DOI: 10.48011/sbse.v1i1.2225

Determinação de Parâmetros Transitórios de Geradores Síncronos de Pequeno Porte Utilizando Otimização por Enxame de Partículas

H. C. Barbosa, J. P. G. S. Filho, I. P. Faria

Instituto de Ciências Tecnológicas, Universidade Federal de Itajubá – Campus de Itabira

Itabira – Brasil (e-mail: hugocampelo7@unifei.edu.br, jpedro@unifei.edu.br, ivan.faria@unifei.edu.br)

Abstract: This paper presents a methodology for obtaining direct axis parameters of synchronous generators that present a fast transient dynamics. The machines that exhibit this behavior are small and widely used in distributed generations. The parameters were obtained through a computational algorithm which performs the minimization of an objective function defined as the integral of the quadratic error between the measured waveform and the calculated waveform from the mathematical model. The particle examination method was used as a computational strategy in order to estimate the machine parameters. This paper compares the results obtained with other methods in order to present the agreement of the estimated and actual values.

Resumo: Este artigo apresenta uma metodologia para obtenção de parâmetros de eixo direto de geradores síncronos que apresentam uma rápida dinâmica transitória. As máquinas que apresentam esse comportamento são de pequeno porte e empregadas nos sistemas de mini e microgeração hidráulica, bem como em pequenas centrais hidrelétricas. Os parâmetros foram obtidos por meio de um algoritmo computacional o qual realiza a minimização de uma função objetivo definida como a integral do erro quadrático entre a forma de onda medida e a forma de onda calculada a partir do modelo matemático. Utilizou-se o método *Particle Swarm Optimization* (PSO) como estratégia computacional a fim de se estimar os parâmetros da máquina. Este artigo traz uma comparação de resultados obtidos com outros métodos afim de comparar os resultados estimados pela metodologia proposta com a tradicional.

Keywords: Synchronous machines; determination of parameters; particle swarm optimization; short circuit test; voltage recovery test.

Palavras-chaves: Máquinas síncronas; determinação de parâmetros; otimização por enxame de partículas; ensaio de curto circuito; ensaio de restabelecimento de tensão.

1. INTRODUÇÃO

A partir de 1995, com a transição do ambiente regulado para competitivo, possibilitou-se o livre acesso a prestação de serviços de energia elétrica com consequente surgimento de autoprodução e produção independente (ANEEL, 2003). Nesse contexto, a fim de tardar vultosos investimentos no setor, os recursos energéticos distribuídos tal como mini e microgeração distribuída (MMGD) têm sido alvo de incentivo governamental, como estabelecido na resolução normativa 482 de 2012 da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL, 2012), (EPE, 2019).

Dentre as modalidades de MMGDs, destacam-se as unidades fotovoltaicas, que têm experimentado um crescimento elevado nos últimos anos. Outro setor promissor é o composto pelas unidades hidráulicas e térmicas, que juntas têm uma potência instalada de aproximadamente 160 MW segundo aponta o relatório confeccionado pela ANEEL (2019). As unidades hidráulicas englobam centrais geradoras com potência instalada inferior a 3 MW (ANEEL, 2015) e as térmicas englobam usinas que geram até 5 MW cuja matéria prima seja a biomassa (ANEEL, 2012).

Os empreendimentos de MMGDs que tem como fonte primária a energia hidráulica ou térmica se caracterizam pelo uso de máquinas síncronas de pequeno porte, tanto de polos lisos quanto de salientes. Em se tratando de geradores de pequeno porte, a obtenção dos seus parâmetros a partir das metodologias convencionais normatizadas por IEEE STD-115 (2010), IEC 34.4 (1984) e NBR 5052 (1982) não é uma tarefa simples. Isto decorre principalmente devido a rápida dinâmica durante os ensaios, onde a resposta da máquina pode atingir o regime permanente em poucos ciclos, tornando a delimitação dos períodos transitórios e subtransitório um processo laborioso (Martin, Tindall e Morrow, 1999).

