

ANÁLISE COMPARATIVA DE ALGORITMOS DE MPPT BIOINSPIRADOS NOS LOBOS CINZENTOS EMPREGANDO UM SISTEMA FOTOVOLTAICO CONECTADO À REDE ELÉTRICA TRIFÁSICA

Leonardo P. Sampaio, Maykon V. Rocha, Sérgio A. O. da Silva, Marcelo H. F. Takami
Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, Cornélio Procópio – PR, Brasil
e-mail: sampaio@utfpr.edu.br, maykon@alunos.utfpr.edu.br, augus@utfpr.edu.br, marcelotakami@utfpr.edu.br

Resumo – Este trabalho apresenta um sistema fotovoltaico (FV) trifásico de duplo estágio de conversão de energia conectado à rede elétrica, o qual é capaz de lidar com problemas de sombreamentos parciais em arranjos FV. Condições de sombreamentos parciais podem afetar o desempenho de sistemas FV, uma vez que as técnicas tradicionais de seguimento do ponto de máxima potência (MPPT – *Maximum Power Point Tracking*) podem operar em pontos de máximos locais de potência ao invés de máximos globais. Sendo assim, são apresentadas quatro técnicas de MPPT bioinspiradas no método de otimização dos lobos cinzentos (GWO - *Grey Wolf Optimization*), as quais são capazes de extrair o ponto de máximo global de potência do sistema. Tais técnicas são denominadas neste trabalho como GWO, GWO-Beta, GWO-IC (*Incremental Conductance*) e GWO-P&O (*Perturb and Observe*). As referidas técnicas são avaliadas e comparadas uma com as outras empregando um sistema FV composto por um conversor CC/CC Boost e um inversor trifásico a três braços. Por meio de resultados de simulação e experimentais o desempenho e eficácia das quatro técnicas de MPPT são avaliadas levando em consideração o tempo de convergência, as oscilações de potência em regime permanente, assim como a eficiência na busca do ponto de máxima potência.

Palavras-Chave – Otimização dos Lobos Cinzentos, Sistema Fotovoltaico, Sombreamento Parcial, Técnicas de Seguimento do Ponto de Máxima Potência.

COMPARATIVE ANALYSIS OF MPPT ALGORITHMS BIOINSPIRED ON THE GREY WOLF EMPLOYING A THREE-PHASE GRID-TIED PHOTOVOLTAIC SYSTEM

Abstract – This paper presents a double-stage three-phase grid-tied photovoltaic (PV) system capable to deal with partial shading condition issues in PV arrays. Partial shading conditions can affect the overall performance of PV system, once traditional techniques employed to perform the maximum power point tracking (MPPT) can operate in local maximum power points

(LMPP) instead global maximum power point (GMPP). Therefore, four MPPT techniques based on the grey wolf optimization (GWO) are presented, which are able to track the GMPP. Such techniques are denominated in this paper as GWO, GWO-Beta, GWO-IC (*Incremental Conductance*) and, GWO-P&O (*Perturb and Observe*). The referred MPPT techniques are evaluated and compared to each other employing a PV system composed of a step-up DC/DC converter and a three-leg three-phase inverter. By means of simulation and experimental results, the performance and effectiveness of the MPPT techniques are evaluated considering the convergence time, the power oscillations in steady-state, as well as the maximum power point tracking efficiency.

Keywords – Grey Wolf Optimization, Maximum Power Point Tracking Techniques, Partial Shading, Photovoltaic System.

I. INTRODUÇÃO

Atualmente, o novo cenário de geração de energia elétrica baseado em geração distribuída tem motivado a utilização de fontes alternativas de energia elétrica (solar, eólica, célula à combustível, entre outras) em substituição e/ou complemento às fontes de energia tradicionais existentes, tais como carvão, petróleo e gás natural [1]-[3].

Neste contexto, a energia solar fotovoltaica (FV) tem exercido um papel de destaque e importância dentre as várias fontes alternativas de energia elétrica existentes no atual cenário de geração distribuída (GD) de energia [4], [5]. Neste sentido, pesquisas e novos investimentos envolvendo a energia solar são de grande importância, a fim de melhorar a eficiência do sistema de conversão da energia solar em elétrica, bem como a eficiência dos equipamentos eletro/eletrônicos que fazem a utilização e condicionamento desta energia [5]-[7].

Frequentemente, são adotadas técnicas para realizar o seguimento do ponto de máxima potência (MPPT – *Maximum Power Point Tracking*) nos arranjos FV, a fim de melhorar a eficiência no aproveitamento da energia fotovoltaica. Métodos tradicionais perturbativos, tais como, Perturba e Observa (P&O – *Perturb and Observe*) e condutância incremental (IC – *Incremental Conductance*), têm sido amplamente utilizados na realização do MPPT, pelo fato de serem de fácil implementação e de convergirem rapidamente ao ponto de máxima potência (MPP – *Maximum Power Point Tracking*) [8]-[11]. No entanto, em diversas situações de operação, o arranjo FV pode ser submetido a

Artigo submetido em 14/05/2018. Primeira revisão em 13/07/2018. Aceito para publicação em 08/02/2019 por recomendação do Editor Marcello Mezaroba. <http://dx.doi.org/10.18618/REP.2019.1.0006>.

condições de sombreamento parcial, ou seja, pode receber irradiância solar não uniforme. Nesta condição, o sistema FV pode rastrear, em sua curva característica de saída, algum ponto de máxima potência local (LMPP) ao invés do ponto de máxima potência global (GMPP) [11]-[13].

Embora as técnicas de MPPT perturbativas, tais como a IC e P&O, apresentarem bons resultados, seus desempenhos são limitados devido aos seguintes problemas: 1) dependência do tamanho do passo de incremento, uma vez que passos pequenos implicam em dinâmicas lentas, enquanto passos grandes implicam na redução da eficiência do sistema; 2) oscilações em torno do MPP em operações transitórias e estacionárias; e 3) seguimento do LMPP em situações de sombreamento parcial [11], [15].

Por outro lado, com o objetivo de contornar os problemas de sombreamento parcial em arranjos FV, diversos trabalhos apresentados na literatura têm propostos metodologias de otimização utilizando algoritmos meta-heurísticos [15]-[19]. De forma geral, os algoritmos de otimização são inspirados em comportamentos de animais/insetos da natureza, tais como: algoritmo de enxame de partículas (PSO – *Particle Swarm Optimization*), algoritmo de colônias de formigas (ACO – *Ant Colony Optimization*), algoritmo de otimização dos lobos cinzentos (GWO - *Grey Wolf Optimization*), dentre outros [15]-[19].

O algoritmo meta-heurístico PSO foi empregado em [15], para realizar o MPPT de um sistema FV submetido a condições de sombreamento parcial, nas quais foi possível observar que o algoritmo MPPT-PSO conseguiu convergir para o GMPP em todas as condições de testes, apresentado um desempenho superior ao algoritmo de MPPT baseado na técnica P&O.

Com desempenho e comportamento similar ao MPPT-PSO, o método de MPPT-ACO apresentado em [16] também mostrou ser capaz de sempre buscar o GMPP, independente das condições climáticas. Por outro lado, em [17] foi proposto uma combinação entre o método ACO e P&O para realizar o MPPT, onde observou-se que para diferentes condições de irradiância solar e temperatura, o algoritmo proposto convergiu mais rapidamente para o GMPP, bem como apresentou menores oscilações em regime permanente quando comparado aos algoritmos de MPPT baseados em PSO e ACO operando isoladamente.

Neste sentido, dentre os métodos de otimização bioinspirados, o método GWO tem se destacado na realização do MPPT, o qual demonstra ser uma metodologia eficiente na busca e convergência ao GMPP [18], [19]. Por outro lado, pelo fato do método GWO ser *online*, qualquer perturbação, ou seja, quaisquer pequenas variações de irradiância solar e/ou temperatura leva o algoritmo a realizar novas buscas do GMPP originando maiores oscilações no sistema e, conseqüentemente, minimizando a eficiência durante os intervalos de varredura. Desta forma, em [19], foi proposto um algoritmo híbrido, onde, primeiramente, o GMPP é buscado utilizando somente o método GWO e, após a convergência, é realizada a troca para o método P&O, o qual é capaz de manter o sistema operando no ponto de máxima mesmo quando ocorrem pequenas perturbações na irradiância solar e temperatura.

Portanto, este trabalho apresenta a implementação de um sistema FV trifásico de duplo estágio conectado à rede elétrica, o qual é constituído por um conversor CC-CC Boost e um inversor de tensão a três braços (3-L). Para realizar o MPPT, são empregados o algoritmo GWO operando isoladamente, bem como as combinações deste com os métodos de MPPT tradicionais Beta, IC e P&O, originando os algoritmos GWO-Beta, GWO-IC e GWO-P&O. A partir de resultados de simulação e experimentais, as técnicas de MPPT implementadas são comparadas e avaliadas considerando o tempo de convergência, a amplitude das oscilações em regime permanente no MPP e a eficiência do método. Em todos os testes, o arranjo FV é submetido a irradiância solar uniforme e não uniforme (sombreamento parcial).

