Universidade Federal Rural do Semi-árido
Revista Eletrônica de Engenharia Elétrica e Engenharia Mecânica
ISSN 2763-5325 | DOI: https://doi.org/10.21708/issn27635325

Artigo

Controle de potência de aerogeradores de indução duplamente alimentados (DFIG) em um sistema de transmissão utilizando *particle swarm optimization* (PSO) e *ladder iterative technique* (LIT)

Adriano Aron Freitas de Moura [1], Sanderson Aron Moura Gurgel Sinedino de Oliveira [2], Ednardo Pereira da Rocha[3] e Victor de Paula Brandão Aguiar [4]

[1] Universidade Federal Rural do Semiárido; adrianoaron@ufersa.edu.br
[2] Universidade Federal Rural do Semiárido; sandersonaron@gmail.com
[3] Universidade Federal Rural do Semiárido; ednardo.pereira@ufersa.edu.br
[4] Universidade Federal Rural do Semiárido; victor@ufersa.edu.br

Recebido: 26/03/2025;
Aceito: 07/07/2025;
Publicado: 20/07/2025.

Resumo: Este trabalho propõe determinar os valores das tensões do rotor para controlar as potências no estator das turbinas eólicas em regime permanente em um valor determinado em uma rede de transmissão. Para isso foi simulado um sistema de geração eólica baseado em *DFIG* (do inglês, *Doubly-fed Induction Generator*) em funcionamento, assim como, sua operacionalização e controle. Foi utilizada a Otimização por Nuvem de Partículas (do inglês, *Particle Swarm Optimization* - *PSO*), para se obter uma determinada potência ativa e reativa trifásicas no estator e *a Ladder Iterative Technique* (*LIT*), para a varredura do sistema, que permitiu determinar a tensão do rotor. A modelagem do DFIG foi desenvolvida através de modelos que refletem os mesmos cálculos realizados pelo *software ATP-EMTP* em regime permanente, conhecendo a variação das grandezas elétricas em vários pontos da topologia *DFIG* e posteriormente comparados os resultados obtidos no *MATLAB* com os modelos desenvolvidos nas simulações. A *PSO* foi utilizada para determinar as tensões no rotor que serão capazes de entregar potências determinadas no estator. Após simulações, constatou-se que a *PSO* representa uma técnica de otimização rápida e robusta e que as potências especificadas no estator foram alcançadas pela *PSO*.

Palavras-chave: Gerador de indução de dupla alimentação; transmissão de energia; nuvem de partículas

Abstract: This work proposes determining the rotor voltage values to control the stator power of wind turbines in steady-state operation at a specified value in a transmission grid. To achieve this, a wind generation system based on DFIG (Doubly-fed Induction Generator) was simulated in operation, as well as its operationalization and control. Particle Swarm Optimization (PSO) was used to obtain a specific active and reactive three-phase power in the stator, and the Ladder Iterative Technique (LIT) was used to scan the system, which allowed the determination of the rotor voltage. The DFIG modeling was developed using models that reflect the same calculations performed by the ATP-EMTP software in steady-state operation, considering the variation of electrical quantities at various points in the DFIG topology, and the results obtained in MATLAB were later compared with the models developed in the simulations. PSO was used to determine the rotor voltages that would be able to deliver specified powers to the stator. After simulations, it was found that PSO represents a fast and robust optimization technique, and the specified powers in the stator were achieved by PSO.

Key-words: Doubly fed induction generator; electrical transmission of energy; particle swarm optimization

1. INTRODUÇÃO

O controle de potência do *DFIG* em um sistema de transmissão é um problema importante na geração de energia renovável. A *Particle Swarm Optimization* (*PSO*) e a *Ladder Iterative Technique* (*LIT*) são técnicas de otimização e de varredura do sistema, respectivamente, que podem ser usadas para ajustar os parâmetros de controle do *DFIG* para maximizar a eficiência e minimizar as perdas de energia.

A *PSO* é um algoritmo de otimização que se baseia em simular o comportamento de uma população de pássaros que voam em busca de alimento, para encontrar a melhor solução em um espaço de busca. Já a *LIT* é uma técnica iterativa que ajusta os valores dos parâmetros de controle do *DFIG* em cada iteração, de acordo com um conjunto de regras predefinidas [1].

Sendo assim, o objetivo desse trabalho é determinar as tensões do rotor para controlar a potência no estator do *DFIG* utilizando Otimização por Nuvem de Partículas (*PSO*) e *Ladder Iterative Technique* (*LIT*). Estas duas técnicas servirão de ferramentas para determinar a tensão do rotor para injetar uma determinada potência em um determinado sistema de potência de transmissão.