Diversos métodos de identificação de parâmetros de geradores síncronos são apresentados na literatura (Bernardes, 2015) (Kornrumpfl e Nabeta, 2018). Os ensaios podem ser basicamente divididos no domínio do tempo ou da frequência, Os ensaios no domínio do tempo se caracterizam pela aplicação de um distúrbio na máquina, tais como ensaio de curto-circuito instantâneo abordados nos trabalhos de Fajoni (2010), Bernardes (2015), Ávila, Faria, Soares, and Coelho (2018), ensaio de restabelecimento de tensão descritos em Soares, Pinto, Faria, Ávila, Coelho e Sousa (2018), Bernardes (2015) e rejeição de carga (Silva, Bortoni, and Rocha, 2017), (Bobon, Nocon, Paszek, and Pruski, 2016), (Giesbrecht, and Meneses, 2018). Este último, muito discutido na literatura em detrimento a dificuldade de se obter parâmetros de eixo de quadratura, visto a necessidade de se realizar a rejeição com carga específica. Em linhas gerais, os métodos apresentados na

literatura abordada adotam formas tradicionais de determinação de parâmetros, onde discrepâncias entre os valores obtidos são muitas vezes observadas, ou trazem novas metodologias buscando apresentar formas alternativas para a estimação dos dados da máquina síncrona.

Tendo em vista que a identificação dos parâmetros é fundamental para obtenção de modelos coerentes para estudos de curto-circuito, proteção, seletividade, estabilidade, estudos esses que permitem o acesso das MMGDs ao sistema de distribuição, e que o método convencional normatizado pode não apresentar resultados satisfatórios para máquinas de pequeno porte, este trabalho tem por objetivo propor uma metodologia alternativa para a determinação de parâmetros de geradores síncronos de pequena potência. Para tanto, serão realizados os ensaios de curto-circuito e restabelecimento de tensão em um gerador de pequeno porte, onde, posteriormente, os dados de ensaios serão analisados pelo algoritmo *Particle Swarm Optimization* (PSO) desenvolvido em ambiente Matlab®. Por fim, os resultados serão comparados com os valores obtidos pela metodologia tradicional, mostrando a eficiência do método proposto.

2. DESCRIÇÃO DOS PROCEDIMENTOS DE ENSAIO

O presente ensaio foi realizado em uma máquina síncrona de polos salientes de pequeno porte pertencente ao Laboratório de Máquinas Elétricas da Universidade Federal de Itajubá – Campus de Itabira. Para a realização dos ensaios, foi planejado um *test bed* composto por um motor de indução trifásico controlado por um inversor de frequência, acoplado a um gerador síncrono de polos salientes e excitação estática via anéis coletores. O gerador utilizado possui potência de 2 kVA, velocidade nominal de 1800 RPM, frequência de 60 Hz, tensão nominal de 220 V e fator de potência 0,8.

A metodologia de ensaio foi realizada seguindo os procedimentos descritos na norma ABNT NBR 5052 (1982). O gerador síncrono foi colocado em operação na velocidade nominal através do acoplamento com a máquina primária. Posteriormente, elevou-se a tensão de campo do gerador, excitando-o até atingir 20% do valor da tensão nominal de armadura. Os terminais do estator foram conectados na entrada de um contator, cuja saída foi curto-circuitada. O fechamento do contator e, consequentemente, o fechamento do curto-circuito foi realizado por meio de um controlador lógico programável (CLP). Após o tempo determinado pelo contador do CLP, foi retirado o sinal de tensão do contator, abrindo o circuito novamente. Dessa forma, são adquiridas as formas de onda do curto-circuito abrupto e restabelecimento de tensão. Todas as grandezas foram monitoradas por dois osciloscópios digitais, aquisitando as formas de onda da tensão e corrente em cada uma das fases do gerador. Adicionalmente, foram monitoradas a velocidade da máquina, a tensão e corrente de campo. A Fig. 1 apresenta o diagrama esquemático do *test bad* desenvolvido e a Fig. 2 mostra a montagem utilizada na realização dos ensaios.

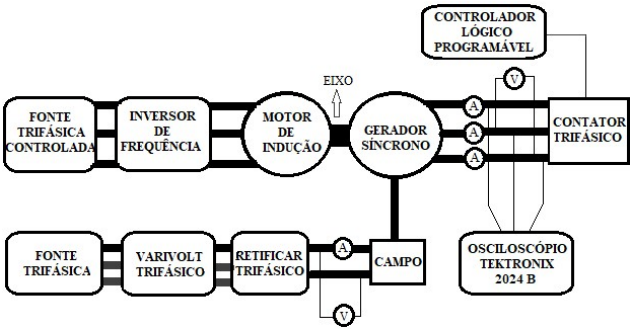

Fig. 1. Esquema de ligações na realização do ensaio. Fonte: Autoria própria.