II. DESCRIÇÃO DO SISTEMA

A Figura 1 apresenta o sistema FV adotado neste trabalho. O sistema é composto por um arranjo FV com dezesseis módulos fotovoltaicos (*SolarWorld SW245*), composto por duas *strings* em paralelo, onde cada *string* é constituída pela associação de oito módulos em série. A saída do arranjo FV é conectada um conversor CC-CC Boost, o qual é associado a um inversor trifásico 3-L. O sistema FV apresentado é capaz de gerar uma potência máxima em torno de 3,92 kWp em STC (*Standard Test Condition*).

A. Algoritmo para Geração das Referências de Corrente do Inversor 3-L

A Figura 2 apresenta o algoritmo completo para a geração das correntes de referências ($i_{L\alpha}^*$, $i_{L\beta}^*$) empregadas no controle do inversor 3-L conectado à rede elétrica. Como pode ser notado, as respectivas correntes de referência são geradas no referencial estacionário $\alpha\beta$ empregando a corrente direta do referencial síncrono ($i_{c\alpha}$) em conjunto com as coordenadas do vetor unitário síncrono $sen(\theta_{pll})$ e $cos(\theta_{pll})$. A corrente $i_{c\alpha}$ é obtida pelo sinal de saída do controlador de tensão do barramento CC, enquanto as coordenadas do vetor unitário síncrono são calculadas usando o ângulo de fase da rede elétrica (θ_{pll}), o qual é estimado por um sistema de detecção de ângulo de fase (PLL-*Phase-Locked Loop*) [20]. Por fim, as correntes do inversor no referencial $\alpha\beta$ ($i_{L\alpha}$ e $i_{L\beta}$) são controladas utilizando controladores proporcional-integral multi-ressonante (PI-MR).

B. Metodologia de Geração da Referência de Tensão do Barramento CC

No sistema FV de duplo estágio utilizado neste trabalho, o inversor 3-L é responsável tanto pelo controle da tensão do barramento CC quanto das correntes injetadas na rede elétrica. Já o MPPT, bem como a elevação do nível de tensão do barramento CC do arranjo FV são realizados pelo conversor Boost.

Deste modo, é necessário que a referência de tensão do barramento CC (V_{cc}^*) do inversor 3-L seja ajustado em um valor constante para garantir o adequado funcionamento do sistema. Neste trabalho, foi adotado $V_{cc}^* = 400$ V.

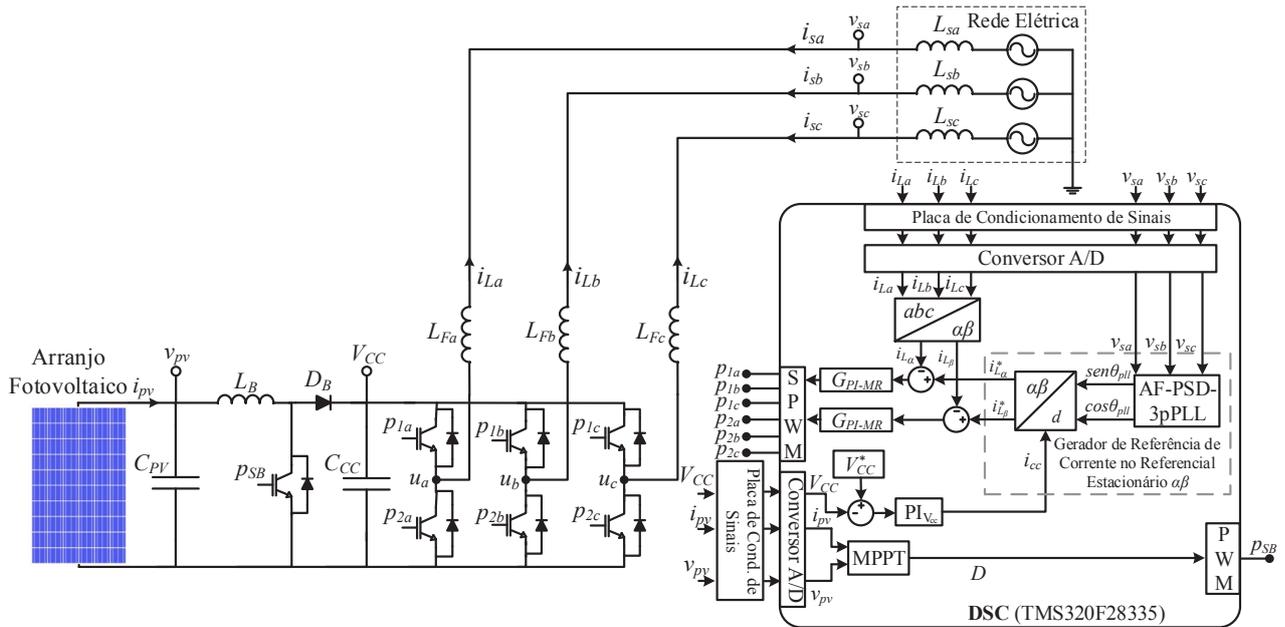


Fig 1. Esquema completo do sistema fotovoltaico trifásico de duplo estágio conectado à rede elétrica.

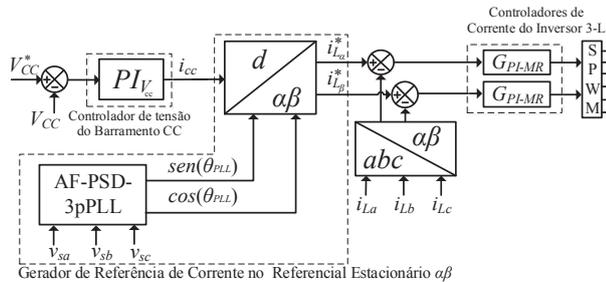


Fig. 2. Diagrama do gerador de referência de corrente baseado no SRF e da malha de controle de corrente do inversor 3-L.

C. Algoritmo PLL

As coordenadas do vetor unitário síncrono $sen(\theta_{pll})$ e $cos(\theta_{pll})$ foram determinadas empregando o sistema de PLL trifásico (AF-PSD-3pPLL) proposto em [20]. Este sistema utiliza três filtros adaptativos (AFs – *Adaptive Filters*) e um detector de sequência positiva (PSD – *Positive Sequence Detector*). Os AFs são responsáveis por extrair as componentes fundamentais das tensões da rede elétrica, enquanto o PSD extrai as componentes de tensão de sequência positiva. Desta forma, o AF-PSD-3pPLL consegue rejeitar, tanto harmônicos de tensão como as componentes de tensão de sequência negativa e zero da rede. A Figura 3 apresenta a configuração do sistema AF-PSD-3pPLL empregado.

D. Modelo Matemático do Inversor 3-L

Como pode ser observado na Figura 1, este trabalho utiliza filtros indutivos (L) para realizar o acoplamento entre o inversor 3-L e a rede elétrica. No projeto, bem como no modelo matemático do inversor 3-L, as indutâncias são consideradas idênticas ($L_{Fa} = L_{Fb} = L_{Fc}$), assim como suas respectivas resistências internas, ou seja, $R_{Lfa} = R_{Lfb} = R_{Lfc}$.

A modelagem do inversor 3-L é desenvolvida no referencial estacionário $\alpha\beta$, uma vez que se fosse realizada no referencial estacionário abc , apesar de linear e invariante no tempo, o modelo apresentaria acoplamento entre as

grandezas de entrada do sistema. Desta forma, as funções de transferências (FTs) do inversor 3-L são dadas por:

$$G_{iL\alpha\beta}(s) = \frac{V_{CC}}{L_f s + R_{L_f}} \quad (1)$$

onde $d_{\alpha\beta}(s)$ representa as razões cíclicas do inversor 3-L.

Neste trabalho são empregados controladores PI-MR, uma vez que as correntes de referências (i_{La} e $i_{L\beta}$) não são grandezas contínuas e um controlador convencional PI não garantiria erro nulo em regime permanente [15], [21]. A FT do controlador PI-MR é dada por:

$$G_{PI-MR}(s) = \frac{sK_{Pi} + K_{Li}}{s} + \sum_{m=1}^n \frac{sk_m}{s^2 + (m\omega_s)^2} \quad (2)$$

onde K_{Pi} e K_{Li} são os respectivos ganhos do controlador PI; k_m corresponde aos ganhos em uma dada frequência de ressonância; ω_s representa a frequência angular fundamental ($2\pi f_s$) e m representa a ordem das componentes harmônicas ($m = 1, 3, 5, \dots, n$). Neste trabalho é adotado $n = 7$, ou seja, $m = 1, 3, 5$ e 7 .

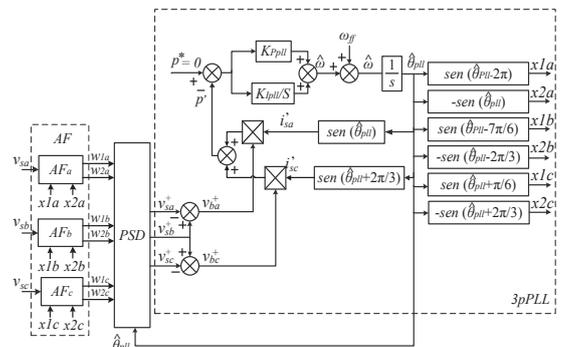


Fig. 3. Diagrama do sistema AF-PSD-3pPLL.