A seguir serão apresentadas todas as modelagens do *DFIG* inserido em um sistema de transmissão, modelagem matemática no *MATLAB* da *PSO* utilizada e aplicação da *LIT* para solução do problema da varredura do sistema.

2. MATERIAIS E MÉTODOSSerão apresentadas a PSO e a Ladder Iterative Technique nesta seção como ferramentas aplicadas na obtenção das potências ativas e reativas trifásicas em um sistema elétrico no estator de um DFIG.

2.1 *Particle Swarm Optimization* (*PSO*)

Nesta seção será apresentada a teoria de forma resumida sobre a qual se embasa esse artigo, ou seja, o algoritmo de otimização de nuvem de partículas. O algoritmo PSO é iniciado criando uma população de soluções aleatórias (partículas), onde cada solução potencial é associada a uma velocidade aleatória, responsável por criar o movimento dessas partículas por todo o espaço de solução do problema. De acordo com [2], para uma nuvem de tamanho N e dimensão D, a população de partículas é denotada por X = [X1, X2, ..., Xn], onde cada partícula é Xi = [Xi,1, Xi,2, ..., Xi,D]. E associado à população inicial, há o vetor de velocidade inicial V, denotado por V = [V1, V2, ..., Vn], onde a i-ésima partícula possui uma velocidade especificada por Vi = [Vi,1, Vi,2, ..., Vi,D].

Para guiar a evolução do enxame na busca pela solução ótima, dois valores são utilizados. De acordo com [2], o primeiro, chamado $Pbest_{i,j}^{k}$ (melhor global), corresponde à melhor posição (valor associado à melhor solução) que cada partícula i alcançou ao longo de sua trajetória na dimensão j do espaço de solução durante um certo tempo. O segundo parâmetro, chamado $Gbest_{j}^{k}$ (melhor de todos), corresponde à posição da melhor partícula (a melhor solução possível) em toda a população durante um certo tempo. Com base nesses valores e na velocidade atual multiplicada por um fator de inércia, ω, as velocidades e posições das partículas são atualizadas recursivamente até que o algoritmo atinja a convergência, conforme mostrado nas Equações 1 e 2.

$$V_{i,j}^{k+1} = \omega * V_{i,j}^{k} + c_1 * r_1 * \left(Pbest_{i,j}^{k} - X_{i,j}^{k}\right) + c_2 * r_2 * \left(Gbest_{j}^{k} - X_{i,j}^{k}\right) \quad (1)$$

$$X_{i,j}^{k+1} = X_{i,j}^{k} + V_{i,j}^{k+1} \quad (2)$$

Onde r_1 e r_2 são números aleatórios, e c1 e c2 são parâmetros usados para ponderar a influência de $Pbest_{i,j}^{k}$ e $Gbest_{j}^{k}$, respectivamente. A Figura 1 ilustra a soma vetorial apresentada nas Equações 1 e 2.

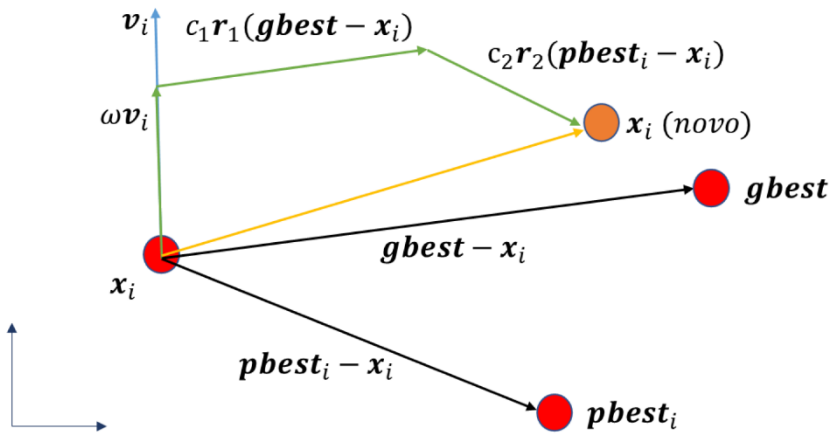


FIGURA 1. Representação vetorial da atualização da posição da i-ésima partícula no enxame [2].

 DOI: https://doi.org/10.21708/issn27635325.v7n1.a14128.2025

De acordo com [3], é comum modificar o valor de ω durante o processo iterativo como uma maneira de reduzir a velocidade da partícula, diminuindo assim as chances de "pular" por pontos ótimos. Existem vários métodos para modificar o valor do coeficiente de inércia. As Equações 3 e 4 apresentam as duas formas mais frequentemente encontradas na literatura.

$$\omega = \omega_{max} - k * (\omega_{max} - \omega_{min})/Iter_{max} \quad (3)$$

$$\omega = \omega_{damp} * \omega \quad (4)$$

Na Equação 3, $Iter_{max}$representa o número máximo de iterações, e ω_{max} e ω_{min} são os limites superior e inferior para ω. Por outro lado, na Equação 4, ω_{damp} representa um coeficiente de amortecimento, normalmente usado com um valor de 0,9.