Fig. 2. *Test bed* para realização de ensaios para a obtenção de parâmetros. Fonte: Autoria própria.

Após a execução dos ensaios, iniciou-se o processo de tratamento de dados obtidos durante os testes. No ensaio de curto-circuito abrupto, deve-se obter o valor eficaz da corrente de armadura, enquanto que no ensaio de restabelecimento é de interesse o valor eficaz da tensão de armadura. Desse modo, dispondo das oscilografias das correntes e tensões, inicia-se o processo computacional para determinar o valor eficaz instantâneo nos períodos subtransitório, transitório e de regime permanente, conforme apresentado na Fig. 3, para ensaio de curto-circuito abrupto. Vale destacar que um processo análogo foi realizado para o ensaio de restabelecimento de tensão.

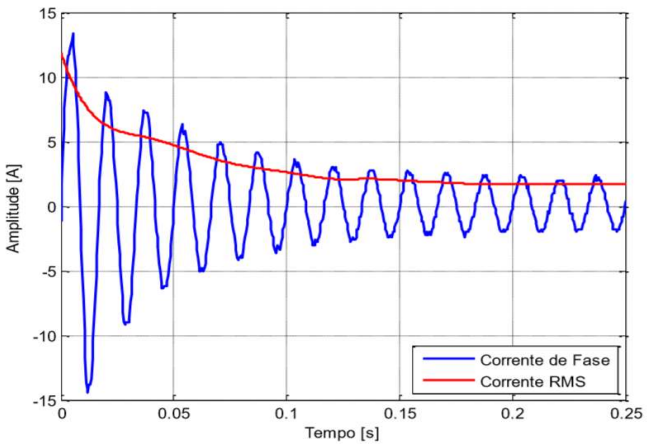

Fig. 3. Curva da corrente de curto-circuito medida (em azul) e valor eficaz instantâneo (em vermelho) obtido para o ensaio de curto-circuito abrupto.

Sabe-se que os valores eficazes da corrente de curto-circuito e da tensão de restabelecimento podem ser calculados por (1) e (2), respectivamente.

$$I_{ef} = E_0\left[\frac{1}{X_d} + \left(\frac{1}{X'_d} - \frac{1}{X_d}\right)\mathrm{e}^{\left(-\frac{\mathrm{t}}{T'_d}\right)} + \left(\frac{1}{X''_d} - \frac{1}{X'_d}\right)\mathrm{e}^{\left(-\frac{\mathrm{t}}{T''_d}\right)}\right] \quad (1)$$

$$V_{ef} = I_0\left[X_d - (X_d - X'_d)e^{-\frac{t}{T'_{d0}}} - (X'_d - X''_d)e^{-\frac{t}{T''_{d0}}}\right] \quad (2)$$

Em que o valor de E_0 representa a tensão eficaz de excitação da máquina imediatamente antes do curto-circuito; I_0 a corrente de armadura imediatamente antes de haver a abertura do curto-circuito; t''_{d0} e t'_{d0} as constantes de tempo subtransitória e transitória, respectivamente; X_d, X'_d e X''_d, correspondem as reatâncias de regime permanente, transitório e subtransitório, respectivamente.

Dispondo dos valores eficazes instantâneos de corrente e tensão da armadura da máquina, utilizou-se nesse trabalho a função minimização ISE (*Integral of Square Error*) como critério de evolução da população do algoritmo (3). Tal função faz a comparação entre amostras da envoltória eficaz obtida do ensaio, com a obtida a partir de (1) e (2).

$$j = \sum_{n=1}^{k}\left[V_e(n) - V_{eq}(n)\right]^2 \quad (3)$$

3. ALGORITMO DE OTIMIZAÇÃO

O PSO consiste em um algoritmo desenvolvido por Eberhart, and Kennedy (1995), sendo vastamente empregado na resolução de problemas computacionais, visto sua baixa complexidade, fácil implementação e relativamente poucos parâmetros a serem ajustados (Shi, and Eberhart, 1998). O algoritmo consiste em um espaço, sendo que cada partícula representa uma possível solução. As partículas são representadas no espaço por três vetores que representam a inércia, a memória e a comparação. A inércia é um vetor que representa a velocidade e direção que a partícula já vinha seguindo, a memória direciona-a para a melhor posição até o momento ocupado pela partícula, a comparação atrai a partícula para a melhor posição até o momento ocupada pelo enxame (Siciliano, 2007).

