

Received July 04, 2024; accepted October 23, 2024; Date of publication November 13, 2024.  
The review of this paper was arranged by Associate Editor Victor F. Mendes and Editor-in-Chief Heverton A. Pereira.

Digital Object Identifier <http://doi.org/10.18618/REP.e202448>

# Um Controle Orientado a Campo Aprimorado para Sistemas de Conversão de Energia Eólica Usando Grasshopper Optimizer

Paulo Jefferson Dias de Oliveira Evald<sup>1,2</sup>, Matheus Schramm Dall'asta<sup>2</sup>, Jéssika Melo de Andrade<sup>2</sup>, Lenon Schmitz<sup>2</sup>, Telles Brunelli Lazzarin<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Universidade Federal de Pelotas, Grupo de Sistemas Inteligentes e Controle, Pelotas - RS, Brasil

<sup>2</sup>Universidade Federal de Santa Catarina, Instituto de Eletrônica de Potência, Florianópolis, - SC, Brasil

e-mail: paulo.evald@ufpel.edu.br, matheus.dall.asta@posgrad.ufsc.br, melo.jessika@ufsc.br, lenonsch@inep.ufsc.br, telles.bl@ufsc.br.

**RESUMO** O setor energético global vem modernizando seus sistemas de conversão de energia, substituindo os meios tradicionais de geração de potência por sistemas de conversão de energia renovável para reduzir os impactos ambientais inerentes aos sistemas de produção de potência ultrapassados. Nas últimas décadas, a geração de potência usando energia eólica como fonte primária de energia vem continuamente aumentando sua participação no suprimento desta demanda. Nestes sistemas, geradores síncronos de ímãs permanentes são largamente utilizados devido suas diversas vantagens, sendo o controle orientado a campo, composto por dois controladores proporcionais-integrais independentes, uma das estratégias de controle mais eficientes para regular as correntes em coordenadas  $dq$ . Neste viés, este trabalho apresenta um procedimento sistemático para parametrização deste controlador usando o algoritmo *grasshopper optimizer*. Para orientar os projetistas de controle que queiram utilizar a metodologia proposta, seis configurações diferentes do otimizador são discutidas para avaliar o impacto da configuração do otimizador na qualidade das soluções propostas ao problema de controle avaliado. Uma comparação com o método de sintonia clássico de Chien, Hrone e Reswick também é apresentado, onde o procedimento proposto demonstra superioridade.

**PALAVRAS-CHAVE** Energia Eólica, Energia Renovável, Geradores Síncronos de Ímãs Permanentes, Otimização Meta-heurística.

## An enhanced field-oriented control for wind energy conversion systems using the grasshopper optimizer

**ABSTRACT** The global energy sector has been modernizing its energy conversion systems, replacing traditional means of power generation with renewable energy conversion systems to reduce the environmental impacts inherent to outdated power production systems. In recent decades, power generation using wind energy as a primary energy source has continually increased its participation in supplying this demand. In these systems, permanent magnet synchronous generators are widely used due to their various advantages, with field-oriented control, which is composed of two independent proportional-integral controllers, being one of the most efficient for regulating currents in  $dq$  coordinates. In this sense, this work presents a systematic procedure for parameterizing this controller using the grasshopper optimizer algorithm. For guiding control designers who want to use the proposed methodology, six different optimizer configurations are discussed to evaluate the impact of the optimizer configuration on the quality of solutions to the evaluated control problem. A comparison with the classical tuning method of Chien, Hrone, and Reswick is also presented, where the proposed procedure demonstrates superiority.

**KEYWORDS** Wind Energy, Renewable Energy, Permanent Magnet Synchronous Generators, Meta-heuristic Optimization.

## I. INTRODUÇÃO

A demanda global por eletricidade aumenta a cada dia [1]. Entretanto, os sistemas de geração de potência baseados em combustíveis fósseis enfrentam limitações de recursos naturais [2], além de impactar negativamente no equilíbrio do meio ambiente, o que intensifica os desastres naturais

como fortes chuvas, enchentes, ondas de calor mais intensas e elevação dos níveis dos rios e mares [3]. Em luz dos recentes eventos climáticos extremos, destaca-se a necessidade de diversificar a matriz energética global para suprir as demandas de energia para indústrias e residências enquanto

alivia a pressão ambiental oriundas dos sistemas de geração de potência baseadas em combustíveis fósseis [4].

Os sistemas de geração de potência baseados em energia eólica, ou WECS (*wind energy conversion systems*), são os mais populares atualmente [5] e podem ser projetados para operar em condições de ventos com velocidade fixa ou variável [6]. Os WECS de velocidade variável têm a capacidade de ajustar dinamicamente suas velocidades de rotação para se alinharem às flutuações na velocidade do vento, garantindo rastreamento ideal do ponto de potência máxima, ou MPPT (*maximum power point tracking*) em uma faixa mais ampla de velocidades do vento. Nesses sistemas, os geradores de indução duplamente alimentado, ou DFIG (*doubly-fed induction generator*) e os geradores síncronos de ímã permanente, ou PMSG (*permanent magnet synchronous generator*), são os dois tipos de geradores mais utilizados. O uso de PMSG nas WECS provê diversas vantagens em relação ao uso de seu concorrente, tais como estresse mecânico reduzido, menores custos de manutenção, maior confiabilidade devido à ausência de engrenagens e rolamentos e peso reduzido, o que leva a maiores rendimentos energéticos [7]. Considerando tais vantagens, este trabalho focará em WECS baseados em PMSG.

A escolha da estrutura correta para determinadas condições de vento é uma das etapas mais relevantes no projeto de instalação de uma WECS. Entretanto, os sistemas de controle são o cerne de uma WECS. Existem diversas abordagens de controle para maximizar a produção de potência [8]. Dentre as principais técnicas de MPPT, destacam-se: *optimal torque control* (OTC), *direct torque control*, *flux oriented control*, *voltage oriented control*, entre outras. Dentre essas técnicas, o OTC é uma das estratégias mais eficazes para a extração máxima de potência do vento [9]. Nesta abordagem é utilizada a velocidade máxima na ponta da pá e o coeficiente máximo de extração de potência para calcular o torque mecânico ideal, que é usado como referência para o torque do gerador. Portanto, a abordagem OTC será adotada para realizar o MPPT neste trabalho.

Além da estratégia de MPPT, a abordagem de controle do PMSG também é fundamental para garantir a qualidade da energia em uma WECS. O controle orientado à campo, ou *field oriented control* (FOC) [10], é usado para controlar o fluxo magnético e o torque do rotor do PMSG. Esta técnica foi originalmente proposta para motores de indução trifásicos, mas é facilmente adaptável para geradores. Para tal, aplica-se o controle em coordenadas  $dq$ , sendo que o eixo  $d$  está  $90^\circ$  adiantado em relação ao eixo  $q$ . Como resultado, esta estratégia trata do controle de ambas as dinâmicas de forma independente, pois os termos do eixo  $q$  são proporcionais ao torque eletromagnético e os termos do eixo  $d$  são proporcionais ao fluxo magnético do rotor. Consequentemente, as correntes em coordenadas  $dq$  são controladas independentemente nessa abordagem. Na literatura há diversas formas de controlar as dinâmicas do PMSG, tais como controladores proporcionais-integrais (PI) [11],

*sliding mode controller* [12], *super-twisting sliding mode control* [13], *model predictive controller* [14], entre outros. Os controladores baseados em estrutura variável costumam apresentar boa robustez às incertezas dos parâmetros do sistema, porém o fenômeno de *chattering* é sua principal desvantagem, visto que reduzem a qualidade da energia. Já os controladores preditivos apresentam desempenho elevado, mas requerem um modelo preciso do sistema e necessitam de processadores com alta capacidade computacional para execução desses algoritmos de controle ao utilizar grandes horizontes de predição. Por outro lado, os controladores PI são simples e de baixo custo computacional. Entretanto, a sintonia dos ganhos deste controlador pode ser desafiadora, o que reflete diretamente na qualidade da energia. Existem diversas técnicas na literatura para sintonia de controladores PI e proporcional-integral-derivativo (PID), tais como Ziegler & Nichols [15], Cohen & Coon [16], *internal model control* [17], *fuzzy* [18], redes neurais [19], entre outros. Os métodos mais tradicionais requerem conhecimento preciso do modelo do sistema, enquanto as abordagens modernas encontram ganhos de forma iterativa, sendo mais flexíveis. Entretanto, as abordagens *fuzzy* necessitam que o projetista crie regras para relacionar os conjuntos *fuzzy* com os ganhos do controlador. Já os métodos baseados em redes neurais precisam da criação de *datasets* para realizar o aprendizado de máquina e com isso, determinar ganhos para o controlador. Ambas estratégias modernas costumam apresentar controladores superiores aos métodos clássicos, mas possuem grande complexidade em sua implementação.