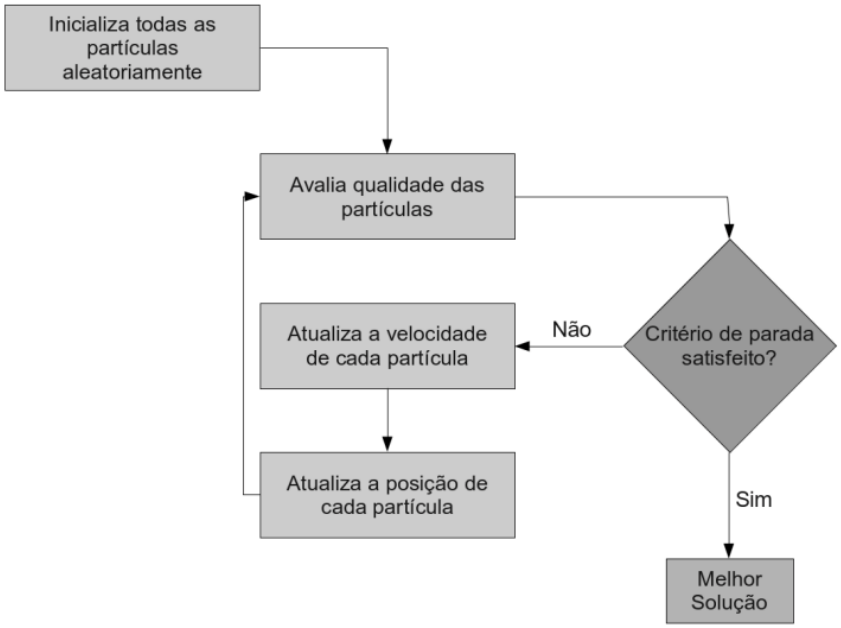


FIGURA 2. Fluxograma da PSO [4].

De acordo com [5], os valores mais comumente usados para os parâmetros do PSO são os seguintes:

- Fator de inércia (ω): 0,4 a 0,9.
- Fatores de aceleração (c1 e c2): 2 a 2,05.
- Tamanho da população: 10 a 100.
- Número máximo de iterações (Iter_max): 500 a 10.000.
- Velocidade inicial: 10% da posição inicial.

Um fluxograma detalhado do PSO considerando os passos acima é mostrado na Figura 2.

2.2 *Ladder Iterative Technique* (*LIT*)

Este trabalho abordou o desenvolvimento e simulação de um sistema de geração eólica conectado a uma rede elétrica com tensão de 22kV composta por duas linhas de transmissão, equipado com gerador de indução duplamente alimentado (*DFIG*).

De acordo com [6], na LIT, o sistema é percorrido ramo por ramo, movendo-se de um para outro sempre que um ponto de "junção" é encontrado. O passo forward consistem em se mover dos nós isolados até o nó da subestação e o passo backward consiste em se mover da subestação até os nós isolados. Em ambos, usando a lei de queda de tensão que descreve cada ramo do sistema.

No passo *backward* do método *Ladder*, os fasores de tensão e corrente em cada barramento n do sistema são calculados com base no barramento adjacente m. No caso de o barramento n ser um ponto de "junção", a última tensão calculada de todos os barramentos diretamente conectados a ele é adotada, juntamente com a corrente resultante obtida aplicando a Lei das Correntes de Kirchhoff. No passo *forward*, os fasores de tensão no barramento m são calculados com base na tensão conhecida no barramento n e na corrente calculada no passo *forward*.

Passo *forward*:

$$[V_{ABC}]_n = [a].[V_{abc}]_m + [b].[I_{abc}]_m \tag{5}$$

$$[I_{ABC}]_n = [c].[V_{abc}]_m + [d].[I_{abc}]_m \tag{6}$$

Passo *backward*:

$$[V_{ABC}]_m = [A].[V_{abc}]_n - [B].[I_{abc}]_m \tag{7}$$

Onde $[V_{ABC}]_n$ é o vetor de tensão trifásica no nó de envio, $[V_{abc}]_m$ é o vetor de tensão trifásica no nó de recebimento, $[I_{ABC}]_n$ é o vetor de corrente de linha no nó de envio e $[I_{abc}]_m$ é o vetor de corrente de linha no nó de recebimento. As matrizes [a], [b], [c] e [d] podem ser encontrados na referência [1].