Para desenvolver o algoritmo, primeiramente, deve-se gerar uma população, ou seja, um enxame, fornecendo suas posições no espaço e suas respectivas velocidades. Em seguida, deve-se atualizar as velocidades e respectivas posições das partículas até atingir algum critério de parada, como por exemplo: número máximo de iterações, partícula com qualidade almejada, entre outros.

A atualização do vetor velocidade é realizada por (4).

$$V^j_{i,n+1} = V^j_{i,n} + C_1 r^j_{i,n}\left(P^j_{i,n} - X^j_{i,n}\right) + C_2 R^j_{i,n}\left(G^j_n - X^j_{i,n}\right) \quad (4)$$

Em que $V^j_{i,n}$ é a velocidade da partícula; $P^j_{i,n}$é a melhor posição encontrada pela partícula i até o momento; G^j_n é a melhor posição encontrada dentre todas as partículas na posição k; C_1e C_2 são denominados parâmetros de confiança e definem o quanto uma partícula confia em si (C_1) e no bando (C_2), sendo que normalmente ambos os valores assumem o valor constante e igual a 2; $r^j_{i,n}$ e $R^j_{i,n}$ representam números aleatórios entre 0 e 1. Para o cálculo da posição futura utiliza-se (5).

$$x^i_{k+1} = x^i_k + v^i_{k+1} \quad (5)$$

Sendo x^i_{k+i} a posição da partícula i na iteração $k+i$ e v^i_{k+1} o vetor velocidade da partícula.

Várias melhorias de performance do PSO clássico foram propostas na literatura, tais como PSO-In (*Particle Swarm Optimization with Inertial Weigth*), onde Shi e Eberhart (1998) propõe um fator de inércia cuja velocidade da partícula é ajustada conforme (6).

$$V^j_{i,n+1} = wV^j_{i,n} + C_1 r^j_{i,n}\left(P^j_{i,n} - X^j_{i,n}\right) + C_2 R^j_{i,n}\left(G^j_n - X^j_{i,n}\right) \quad (6)$$

Em que w é denominado fator de inércia, sendo o parâmetro que representa a inércia da partícula, controlando a sua capacidade de explorar o espaço. Um valor alto, determina uma busca global enquanto um valor baixo determina uma busca local. Normalmente tais valores estão entre 0,4 e 1,4.

Outra vertente é o PSO-Co (P*article Swarm Optimization with Construction Factors*). Desenvolvido por Clerc (1999) este propõe um fator de restrição para a velocidade das partículas conforme (7), sendo χ obtido por (8).

$$V^j_{i,n+1} = \chi\left[V^j_{i,n} + C_1 r^j_{i,n}\left(P^j_{i,n} - X^j_{i,n}\right) + C_2 R^j_{i,n}\left(G^j_n - X^j_{i,n}\right)\right] \quad (7)$$

$$\chi = \frac{2}{\left|2 - \phi - \sqrt{\phi^2 - 4\phi}\right|} \quad (8)$$

Em que $\phi = C_1 + C_2$, sendo que C_1 e C_2 devem ser tais que ϕ>4.

Ambos os algoritmos citados têm por semelhança acelerar a convergência do enxame para o ótimo global, além de melhorar a performance do algoritmo em geral. Outras variantes são os algoritmos probabilísticos tais como o QPSO (*Quantum-behaved Particle Swarm Optimization*). Tal algoritmo é baseado no modelo de poço potencial quântico (Sun, Lai and Wu, 2012) , sendo vantajoso visto dispensar a necessidade de equação de evolução da velocidade. Além disto, tal algoritmo demanda menos parâmetros para ajustar, facilitando sua implementação.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Para averiguar os parâmetros, foi implementado tanto a metodologia tradicional normalizada (ABNT NBR 5052 (1982), assim como o algoritmo PSO clássico e seus derivados PSO-In, PSO-Co, e QPSO. O critério de desempenho ISE (*Integral Square Error*), também foi implementado a fim de se averiguar o desempenho tanto dos algoritmos propostos quanto do método convencional.