Recentemente, algoritmos de otimização meta-heurística inspirados em padrões da natureza vem sendo desenvolvidos e utilizados para resolver diversos problemas matemáticos e de engenharia unidimensionais e multidimensionais, tais como *whale optimization algorithm* [20], *grasshopper optimization algorithm* (GOA) [21], *chimp optimization algorithm* [22], *snake optimization algorithm* [23], entre diversos outros. Estes otimizadores estocásticos emulam o comportamento de caça, reprodução, migração e/ou sobrevivência de animais em seus habitats naturais. De modo geral, esses algoritmos tratam o problema de otimização como uma caixa-preta, necessitando fornecer apenas as variáveis de interesse e o intervalo de busca por soluções para cada variável. Desta forma, esses algoritmos executam a lógica de otimização iterativamente para minimizar (ou maximizar) uma função-custo (*fitness*), que deve ser designada pelo projetista. Além disso, estes algoritmos utilizam o conceito de inteligência de enxame (*swarm intelligence*) para cobrir espaços de buscas esparsos paralelamente, garantindo a obtenção de uma solução ótima ao problema de otimização, ou no mínimo sub-ótima, ao garantir a convergência de uma função-custo.

Esses algoritmos são ferramentas potenciais para otimização de controladores e estão em pleno desenvolvimento atualmente. Além disso, os algoritmos de otimização meta-heurística possuem uma estrutura mais simples de implementar do que outras técnicas

modernas de sintonia de controladores, tais como *fuzzy* e redes neurais. Entretanto, essa é ainda uma área pouco explorada na área de eletrônica de potência. Na literatura, há diversos trabalhos que utilizam algoritmos de otimização meta-heurística clássicos para tal tarefa, tais como algoritmos genéticos [24]–[27] e enxame de partículas [28]–[32]. Porém, há poucos trabalhos utilizando algoritmos de otimização recentes para tal otimização dos controladores. Portanto, há uma lacuna de pesquisa que pode ser explorada e trazer grandes benefícios para geração de potência a partir de fontes de energia renovável ao otimizar os controladores com algoritmos sofisticados de otimização meta-heurística. Nesse sentido, este trabalho apresenta um procedimento sistemático de parametrização dos controladores PI utilizados na abordagem FOC de um WECS com PMSG do tipo *direct drive* utilizando o *grasshopper optimization algorithm*, GOA. O procedimento proposto automatiza efetivamente a tarefa de sintonia dos ganhos dos controladores de um WECS, liberando tempo do projetista para outras atividades.

A organização deste trabalho é estruturada da seguinte forma: a Seção II apresenta o modelo do WECS baseado em PMSG, seguida pela descrição do sistema de controle na Seção III. A Seção IV discute o procedimento de parametrização dos controladores. A Seção V discute os resultados de simulação usando o controlador otimizado, bem como uma comparação deste controlador com outro cujos ganhos são obtidos com uma técnica clássica de ajuste de ganhos e também provê uma discussão aprofundada sobre a utilização do procedimento proposto. Por fim, a Seção VI provê as considerações finais deste trabalho.

## II. MODELO DO WECS COM PMSG

O modelo de WECS com PMSG é bem difundida na literatura. Portanto, esta seção apresenta uma descrição sucinta do modelo deste sistema baseado em [33]. A potência mecânica do vento,  $P_m$ , é calculada da seguinte forma:

$$P_m = \frac{1}{2} \rho A C_p(\lambda, \beta) V_v^3, \quad (1)$$

onde  $V_v$  e  $\rho$  são a velocidade do vento e a densidade volumétrica do ar, respectivamente. Além disso,  $A$  é a área varrida pelas pás da turbina. Ainda, o coeficiente de potência,  $C_p$ , depende do ângulo de ataque das pás  $\beta$  e da relação de velocidade de ponta  $\lambda$ , isto é,

$$C_p = C_1 \left( \frac{C_2}{\lambda_i} - C_3\beta - C_4\beta C_5 - C_6 \right) e^{-C_7/\lambda_i}, \quad (2)$$

onde

$$\lambda_i = \frac{1}{\frac{1}{\lambda + C_8\beta} - \frac{C_9}{\beta^3 + 1}}, \quad (3)$$

e

$$\lambda = \frac{\omega_t R}{V_v}, \quad (4)$$

sendo  $C_1$  a  $C_9$  os coeficientes da turbina e  $\omega_t$  é a velocidade angular mecânica do rotor. Além disso,  $R$  é o raio das pás da turbina.

O torque mecânico induzido na turbina pela ação do vento,  $T_m$ , é

$$T_m = \frac{1}{2} \rho \pi R^3 \frac{C_p(\lambda, \beta)}{\lambda} V_v^2. \quad (5)$$

A seguinte relação é válida para WECS com PMSG do tipo *direct drive*:

$$J_{eq} \frac{d}{dt} \omega_m = T_m - T_e - B \omega_m, \quad (6)$$

onde a inércia equivalente  $J_{eq}$  no eixo é dada pela soma das inércias da turbina eólica com a inércia do gerador. Além disso,  $B$  e  $T_e$  são o coeficiente de atrito e o torque eletromagnético do gerador, respectivamente. Ainda, para um PMSG do tipo *direct drive* têm-se que a velocidade angular do gerador  $\omega_m$  é igual a velocidade angular da turbina  $\omega_t$ , devido ao acoplamento direto do gerador à turbina.

A tensão do gerador no eixo direto e de quadratura é descrita como

$$\begin{bmatrix} v_d \\ v_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & 0 \\ 0 & R_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \omega_e \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ -1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \psi_d \\ \psi_q \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \psi_d \\ \psi_q \end{bmatrix}, \quad (7)$$

onde as tensões  $v$  dependem da corrente  $i$  no eixo direto  $d$  e de quadratura  $q$ . Além disso,  $R_s$ ,  $\omega_e$  e  $\psi$  são a resistência do estator, a velocidade de rotação angular elétrica e o fluxo magnético do PMSG em coordenadas  $dq$ , respectivamente. O fluxo magnético é calculado em função das correntes e do fluxo magnético máximo do gerador,  $\psi_{pm}$ , conforme segue:

$$\begin{bmatrix} \psi_d \\ \psi_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_d & 0 \\ 0 & L_q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \psi_{pm} \\ 0 \end{bmatrix}, \quad (8)$$

onde  $L_d$  e  $L_q$  são a indutância do eixo direto e de quadratura, respectivamente.

As correntes do gerador em coordenadas  $dq$  podem ser calculadas através da seguinte representação em espaço de estados:

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} -\frac{R_s}{L_d} & \frac{\omega_e L_q}{L_d} \\ -\frac{\omega_e L_d}{L_q} & -\frac{R_s}{L_q} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \\ &\begin{bmatrix} \frac{1}{L_d} & 0 \\ 0 & \frac{1}{L_q} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_d \\ v_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ -\frac{\psi_{pm}}{L_q} \end{bmatrix} \omega_e. \end{aligned} \quad (9)$$

A potência elétrica fornecida pelo gerador,  $P_e$ , depende das correntes e tensões nas coordenadas  $dq$ ,

$$P_e = \frac{3}{2} (v_d i_d + v_q i_q). \quad (10)$$

O torque elétrico é

$$T_e = \frac{3N_p}{4} [\psi_{pm} i_q + (L_d - L_q) i_d i_q], \quad (11)$$

onde  $N_p$  é o número de polos do gerador.

### III. SISTEMA DE CONTROLE

O sistema de controle da WECS com *direct drive* PMSG é realizado utilizando um OTC para MPPT [9] e FOC para regulação das correntes do PMSG [34]. O OTC usa a relação de velocidade máxima da ponta,  $\lambda_{max}$ , e o coeficiente máximo de extração de potência,  $C_{p_{max}}$ , para calcular o torque mecânico ideal,  $T_m^*$  [9]. Ou seja,

$$T_m^* = \frac{1}{2} \rho \pi R^5 \frac{C_{p_{max}}}{\lambda_{max}^3} \omega_t^2. \quad (12)$$

Já o FOC permite controlar o fluxo magnético e o torque do rotor do gerador de forma independente nos eixos  $d$  e  $q$ , respectivamente. Nesse sentido, a corrente no eixo  $d$  é mantida nula para eliminar as não-linearidades do torque de relutância do gerador [10]. Logo, a corrente de referência para o eixo  $d$  é zero. Por outro lado, a corrente no eixo  $q$  é controlada usando o torque elétrico ótimo,  $T_e^*$ , como referência. Este torque ótimo é obtido negligenciando a fricção da turbina eólica, ou seja,

$$T_e^* = \frac{3N_p}{4} [\psi_d i_q^* + \psi_q i_d^*]. \quad (13)$$

Logo, a referência para  $i_q$  é

$$i_q^* = \frac{T_e^*}{\frac{3N_p}{4} \psi_q}, \quad (14)$$

considerando  $i_d^* = 0$ .

O controle propriamente dito das correntes em coordenadas  $dq$  é realizado com dois controladores PI independentes. Para tal, assume-se que o chaveamento dos conversores é ideal. Desta forma, as seguintes funções de transferências são comumente utilizadas [34]:

$$G_d(s) = \frac{i_d(s)}{v_d(s)} = \frac{1}{L_d s + R_s}, \quad (15)$$

e

$$G_q(s) = \frac{i_q(s)}{v_q(s)} = \frac{1}{L_q s + R_s}. \quad (16)$$

A Figura 1 mostra o diagrama de blocos do sistema de controle.