Em [1], observa-se que a corrente no nó de envio é igual à corrente no nó de recebimento. As matrizes [A] e [B] são determinadas com base na modelagem dos elementos do sistema. De acordo com [1]:

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{8}$$

$$B = [Z] = \begin{bmatrix} z_{11} & z_{12} & z_{13} \\ z_{21} & z_{22} & z_{23} \\ z_{31} & z_{32} & z_{33} \end{bmatrix} \tag{9}$$

2.3 Modelagem do DFIG em regime permanente

Esta modelagem utiliza o modelo equivalente do DFIG para estado estacionário, pode ser modelado como um circuito no *ATP-EMTP* (Alternative Transient Program-Electromagnetic Transients Program) ou matematicamente em qualquer programa de cálculo numérico. O objetivo é injetar correntes Ir_{abc} no rotor calculadas com o algoritmo desenvolvido no *MATLAB* com o método *PSO* utilizando o *LIT* e determinar a tensão resultante no mesmo, fazendo o algoritmo convergir para se determinar as potências especificadas no estator do DFIG.

A Figura 3 mostra o modelo equivalente para o estado estacionário do *DFIG* visto do lado do estator. Nela, observa-se que a tensão nos terminais e a resistência do rotor vistas pelo estator são afetadas pelo escorregamento.

Por outro lado, a corrente do rotor é a mesma que veríamos no modelo detalhado. Portanto, se injetarmos as correntes do rotor Ir_{abc} necessárias para produzir os valores de potência ativa e reativa desejados para o ponto inicial do aerogerador, pode-se determinar a tensão no nó do rotor necessária para inicializar o *DFIG*. É

importante notar que no circuito da figura 3, a defasagem entre o rotor e o estator deve ser considerado, o qual depende do tipo de conexão dos enrolamentos do *DFIG* [7].

Onde Vs é tensão fase-neutro do estator, ωs é frequência elétrica das tensões do estator, Lls é a indutância de ligação do estator, Llr é a indutância de ligação do rotor, Lm é a indutância de magnetização, Rs é a resistência do estator, Rr é a resistência do rotor, s é o escorregamento da máquina e t é a relação de transformação entre as tensões do estator e do rotor.

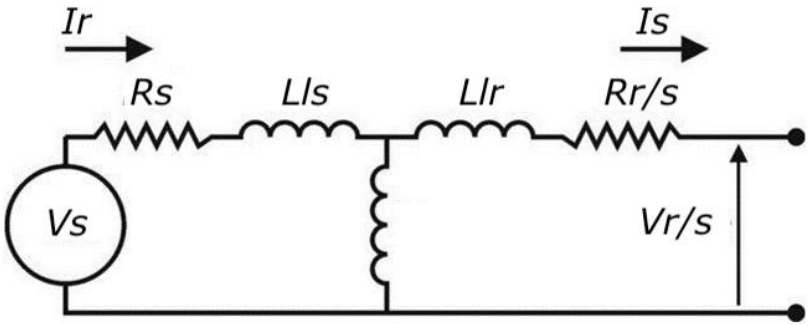


FIGURA 3. Modelo equivalente convencional monofásico para o regime permanente do DFIG [7].

É importante destacar que os parâmetros do DFIG para simulação no ATP incluem as resistências do estator, a indutância de magnetização, a indutância de ligação do estator, a resistência do rotor e a indutância de ligação do rotor referidas ao estator. Com base no circuito equivalente mostrado na Figura 3, pode-se observar que o DFIG é descrito pelas seguintes equações em regime permanente [7].

$$I_s = \left(\frac{S_S}{V_S}\right)^* \tag{10}$$

$$V_s = (R_S + j\omega_s L_{lS}).I_S + V_m \tag{11}$$

$$V_m t - \frac{I_r}{t}\left(\frac{R_r}{s} + j\omega_s L_{lR}\right).t^2 = V_r t/s \tag{12}$$

As equações (13) a (15) determinam as matrizes de impedâncias do circuito [7].

$$Matriz_{RL} = \begin{bmatrix} Z_{estator} & 0 & 0 \\ 0 & Z_{estator} & 0 \\ 0 & 0 & Z_{estator} \end{bmatrix} \tag{13}$$

$$Matriz_{Rotor} = \begin{bmatrix} Z_{rotor} & 0 & 0 \\ 0 & Z_{rotor} & 0 \\ 0 & 0 & Z_{rotor} \end{bmatrix} \tag{14}$$

$$Matriz_{Xm} = \begin{bmatrix} \frac{1}{(j * X_m)} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{(j * X_m)} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{(j * X_m)} \end{bmatrix} \tag{15}$$