5.1 Resultados Obtido para Ensaio de Curto-circuito

Por meio da utilização da metodologia convencional e dos algoritmos propostos neste trabalho, pôde-se calcular os parâmetros do gerador de pequeno porte ensaiado. Os resultados obtidos são sumarizados na Tabela 1, que apresenta os valores médios obtidos e seus respectivos desvios-padrões. Vale ressaltar que foram realizadas cinco repetições dos ensaios para obtenção dos valores estatísticos.

Tabela 1. Parâmetros obtidos no ensaio de curto-circuito.

	X_d [p.u.]	X'_d [p.u.]	X''_d [p.u.]	T'_d [ms]	T''_d [ms]
Conv.	1,6 ± 0,2	0,22 ± 0,04	0,18 ± 0,03	86,09 ± 23,49	13,40 ± 2,92
PSO	1,647 ± 0,009	0,73 ± 0,02	0,180 ± 0,004	100,22 ± 0,01	31,960 ± 0,002
PSO-Co	1,64 ± 0,08	0,79 ± 0,03	0,181 ± 0,008	141,65 ± 0,01	26,680 ± 0,002
PSO-In	1,61 ± 0,08	0,80 ± 0,05	0,168 ± 0,005	133,01 ± 0,02	27,080 ± 0,004
QPSO	1,63 ± 0,04	0,82 ± 0,03	0,173 ± 0,008	101,30 ± 0,01	30,660 ± 0,004

Utilizando dos resultados médios apresentados na Tabela 1, foi possível obter as Fig. 4 e 5, que apresentam os resultados da corrente eficaz medida durante o ensaio de curto-circuito, bem como as curvas obtidas por meio das metodologias empregadas neste trabalho. Observa-se qualitativamente que a metodologia convencional normalizada apresentou desvio considerável em relação à corrente medida nos terminais da máquina. Isso decorre da dificuldade em se delimitar os períodos transitórios e subtransitório em máquinas com dinâmicas rápidas. Por outro lado, nota-se um bom desempenho do algoritmo PSO e seus derivados, onde os resultados obtidos foram próximos aos valores medidos.

Para realizar uma análise quantitativa e comparativa entre os métodos utilizados, foram obtidos os índices ISE de cada uma das metodologias empregadas. Os resultados são apresentados na Tabela 2. Observa-se que o método PSO clássico apresentou menor valor relativo, indicando que esse método é que mais se aproximou da corrente medida durante o ensaio. Em contrapartida, a metodologia convencional normatizada apresentou maior valor relativo do índice ISE, apontando para uma discrepância entre os valores medidos e estimados.

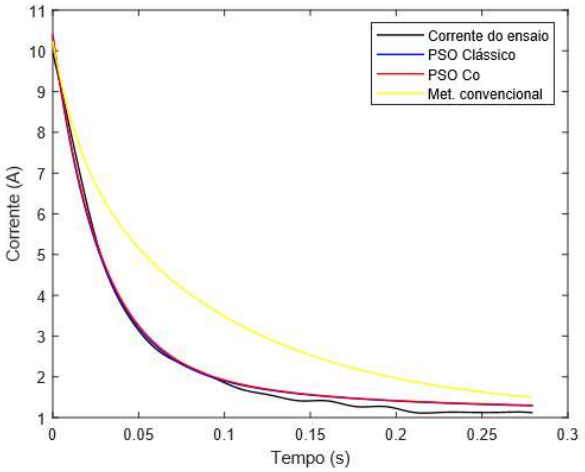

Fig. 4. Curva da corrente eficaz da máquina utilizando método convencional, PSO clássico e PSO Co.

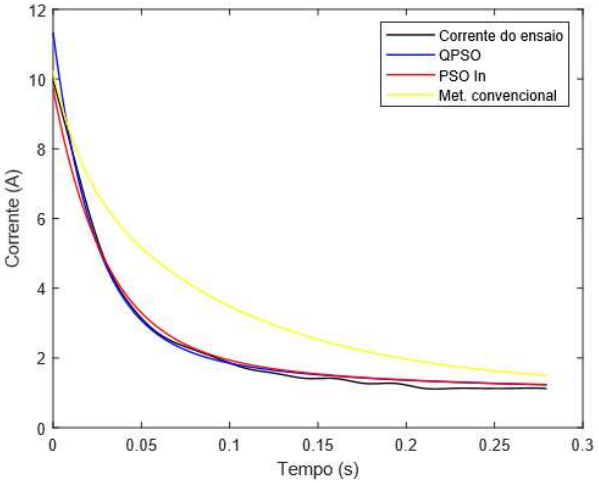

Fig. 5. Curva da corrente eficaz da máquina utilizando método convencional, QPSO e PSO In.