### IV. PROCEDIMENTO DE PARAMETRIZAÇÃO

O procedimento de parametrização dos controladores PI é conduzido pelo GOA com as adaptações necessárias. O algoritmo original pode ser consultado em [21]. A primeira etapa do GOA é gerar gafanhotos (agentes de busca) em posições aleatórias no espaço de busca, que deve ser informado pelo projetista. Esses gafanhotos devem encontrar as fontes de alimento, que são desconhecidas e podem variar a cada iteração. Logo, a melhor solução é aquela cuja a posição do gafanhoto é a de menor distância entre o gafanhoto e uma fonte de alimento. Isto é avaliado através de uma função-custo, chamada *fitness*, determinada pelo usuário de acordo com o problema de otimização avaliado. Em resumo, o algoritmo busca uma solução que faça a *fitness* ter um valor o mais próximo possível de zero, o que mimetiza a obtenção de alimento nesse algoritmo bioinspirado. Em

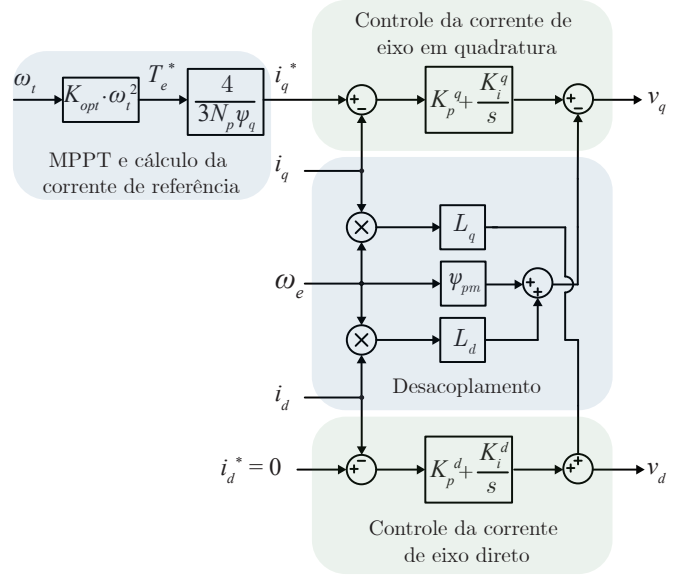


FIGURA 1. Diagrama de blocos do sistema de controle.

problemas de otimização de múltiplas variáveis, haverá múltiplas soluções que conseguem minimizar a *fitness* equivalentemente. A posição do  $i$ -ésimo gafanhoto do enxame é calculada como

$$x_i^d = c \left( \sum_{j=1, j \neq i}^N c \frac{ub_d - lb_d}{2} s (|x_j^d - x_i^d|) \frac{x_j - x_i}{d_{ij}} \right) + \hat{T}_d, \quad (17)$$

onde  $lb_d$  e  $ub_d$  são os limites inferiores e superiores da  $d$ -ésima dimensão do espaço de busca. O valor da melhor solução atual é salvo na variável  $\hat{T}_d$ . Além disso,  $s$  define a força da interação social, isto é,

$$s(r) = f e^{-r} - e^{-r}, \quad (18)$$

sendo que  $r$  é um número gerado aleatoriamente a cada iteração na faixa  $[0,1]$ . Além disso,  $f = 0,5$  e  $l = 1,5$  determinam a intensidade de atração e escala de atratividade, respectivamente [21].

Ainda, o fator  $c$  auxilia na transição de busca global e local, sendo determinado como:

$$c = c_{max} - k \frac{c_{max} - c_{min}}{k_t}, \quad (19)$$

onde  $k$  e  $k_t$  são a iteração atual e o número máximo de iterações, respectivamente. Além disso,  $c_{min} = 1 \times 10^{-5}$  e  $c_{max} = 1$  [21]. A utilização deste componente garante a saída de mínimos locais, característica inerente dos otimizadores estocásticos.

A explicação acima é relativa a lógica do GOA e abstrai o comportamento dos gafanhotos na natureza. Para utilização deste algoritmo como um parametrizador sistemático de controladores, utilizam-se (17)-(19) e as seguintes regras:

- 1) A posição dos gafanhotos  $x_i^d$  representam abstratamente os ganhos do controlador;

- 2) As variáveis de interesse que compõem o vetor de saída do otimizador são os ganhos dos dois controladores PI que compõem o FOC, ou seja,  $O = [K_p^d K_i^d K_p^q K_i^q]$ . Portanto, a dimensão do problema  $d$  é quatro (uma dimensão para cada variável de interesse);
- 3) O usuário deve definir os limites do espaço de busca  $[ub_d, lb_d]$  para cada dimensão. Esse espaço de busca deve ser suficientemente grande para garantir que o algoritmo encontre a solução global. Esses limites não precisam ser iguais para cada dimensão, visto que cada dimensão está relacionada com uma variável de interesse, mas se não há conhecimento sobre possíveis soluções basta colocar um espaço de busca grande e idêntico em cada dimensão para que o algoritmo encontre o melhor conjunto de ganhos para o controlador. Naturalmente, um espaço de busca demasiadamente grande pode implicar na necessidade de mais iterações para que o algoritmo consiga convergir para a melhor solução;
- 4) A função-custo (*fitness*) é a soma da média dos erros de rastreamento das correntes nas coordenadas  $dq$ . Desta forma, quanto menor a *fitness*, melhor a solução obtida, pois menores são os erros de rastreamento. Essa função é calculada ao final de cada iteração e serve para verificar se é necessário atualizar  $\hat{T}_d$ . Isto é, se a solução atual é melhor que a anterior,  $\hat{T}_d$  recebe os valores de  $x_i^d$ , pois a *fitness* diminui. Caso contrário,  $\hat{T}_d$  se mantém com os mesmos valores da iteração anterior;
- 5) Uma penalização da *fitness* deve ser considerada para assegurar a eliminação de soluções inviáveis. Para tal, se as tensões requeridas para executar as ações de controle nas coordenadas  $dq$  forem superior a tensão disponível no barramento, então a *fitness* é multiplicada por 100, excluindo a solução inviável;
- 6) O usuário define a número de iterações que o algoritmo irá executar e a quantidade de agentes de busca. Em algoritmos de otimização estocástico baseados em inteligência de enxame, quanto maior forem ambos parâmetros, maior a probabilidade de encontrar a solução global. Entretanto, maior será o custo computacional para executar uma iteração. Logo, um balanço entre esse parâmetros deve ser levado em consideração durante a configuração do otimizador. Uma discussão sobre essa tarefa é fornecida na próxima seção;
- 7) A *fitness* é calculada considerando a minimização dos erros de rastreamento em coordenadas  $dq$ . Para tal, um cenário de atuação do sistema em malha fechada deve ser implementado e codificado em uma função que será chamada pelo otimizador a cada iteração. Desta forma, o algoritmo gera uma solução usando (17)-(19) e a equação da *fitness* com suas penalizações e atribui aos ganhos do controlador essa solução para testá-la.

Ou seja,  $K_p^d = \hat{T}_1 K_i^d = \hat{T}_2 K_p^q = \hat{T}_3 K_i^q = \hat{T}_4$ . Com isso, executa um laço *for*, devidamente programado dentro do arquivo que contém um cenário de teste do sistema em malha fechada. Ao final desse laço de repetição, calcula-se o valor da *fitness*. Em seguida, uma nova solução é gerada e o otimizador avalia novamente a *fitness* no arquivo de teste. Com isso, o algoritmo avança para verificar a necessidade de atualizar  $\hat{T}_d$  até que termine o número de iterações definido pelo usuário. Ao final, fornece os melhores valores de  $\hat{T}_d$ , os quais provêm a menor *fitness*.

A Figura 2 sintetiza o procedimento de parametrização do controlador discutido nessa seção.

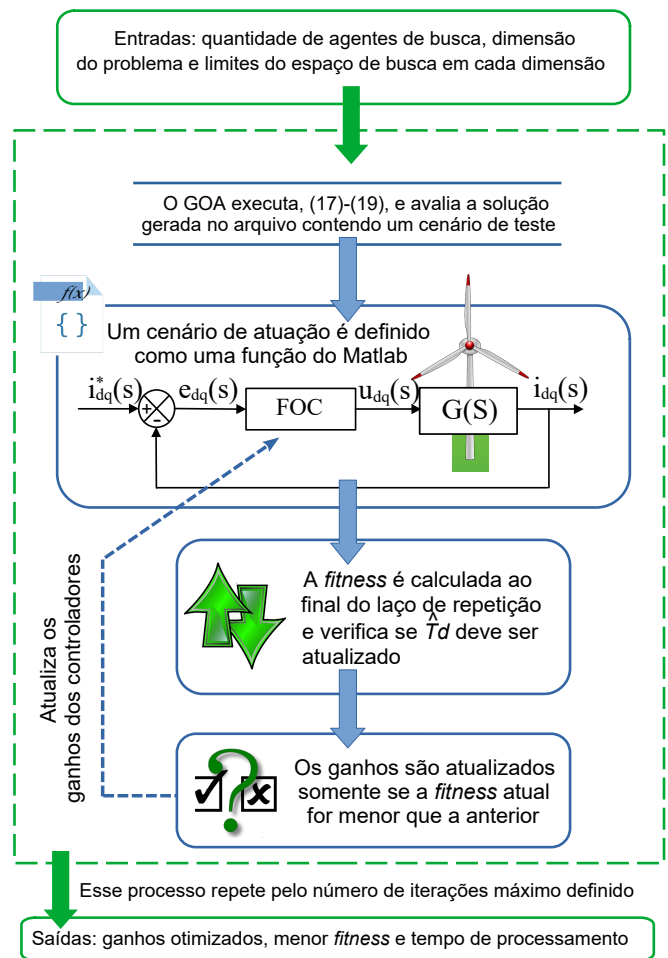


FIGURA 2. Esquema ilustrativo do procedimento de parametrização do FOC usando GOA.