 DOI: https://doi.org/10.21708/issn27635325.v7n1.a14128.2025

Os valores de tensão e corrente no estator são definidos por:

$$\begin{bmatrix} V_{Al} \\ V_{Bl} \\ V_{Cl} \end{bmatrix} = V_{pico}.\left(\frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}}\right).\begin{bmatrix} \frac{e^{\frac{-j\pi}{2}}}{\sqrt{2}} \\ \frac{e^{\frac{j5\pi}{6}}}{\sqrt{2}} \\ \frac{e^{\frac{j\pi}{6}}}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \tag{16}$$

$$\begin{bmatrix} I_{Al} \\ I_{Bl} \\ I_{Cl} \end{bmatrix} = \sqrt{2}.\begin{bmatrix} \frac{SA}{V_{Al}} \\ \frac{SB}{V_{Bl}} \\ \frac{SC}{V_{Cl}} \end{bmatrix}^{*}.\sqrt{2} \tag{17}$$

A tensão de fase na magnetização (V_{ABC}) e a corrente de linha do estator do DFIG (I_{ABC}) são definidas por (o ATP-EMTP trabalha com os valores pico de tensão e corrente):

$$V_{ABC} = \begin{bmatrix} V_{Al} \\ V_{Bl} \\ V_{Cl} \end{bmatrix}.\sqrt{2} + Matriz_{RL}.\begin{bmatrix} I_{Al} \\ I_{Bl} \\ I_{Cl} \end{bmatrix} \tag{18}$$

$$I_{ABC} = \begin{bmatrix} I_{Al} \\ I_{Bl} \\ I_{Cl} \end{bmatrix} + Matriz_{Xm}.\begin{bmatrix} V_{A} \\ V_{B} \\ V_{C} \end{bmatrix} \tag{19}$$

As equações a seguir descrevem de forma trifásica a conexão Yd9 entre o estator e o rotor do DFIG, que é uma conexão estrela-delta descrita na referência [8], no apêndice B.2.5. Nessa conexão a tensão de fase da fase A do lado primário, está deslocada de 90 graus da tensão de fase da fase A do lado secundário. As equações (20)-(23) representam as matrizes responsáveis por converter as tensões de linha em tensões de fase, baseadas nas transformações de componentes simétricas conforme definidas por [1], e na matriz de transformação associada.

$$AV = \frac{1380}{\frac{V_{pico}}{\sqrt{3}}}.\begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \tag{20}$$

$$W = \frac{1}{3}.\begin{bmatrix} 2 & 1 & 0 \\ 0 & 2 & 1 \\ 2 & 0 & 2 \end{bmatrix} \tag{21}$$

$$V_{abc} = AV.V_{ABC} \tag{22}$$

$$VLG_{abc} = W.V_{ABC} \tag{23}$$

Transformando tensões e correntes para referencial do estator, temos:

$$I_{\Delta abc} = -\left(\frac{\frac{V_{pico}}{\sqrt{3}}}{1380}\right).\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{24}$$

$$I_{abc} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & -1 \\ -1 & 0 & 1 \\ 1 & -1 & 0 \end{bmatrix}.I_{\Delta abc} \tag{25}$$

$$V_{abc2}^{r} = VLG_{abc} - Matriz_{rotor}.4.I_{abc} \quad (26)$$

A equação (26) representa a operação em modo subsíncrono e é diferente para o modo supersíncrono. Deve-se, então, fazer uma alteração de sinal na equação que representa o valor de V_{abc2}^{r}. Logo, respeitando a polaridade da tensão do rotor e o sentido dos fluxos de corrente, a equação será:

$$V_{abc2}^{r} = VLG_{abc} + Matriz_{rotor}.4.I_{abc} \quad (27)$$

Sendo assim, essas equações descrevem as operações em regime permanente em todos os modos de operação subsíncrono e supersíncrono. Vale salientar que durante a operação do modo supersíncrono ocorre uma alteração natural de sequência de fases, sendo necessárias alterações no ATP com o bloco de transposição de fases.

O algoritmo consiste em iniciar as tensões do rotor como aleatórias no espaço de busca. Logo em seguida a técnica LIT é processada para que as tensões sejam ajustadas e em seguida a função objetivo da nuvem de partículas é testada fazendo com que a nuvem de partículas vá salvando as melhores soluções. A função objetivo da nuvem de partículas é:

$$f = abs(P_{esp} - P_{calc}) + abs(Q_{esp} - Q_{calc}) \quad (28)$$

Onde:

