ao DSC; iii. aciona-se a aba “Ambiente de Teste 2”; iv. aciona-se o botão “Iniciar”. Após acionar este botão os parâmetros relacionados com o modelo do painel PV serão desabilitados e o botão será rotulado para “Cancelar”. Assim, o EEPV entrará em operação com irradiância solar igual a zero e temperatura igual a 25°C , e a cada intervalo de tempo de 3,3s haverá um incremento na irradiância solar e/ou temperatura, conforme valor informado na ferramenta. Quando a irradiância solar atingir o valor de STC o EEPV continuará operando por mais 3,3s e então será desligado. Neste ambiente o estudante/usuário também poderá visualizar as principais formas de ondas disponíveis. Enquanto o AT2 estiver ativado, o AT1 ficará desabilitado. Além disso, em qualquer momento este procedimento poderá ser cancelado, bastando acionar o botão “Cancelar”.

Adicionalmente, com o objetivo de exemplificar as operações realizadas pela PGC, a Figura 14 apresenta o fluxograma resumido das funcionalidades da ferramenta computacional, na qual é possível verificar o comportamento do aplicativo tanto no AT1 quanto no AT2.

VI. CONCLUSÕES

Este trabalho apresentou uma PGC para auxílio no ensino de sistemas PV. Esta é capaz de reproduzir diferentes curvas características de um painel PV desejado, a partir do controle da corrente de referência do conversor Buck, com possibilidade de modificações nas variáveis climáticas, tais como irradiância solar e temperatura. O controle da tensão do barramento CC foi realizado a partir de um retificador controlado, com o objetivo de drenar uma corrente senoidal da

rede elétrica com baixa TDH. Além disso um FP próximo de um é obtido.

A interface gráfica foi desenvolvida em linguagem de programação Java, permitindo a definição do painel PV a ser emulado, além de permitir, em tempo real, a visualização das curvas características e das formas de ondas de tensão, corrente e potência de saída do EEPV. Adicionalmente, a ferramenta apresenta dois ambientes de testes. O primeiro permite a alteração manual da irradiância solar e temperatura, enquanto o segundo realiza a alteração destas mesmas variáveis de forma automática com base em um degrau de incremento preestabelecido pelo usuário. A comunicação entre a ferramenta computacional gráfica e o DSC foi realizada a partir da conexão USB.

A funcionalidade do sistema proposto pôde ser avaliada por resultados experimentais, bem como através de uma PGC flexível, intuitiva e interativa. Tais resultados demonstram que esta é capaz de sintetizar, em tempo real, as curvas características de um arranjo PV em estudo.

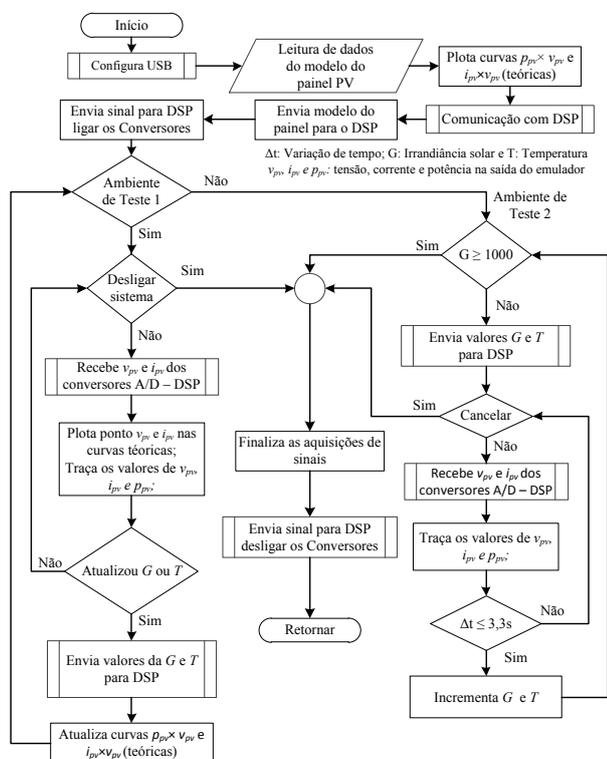


Fig. 14. Fluxograma resumido das operações da PGC.

REFERÊNCIAS

[1] F. Blaabjerg, Y. Yang, K. Ma, X. Wang, “Power Electronics - the Key Technology for Renewable Energy System Integration”, in *Proc. of ICRERA*, pp. 1618-1626, 2015.

[2] REN21, “Renewables 2016: Global Status Report (GSR)”, 2016. [Online]. Disponível: www.ren21.net.