O diagrama das malhas de controle de corrente e do modelo médio do inversor 3-L são apresentados na Figura 4, onde K_{PWM} representa o ganho do modulador PWM, determinado por meio do valor de pico da portadora triangular do DSC (*Digital Signal Controller*).

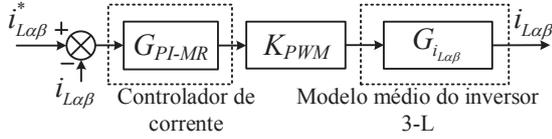


Fig. 4. Gráfico de fluxo de sinais das malhas de controle de corrente e o modelo médio do inversor 3-L.

III. TÉCNICAS DE MPPT BASEADAS NO GWO

Esta seção apresenta as técnicas de MPPT empregadas neste trabalho, as quais são uma combinação do método GWO com as técnicas tradicionais P&O, Beta e IC. Como o método GWO simula o comportamento dos lobos na caça da presa [22], quanto maior o número de lobos melhor será o processo de busca, porém, isto implica no aumento dos cálculos computacionais [19]. Desta forma, neste trabalho foi adotado um número total de lobos igual a 3 e de iterações igual a 50 [19]. O tamanho do passo para os métodos P&O, Beta e IC foi ajustado em $\Delta D = 0,01$, o limite de variação de potência foi definido em 300 W e a frequência de operação dos algoritmos em $f_{s_MPPT} = 4$ Hz. Estes parâmetros foram determinados experimentalmente a fim reduzir o tempo computacional, minimizar o tempo de convergência na busca do GMPP, assim como diminuir possíveis oscilações de potência em regime permanente.

A. Método de Otimização do Lobo Cinzento (GWO)

O método GWO simula o comportamento dos lobos cinzentos em busca de uma presa, o qual leva em conta sua pirâmide de liderança em seu processo natural de perseguição da presa na natureza [22]. Este algoritmo usa quatro tipos de lobos para compor a hierarquia, sendo eles: alfa (α), beta (β_w), gama (δ) e ômega (ω). O lobo α é considerado o líder da pirâmide, bem como o tomador de decisão na busca da presa, ou seja, o mesmo resulta na melhor solução do problema. Os lobos β_w e δ são considerados a segunda e terceira melhores soluções, respectivamente, de modo a ajudar o lobo α na tomada de decisões. Finalmente, ω representa os lobos restantes que seguem os líderes [18], [19], [22].

Neste algoritmo, o movimento do grupo de lobos \bar{x} depende da posição estimada da presa (\bar{x}_p) (melhor posição individualmente determinada), assim como da variação da posição dos lobos em torno da presa, tal como ocorre em uma caça real por um grupo de lobos. Desta forma, durante a caça, a presa vai sendo cercada pelos lobos e a variação de aproximação é determinada considerando a posição estimada da presa, a qual vai sendo subtraída desta posição através de uma ponderação por um valor aleatório entre [0,1] definido a cada iteração, conforme apresentado em [18]. O objetivo é fazer com que o grupo de lobos chegue a melhor solução possível para capturar a presa. As equações a seguir representam o comportamento de ataque a presa pelo grupo de lobos:

$$\bar{x}(i+1) = \bar{x}_p(i) - \bar{a} \cdot \bar{e} \quad (3)$$

$$\bar{e} = |\bar{f} \cdot \bar{x}_p(i) - \bar{x}_p(i)| \quad (4)$$

onde i é a iteração atual; \bar{e} , \bar{a} e \bar{f} representam os vetores do coeficiente; \bar{x}_p especifica o vetor de posição da presa; e \bar{x} se refere ao vetor de posição dos lobos cinzentos [18]. Os vetores \bar{a} e \bar{f} são determinados conforme:

$$\bar{a} = 2 \cdot \bar{b} \cdot \bar{r}_1 - \bar{b} \quad (5)$$

$$\bar{f} = 2 \cdot \bar{r}_2 \quad (6)$$

onde os componentes de \bar{b} diminuem linearmente de 2 a 0; \bar{r}_1 e \bar{r}_2 são vetores aleatórios em [0, 1]. Assim, o objetivo do método é tornar a grandeza \bar{x} próxima de \bar{x}_p , de modo que os lobos se aproximem da presa, para isso o valor de \bar{a} tenderá a zero.

Para o seguimento do MPP apresentado neste artigo, a razão cíclica (D) do conversor Boost é referente às posições dos lobos em cada estado (\bar{x}), conforme:

$$D(k+1) = D(k) - a \cdot e. \quad (7)$$

A função objetivo do algoritmo é determinado por:

$$P_{pv}(k) > P_{pv}(k-1) \quad (8)$$

onde $P_{pv}(k)$ é a potência atual, $P_{pv}(k-1)$ é a potência anterior na saída do arranjo FV e k é o valor da iteração.

A Figura 5 apresenta o fluxograma para o método GWO, onde, $P_{best,i}$ indica o melhor valor obtido na iteração i e G_{best} indica o melhor valor global encontrado pelo método.

B. Algoritmo de MPPT GWO-Beta

O algoritmo MPPT baseado no método Beta foi apresentado em [23], cuja variável intermediária β e a variável β^* utilizadas no algoritmo são dadas, respectivamente, por:

$$\beta = \ln\left(\frac{i_{pv}}{v_{pv}}\right) - c v_{pv} \quad (9)$$

$$\beta^* = \ln\left(\frac{i_{pvMPP}}{v_{pvMPP}}\right) - c v_{pvMPP} \quad (10)$$

onde v_{pv} e i_{pv} são as respectivas tensão e corrente de saída do arranjo FV; v_{pvMPP} e i_{pvMPP} são as respectivas tensão e corrente de MPP do arranjo FV em STC; e $c = q/(\eta k T N_s)$ é uma constante que depende da carga de elétrons (q), do fator de idealidade da junção do diodo (η), da constante de Boltzmann (k), da temperatura (T) em K (Kelvin) e do número de células FVs inseridas no módulo FV (N_s). A Figura 6 ilustra em detalhes o fluxograma do algoritmo de MPPT GWO-Beta.

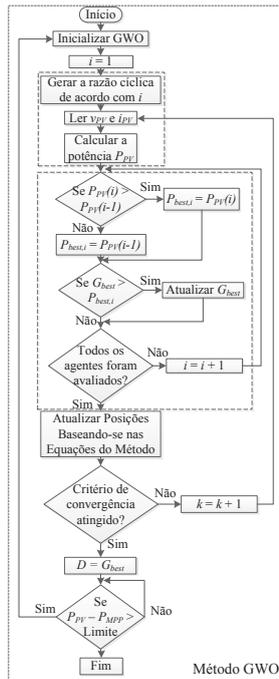


Fig. 5. Fluxograma do Método de MPPT-GWO.

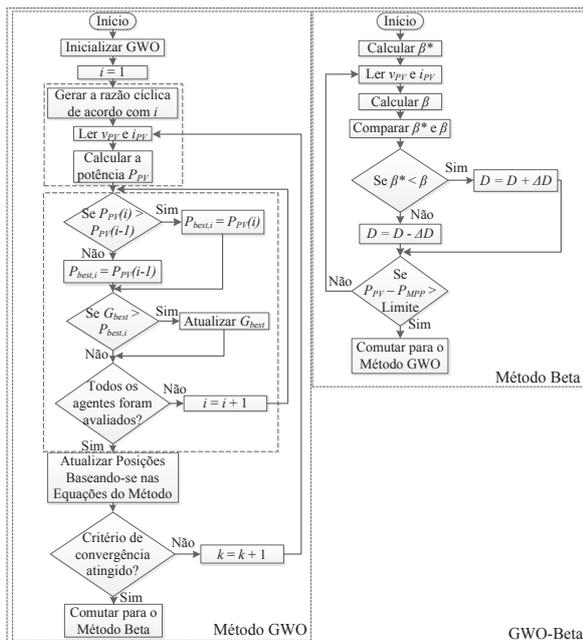


Fig. 6. Fluxograma do Método de MPPT GWO-Beta.

Uma das principais vantagens do algoritmo Beta é a rápida convergência ao MPP. Por outro lado, o princípio de funcionamento deste método leva em conta as características do módulo FV empregado na determinação da variável c , assim sua operação torna-se específica para o módulo FV definido em projeto. Desta forma, a constante c e o Beta de referência (β^*) limitam a extração da máxima energia disponível no arranjo FV, de modo que o método não seja eficiente em alguns casos.

De forma a superar as limitações do método de MPPT Beta de forma a melhorar a velocidade de convergência após a busca do GMPP, a combinação entre os métodos GWO e Beta é realizada.

Sendo assim, o algoritmo proposto GWO-Beta apresenta

duas etapas, sendo que a primeira etapa emprega o método GWO para buscar o GMPP, de modo que a referência β^* possa ser calculada de acordo com a tensão e a corrente do arranjo FV no GMPP. Em seguida, o algoritmo comuta para o método Beta que acompanha a referência do GMPP, garantindo o GMPP nesse ponto de operação (segunda etapa). Além disso, para pequenas oscilações de irradiância solar e/ou temperatura, o algoritmo consegue manter a busca do GMPP sem necessitar de uma nova varredura na curva, condição esta que aconteceria se o GWO operasse isoladamente.