Tabela 2. Cálculo do índice ISE para as metodologias utilizadas durante o ensaio de curto-circuito.

	Conv.	PSO	PSO-Co	PSO-In	QPSO
ISE (%)	154,98	2,71	2,87	3,34	3,67

5.2 Resultados Obtidos para Ensaio de Restabelecimento de Tensão

Os resultados obtidos para o ensaio de restabelecimento de tensão são mostrados na Tabela 3, que apresenta os valores médios obtidos e seus respectivos desvios-padrões. Vale ressaltar que foram realizadas cinco repetições dos ensaios para obtenção dos valores estatísticos.

Tabela 3. Parâmetros obtidos por meio do ensaio de reestabelecimento de tensão.

	X_d [p.u.]	X'_d [p.u.]	X''_d [p.u.]	T'_d [ms]	T''_d [ms]
Conv.	1,6 ± 0,2	0,50 ± 0,07	0,23 ± 0,05	401 ± 13	119 ± 5
PSO	1,63 ± 0,01	0,49 ± 0,05	0,3 ± 0,1	411,03 ± 0,02	147,91 ± 0,02
PSO-Co	1,660 ± 0,003	0,479 ± 0,04	0,21 ± 0,03	420,21 ± 0,02	145,61 ± 0,01
PSO-In	1,647 ± 0,007	0,50 ± 0,02	0,212 ± 0,008	418,74 ± 0,01	139,25 ± 0,01
QPSO	1,66 ± 0,02	0,60 ± 0,03	0,23 ± 0,08	457,63 ± 0,03	123,32 ± 0,01

Utilizando dos resultados médios apresentados na Tabela 3, foi possível obter as Fig. 6 e 7. Observa-se qualitativamente que todas as metodologias utilizadas apresentaram resultados coerentes com os valores medidos de tensão de restabelecimento. Vale destacar que para esse tipo de ensaio, as constantes de tempo obtidas são maiores em comparação às obtidas no ensaio de curto-circuito, o que se traduz em uma dinâmica mais lenta. Consequentemente, o método convencional apresentou resultados condizentes com as medições.

O índice ISE também foi utilizado para realizar uma comparação quantitativa entre as metodologias empregadas, sendo os resultados apresentados na Tabela 4. Os menores valores foram observados para as técnicas PSO utilizadas, sendo que a metodologia convencional apresentou maior valor do índice. Diferentemente dos resultados obtidos para o ensaio de curto-circuito, notam-se dois aspectos relevantes. O primeiro diz respeito aos valores mais elevados do índice ISE em comparação aos resultados apresentados na Tabela 2 relativa aos ensaios de curto-circuito. Esse fato pode ser explicado pelas oscilações de tensão mensuradas durante o ensaio de restabelecimento (Fig. 6 e 7), que causam naturalmente um aumento do índice ISE. O segundo aspecto a ser destacado é referente a menor discrepância dos valores obtidos pelas metodologias PSO propostas em relação a convencional, demonstrando que para situações onde as dinâmicas transitórias são mais lentas, a metodologia normatizada apresentou melhores resultados em comparação aos obtidos no ensaio de curto-circuito.

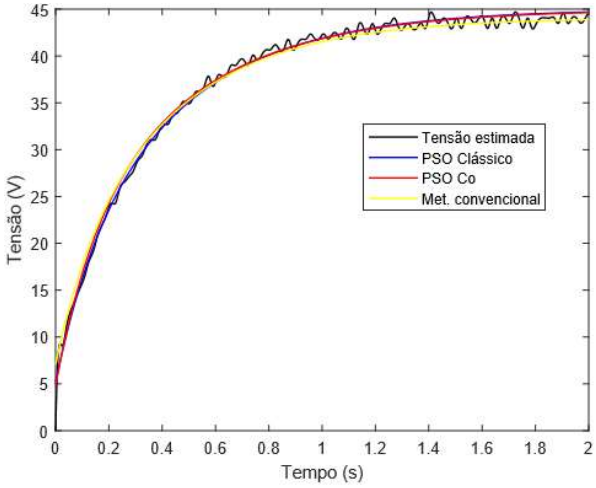

Fig. 6. Curva da tensão eficaz da máquina utilizando método convencional, PSO clássico e PSO Co.