[3] M. A. G. Brito, L. P. Sampaio, L. G. Junior, C. A. Canesin, “Research on Photovoltaics: Review, Trends and Perspectives”, in *Proc. of COBEP*, pp. 531-537, 2011.

[4] 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, nº 3, pp. 592-600, Ago. 2012.

[5] R. F. Coelho, W. M. Santos, D. C. Martins, “Influence of Power Converters on PV Maximum Power Point Tracking Efficiency”, in *Proc. of INDUSCON*, pp. 1-8, 2012.

[6] E. N. Chaves, L. S. Vilefort, H. T. M. Carvalho, E. A. A. Coelho, L. C. G. Freitas, J. B. Vieira Jr, L. C. Freitas, “Projeto de Controlador Baseado no Modelo Interno Utilizado em P&O-MPPT e conversor CC-CC boost quadrático”, *Eletrônica de Potência-SOBRAEP*, vol. 20, nº 4, pp. 383-394, Nov. 2015.

[7] F. M. Oliveira, S. A. O. Silva, F. R. Durand, L. P. Sampaio, V. D. Bacon, L. B. G. Campanhol, “Grid-tied Photovoltaic System Based on PSO MPPT Technique with Active Power Line Conditioning”, *IET Power Electronics*, vol. 9, nº 6, pp. 1180-1191, Maio 2016.

[8] M. A. G. Brito, L.P. Sampaio, J. C. U. Peña, C. A. Canesin, “Familia de Inversores Integrados Monofásicos e Trifásicos”, *Eletrônica de Potência-SOBRAEP*, vol. 19, nº 4, pp. 368-372, set./nov. 2014.

[9] D. Barater, E. Lorenzani, C. Concari, G. Franceschini, G. Buticchi, “Recent Advances in Single-Phase Transformerless Photovoltaic Inverters”, *IET Renewable Power Generation*, vol. 10, nº 2, pp. 260-273, Fev. 2016.

[10] G. R. Walker, P. C. Sernia, “Cascaded DC-DC Converter Connection of Photovoltaic Modules”, *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 19, nº 4, pp. 1130-1139, Jul. 2004.

[11] S. B. Kjaer, J. K. Pedersen, F. Blaabjerg, “A Review of Single-Phase Grid-Connected inverters for Photovoltaic Modules”, *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 41, nº 5, pp. 1292-1306, Set./Out. 2005.

[12] M.A.G. Brito, L.P. Sampaio, M. G. Alves, C.A. Canesin, “Inversor Buck-Boost Tri-State Integrado Trifásico para Aplicações Fotovoltaicas”, *Eletrônica de Potência-SOBRAEP*, vol. 19, nº. 1, pp. 81-89, Fev. 2014.

[13] B. K. Bose, “The past, present, and future of power electronics [Guest Introduction]”, *IEEE Transactions on Industrial Electronics Magazine*, vol. 3, nº 2, pp. 7-11, Jun. 2009.

[14] V. G. Agelidis, “The future of power electronics/power engineering education: challenges and opportunities”, in *Proc. of IEEE Workshop in Power Electronics Education*, vol. 1, pp. 1-8, 2005.

[15] 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, nº 3, pp. 173-178, Ago. 2015.

[16] 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, nº 1, pp. 32-38, Fev. 2016.

[17] S. Bonho, R. Pizzio, F. A. B. Batista, C. A. Petry, “Teaching Power Electronics with Engineering Interdisciplinary Projects”, in *Proc. of COBEP/SPEC*, Fortaleza, pp. 1-6, 2015.