C. Algoritmo GWO-IC

O método IC leva em consideração que no MPP a inclinação da curva característica envolvendo a potência e tensão é nula ($dP/dV = 0$), sendo esta inclinação positiva à esquerda e negativa à direita do MPP [8], [9]. Em teoria, o algoritmo IC deve apresentar erro nulo em regime permanente ao atingir o MPP, uma vez que a derivada de potência em função da tensão se torna nula. Neste caso, não há necessidade de nova perturbação para o algoritmo buscar o MPP.

No entanto, considerando a implementação do algoritmo em um controlador digital de sinal (DSC), onde há a existência de um pequeno erro na conversão A/D e ainda do tempo de processamento dos dados do DSC, a derivada nula da referida inclinação quase nunca ocorre. Além disso, os ajustes entre tempo de amostragem do DSC e o passo de incremento do algoritmo podem gerar grandes oscilações no MPP, aliado a uma convergência mais rápida caso sejam definidos valores grandes no passo de incremento. Por outro lado, caso sejam definidos passos de incremento muito pequenos haverá pequenas oscilações no MPP, aliado a uma convergência mais lenta [8]. Sendo assim, afim de se obter um algoritmo de MPPT mais eficaz, foi utilizada a combinação dos métodos GWO e IC com o objetivo de melhorar a velocidade de convergência e reduzir as oscilações de potência no GMPP.

Como no método GWO-Beta, o algoritmo proposto GWO-IC apresenta duas etapas, na qual a primeira etapa utiliza a técnica GWO para alcançar o GMPP. Em sequência, na segunda etapa, o algoritmo faz a comutação para o método IC, o qual se inicia com a referência do GMPP definido pelo método GWO. A Figura 7 apresenta em detalhes o fluxograma do algoritmo GWO-IC.

D. Algoritmo GWO-P&O

A técnica P&O é uma das mais conhecidas e empregadas na realização do MPPT. A técnica P&O é baseada no método da Escalada (*Hill-Climbing*) [9], [11]. O princípio de funcionamento desta técnica é baseado no incremento ou decremento periódico da variável de controle do conversor (e.g. razão cíclica, tensão ou corrente de entrada) de acordo com o comportamento da variação de potência e de tensão do arranjo FV [10].

Dependendo da aplicação, a variável de saída do algoritmo pode ser uma referência de corrente, tensão ou o próprio sinal da razão cíclica. Caso os valores das variações de potência e de tensão sejam positivos deve-se manter o incremento da variável de controle, caso a variação de tensão tenha valor negativo deve-se decrementar a variável de controle, e o oposto deve ser realizado com a variável de controle caso a variação de potência tenha valor negativo.

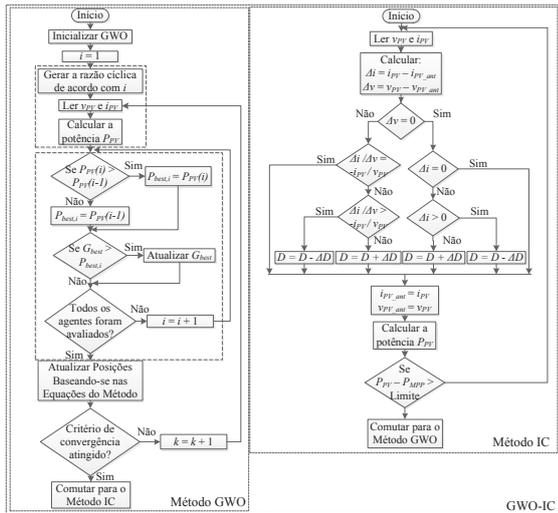


Fig. 7. Fluxograma do Método de MPPT GWO-IC.

O fator limitante principal do método MPPT-P&O é que podem ocorrer oscilações significativas em torno do MPP, dependendo do tamanho do passo de incremento adotado. Além disso, ele pode ficar preso em um LMPP quando o arranjo fotovoltaico é submetido a sombreamento parcial [15].

O algoritmo GWO-P&O, apresentado detalhadamente em [19], também apresenta duas etapas de operação, assim, a primeira etapa utiliza a técnica GWO para alcançar o ponto de potência máxima global, e logo depois de encontrá-lo, na segunda etapa, o algoritmo faz a comutação para o método P&O, o qual se inicia com a referência do GMPP definido pelo método GWO. A Figura 8 mostra em detalhes o fluxograma do algoritmo GWO-P&O utilizado neste trabalho.

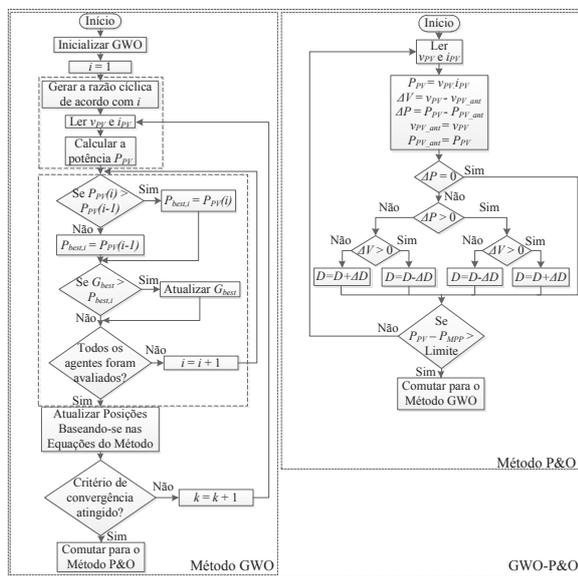


Fig. 8. Fluxograma do Método de MPPT GWO-P&O.

IV. RESULTADOS DE SIMULAÇÃO E EXPERIMENTAIS

Para avaliar experimentalmente os algoritmos de MPPT baseado no método GWO foi utilizado o protótipo mostrado na Figura 9, cujo circuito de potência é apresentado na Figura 1. As chaves de potência são compostas por módulos IGBT

SKM100GB12T4 (Semikron), tanto no inversor 3-L, assim como no conversor CC/CC Boost. Já o acionamento dos módulos IGBT é realizado através dos drivers da Semikron SKHI 22A. Por meio de placas de condicionamentos de sinais empregando transdutores de efeito Hall (LEM) as grandezas de tensão e corrente são medidas e condicionadas. Os algoritmos de MPPT, PLL e controladores de corrente e tensão são embarcados no DSC TMS320F28335 (Texas Instruments). O arranjo fotovoltaico é constituído por módulos FV SW 245 (SolarWorld). Nas medições das grandezas de potência (P_{PV}), tensão (v_{PV}) e corrente (i_{PV}) do arranjo FV foi utilizado o Wattímetro WT3000 (Yokogawa).

A Tabela I apresenta as principais especificações do módulo FV adotado neste trabalho, enquanto nas Tabelas II e III são apresentados os parâmetros do sistema FV (conversor CC-CC Boost e inversor 3-L) e as especificações e ganhos dos controladores, respectivamente.

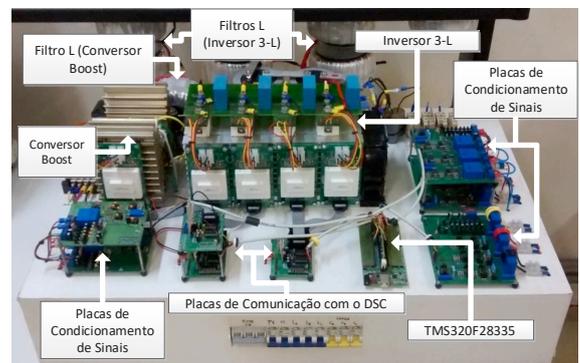


Fig. 9. Protótipo utilizado para os testes experimentais.

TABELA I
Parâmetros do Módulo FV SolarWorld Sunmodule Plus SW 245 em Condições de Teste Padrão (STC)

Potência máxima do Módulo FV	$P_{max} = 245 \text{ W}$
Tensão de MPP	$V_{mpp} = 30,8 \text{ V}$
Corrente de MPP	$I_{mpp} = 7,96 \text{ A}$
Tensão de circuito-aberto	$V_{oc} = 37,5 \text{ V}$
Corrente de curto-circuito	$I_{sc} = 8,49 \text{ A}$

TABELA II
Parâmetros Usados nos Testes Experimentais

Tensão eficaz da rede elétrica por fase	$V_s = 127 \text{ V}$
Frequência nominal da rede elétrica	$f_s = 60 \text{ Hz}$
Frequência de chaveamento (Boost e 3-L)	$f_{ch} = 20 \text{ kHz}$
Frequência de amostragem do conversor A/D	$f_a = 40 \text{ kHz}$
Filtro capacitivo do arranjo FV	$C_{pv} = 1,2 \text{ mF}$
Filtro indutivo do conversor Boost	$L_{fb} = 1,5 \text{ mH}$
Resistência do filtro indutivo do conversor Boost	$R_{Lfb} = 0,22 \Omega$
Capacitância do barramento CC	$C_{CC} = 2,35 \text{ mF}$
Tensão do barramento CC	$V_{CC} = 400 \text{ V}$
Ganho do PWM para o inversor 3-L	$K_{PWM} = 2,666 \cdot 10^{-4}$
Filtros L (Indutâncias e resistências internas dos indutores) do 3-L	$L_f = 1,7 \text{ mH}$ $R_{Lfb} = 0,22 \Omega$
Frequência de amostragem do MPPT	$f_{s_MPPT} = 4 \text{ Hz}$
Passo de incremento da razão cíclica (MPPT)	$AD = 0,01$
Número de lobos (GWO)	$i = 3$
Número de iterações (GWO)	$k = 50$
Limite de variação de potência (GWO)	$AP = 300 \text{ W}$