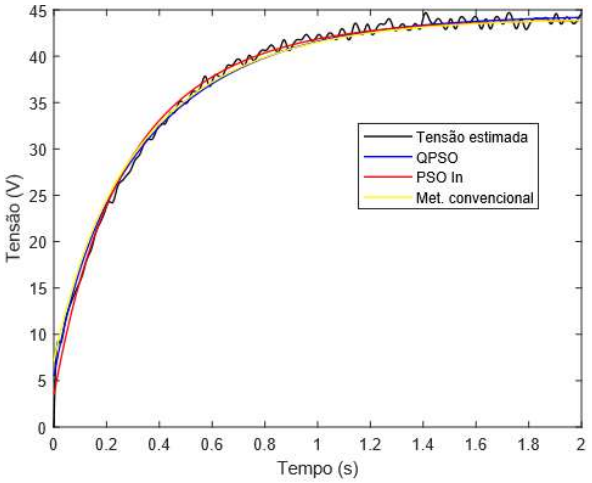

Fig. 7. Curva da tensão eficaz da máquina utilizando método convencional, QPSO e PSO In.

Tabela 4. Cálculo do índice ISE para as metodologias utilizadas durante o ensaio de restabelecimento de tensão.

	Conv.	PSO	PSO-Co	PSO-In	QPSO
ISE (%)	58,95	34,87	41,15	38,40	41,46

6. CONCLUSÃO

Este trabalho apresentou uma metodologia alternativa para a determinação de parâmetros de máquinas síncronas baseada na realização do ensaio tradicional de curto-circuito abrupto e restabelecimento de tensão com aplicação de técnicas de otimização por enxame de partículas. A sistemática proposta foi aplicada em um gerador síncrono de pequeno porte, cujas constantes de tempo são pequenas e seus parâmetros difíceis de se estimar pelo método convencional. Por meio do ensaio de curto-circuito abrupto, pôde-se observar que a metodologia convencional apresentou maiores desvios-padrões na determinação dos parâmetros em comparação aos métodos propostos pelos autores. Em relação ao índice ISE, o método convencional apresentou o valor de 154,98%, sendo que o

maior valor obtido para a técnica utilizada nesta pesquisa foi de 3,67% para o QPSO, demonstrando maior eficiência na identificação de parâmetros pelos métodos de otimização baseados no enxame de partículas. Em se tratando do ensaio de restabelecimento de tensão, os desvios-padrões foram maiores para a metodologia convencional comparada as técnicas PSO. Quanto ao índice ISE, o método normatizado apresentou o valor de 58,95% ao passo que o maior valor obtido para a técnica otimizada foi de 41,46% para o QPSO. De forma geral, não foram observadas discrepâncias significativas nos resultados obtidos entre as diferentes técnicas PSO empregadas. Os valores calculados das reatâncias e das constantes de tempo são úteis para avaliar as premissas adotadas no projeto do gerador síncrono, para comparar os dados fornecidos pelo fabricante ou simplesmente recuperar informações da máquina que foram perdidas. Os ensaios propostos podem ser realizados tanto em fábrica quanto em campo, sendo o tratamento de dados e o emprego das técnicas PSO feitos de forma *offline*. Finalmente, a presente metodologia cobre uma lacuna existente nas normas quando se trata da identificação de parâmetros de geradores de pequeno porte. Outras análises como a influência da saturação nos parâmetros estimados são objetos de trabalhos futuros.

REFERÊNCIAS

ABNT NBR 5052. Máquinas Síncronas – Ensaios. 1982. 122p.

ANEEL (2003). Ministério de Minas e Energia. Guia do Empreendedor De Pequenas Centrais Hidrelétricas. Brasília: ANEEL, p.704.

ANEEL (2012). Ministério de Minas e Energia. Resolução Normativa Nº 482. Brasília: ANEEL, p.12.