$P_{esp} - Potência\ ativa\ trifásica\ especificada\ no\ estator\ do\ DFIG$

$Q_{esp} - Potência\ reativa\ trifásica\ especificada\ no\ estator\ do\ DFIG$

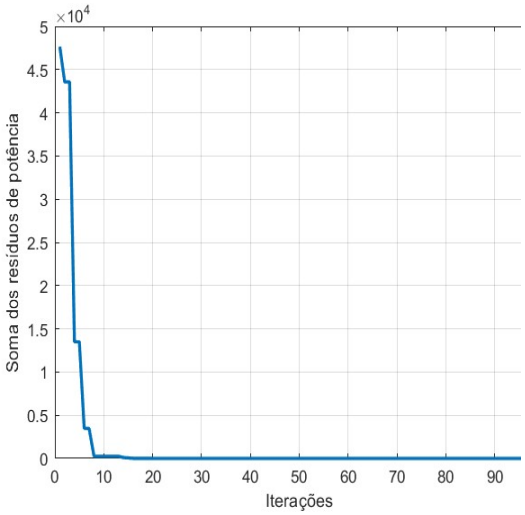
$P_{esp} - Potência\ ativa\ trifásica\ calculada\ no\ estator\ do\ DFIG$

$Q_{esp} - Potência\ reativa\ trifásica\ calculada\ no\ estator\ do\ DFIG$

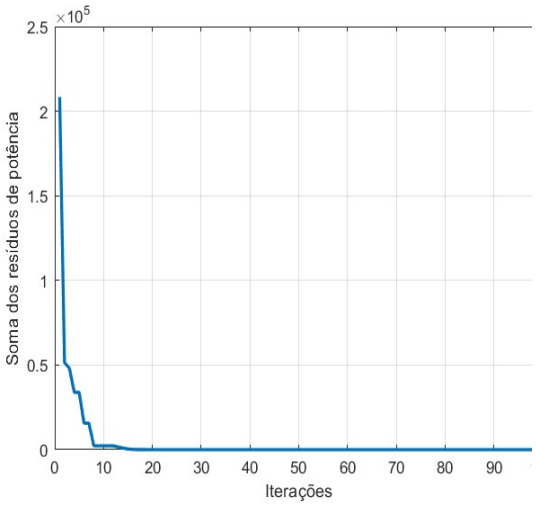
abs – Valor absoluto da diferença

3. RESULTADOS

Os dados simulados no *ATP-EMTP* e *MATLAB*, através das equações mencionadas em modo supersíncrono com funcionamento da máquina em regime permanente podem ser vistos nas imagens e quadros abaixo.



(a)



(b)

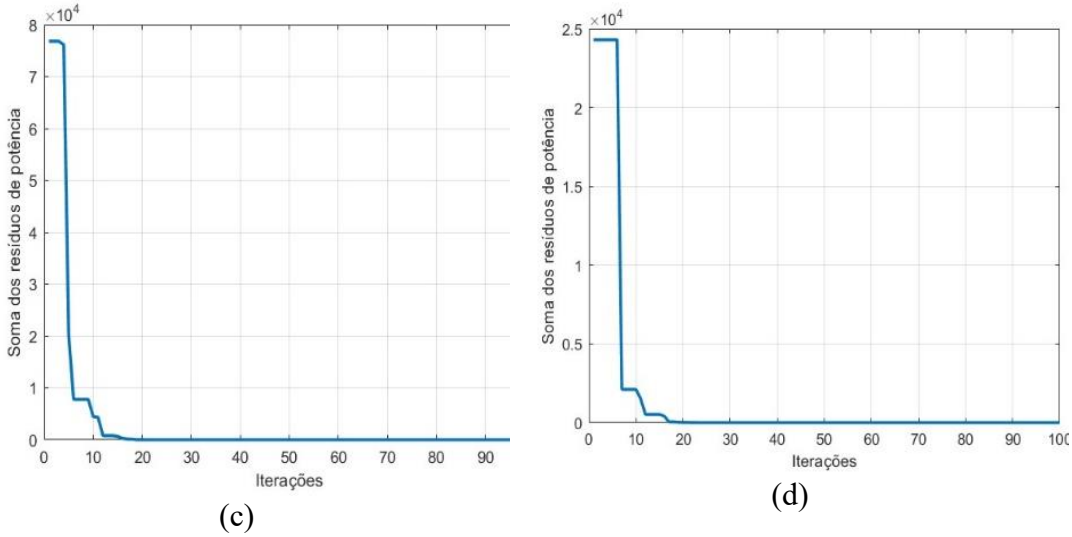


FIGURA 4. Convergência da PSO no modo supersíncrono para valores de potência no estator de (a) 10MW; (b) 15MW; (c) 20MW e (d) 30MW (Autoria própria)

Os gráficos das curvas de aprendizagem da nuvem de partículas – Figura 4, erros a, b, c e d mostram erros muito baixos e próximos de zero, indicando que a nuvem de partículas convergiu para a solução, ou seja, para uma tensão do rotor que traduza em determinadas potências ativas obtidas no estator.