TABELA III

Especificações de Projeto e Ganho dos Controladores

Ganhos dos controladores de corrente PI-MR	$K_{P_i} = 121; K_{I_i} = 315000;$ $K_{I_j} = 4154; K_{I_s} = 3883;$ $K_{I_5} = 3340; K_{I_7} = 2526$
Frequência de cruzamento (PI de corrente)	$\omega_{ci} = 8,976 \cdot 10^3 \text{ rad/s}$
Margem de fase (PI de corrente)	$MF = 62^\circ$
Frequência de cruzamento (MR de corrente)	$\omega_{c1} = \omega_{c3} = \omega_{c5} =$ $\omega_{c7} = 4188,8 \text{ rad/s}$
Ganhos do controlador PI (barramento CC)	$K_{P_v} = 0,0994; K_{I_v} = 0,6056$
Frequência de cruzamento (PI barramento CC)	$\omega_{cv} = 15,0796 \text{ rad/s}$
Margem de fase (PI barramento CC)	$MF = 68^\circ$
Ganhos do controlador PI do PLL	$K_{P_{pll}} = 141,7; K_{I_{pll}} = 7777$
Frequência de cruzamento (PLL)	$\omega_{cpll} = 150,7964 \text{ rad/s}$
Margem de fase (PLL)	$MF = 70^\circ$

Os algoritmos de MPPT foram avaliados considerando duas condições de operação do sistema FV. Na primeira (Caso 1) o arranjo FV opera com irradiância solar uniforme, enquanto que na segunda condição (Caso 2) o arranjo FV opera sob a condição de sombreamento parcial.

A. Caso 1: Irradiância Solar Uniforme

A Figura 10 ilustra a curva característica ($P_{PV} \times t$) do arranjo FV, enquanto os resultados experimentais envolvendo potência, tensão e corrente do arranjo FV são mostrados na Figura 11, ambas considerando irradiância solar uniforme (Caso 1).

Levando em conta a curva característica de potência do arranjo FV mostrado na Figura 10, pode-se observar que o GMPP é alcançado por todos os métodos de MPPT. O método GWO emprega variáveis aleatórias para realizar a varredura da curva do arranjo FV, convergindo para pontos próximos ao

GMPP. Já os métodos híbridos apresentam vantagens, uma vez que conseguem realizar o ajuste fino da razão cíclica do conversor CC-CC após a convergência do método GWO.

Neste sentido, em relação aos algoritmos envolvendo os métodos híbridos, o algoritmo GWO-Beta apresentou o menor tempo de convergência. Destaca-se que apesar de todos os métodos sempre alcançarem o GMPP, os algoritmos tradicionais são inicializados após o método GWO convergir, ou seja, a cada nova varredura na curva o mesmo pode alcançar diferentes pontos em torno do GMPP.

A Tabela IV resume os principais resultados obtidos a partir dos testes práticos envolvendo os quatro algoritmos de MPPT operando com irradiância solar uniforme. Os resultados validam e confirmam que os algoritmos de MPPT Beta, IC e P&O, baseados no método GWO convergem rapidamente para o GMPP com reduzida oscilação e boa eficiência no seguimento do MPPT.

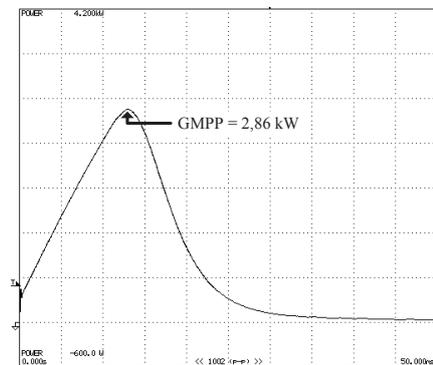


Fig. 10. Curva característica $P_{PV} \times t$ para o caso 1 (arranjo FV operando em irradiância solar uniforme): (600 W/div; 5 ms/div).

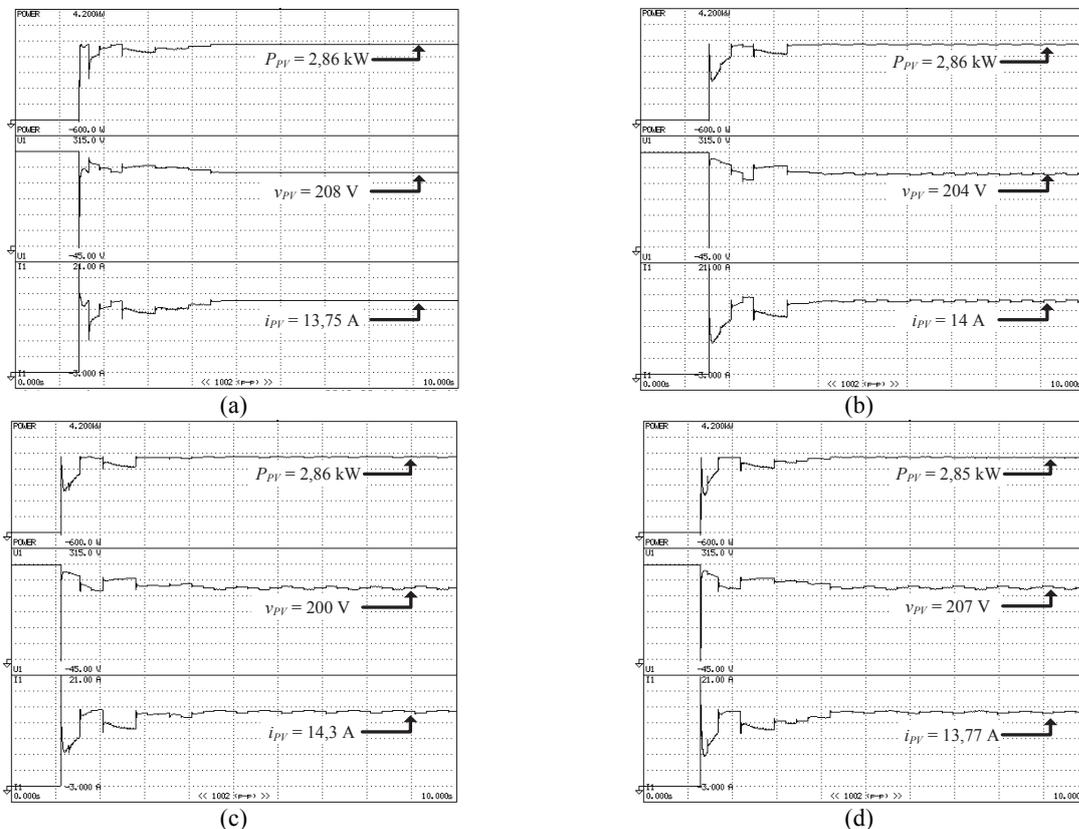


Fig. 11. Resultados experimentais das técnicas de MPPT considerando o Caso 1 (Fig. 10) para os algoritmos: (a) GWO; (b) GWO-Beta; (c) GWO-IC; (d) GWO-P&O (600 W/div; 45 V/div; 3 A/div; 1 s/div).

TABELA IV

Principais Resultados Experimentais para Comparação de Desempenho entre as Técnicas de MPPT para Caso 1

Técnica de MPPT	GWO	GWO-Beta	GWO-IC	GWO-P&O
Tempo de convergência (s)	2,99	3,04	3,15	3,15
Oscilações de Potência em regime (%)	0	2,48	2,90	3,68
Potência extraída em MPP (kW)	2,86	2,86	2,86	2,85
Eficiência no MPPT (%)	100	100	100	99,65

B. Caso 2: Irradiância Solar não Uniforme (Sombreamento Parcial)

A Figura 12 ilustra a curva característica ($P_{PV} \times t$) do arranjo FV para os módulos operando sob condições de sombreamento parcial (Caso 2), a qual apresenta as máximas potências global e local, respectivamente, iguais a 2,57 kW e 1,82 kW.

Resultados experimentais envolvendo potência, tensão e corrente do arranjo FV são mostrados na Figura 13. Observa-se que o GMPP é alcançado em todos os métodos de MPPT, destacando que dentre os métodos híbridos o GWO-IC apresentou menor oscilação de potência em regime.

Observa-se que com o método GWO-Beta obteve-se o menor tempo de convergência para alcançar o GMPP entre

os métodos híbridos. Porém, o mesmo apresentou maior oscilação de potência. Já o método GWO-P&O apresentou o maior tempo de convergência.

A Tabela V resume os principais resultados obtidos a partir dos testes práticos envolvendo os quatro algoritmos de MPPT baseados no GWO operando sob condições de sombreamento parcial.

Os resultados experimentais confirmaram que os algoritmos de MPPT baseados no GWO convergiram rapidamente ao GMPP e não ao LMPP.