## V. RESULTADOS

Nesta seção são discutidos os resultados do procedimento de parametrização, a resposta do sistema em malha fechada com o sistema otimizado e uma comparação do método proposto com uma técnica de ajuste de ganhos tradicional. A Tabela 1 apresenta os parâmetros do sistema. Além disso,  $Cp_{max} = 0,503$  e  $\lambda_{max} = 9,55$ . Ademais, a tensão do

barramento CC é de 6,5 kV e a frequência de amostragem é de 5 kHz. A velocidade nominal do vento no processo de parametrização é fixada em 11.2 m/s, adicionada por uma variação aleatória de  $\pm 1$  m/s para obter ganhos adequados para uma maior faixa de ganhos. A dinâmica de comutação do inversor dos conversores *back-to-back* é considerada ideal neste trabalho, ou seja, não foi simulada uma técnica de modulação para reduzir o custo computacional do procedimento de parametrização. Entretanto, o atraso de implementação foi simulado através da aproximação de Padé, considerando uma amostra.

TABELA 1. Parâmetros do sistema [34].

Parâmetro	Símbolo	Valor	Unidade
Comprimento das pás da turbina	$R$	90	m
Coefficiente de fricção	$B$	0,1	[-]
Coefficiente da turbina	$C_1$	0,78	[-]
Coefficiente da turbina	$C_2$	142	[-]
Coefficiente da turbina	$C_3$	0,58	[-]
Coefficiente da turbina	$C_4$	0,001	[-]
Coefficiente da turbina	$C_5$	2,14	[-]
Coefficiente da turbina	$C_6$	9,2	[-]
Coefficiente da turbina	$C_7$	20,9	[-]
Coefficiente da turbina	$C_8$	-0.002	[-]
Coefficiente da turbina	$C_9$	-0.008	[-]
Inércia equivalente	$J_{eq}$	$7,37 \times 10^7$	kgm <sup>2</sup>
Número de polos do PMSG	$N_p$	320	[-]
Resistência do estator	$R_s$	64	mΩ
Indutância no eixo direto	$L_d$	1,8	mH
Indutância no eixo de quadratura	$L_q$	1,8	mH
Fluxo magnético máximo	$\psi_{pm}$	19,49	Wb

A Figura 3 mostra o perfil de velocidade de vento simulada, que é altamente estocástica, o que requer um controlador rápido para atender a demanda de rastreamento da corrente de referência gerada pelos métodos implementados. Este perfil de vento foi adotado pois se o controle consegue agir rapidamente para rastrear as referências considerando um vento extremamente estocástico, então seu desempenho também será satisfatório quando o vento for mais ameno, pois as mudanças serão mais brandas.

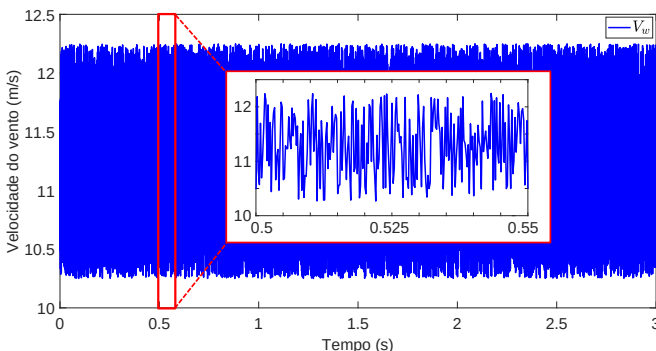


FIGURA 3. Velocidade do vento.

O objetivo do otimizador é definir os melhores ganhos do controlador para minimizar os erros de rastreamento das correntes nas coordenadas  $dq$ . O espaço de busca dos ganhos do controlador é  $lb = [1 \times 10^{-6} \ 1 \times 10^{-6} \ 1 \times 10^{-6} \ 1 \times 10^{-6}]$  e  $ub = [1 \times 10^3 \ 1 \times 10^3 \ 1 \times 10^3 \ 1 \times 10^3]$ . Seis configurações do otimizador foram avaliadas, denotadas como (gafanhotos, iterações), sendo elas (50, 50), (50, 500), (50, 1000), (100, 50), (100, 500) e (100, 1000). Cada configuração foi executada dez vezes para avaliar a qualidade das soluções obtidas. Embora cada execução do procedimento tenha retornado uma solução diferente, todas as soluções apresentaram métricas de erro equivalente, sendo as seguintes métricas avaliadas: o erro médio absoluto (*mean absolute error* - MAE), o erro quadrático médio (*mean squared error* - MSE) e a raiz do erro quadrático médio (*root mean squared error* - RMSE). Isto indica que este algoritmo tem alta taxa de convergência para o problema avaliado. Além disso, todos os conjuntos de ganhos provido pelo GOA são implementáveis, visto que nenhum controlador otimizado requereu mais tensão do que a tensão disponível no barramento CC. Isso é importante pois garante a executabilidade do controlador na prática, ou seja, sem forçar o *hardware* nem por em risco a estabilidade do sistema. Portanto, para este sistema, pode-se afirmar que o procedimento de parametrização garante desempenho satisfatório ao sistema em malha fechada, reduzindo a dependência da experiência do projetista com o sistema e o controlador, visto que esta parametrização é automatizada. Destaca-se ainda que nenhuma das soluções providas pelo GOA, considerando as configurações discutidas, implicou em sobressinais nas correntes controladas. Outras configurações com menos iterações foram avaliadas, porém apresentaram uma forte tendência ao acúmulo de erro. Portanto, o mínimo de iterações sugerido para esse procedimento é 50 iterações.

Como todas as soluções tem desempenho similar, então sugere-se utilizar a configuração com menos agentes de busca e iterações para realizar este processo mais rapidamente. A carga computacional deste procedimento executando-o em um processador i5-8265U 1,60 GHz com Intel UHD Graphics 610, para as configurações (50, 50), (50, 500), (50, 1000), (100, 50), (100, 500) e (100, 1000) foi em torno de 17 s, 142 s, 377 s, 32 s, 302 s e 700 s, respectivamente. Para ilustrar visualmente o desempenho do controlador otimizado será mostrado a resposta do sistema em malha fechada com o conjunto de ganhos que resultou em um menor MAE, cujos os ganhos são  $K_p^d = 10,6019$ ,  $K_i^d = 287,9805$ ,  $K_p^q = 8,9295$ ,  $K_i^q = 533,7855$ . Entretanto, destaca-se que essa solução implica em um MAE com uma diferença pequena em relação a pior solução (menos de 0,1), o que demonstra que as soluções do GOA são equivalentes.

A Figura 4 mostra os torques mecânico e elétrico. Nesta figura pode-se observar que ambos torques estão muito próximos, o que era esperado. Para enfatizar essas dinâmicas, uma ampliação do período entre 2 e 2,2 s é apresentada. Como pode ser visto, o torque ficou em torno de 0,54 MNm.

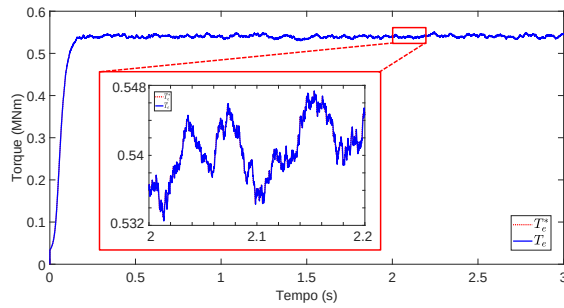


FIGURA 4. Torque mecânico e torque elétrico.

A Figura 5 mostra o rastreamento de correntes nas coordenadas  $dq$ . Como pode ser visto, o controlador consegue rastrear com precisão as correntes de referência, sem apresentar sobressinal e com rápida resposta em malha fechada. Dois trechos do experimento são realçados para melhor visualização do rastreamento das correntes, um para corrente no eixo  $d$  e outro para a corrente no eixo  $q$ .

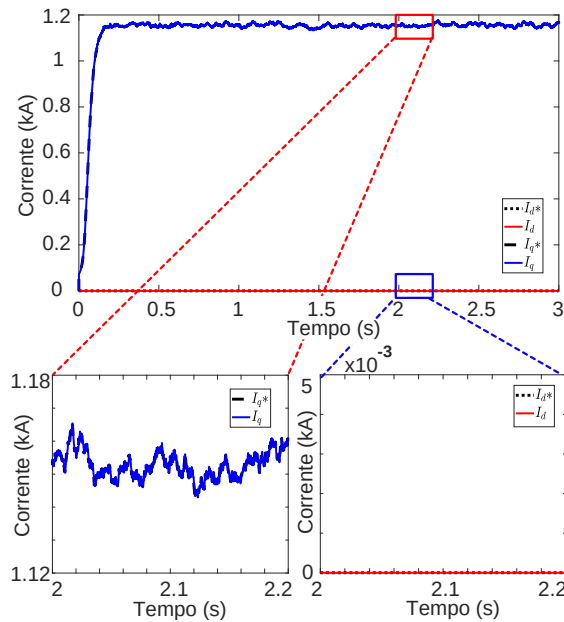


FIGURA 5. Rastreamento das correntes em coordenadas  $dq$ .