A posição mostrada como *best solution* no *MATLAB* será a fase e o ângulo da tensão do rotor no circuito simulado no ATP. Logo, na Figura 5 são mostrados os valores de PS e QS simulados no *ATP-EMTP*. O fator de potência nas simulações é unitário.

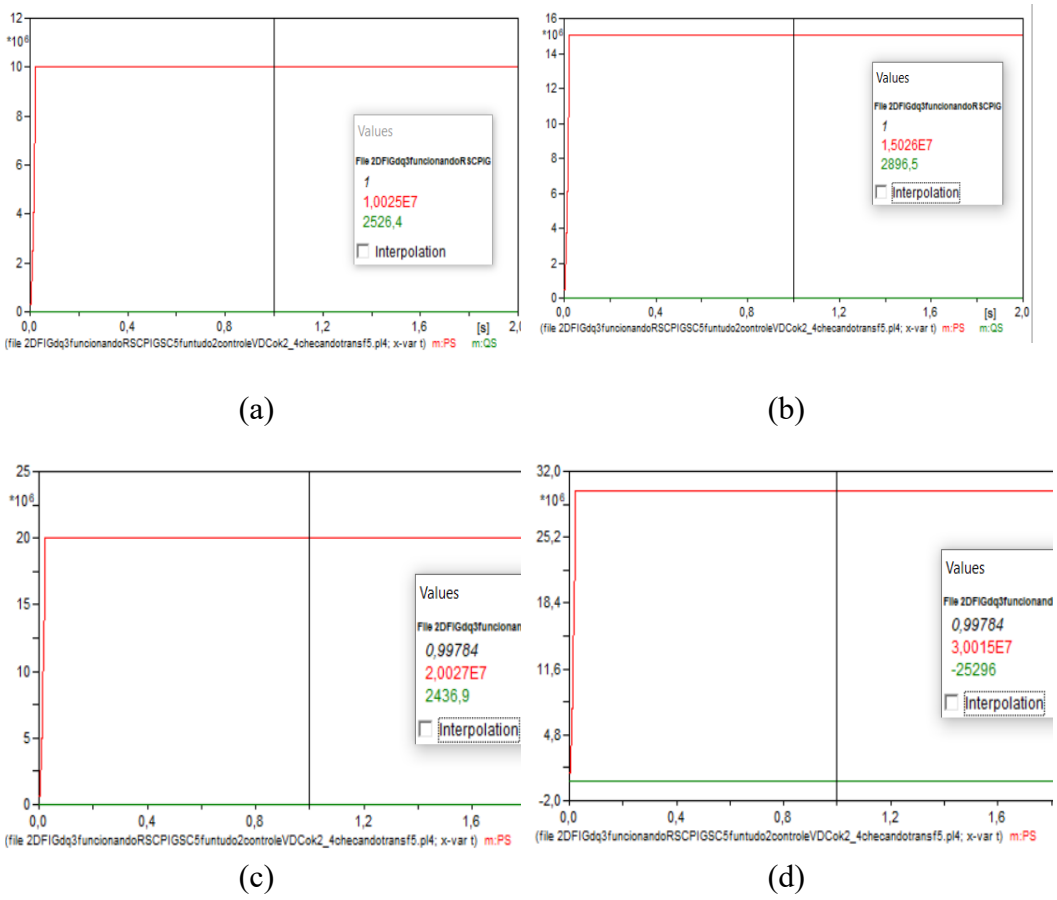


FIGURA 5. Dados de simulação no ATP do DFIG no modo supersíncrono para valores de potência no estator de (a) 10MW; (b) 15MW; (c) 20MW e (d) 30MW (Autoria própria)

 DOI: https://doi.org/10.21708/issn27635325.v7n1.a14128.2025

De acordo com a Figura 5 para valores de VS conforme posições do resultado da *PSO*, a potência no estator satisfez as potências implementadas no ATP. A tabela 1 mostra os resultados dos valores obtidos no *MATLAB* e simulados no *ATP-EMTP* no modo supersíncrono, com os respectivos erros.

TABELA 1. Parâmetros do DFIG modelado no modo supersíncrono (Autoria propria)

Variável	**Valor Teórico**	**Valor obtido no *ATP-EMTP***	**Erro (%) = (*ATP-EMTP/MATLAB*)**
$P_{S\ 10MW}$	10 MW	10,025 MW	0,25%
$P_{S\ 15MW}$	15 MW	15,026 MW	0,17%
$P_{S\ 20MW}$	20 MW	20,027 MW	0,13%
$P_{S\ 30MW}$	30 MW	30,015 MW	0,05%

As mesmas simulações foram feitas com o DFIG no modo subsíncrono (escorregamento = 10%). Os erros obtidos também foram pequenos. Devido a similaridade dos resultados, apresenta-se aqui apenas a versão com o modo de operação supersíncrono.