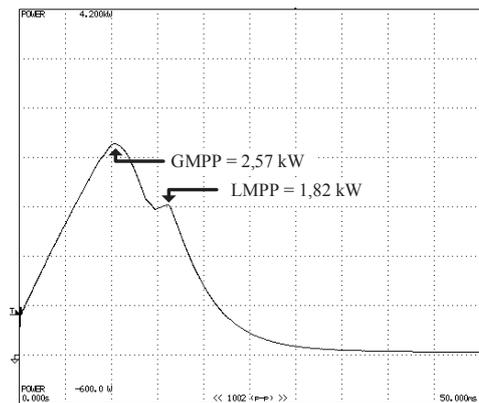
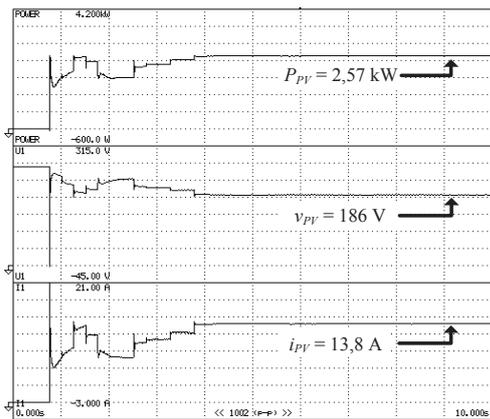
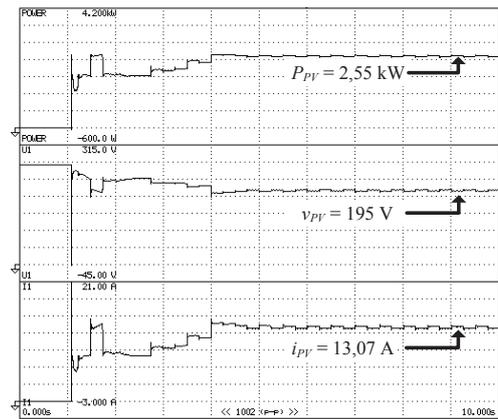


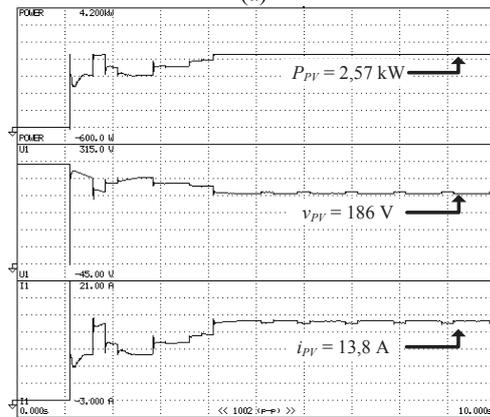
Fig. 12. Curva característica $P_{PV} \times t$ do arranjo FV para o caso 2 (sombreamento parcial) (600 W/div; 5 ms/div).



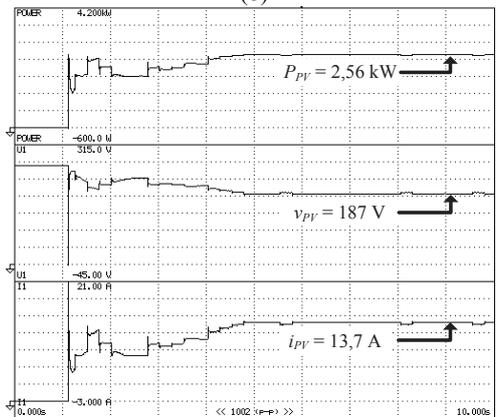
(a)



(b)



(c)



(d)

Fig. 13. Resultados experimentais das técnicas de MPPT considerando o Caso 2 (Fig. 12) para os algoritmos: (a) GWO; (b) GWO-Beta; (c) GWO-IC; (d) GWO-P&O (600 W/div; 45 V/div; 3 A/div; 1 s/div).

TABELA V

Principais Resultados Experimentais para Comparação de Desempenho entre as Técnicas de MPPT para Caso 2

Técnica de MPPT	GWO	GWO-Beta	GWO-IC	GWO-P&O
Tempo de convergência (s)	3,30	3,45	3,54	3,70
Oscilações de Potência em regime (%)	0	2,35	0	2,34
Potência extraída em MPP (kW)	2570	2550	2570	2560
Eficiência no MPPT (%)	100	99,2	100	99,6

C. Desempenho dos Métodos de MPPT Considerando Variações na Irradiância Solar

No intuito de avaliar o desempenho dos métodos de MPPT mediante variações na irradiância solar, o método GWO e sua combinação com as tradicionais técnicas Beta, IC e P&O foram implementados em simulação computacional no ambiente MatLab/Simulink®. Neste sentido, com o objetivo de realizar os testes de simulação o mais próximo possível do sistema real, foi considerado a discretização de todo o sistema, incluindo os algoritmos, aquisição de sinais, controladores, além dos atrasos na aquisição introduzidos pelos filtros *anti-aliasing*.

Comparou-se o desempenho dos algoritmos de MPPT considerando uma condição inicial na qual o arranjo FV está operando com irradiância solar uniforme igual a 900 W/m^2 e no instante de 4 segundos ocorre uma variação na irradiância solar e o sistema passa a operar com 1000 W/m^2 , conforme ilustra a Figura 14.

Pode-se verificar que as combinações do algoritmo GWO com os outros métodos se mostraram mais eficientes, pois pequenas variações de potência no arranjo FV não resultaram na necessidade de realizar uma nova varredura na curva para encontrar o novo GMPP, o que ocorre quando o método bioinspirado é utilizado de forma isolada. Neste sentido, nos métodos híbridos foi definido um limite de variação de potência de até 300 W no qual é mantida a operação do método tradicional (Beta, IC e P&O), caso a variação seja superior a este valor estabelecido, os métodos híbridos refazem uma nova varredura na curva em busca do GMPP empregando o GWO. Portanto, o método GWO operando de

forma isolada e realizando a varredura na curva de forma repetitiva pode comprometer a eficiência global do sistema.

Desta forma, assim como observado experimentalmente, nos resultados de simulação, é possível verificar que os métodos tradicionais combinados com GWO possuem vantagens quando comparado ao GWO operando de forma isolada, tais como uma melhor eficiência no seguimento do MPP, maior precisão na busca do GMPP e menores oscilações de potência para uma pequena variação na irradiância solar.

Adicionalmente, o comportamento dinâmico dos algoritmos de MPPT considerando variações abruptas de irradiância solar no arranjo FV é avaliado levando em conta dois perfis distintos (curvas 1 e 2), conforme curvas apresentadas na Figura 15.

A Figura 16 apresenta a forma de onda de potência do arranjo FV para os algoritmos de MPPT, na qual foi considerado que inicialmente o arranjo FV apresenta o comportamento da curva 1. Após um tempo operando na curva 1, ocorre a transição para curva 2 no tempo de 5 segundos. Após 9 segundos de operação o arranjo FV volta a operar com o comportamento da curva 1. Como pode ser observado, todos os algoritmos de MPPT avaliados são capazes de operar e convergir para o GMPP mediante variações bruscas de irradiância solar.

D. Injeção de Corrente na Rede Elétrica

As Figuras 17.a e 17.b apresentam as correntes trifásicas injetadas na rede elétrica para o sistema FV operando sob irradiância solar uniforme (Caso 1) e sob sombreamento parcial (Caso 2), respectivamente. Pode ser observado que, para ambas condições de testes, todas as técnicas atingiram o GMPP. Além disso, nota-se que as amplitudes das correntes trifásicas injetadas na rede elétrica são menores no Caso 2, uma vez que, com sombreamento parcial, a energia drenada do arranjo FV é mais baixa.

As distorções harmônicas totais (DHT) das correntes injetadas na rede se situaram em aproximadamente $2,7 \%$ considerando o Caso 1, enquanto para o Caso 2 ficaram em torno de $3,2 \%$. As Figuras 18 e 19 apresentam as medições das DHT das correntes injetadas na rede elétrica para o Caso 1 e 2, respectivamente.