Embora a velocidade do vento considerado, que é altamente estocástica, faça a referência de corrente no eixo  $q$  variar rapidamente, o controlador otimizado conseguiu manter o sistema rastreando este sinal de forma muito próxima, o que indica que as regras determinadas para sistematizar o procedimento de otimização foram adequadas, provendo ganhos que tornam os controladores eficientes mesmo em ventos desfavoráveis para o sistema de controle das correntes do gerador.

A Figura 6 apresenta as ações de controle em coordenadas  $dq$  juntamente com a tensão do barramento. Como pode ser observado, nenhuma ação de controle saturou. Pelo contrário, ambas são exequíveis com uma boa margem de segurança considerando o sistema considerado, visto que a

tensão necessária para executar as ações de controle em seu valor máximo foi 5,62 kV, no eixo  $q$ , o qual representa 86,46% da tensão disponível no barramento (6,5 kV). Isto indica a viabilidade de implementação deste sistema de controle otimizado com o procedimento de parametrização proposto. Ressalta-se que uma das regras desse procedimento é justamente penalizar a função-custo (ou *fitness*) quando os ganhos determinados pelo otimizador fazem com que alguma das ações de controle requeiram mais tensão do que a tensão disponível no barramento CC para a sua sintetização.

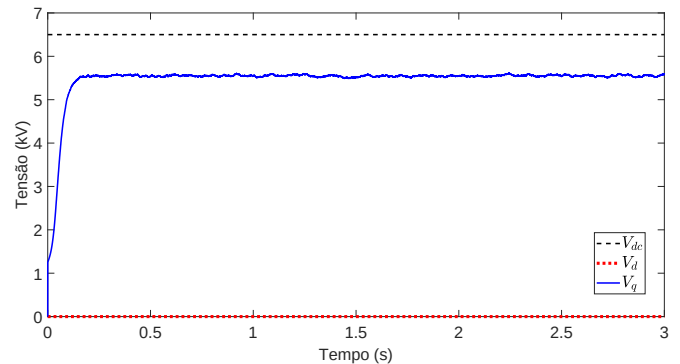


FIGURA 6. Tensão do barramento e ações de controle em coordenadas  $dq$ .

As Figuras 7 e 8 mostram as tensões e correntes trifásicas do PMSG neste experimento, respectivamente.

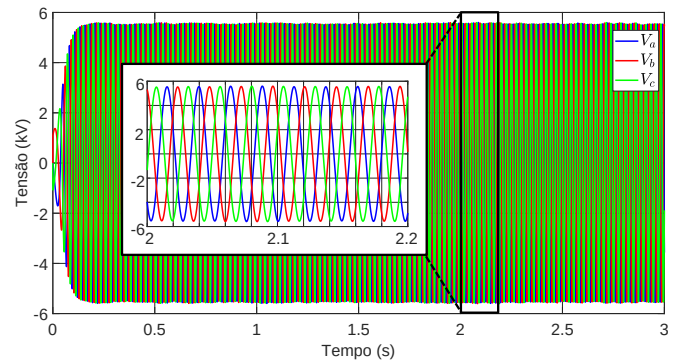


FIGURA 7. Tensões no estator do PMSG.

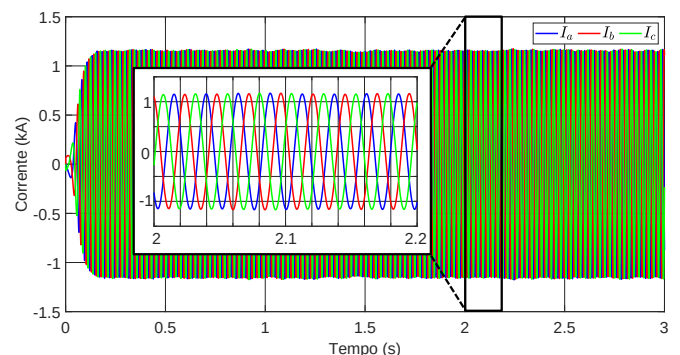


FIGURA 8. Correntes no estator do PMSG.

Como esperado ambas dinâmicas estão adequadas, visto que são obtidas ao aplicar a transformada inversa de Park nas dinâmicas em coordenadas  $dq$ , a qual preserva a amplitude desses sinais. Uma ampliação do período entre 2 e 2,2 s é mostrada em cada figura para melhor visualização dos sinais. Nesses trechos é possível verificar que as correntes trifásicas alcançam um pico próximo de 1,17 kA e que as tensões trifásicas alcançam um pico próximo de 5,6 kV, assim como a corrente e a tensão no eixo  $q$ , respectivamente.

A Figura 9 mostra a potência gerada neste experimento. Nesta figura pode-se inferir que a potência elétrica chega próxima de 10 MW quando o vento alcança seus picos de velocidade. A potência máxima gerada foi 9,94 MW para um vento de 12,2 m/s. Em termos de valores médios, a potência gerada foi em torno de 9,37 MW, considerando uma velocidade de vento média de 11,25 m/s.

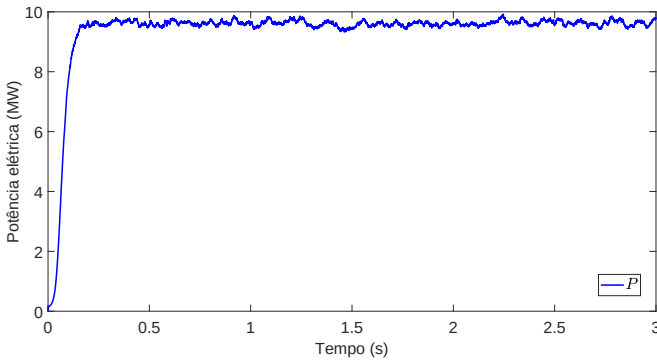


FIGURA 9. Potência gerada.

Os resultados desta simulação corroboram a viabilidade de utilizar o procedimento de parametrização para o FOC utilizado no controle de um WECS com PMSG. Adicionalmente, uma análise de estabilidade destes controladores é discutida no Apêndice.

### A. ANÁLISE COMPARATIVA

Nesta subseção será demonstrada a vantagem de utilizar o procedimento de parametrização dos controladores usando GOA e as regras desenvolvidas para guiar a otimização frente a um método clássico de sintonia de controladores PI. Para tal, foi sintonizado os controladores PI pelo método de Chien, Hrone e Reswick (CHR) [35]. Essa técnica de ajuste é baseada nas características do sistema: ganho  $K$ , tempo de atraso  $\theta$  e constante de tempo  $\tau$ . Este método provê o ganho  $K_p$  e a constante de integração  $T_i$  para um controlador PI da seguinte forma:

$$K_p = \frac{0,35\tau}{K\theta}, \quad (20)$$

e

$$T_i = 1,16\theta, \quad (21)$$

respectivamente.

As funções de transferência que representam o sistema são (15) e (16). Como são idênticas, basta sintonizar um controlador e replicar para a outra coordenada. Com base

em (15), pode afirmar que  $K = 1/R_s$  e  $\tau = L_d/R_s$ . O tempo de atraso foi verificado ao aplicar um degrau unitário no sistema em malha aberta, onde foi inferido que  $\theta = 1 \times 10^{-4}$ . Portanto,  $K_p = 1,5750$  e  $T_i = 0,0326$ . O ganho  $K_i$  é facilmente obtido pela relação  $K_i = K_p/T_i$ , a qual resulta em  $K_i = 48,2759$ .

Uma análise comparativa do FOC parametrizado com GOA, usando os mesmos ganhos do experimento anterior, e o FOC parametrizado com o método CHR é discutida a seguir. Os sobrescritos GOA e CHR são utilizados para diferenciar as dinâmicas com cada controlador. O cenário de avaliação destes controladores possuem um perfil de vento com a mesma estocasticidade do experimento anterior. Entretanto, a velocidade nominal é variada duas vezes durante essa simulação: inicialmente, a velocidade nominal do vento é 9,5 m/s. Em seguida, quando o tempo alcança 1 s, a velocidade nominal do vento é 10,5 m/s. Finalmente, a partir de 2 s, a velocidade nominal do vento passa para 11,5 m/s.

As Figuras 10 e 11 apresentam os rastreamentos de corrente usando FOC baseado em GOA e FOC baseado em CHR no eixo  $d$  e no eixo  $q$ , respectivamente.

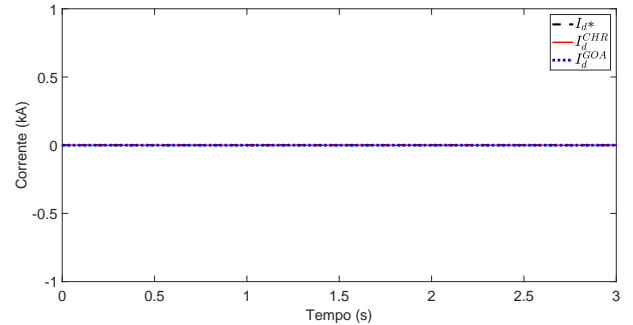


FIGURA 10. Rastreamento da corrente no eixo  $d$ .