4. CONCLUSÃO

Este trabalho abordou o desenvolvimento e simulação de um sistema de geração eólica conectado a uma rede elétrica com tensão de 22kV composta por duas linhas de transmissão, equipado com gerador de indução duplamente alimentado (*DFIG*). O controle da máquina, em vez de conectado entre a rede e o rotor, nessa configuração, funciona sem conversor eletrônico, na qual a tensão no rotor controla a potência do estator. Para isso, foi utilizado o algoritmo de Otimização por Nuvem de Partículas (*PSO*) e *Ladder Iterative Technique* (*LIT*) para determinar as tensões do rotor para controlar a potência no estator do *DFIG*. Estas duas técnicas serviram de ferramentas para determinar a tensão do rotor para injetar uma determinada potência no sistema de potência utilizado.

Primeiramente foram apresentados os fundamentos do método de otimização por nuvem de partículas clássico, seguido de sua adaptação para solução do problema do fluxo de carga em sistemas de potência. Por meio de estudos de casos analisados, foi possível verificar que os algoritmos desenvolvidos foram capazes de obter soluções ótimas para os problemas propostos com precisão aceitável.

Posteriormente, foi realizada uma análise de sensibilidade do sistema de potência com o *DFIG* com o objetivo de determinar como as modificações na tensão do rotor influência na potência de saída do *DFIG*. Para este propósito, o valor da amplitude e ângulo da tensão no rotor conforme calculado pela PSO no *MATLAB* foi utilizado para verificação na modelagem do *DFIG* no ATPDraw nos modos subsíncrono e supersíncrono. Para cada um desses novos valores de VS, a potência ativa e reativa de saída do *DFIG* foi calculada com o *ATP-EMTP*. Esses valores foram comparados com os valores teóricos iniciais e os erros percentuais foram calculados. Os resultados apresentados mostraram que para valores altos de potência no estator no modo supersíncrono, o erro é menor, tornando os valores teóricos mais próximos dos valores simulados no *ATP-EMTP*.

Com isso, é importante ressaltar que a *PSO* representa uma técnica de otimização rápida e robusta, capaz de resolver uma variedade de problemas complexos, incluindo aqueles de natureza não-linear, não diferenciável e até mesmo multi-objetivo. Além disso, suas vantagens principais incluem sua facilidade de implementação computacional, exigindo apenas poucos parâmetros e demonstrando rápida convergência. No entanto, é preciso considerar suas desvantagens, como a baixa convergência em espaços de alta dimensão e uma notável sensibilidade aos parâmetros de execução. Por conseguinte, a funcionalidade do *ATP-EMTP* e *MATLAB* para a simulação de um *DFIG* foi comprovada e se mostrou indispensável para entendimento do funcionamento das máquinas de turbinas eólicas, tornando possíveis diversos estudos.

REFERÊNCIAS

[1] KERSTING, W. H. Distribution system modeling and analysis. 5 ed. Boca Raton: Taylor & Francis, CRC Press, 2022.

[2] SHI, Y. Particle Swarm Optimization. IEEE Connections - Neutral Network Society. Kokomo, IN, EUA, 2004.
[3] KENNEDY, J.; EBERHART, R. Particle swarm optimization. Proceedings of the In-ternational Conference on Neural Networks. Australia IEEE, v. 1948, 1995.
[4] CORDEIRO, Z. J. M. J. Um Algoritmo de Nuvem de Partículas para Combinação de Classificadores em Aprendizado Multi-Visão. Dissertação (mestrado) — Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte. 2011.
[5] NABAB, M. Particle Swarm Optimization: Algorithm and its Codes in *MATLAB*. ResearchGate 2016:8–12. DOI: https://doi.org/10.13140/rg.2.1.4985.3206
[6] MARCHESAN, A. C., MARCONATO, G. V., COSTA, L. M. A., GALLAS, M., FERRI, R. C. B., & CARDOSO, G. Performance analysis of forward/backward sweep power flow methods for radial distribution systems. Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos (SBSE). 2018.
[7] GUIDI-VENERDINI, G. D., MOMBELLO E. Initialization of the DFIG Machine for Electromagnetic Transients Calculation. IEEE Latin America Transactions, vol. 16, no. 2, pp. 497-504, Feb. 2018.
[8] WAKILEH, G. J. Power System Harmonics Fundamentals, Analysis and Filter Design, Springer, 2001.