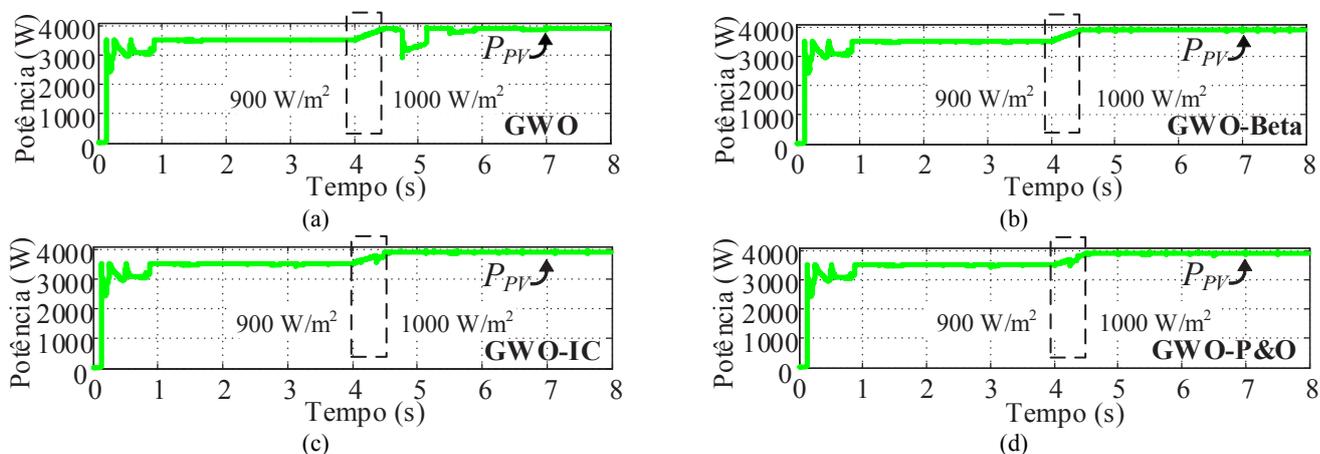
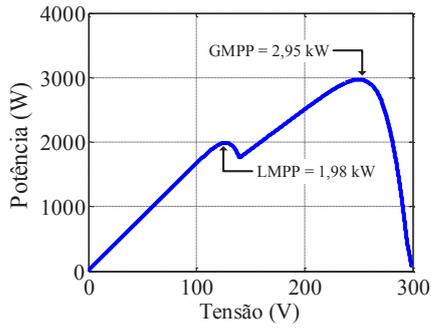
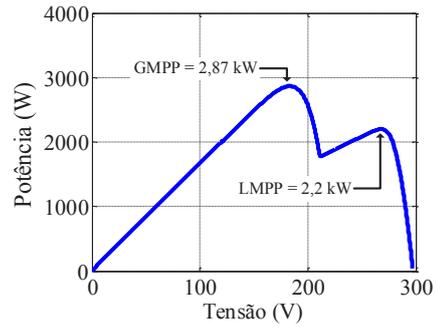


Fig. 14. Resultados de simulação comparando as técnicas de MPPT considerando uma variação na irradiância solar de 900 W/m^2 para 1000 W/m^2 para os algoritmos: (a) GWO; (b) GWO-Beta; (c) GWO-IC; (d) GWO-P&O.

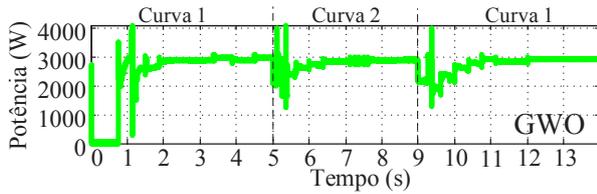


(a)

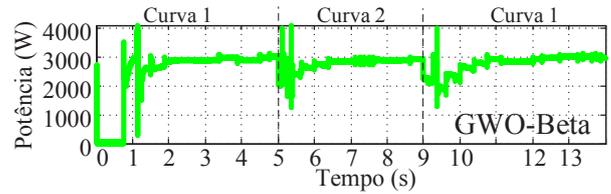


(b)

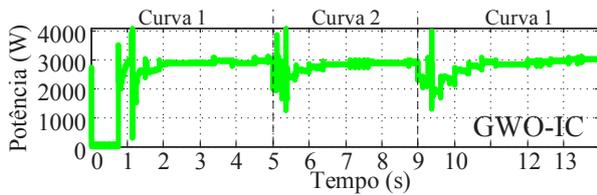
Fig. 15. Resultados de simulação: Perfis das curvas características empregadas no sistema FV para avaliação do comportamento dinâmico dos algoritmos de MPPT: (a) curva 1; (b) curva 2.



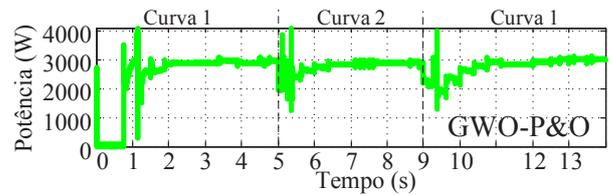
(a)



(b)

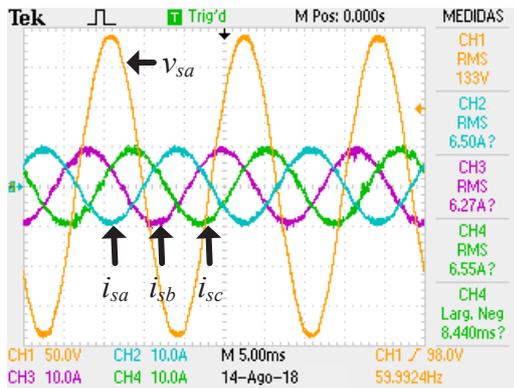


(c)

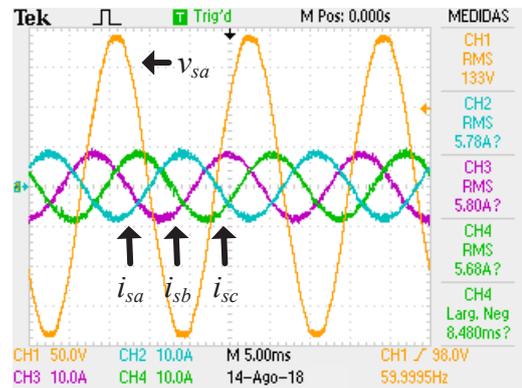


(d)

Fig. 16. Resultados de simulação: comportamento dinâmico dos algoritmos de MPPT considerando variação na curva característica: (a) GWO, (b) GWO-Beta, (c) GWO-IC, (d) GWO-P&O.

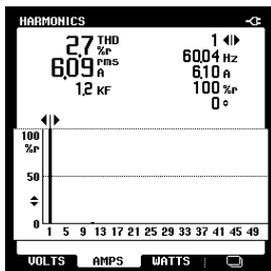


(a)

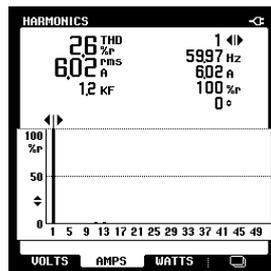


(b)

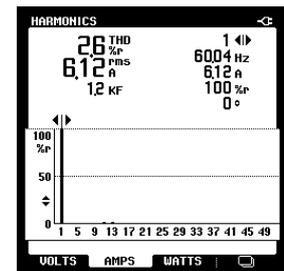
Fig. 17. Tensão da rede na fase “a” (v_{sa}), correntes trifásicas injetadas na rede elétrica (i_{sa} , i_{sb} e i_{sc}): (a) Caso 1; (b) Caso 2 (50 V/div; 10 A/div; 5 ms/div).



(a)



(b)



(c)

Fig. 18. Distorções harmônicas totais das correntes injetadas na da rede elétrica para o Caso 1: (a) Fase a i_{sa} , (b) Fase b i_{sb} , (c) Fase c i_{sc} .

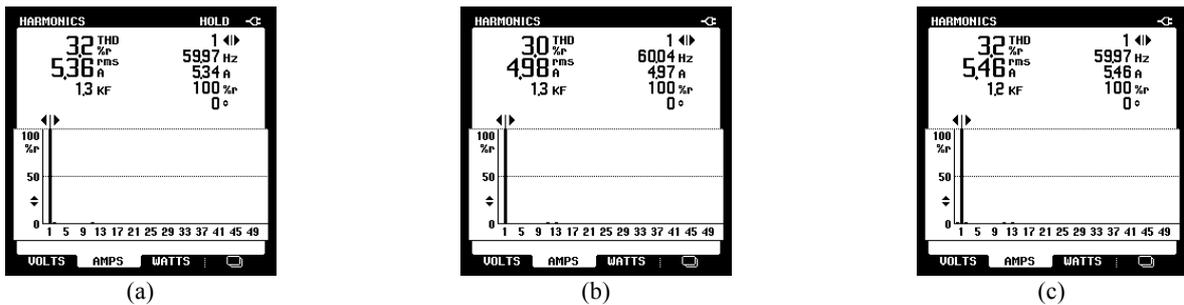


Fig. 19. Distorções harmônicas totais das correntes injetadas na da rede elétrica para o Caso 2: (a) Fase a i_{sa} , (b) Fase b i_{sb} , (c) Fase c i_{sc} .

V. CONCLUSÕES

Este trabalho apresentou uma análise comparativa do desempenho de quatro algoritmos de MPPT, bioinspirados no comportamento dos lobos cinzentos, onde foram considerados o método GWO operando isoladamente, bem como sua combinação com os métodos tradicionais de MPPT Beta, IC e P&O. O desempenho de cada algoritmo foi avaliado por meio de um sistema FV conectado à rede elétrica trifásica, constituído por um conversor Boost e um inversor 3-L.

A eficácia dos algoritmos de MPPT GWO, GWO-Beta, GWO-IC e GWO-P&O foi avaliada por meio de resultados experimentais, levando em conta duas condições de testes: arranjo FV com irradiância solar uniforme e sob condições de sombreamento parcial. Em ambas condições de testes, todos os algoritmos alcançaram o GMPP de forma satisfatória. Os algoritmos também demonstraram capacidade de convergir ao GMPP mesmo para variações abruptas de irradiância solar quando o arranjo FV é submetido a sombreamento parciais.

Neste sentido, o algoritmo de MPPT GWO operando isoladamente apresentou o menor tempo de convergência, assim como a menor oscilação de potência em regime permanente.