ANEEL (2015). Ministério de Minas e Energia. Resolução Normativa Nº 673. Brasília: ANEEL, p.15.

ANEEL (2019). Ministério de Minas e Energia. Unidades Consumidoras com Geração Distribuída. Resumo por Tipo de Geração: ANEEL, p.1.

Ávila, B.R.A., Faria, I.P., Soares, L.A., Coelho, A.L.M. and Sousa, C.V. Estimation of Direct Axis Synchronous Parameters using the Sudden Short-circuit Tests. *Simposio Brasileiro de Sistemas Eletricos (SBSE)*, 2018.

Bernardes, J.B.J. Determinação de Parâmetros de Máquina Síncrona através de Abertura e Fechamento de Curto-circuito. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2015.

Bobon, A., Nocon, A., Paszek, S. and Pruski, P. Determination of Synchronous Generator Nonlinear Model Parameters Based on Power Rejection Tests Using a Gradient Optimization Algorithm. *Bulletin of the Polish Academy of Sciences,* Vol. 65, No. 4, 2017.

Bortoni, E.C., Araujo, B.T., Jardini, J.A. Estimation od Quadrature Axis Synchronous Reactance Using the Constant Excitation Test. *IEEE Power and Engery Technology Systems Journal*, 2016.

Clerc. M. The Swarm and the Queen: Towards a Deterministic and Adaptive Particle Swarm Optimization. *Proceedings of the Congress on Evolutionary Computation*, Washington, DC, vol. 3, 1999, pp. 1951–1957.

EPE (2019). Ministério de Minas e Energia. Balanço Energético Nacional. Rio de Janeiro: EPE, p.67.

EPE (2019). Ministério de Minas e Energia. Plano Decenal de Expansão de Energia 2029. Brasília: EPE, p.382.

Fajoni, F.C. Estudo sobre Determinação de Parâmetros Elétricos de Geradores Síncronos de Polos Salientes. Dissertação de Mestrado, FEEC, Unicamp, Campinas, 2010.

Giesbrecht, M., Meneses, L.A.E. Detailed Derivation and Experimental Validation of a Method for Obtaining Load Conditions for Salient Pole Synchronous Machine Quadrature Axis Parameters Determination. *IEEE Transactions on Industrial Electronics,* Vol 66, Issue 7, 2018.

IEC (1985). IEC 34.4 - Methods for determining synchronous machines quantities from tests, 175 p.

IEEE Std 115 (2010). Test Procedures for Synchronous Machines", 2010, p. 87.

Kennedy, J., Eberhart, R.C. Particle Swarm Optimization. *In Proceedings of the IEEE International Conference on Neural Networks*, Piscataway, NJ, 1995, vol. IV, pp. 1942–1948, 1995.

Kornrumpfl, L.H.D., Nabeta, S.I. Determination of Synchronous Machine Parameters through the SSFRT Test and Artificial Neural Networks. *9th International Conference on Power Electronics, Machines and Drives*, 2018.

Martin, J.P., Tindall, C.E., Morrow, D.J. Synchronous Machine Parameter Determination using the Sudden Short-Circuit Axis Currentes. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, Vol. 14, No. 3, pp. 454–459, 1999.

Shi, Y., Eberhart, R.C. A Modified Particle Swarm Optimizer. *Proceedings of the IEEE International Conference on Evolutionary Computation*, Anchorage, AK, 1998, pp. 69–73.

Siciliano, A.V. Algoritmos Genéticos e Particle Swarm Optimization e suas aplicações problemas de Guerra Eletrônica. *IX SIGE*, 2007.

Silva, P.V.V., Bortoni, E.C., Rocha, E.J.J. Identification of synchronous machines parameters using genetic algorithm and load rejection test. *IEEE Power & Energy Society General Meeting*, Chicago, 2017.

Soares, L.A., Pinto, P.P., Faria, I.P., Ávila, B.R.A., Coelho, A. L.M., Sousa, C.V. Identification of Direct Axis Parameters of the Synchronous Machine Using Optimization Algorithm and Voltage Recovery Test. *Simpósio Brasileiro de Sistemas Eletricos (SBSE)*, 2018.

Sun, J., Lai, C. and Wu, X. (2012). *Particle Swarm Optimization*. CRC Press, Boca Raton.