- [18] J. A. Pomilio, C. A. Canesin, F. L. M. Antunes, F. S. dos Reis, L. P. Sampaio, "Power Electronics Courses for the New Paradigms of the Electrical System", in *Proc. of COBEP*, pp. 1027-1031, 2011.
- [19] F. S. Garcia, A. A. Ferreira, J. A. Pomilio, "Plataforma de Ensino de Eletrônica de Potência Versátil e de Baixo Custo", *Eletrônica de Potência-SOBRAEP*, vol. 13, nº 2, pp. 85-90, Maio 2008.
- [20] J. M. G. Muñoz, J. García, P. García, P. Arboleya, "Laboratory": A Project-based Learning Example on Power Electronics", *Eletrônica de Potência-SOBRAEP*, vol. 4, nº 14, pp. 430-437, Nov. 2014.
- [21] L. P. Sampaio, M. A. G. Brito, G. A. Melo, C. A. Canesin, "Computer Tools to Aid the Learning and Design Steps for Photovoltaic Systems", in *Proc. of COBEP*, pp. 1021-1026, 2011.
- [22] L. Gomes, S. Bogosyan, "Current Trends in Remote Laboratories", *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 56, nº 12, pp. 4744-4756, Dez. 2009.
- [23] I. E. Achumba, D. Azzi, V. L. Dunn, G. A. Chukwudebe, "Intelligent Performance Assessment of Students' Laboratory Work in a Virtual Electronic Laboratory Environment", *IEEE Transactions on Learning Technologies*, vol. 6, nº 2, pp. 103-116, Abr./Jun. 2013.
- [24] C. A. Canesin, F. A. S. Gonçalves, L. P. Sampaio, "Simulation Tools for Power Electronics Courses, Based in Java Technologies", *Eletrônica de Potência-SOBRAEP*, vol. 13, nº 2, pp. 91-98, Maio 2008.
- [25] P. F. Miaja, D. G. Lamar, M. A. P. de Azpeitia, A. Rodriguez, M. Rodriguez, M. M. Hernando, "A Switching-Mode Power Supply Design Tool to Improve Learning in a Power Electronics Course", *IEEE Transactions on Education*, vol. 54, nº 1, pp. 104-113, Fev. 2011.
- [26] C. Goldemberg; E. L. Pellini, W. Kaiser, W. Komatsu, "A Python Based Power Electronics E-learning Tool", in *Proc. of COBEP*, pp. 1088-1092, 2009.
- [27] R. O. Brioschi, "Educational Innovation in Power Electronic's Education with Multimedia's Resources: Production and Implications in Education Practice", in *Proc. of COBEP*, pp. 1-6, 2015.
- [28] 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, nº 3, pp. 141-146, Ago. 2008.
- [29] S. Fukuda, T. Yoda, "A Novel Current-Tracking Method for Active Filters Based on a Sinusoidal Internal Model", *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 37, nº 3, pp. 888-895, Mai/Jun. 2001.
- [30] B. A. Angélico, L. B. G. Campanhol, S. A. O. Silva, "Proportional-Integral/Proportional-Integral-Derivative Tuning Procedure of a Single-Phase Shunt Active Power Filter Using Bode Diagram", *IET Power Electronics*, vol. 7, nº 10, pp. 2647-2659, Ago. 2014.
- [31] V. D. Bacon, S. A. O. Silva, L. B. G. Campanhol, B. A. Angélico, "Stability Analysis and Performance Evaluation of a Single-Phase Phase-Locked Loop Algorithm Using a Non-Autonomous Adaptive Filter", *IET Power Electronics*, vol. 7, nº 8, pp. 2081-2092, Ago. 2014.
- [32] S. Shongwe, M. Hanif, "Comparative Analysis of Different Single-Diode PV Modeling Methods", *IEEE Journal of Photovoltaics*, vol. 5, nº 3, pp. 938-946, Maio 2015.
- [33] 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, nº 5, pp. 1198-1208, Maio 2009.
- [34] 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.

DADOS BIOGRÁFICOS

Leonardo Poltronieri Sampaio, nascido em São José do Rio Preto (SP), é engenheiro eletricitista (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 e IEEE PES.

Sérgio Augusto Oliveira da Silva, nascido em Joaquim Távora (PR), é engenheiro eletricitista (1987) e mestre em engenharia elétrica (1989) pela Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC); e doutor em engenharia elétrica (2001) pela Universidade Federal de Minas Gerais. É professor do Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campus Cornélio Procópio (UTFPR-CP) desde 1993. É coordenador do Laboratório de Eletrônica de Potência, Qualidade de Energia e Energias Renováveis (LEPQER). Suas principais áreas de interesse são: condicionadores ativos de energia elétrica, sistemas de energia ininterrupta (UPS), sistemas de controle empregando DSC, qualidade da energia elétrica e sistemas de energia renováveis. É membro da SOBRAEP e IEEE PES.

Alessandro do Nascimento Vargas, nascido em Vitória (ES), é engenheiro da computação pela Universidade Federal do Espírito Santo (2002), mestre e doutor em Engenharia Elétrica pela Universidade Estadual de Campinas em (2004) e (2009), respectivamente. É professor do Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campus Cornélio Procópio (UTFPR-CP) desde 2007. Tem experiência na área de Engenharia Elétrica, com ênfase em Controle de Processos Eletrônicos, Retroalimentação, atuando principalmente nos seguintes temas: estabilidade e controle de sistemas estocásticos, sistemas com saltos markovianos, processos de decisão markoviano, controle ótimo e robusto, sistemas lineares variantes no tempo, métodos matemáticos e sistemas dinâmicos.