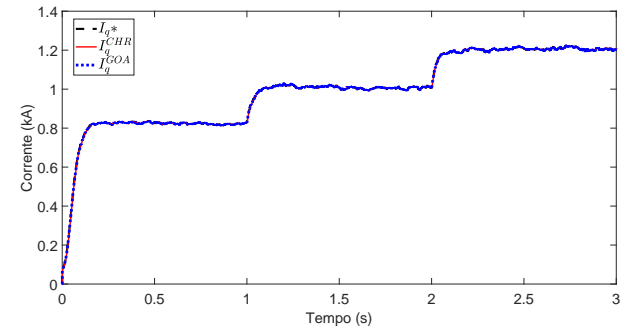


FIGURA 11. Rastreamento da corrente no eixo  $q$ .

Como pode ser observado ambos controladores são capazes de manter o sistema estável e operando em condições similares. De fato, visualmente os resultados são indiferenciáveis ao observar o experimento como um todo. O rastreamento da corrente de referência no eixo  $d$  é equivalente para ambos controladores, sem diferenças significati-



vas. Entretanto, o controlador baseado em GOA provê um rastreamento mais preciso da corrente no eixo  $q$ .

A Figura 12 mostra um *zoom* no rastreamento de corrente no eixo  $q$  quando um degrau é aplicado na velocidade de vento, alterando a corrente de referência nesse eixo, o que gerou o primeiro transitório. Nesta figura fica evidente que o procedimento proposto provê ganhos ao controlador que garantem um desempenho superior ao CHR. Como pode ser notado, a resposta do sistema com o controlador baseado em GOA é mais rápida e precisa para o rastreamento de corrente cuja referência é variável. Embora a melhoria pareça sutil, ressalta-se que a escala da corrente é em kA. Um comportamento similar é observado para o segundo degrau de velocidade do vento. A Figura 13 mostra esse segundo transitório, onde corrobora-se novamente a vantagem de utilizar o procedimento proposto para a parametrização do FOC.

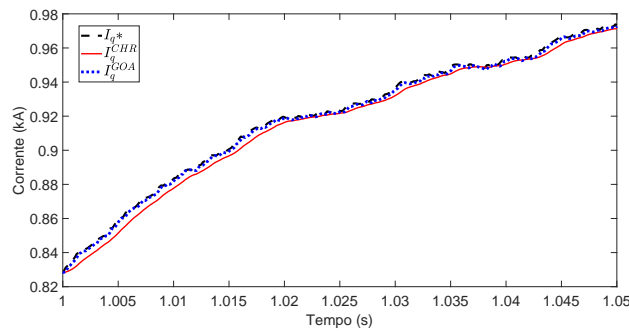


FIGURA 12. Rastreamento da corrente no eixo  $q$  (*zoom* no primeiro transitório).

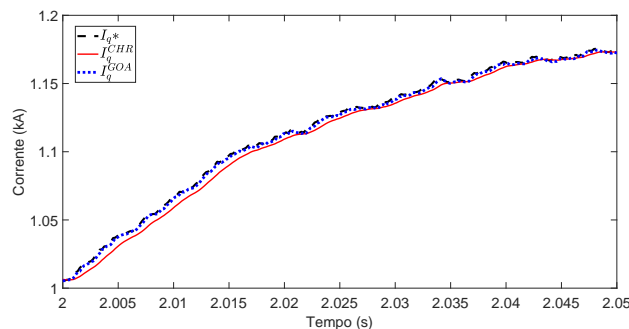


FIGURA 13. Rastreamento da corrente no eixo  $q$  (*zoom* no segundo transitório).

A Figura 14 mostra os erros de rastreamento no eixo  $q$  utilizando ambos controladores. Os erros de rastreamento no eixo  $d$  não foram incluídos nesta figura pois seus valores são irrelevantes (vide rastreamento de corrente nesta coordenada na Figura 10). Essa figura destaca mais claramente as melhorias obtidas pelo uso do procedimento de parametrização proposto. O MAE, MSE e RMSE obtidos com GOA foram 0,6692, 0,9497 e 0,9745, respectivamente. Por outro lado, o MAE, MSE e RMSE obtidos com CHR foram 1,4920,

6,2505 e 2,5001, respectivamente. Portanto, ao utilizar o GOA como ferramenta de parametrização do FOC juntamente com as regras propostas, há uma redução de 55,15%, 84,81% e 61,02% no MAE, MSE e RMSE, respectivamente. Essa redução nas métricas de erro permitem incrementar a geração de potência.

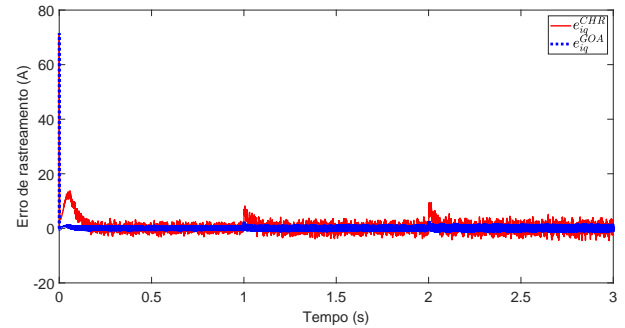


FIGURA 14. Erro de rastreamento das correntes.

A resposta em malha fechada com ambos controladores é similar, então não há diferenciação visual nas correntes e tensões trifásicas. Portanto, essas figuras não serão mostradas neste trabalho. A Figura 15 apresenta a potência gerada com cada controlador sob as condições de vento com degraus no perfil de velocidade.

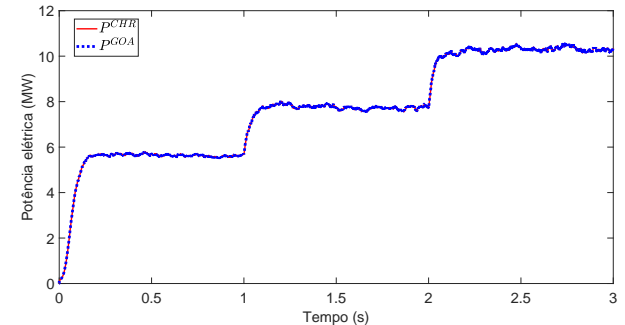


FIGURA 15. Potência gerada.

Como pode ser observado, a uma geração de potência reduzida com ventos mais amenos. Sob ventos com velocidade nominal de 9,5 m/s, 10,5 m/s e 11,5 m/s, adicionados de um fator estocástico conforme discutido anteriormente, o WECS gerou cerca de 5,6 MW, 7,7 MW e 10,1 MW, respectivamente. Em termos comparativos, o uso do FOC baseado em GOA permitiu uma geração média de 7,7169 MW, enquanto o uso do FOC baseado em CHR permitiu uma geração média de 7,7162 MW. Embora esta diferença seja pequena em termos absolutos para um experimento como o que foi discutido, a geração de 728,58 W médio continuamente, resultará em uma potência acumulada significativa ao longo de um ano. Portanto, pode-se afirmar que o método proposto traz benefícios para o setor energético, elevando a produção de potência a partir de energia eólica.

## VI. CONCLUSÃO

Este trabalho apresentou um procedimento de parametrização sistemático de controladores PI utilizados na abordagem FOC de um WECS com PMSG do tipo *direct drive*. O método proposto utiliza o otimizador GOA e minimiza o erro de rastreamento das correntes do gerador em coordenadas  $dq$  enquanto garante a viabilidade de sintetização das ações de controle resultantes dos conjuntos de ganhos providos por este algoritmo. Para demonstrar a capacidade do procedimento proposto, seis configurações do otimizador foram avaliadas com as regras propostas para a parametrização dos controladores. De modo geral, todas as parametrizações obtidas com o GAO eram implementáveis na prática, visto que nenhuma delas exigiu mais tensão do que havia disponível no barramento. Uma das regras do procedimento de parametrização desenvolvido trata justamente da exclusão de soluções inviáveis na prática, ou seja, quando a ação de controle requer mais tensão do que a tensão disponível no barramento CC para sua sintetização. Além disso, as soluções providas podem ser consideradas equivalentes em desempenho no rastreamento das correntes de referência, pois todas soluções apresentaram as métricas de erro com valores similares para as seis configurações do otimizador. Isso indica que o procedimento de parametrização consegue prover ganhos otimizados que implicam em desempenho satisfatório mesmo que o projetista tenha pouca experiência com algoritmos de otimização meta-heurística. Um cenário não considerado na otimização foi utilizado para realizar a comparação do FOC baseado em GOA e um FOC baseado no método de sintonia clássica CHR. O procedimento proposto reduziu 55,15%, 84,81% e 61,02% no MAE, MSE e RMSE, respectivamente, provendo um controlador mais rápido e preciso, o qual resultou em um aumento da geração de potência. Portanto, o procedimento proposto cumpre efetivamente com seu propósito de ajuste dos ganhos dos controladores PI da estratégia FOC aplicada a WECS.