Além disso, foi possível observar que, dentre os métodos de MPPT híbridos, o algoritmo GWO-Beta apresentou o menor tempo de convergência na busca do GMPP, embora tenha apresentado maior oscilação de potência no MPP quando o sistema está submetido a sombreamento parcial. Já o método GWO-IC apresentou menor oscilação de potência no MPP em regime permanente, embora necessite de um tempo de convergência maior que o GWO-Beta. O método GWO-P&O apresentou um desempenho razoável no que diz respeito ao tempo de convergência e, oscilações de potência em regime permanente.

Finalmente, a principal vantagem dos métodos de MPPT híbridos em relação ao MPPT-GWO, operando isoladamente, está na capacidade destes algoritmos refinarem a varredura do MPPT e, desta forma, alcançar o GMPP. Além disso, os algoritmos híbridos foram capazes de buscar o GMPP para pequenas variações na irradiância solar, sem necessidade de realizar uma nova busca completa na curva característica do arranjo FV, minimizando as oscilações de potência.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o suporte financeiro recebido do CNPq (Processos 400837/2016-1 e 303359/2018-8) e o apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

REFERÊNCIAS

- [1] F. Blaabjerg, R. Teodorescu, M. Liserre, A. V Timbus, "Overview of Control and Grid Synchronization for Distributed Power Generation Systems", in *IEEE Transactions on Industry. Electronics*, vol. 53, nº 5, pp. 1398-1409, Oct. 2006.
- [2] T. B. Lazzarin, R. F. Coelho, G. G. Facchinello, "Inversores do Tipo Forward para Conexão de Fontes Renováveis à Rede Elétrica", in *Eletrônica de Potência SOBRAEP*, vol. 23, nº 2, pp. 193-203, Abr. 2018.
- [3] B. W. França, E. L. V. Emmerik, J. F. Caldeira, M. Aredes, "Sliding Droop Control for Distributed Generation in Microgrids", in *Eletrônica de Potência SOBRAEP*, vol. 22, nº 4, pp. 429-439, Dec. 2017.
- [4] L. V. Bellinaso, L. Michels, "Conversores Fotovoltaicos Multifuncionais - Classificação e Requisitos de Compatibilidade com a Rede e com as Cargas", in *Eletrônica de Potência SOBRAEP*, vol. 21, nº 2, pp. 126-137, Jun. 2017.
- [5] M. A. G. Brito, M. G. Alves, L. P. Sampaio, C. A. Canesin, "Estratégias de Anti-ilhamento Aplicadas a Sistemas de Geração Distribuída Fotovoltaica", in *Eletrônica de Potência SOBRAEP*, vol. 23, nº 2, pp. 226-234, Abr. 2018.
- [6] W. Xiao, M. S. El Moursi, O. Khan, D. Infield, "Review of Grid-Tied Converter Topologies Used in Photovoltaic Systems", in *IET Renewable Power Generation*, vol. 10, nº 10, pp. 1543-1551, Nov. 2016.
- [7] M. A. G. Brito, L.P. Sampaio, J. C. U. Peña, C. A. Canesin, "Família de Inversores Integrados Monofásicos e Trifásicos", in *Eletrônica de Potência SOBRAEP*, vol. 19, nº 4, pp. 368-372, Set./Nov. 2014.
- [8] 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", in *Eletrônica de Potência SOBRAEP*, vol. 17, nº 3, pp. 592-600, Ago. 2012.
- [9] S. B. Kjær, "Evaluation of the "Hill Climbing" and the "Incremental Conductance" Maximum Power Point Trackers for Photovoltaic Power Systems", in *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 27, nº 4, pp. 922-929, Dec. 2012.
- [10] S. A. O. Silva, L. B. G. Campanhol, V. D. Bacon, L. P. Sampaio, "Single-Phase Grid-Connected Photovoltaic System with Active Power Line Conditioning", in *Eletrônica de Potência*, vol. 20, nº 1, pp. 8-18, Feb. 2015.

- [11] L. Tang, W. Xu, C. Mu, "Analysis for Step-Size Optimisation on MPPT Algorithm for Photovoltaic Systems", in *IET Power Electronics*, vol. 10, n° 13, pp. 1647-1654, Nov. 2017.
- [12] S. B. Jeyaprabha, A. I. Selvakumar, "Model-Based MPPT for Shaded and Mismatched Modules of Photovoltaic Farm", in *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, vol. 8, n° 4, pp. 1763-1771, Oct. 2017.
- [13] C. J. Oliveira Jr, L. P. Pires, L. C. Freitas, E. A. A. Coelho, L. C. G. Freitas, D. B. Rodrigues, "Algoritmo de Seguimento do Ponto de Máxima Potência Global para Inversores Solares Multistring em Condições de Sombreamento Parcial", in *Eletrônica de Potência SOBRAEP*, vol. 23, n° 2, pp. 182-192, Abr. 2018.
- [14] K. Hu, W. Li, L. Wang, F. Zhu, Z. Shou, "Topology and Control Strategy of Power Optimisation for Photovoltaic Arrays and Inverters During Partial Shading", in *IET Generation, Transmission*, vol. 12, n° 1, pp. 62-71, Feb. 2018.
- [15] S. A. O. Silva, L. P. Sampaio, F. M. Oliveira, F. R. Durand, "Sistema Fotovoltaico com Condicionamento Ativo de Energia Usando MPPT Baseado em PSO e Malha Feed-Forward de Controle de Tensão do Barramento CC", in *Eletrônica de Potência SOBRAEP*, vol. 21, n° 2, pp. 105-116, Jun. 2016.
- [16] L.L. Jiang, D.L. Maskell, J. C. Patra, "A Novel Ant Colony Optimization-Based Maximum Power Point Tracking for Photovoltaic Systems Under Partially Shaded Conditions", in *Energy and Buildings*, vol. 58, pp. 227-236, Mar. 2013.
- [17] K. Sundareswaran, V. Vigneshkumar, P. Sankar, S. P. Simon, P. Srinivasa Rao Nayak, S. Palani, "Development of an Improved P&O Algorithm Assisted Through a Colony of Foraging Ants for MPPT in PV System", in *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, vol. 12, n° 1, pp. 187-200, Feb. 2016.
- [18] S. Mohanty, B. Subudhi, P. K. Ray, "A new MPPT Design Using Grey Wolf Optimization Technique for Photovoltaic System Under Partial Shading Conditions", in *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, vol. 7, n° 1, pp. 181-188, Jan. 2016.
- [19] S. Mohanty, B. Subudhi, P. K. Ray, "A Grey Wolf-Assisted Perturb & Observe MPPT Algorithm for a PV System", in *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 32, n° 1, pp. 340-347, Mar. 2017.
- [20] V. D. Bacon, S. A. O. Silva, "Performance Improvement of a Three-Phase Phase-Locked-Loop Algorithm Under Utility Voltage Disturbances Using Non-Autonomous Adaptive Filters", in *IET Power Electronics*, vol. 8, n° 11, pp. 2237-2250, Nov. 2015.
- [21] S. Fukuda, T. Yoda, "A Novel Current-Tracking Method for Active Filters Based on a Sinusoidal Internal Model", in *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 37, n° 3, pp. 888-895, Maio/Jun. 2001.
- [22] S. Mirjalili, S. M. Mirjalili, A. Lewis, "Grey Wolf Optimizer", in *Advances in Engineering Software*, vol. 69, pp. 46-61, Mar. 2014.
- [23] S. Jain, V. Agarwal, "A New Algorithm for Rapid Tracking of Approximate Maximum Power Point in

Photovoltaic Systems", in *IEEE Power Electronics Letter*, vol. 2, n° 1, pp. 16-19, Mar. 2004.

BIOGRAFIAS

Leonardo Poltronieri Sampaio é engenheiro eletricitista (2008), mestre em engenharia elétrica (2010) e doutor em engenharia elétrica (2013) pela Universidade Estadual Paulista, Campus Ilha Solteira (UNESP/IS). 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 empregando DSC, desenvolvimento de ferramentas educacionais e programação em Java e C. É membro da SOBRAEP.

Mavkon Vichoski da Rocha é engenheiro da computação (2016) pela Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campus Cornélio Procópio (UTFPR-CP). Atualmente é aluno de mestrado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica (UTFPR-CP) e desenvolve suas atividades de pesquisa no Laboratório de Eletrônica de Potência, Qualidade de Energia e Energias Renováveis (LEPQER). Suas áreas de interesse englobam sistemas de energia renováveis, Técnicas de rastreamento da máxima potência, linguagem de programação e eletrônica de potência.

Sérgio Augusto Oliveira da Silva 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, sistemas de energia renováveis e desenvolvimento de ferramentas educacionais voltadas ao ensino de eletrônica de potência. É membro da SOBRAEP e IEEE-IES.

Marcelo Hideo de Freitas Takami é engenheiro eletricitista (2015) e mestre em engenharia elétrica (2017) pela Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campus Cornélio Procópio (UTFPR-CP). Atualmente é doutorando no Programa de Pós-Graduação Associado em Engenharia Elétrica (UEL/UTFPR-CP) e desenvolve suas atividades de pesquisa no Laboratório de Eletrônica de Potência, Qualidade de Energia e Energias Renováveis (LEPQER). É professor colaborador do Departamento de Engenharia Elétrica da UTFPR-CP. Suas áreas de interesse englobam sistemas de energia renováveis, qualidade de energia, filtros ativos de potência. É membro da SOBRAEP.