### APÊNDICE - ANÁLISE DE ESTABILIDADE

A análise de estabilidade dos controladores otimizados é feita através da avaliação das margens de ganho e fase. As Figuras 16 e 17 mostram os diagramas de Bode das funções de transferência em malha aberta considerando os controladores otimizados que foram utilizados para regular as correntes do gerador nas coordenadas  $d$  e  $q$ , respectivamente.

Tipicamente, uma margem de ganho superior à 6 dB e uma margem de fase superior à  $30^\circ$  já provêm uma boa estabilidade ao sistema. Conforme pode ser observado, as margens de ganho e de fase em ambos diagramas de Bode são similares, o que é plausível visto que os dois controladores foram otimizados de forma conjunta, e com valores relevantemente superiores aos valores típicos para garantir estabilidade a um sistema.

A margem de ganho de ambos é  $G_m = 25,1$  dB, o que significa que o ganho do sistema pode variar até aproxi-

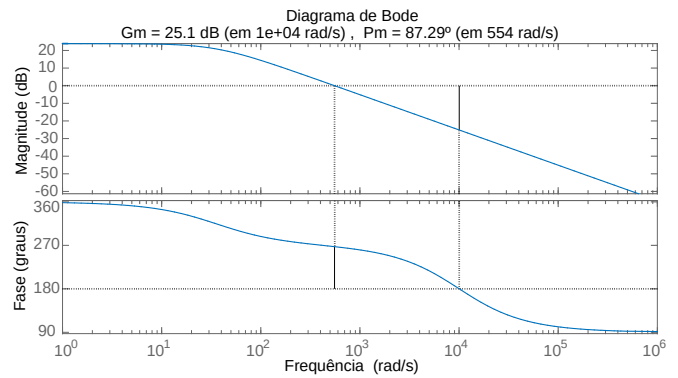


FIGURA 16. Margens de ganho e fase considerando o controlador otimizado no eixo  $d$ .

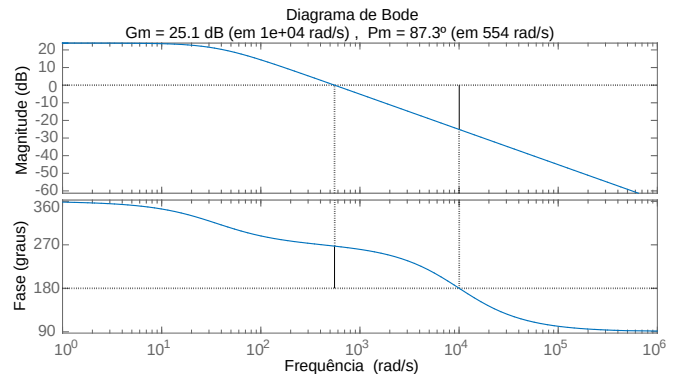


FIGURA 17. Margens de ganho e fase considerando o controlador otimizado no eixo  $q$ .

madamente 32,39 vezes. Além disso, as margens de fase em coordenadas  $d$  e  $q$  são  $87,29^\circ$  e  $87,3^\circ$ , respectivamente. Isto indica que o sistema tem uma boa capacidade de tolerância a atrasos sem perder a estabilidade. Embora uma margem de fase tão elevada possa comprometer o desempenho dos controladores em termos de velocidade da resposta, os resultados apresentados mostraram que o sistema em malha fechada apresenta uma resposta de rastreamento rápida. Portanto, o procedimento proposto para a parametrização dos controladores garante ganhos otimizados que asseguram a estabilidade ao sistema e provêm robustez satisfatória para rejeição de perturbações.

### AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi financiado pelo Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) - código de financiamento 407826/2022-0.

### CONTRIBUIÇÕES DOS AUTORES

**EVALD, P.J.D.O.:** Conceitualização, Curadoria de dados, Análise de dados, Recebimento de financiamento, Pesquisa, Metodologia, Desenvolvimento, implementação e teste de software, Design da apresentação de dados, Redação do manuscrito original. **DALL'ASTA, M.S.:** Validação de dados e experimentos, Redação - revisão e edição. **DE ANDRADE, J.M.:** Redação - revisão e edição. **S., LENON:** Redação

- revisão e edição. LAZZARIN, T.B.: Recebimento de financiamento, Administração do projeto, Disponibilização de ferramentas, Supervisão, Redação - revisão e edição.

## PLAGIO E SIMILARIDADE

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

## REFERÊNCIAS

- [1] P. J. D. O. Ewald, R. V. Tambara, H. A. Gründling, "A direct discrete-time reduced order robust model reference adaptive control for grid-tied power converters with LCL filter", *Eletrônica de Potência*, vol. 25, no. 3, pp. 361–372, Setembro 2020, doi:10.18618/REP.2020.3.0039.
- [2] P. J. D. O. Ewald, G. V. Hollweg, R. V. Tambara, H. A. Gründling, "A discrete-time robust adaptive PI controller for grid-connected voltage source converter with LCL filter", *Eletrônica de Potência*, vol. 26, no. 1, pp. 19–30, Março 2021, doi:10.18618/REP.2021.1.0053.
- [3] B. Clarke, F. Otto, R. Stuart-Smith, L. Harrington, "Extreme weather impacts of climate change: an attribution perspective", *Environmental Research: Climate*, vol. 1, no. 1, p. 12001, Junho 2022, doi:10.1088/2752-5295/ac6e7d.
- [4] G. V. Hollweg, P. J. D. O. Ewald, E. Mattos, L. C. Borin, R. V. Tambara, H. A. Gründling, W. Su, "A Direct Adaptive Controller with Harmonic Compensation for Grid-connected Converters", *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 71, no. 3, pp. 2978–2989, Março 2024, doi:10.1109/TIE.2023.3270535.
- [5] M. Z. Malik, M. H. Baloch, M. Gul, G. S. Kaloi, S. T. Chauhdary, A. A. Memon, "A research on conventional and modern algorithms for maximum power extraction from wind energy conversion system: A review", *Environmental Science and Pollution Research*, vol. 28, no. 5, pp. 5020–5035, Novembro 2021, doi:10.1007/s11356-020-11558-6.
- [6] B. Mendi, M. Pattnaik, G. Srungavarapu, "A single current sensor based adaptive step size MPPT control of a small scale variable speed wind energy conversion system", *Applied Energy*, vol. 357, p. 122492, Dezembro 2023, doi:10.1016/j.apenergy.2023.122492.
- [7] A. M. Osman, F. Alsokhry, "Sliding mode control for grid integration of wind power system based on direct drive PMSG", *IEEE Access*, vol. 10, pp. 26567–26579, Março 2022, doi:10.1109/ACCESS.2022.3157311.
- [8] A. Raouf, K. B. Tawfiq, E. T. Eldin, H. Youssef, E. E. El-Kholy, "Wind energy conversion systems based on a synchronous generator: comparative review of control methods and performance", *Energies*, vol. 16, no. 5, p. 2147, Fevereiro 2023, doi:10.3390/en16052147.
- [9] M. Nasiri, J. Milimonfared, S. H. Fathi, "Modeling, analysis and comparison of TSR and OTC methods for MPPT and power smoothing in permanent magnet synchronous generator-based wind turbines", *Energy Conversion and Management*, vol. 86, pp. 892–900, Julho 2014, doi:10.1016/j.enconman.2014.06.055.
- [10] F. Wang, Z. Zhang, X. Mei, J. Rodríguez, R. Kennel, "Advanced control strategies of induction machine: Field oriented control, direct torque control and model predictive control", *Energies*, vol. 11, no. 1, p. 120, Janeiro 2018, doi:10.3390/en11010120.
- [11] M. Metwally Mahmoud, "Improved current control loops in wind side converter with the support of wild horse optimizer for enhancing the dynamic performance of PMSG-based wind generation system", *International Journal of Modelling and Simulation*, vol. 43, no. 6, pp. 952–966, Outubro 2023, doi:10.1080/02286203.2022.2139128.
- [12] H. Salime, B. Bossoufi, S. Motahhir, Y. El Mourabit, "A novel combined FFOC-DPC control for wind turbine based on the permanent magnet synchronous generator", *Energy Reports*, vol. 9, pp. 3204–3221, Fevereiro 2023, doi:10.1016/j.egy.2023.02.012.
- [13] N. Zine Laabidine, B. Bossoufi, I. El Kafazi, C. El Bekkali, N. El Ouanjli, "Robust Adaptive Super Twisting Algorithm Sliding Mode Control of a Wind System Based on the PMSG Generator", *Sustainability*, vol. 15, no. 14, p. 10792, July 2023, doi:10.3390/su151410792.
- [14] N. Mughees, M. H. Jaffery, M. Jawad, "A new predictive control strategy for improving operating performance of a permanent magnet synchronous generator-based wind energy and superconducting magnetic energy storage hybrid system integrated with grid", *Journal of Energy Storage*, vol. 55, p. 105515, Agosto 2022, doi:10.1016/j.est.2022.105515.
- [15] P. M. Meshram, R. G. Kanojija, "Tuning of PID controller using Ziegler-Nichols method for speed control of DC motor", in *IEEE International Conference on Advances in Engineering, Science and Management (ICAESM 2012)*, pp. 117–122, IEEE, Março 2012.
- [16] T. Suksawat, P. Kaewpradit, "Comparison of Ziegler-Nichols and Cohen-Coon tuning methods: implementation to water level control based MATLAB and Arduino", *Engineering Journal Chiang Mai University*, vol. 28, no. 1, pp. 153–168, Abril 2021.
- [17] I.-L. Chien, "IMC-PID controller design-an extension", *IFAC Proceedings Volumes*, vol. 21, no. 7, pp. 147–152, Junho 1988, doi:10.1016/S1474-6670(17)53816-1.
- [18] R. K. Mudi, N. R. Pal, "A self-tuning fuzzy PI controller", *Fuzzy Sets and Systems*, vol. 115, no. 2, pp. 327–338, Junho 2000, doi:10.1016/S0165-0114(98)00147-X.
- [19] M. Y. Hassan, G. Kothapalli, "Comparison between neural network based PI and PID controllers", in *7th International Multi-Conference on Systems, Signals and Devices*, pp. 1–6, IEEE, Setembro 2010, doi:10.1109/SSD.2010.5585598.
- [20] S. Mirjalili, A. Lewis, "The whale optimization algorithm", *Advances in Engineering Software*, vol. 95, pp. 51–67, Fevereiro 2016, doi:10.1016/j.advengsoft.2016.01.008.
- [21] S. Saremi, S. Mirjalili, A. Lewis, "Grasshopper optimisation algorithm: theory and application", *Advances in Engineering Software*, vol. 105, pp. 30–47, Janeiro 2017, doi:10.1016/j.advengsoft.2017.01.004.
- [22] M. Khishe, M. R. Mosavi, "Chimp optimization algorithm", *Expert Systems with Applications*, vol. 149, p. 113338, Março 2020, doi:10.1016/j.eswa.2020.113338.
- [23] F. A. Hashim, A. G. Hussien, "Snake Optimizer: A novel meta-heuristic optimization algorithm", *Knowledge-Based Systems*, vol. 242, p. 108320, Fevereiro 2022, doi:10.1016/j.knsys.2022.108320.
- [24] G. V. Hollweg, P. J. D. O. Ewald, E. Mattos, L. C. Borin, R. V. Tambara, V. F. Montagner, "Self-tuning methodology for adaptive controllers based on genetic algorithms applied for grid-tied power converters", *Control Engineering Practice*, vol. 135, p. 105500, Março 2023, doi:10.1016/j.conengprac.2023.105500.
- [25] P. J. D. O. Ewald, G. V. Hollweg, L. C. Borin, E. Mattos, R. V. Tambara, V. F. Montagner, H. A. Gründling, "An optimal initialization for robust model reference adaptive PI controller for grid-tied power systems under unbalanced grid conditions", *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, vol. 124, p. 106589, Junho 2023, doi:10.1016/j.engappai.2023.106589.
- [26] H. Benbouhenni, I. Colak, N. Bizon, "Application of genetic algorithm and terminal sliding surface to improve the effectiveness of the proportional–integral controller for the direct power control of the induction generator power system", *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, vol. 125, p. 106681, Julho 2023, doi:10.1016/j.engappai.2023.106681.
- [27] M. Lara, J. Garrido, J.-W. van Wingerden, S. P. Mulders, F. Vázquez, "Optimization with genetic algorithms of individual pitch control design with and without azimuth offset for wind turbines in the full load region", *IFAC-PapersOnLine*, vol. 56, no. 2, pp. 342–347, Novembro 2023, doi:10.1016/j.ifacol.2023.10.1591.
- [28] R. U. Viaro, L. C. Borin, R. Medke, E. Mattos, C. R. D. Osório, V. F. Montagner, "Otimização de controladores baseada em meta-heurística aplicada a conversores CC-CC com validação em hardware-in-the-loop", *Eletrônica de Potência*, vol. 29, pp. e202408–e202408, Abril 2024, doi:10.18618/REP.2024.1.0040.
- [29] V. N. Ogar, S. Hussain, K. A. A. Gamage, "Load frequency control using the particle swarm optimisation algorithm and pid controller for effective monitoring of transmission line", *Energies*, vol. 16, no. 15, p. 5748, Agosto 2023, doi:10.3390/en16155748.
- [30] J. Sun, M. Chen, L. Kong, Z. Hu, V. Veerasamy, "Regional load frequency control of BP-PI wind power generation based on particle swarm optimization", *Energies*, vol. 16, no. 4, p. 2015, Fevereiro 2023, doi:10.3390/en16042015.
- [31] G. V. Hollweg, P. J. D. O. Ewald, E. Mattos, L. C. Borin, R. V. Tambara, V. F. Montagner, "Optimized parametrization of adaptive controllers for enhanced current regulation in grid-tied converters", *International Journal of Adaptive Control and Signal Processing*, vol. 38, no. 1, pp. 200–220, Outubro 2024, doi:10.1002/acs.3696.
- [32] P. J. D. O. Ewald, G. V. Hollweg, L. C. Borin, E. Mattos, R. V. Tambara, V. F. Montagner, H. A. Gründling, "A smart parametrisation

- for robust adaptive PI controller applied on renewable energy power generation systems under weak and uttermost weak grid conditions”, *Computers and Electrical Engineering*, vol. 116, p. 109203, Março 2024, doi:10.1016/j.compeleceng.2024.109203.
- [33] H. Salime, B. Bossoufi, Y. El Mourabit, S. Motahhir, “Robust nonlinear adaptive control for power quality enhancement of PMSG wind turbine: Experimental control validation”, *Sustainability*, vol. 15, no. 2, p. 939, Janeiro 2023, doi:10.3390/su15020939.
- [34] L. B. K. Fisch, M. L. Heldwein, “10-MW direct-drive PMSG-based wind energy conversion system model”, in *IEEE 21st workshop on control and modeling for power electronics (COMPEL)*, pp. 1–8, IEEE, Novembro 2020, doi:10.1109/COMPEL49091.2020.9265784.
- [35] K. L. Chien, J. Hrones, J. B. Reswick, “On the automatic control of generalized passive systems”, *Transactions of the American Society of Mechanical Engineers*, vol. 74, no. 2, pp. 175–183, Julho 1952, doi:10.1115/1.4015724.

## DADOS BIOGRÁFICOS

**Paulo Jefferson Dias de Oliveira Evald** é engenheiro de automação (2016) e mestre em engenharia de computação (2018), ambos pela Universidade Federal do Rio Grande (FURG), e doutor em engenharia elétrica (2021) pela Universidade Federal de Santa Maria. Realizou seu primeiro pós-doutorado na FURG (2023). Atualmente é professor da Universidade Federal de Pelotas (UFPel) e pesquisador de pós-doutorado na Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC) no Instituto de Eletrônica de Potência (INEP). Além disso, ele é integrante do Grupo de Sistemas Inteligentes e Controle (GSIC/UFPel), Grupo de Pesquisa em Automação e Robótica Inteligente (NAUTEC/FURG), Instituto de Eletrônica de Potência (INEP/UFSC) e membro da Sociedade Brasileira de Eletrônica de Potência (SOBRAEP). Suas principais áreas de pesquisa são energia renovável, aplicações de controle em eletrônica de potência e otimização meta-heurística de controladores.

**Matheus Schramm Dall’asta** possui graduação (2017) e mestrado (2019) em engenharia elétrica pela UFSC, onde é atualmente doutorando desde

de 2019. Suas principais áreas de pesquisa são conversores CC-CC de alto ganho, retificadores PWM com correção do fator de potência, conversores a capacitor chaveado, fontes renováveis de energia, sistemas de conversão de energia eólica e inversores conectados à rede.

**Jéssika Melo Andrade** possui graduação em sistemas eletrônicos pelo Instituto Federal de Santa Catarina (2015), mestrado (2018) e doutorado (2022) em engenharia elétrica pela UFSC, além de pós-doutorado realizado no INEP/UFSC (2023). Atualmente é professora dessa mesma instituição. Suas principais áreas de pesquisa são conversores CC-CC de alto ganho, técnicas para elevação de ganho, modelagem e controle de conversores estáticos e aplicações de eletrônica de potência para energias renováveis.

**Lenon Schmitz** possui graduação (2013), mestrado (2015), doutorado (2020) em engenharia elétrica pela UFSC. Atualmente é professor dessa mesma instituição. Suas principais áreas de pesquisa são conversores estáticos de elevado rendimento, técnicas de projetos otimizados, modelagem e controle, sistemas conectados à rede e aplicações da eletrônica de potência para energias renováveis.

**Telles Brunelli Lazzarin** possui graduação (2004), mestrado (2006), doutorado (2010) e pós-doutorado (2011) em engenharia elétrica pela UFSC. Atuou como pesquisador visitante na Northeastern University em Boston no período 2017-2018. Atualmente é professor da UFSC. Desde 2020 é Editor Associado da IEEE Open Journal of Power Electronics (OJ-PEL) e da Revista Eletrônica de Potência. Suas principais áreas de pesquisa são: conversores a capacitor chaveado, conversores híbridos a capacitor chaveado, retificadores monofásicos, inversores de tensão, conversores para geradores eólicos de pequeno porte e conversores CC-CC de alto ganho.