

Determinação de Parâmetros Transitórios de Máquinas Síncronas de Pequeno Porte no Referencial de Park Utilizando Algoritmo Genético

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

Instituto de ciências tecnológicas (ICT), Universidade Federal de Itajubá – Campus Itabira Itabira - Brasil, (e-mail: hugocampelo7@unifei.edu.br, jpedro@unifei.edu.br, ivan.faria@unifei.edu.br)

Abstract: This article presents a methodology for obtaining direct axis parameters of synchronous generators that present a fast transient dynamic. The machines that exhibit this behavior are small in size and used in mini and micro hydraulic generation systems, as well as in small hydroelectric plants. The parameters were obtained by means of a computational algorithm which minimizes an objective function defined as the integral of the quadratic error between the measured waveform and the calculated waveform from the mathematical model. The Genetic Algorithm method was used as a computational strategy in order to estimate the optimal parameters of the machine. This article brings an approach of estimation in the Park Reference, eliminating all the difficulties and subjectivity of the traditional normalized methodology.

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 Algoritmo genético como estratégia computacional a fim de se estimar os parâmetros ótimos da máquina. Este artigo traz uma abordagem de estimação no Referencial de Park eliminando todas as dificuldades e subjetividade da metodologia tradicional normalizada.

Keywords: Synchronous machines; determination of transient parameters; short-circuit test; Park referential; Genetic Algorithm.

Palavras-chaves: Máquinas síncronas; determinação de parâmetros transitórios; ensaio de curto-circuito; referencial de Park; algoritmo genético.

1. INTRODUÇÃO

Com a escassez dos grandes potenciais hidráulicos somado aos elevados custos dos grandes empreendimentos de geração de energia, há tendência de desverticalização do setor. Incentivada pela REN 482 (ANEEL, 2012), a mini e microgeração distribuída (MMGDs), tem ganhado notoriedade na participação da matriz elétrica nacional, com perspectiva de capacidade instalada de 11,4 GW até 2029 (EPE, 2019). Neste contexto, a exploração de pequenos potenciais hidráulicos, tais como as pequenas centrais hidráulicas (PCHs) e centrais geradoras hidráulicas (CGHs), têm sido alvos constantes de investimentos principalmente nas modalidades de autoconsumo remoto e geração compartilhada. Tal crescimento da geração distribuída, tem sido acompanhado por investimentos em geração térmica, não só para suprir a imprevisibilidade e variabilidade principalmente das fontes eólicas e solares, como também forma de suporte à tensão do sistema e quando adequadamente distribuído, adiamento do gasto de capital em redes de transmissão e distribuição.

Neste contexto, com crescentes incorporações de gerações de pequeno porte descentralizadas, faz-se necessária a obtenção de modelos matemáticos que representem com rigor as

características dinâmicas dos equipamentos, como é o caso dos geradores síncronos. Dessa forma, a simulação através de um modelo rigoroso viabiliza vários estudos de interesses técnicos. Como, por exemplo, estudos de estabilidade angular, ajustes de controladores de tensão e velocidade, ajustes de relés de proteção, entre outros.

O método clássico de obtenção dos parâmetros, normatizados pelo IEEE Std. 115 (2009) e NBR 5052 (1984), consiste na obtenção da corrente eficaz de armadura da máquina dado uma perturbação. Em seguida, em escala semi logarítmica, realiza-se a extrapolação exponencial da forma de onda eficaz correspondente à cada período (subtransitório, transitório e regime permanente) até interseção com eixo das ordenadas. A problemática dessa metodologia consiste na dificuldade de se obter o valor eficaz da grandeza de interesse visto a presença de assimetria e componente de segundo harmônico, cuja negligência pode culminar em erros de estimação na ordem de 15 a 20%, principalmente no período subtransitório (Kamwa et al., 1995). O processo de extrapolação exponencial por sua vez, é um tanto quanto subjetivo, demandando em grande parte do julgamento individual quanto aos limites de cada período. O processo se torna ainda mais laborioso quando se trata de

máquinas de pequeno porte. Sabe-se que para esses geradores, as constantes de tempo de armadura são muito pequenas, atingindo regime permanente em poucos ciclos. Devido ao fato, o processo de interpolação dos picos e vales da forma de onda instantânea, realizado para se obter valor eficaz, demanda extrapolações e aproximações, devido à pequena quantidade de amostras, principalmente no período subtransitário. Portanto, para estimação mais precisa, é necessário eliminar a necessidade de se obter a componente eficaz da forma de onda e utilizar algoritmo computacional a fim de realizar o *fitting* entre a forma de onda instantânea do ensaio e a equação que a modela.

Este artigo apresenta uma alternativa na obtenção de parâmetros de geradores síncronos de pequeno porte por meio do ensaio de curto-circuito buscando eliminar as problemáticas acima retratadas. Para o desenvolvimento da metodologia, recorreu-se ao método de aproximação baseado na equação da corrente de curto-circuito trifásico no referencial de Park (Park, 1928). Para obter erro mínimo e eliminar a necessidade de julgamento humano no processo de estimação utilizou-se o algoritmo genético. Por fim, uma análise da influência do nível de excitação nos valores dos parâmetros é realizada.

2. MÉTODO DE DETERMINAÇÃO DE PARÂMETROS DE GERADORES SÍNCRONOS

Vários procedimentos de ensaios para obtenção de parâmetros das máquinas síncronas são retratados nas seguintes normas IEEE Std 115 (2009), NBR 5052 (1984) e IEC 34.4 (1985). No entanto, aprimoramentos das técnicas de tratamento de dados assim como novas metodologias estão em constante desenvolvimento. Em Ávila et al. (2018), o uso de algoritmos no processo de estimação dos parâmetros provenientes do ensaio de curto-circuito no referencial cartesiano é proposto. Os autores apresentam uma nova abordagem para estimação dos parâmetros da máquina síncrona. O procedimento proposto, consiste em se determinar de forma analítica a reatância de eixo direto de regime permanente, ressaltando que tal procedimento é relativamente de fácil obtenção. Dispondo deste parâmetro, os autores estimam a reatância transitória e subtransitória como 66,6% e 33,3% da reatância de regime permanente, respectivamente. As constantes de tempo são obtidas tomando tempos de 1/4 e 1/2 ciclos. Estes valores, por sua vez, são condições iniciais para um algoritmo proposto que tem por objetivo ajustar, por meio de análise de sensibilidade, o erro de *fitting* destes parâmetros para uma tolerância máxima de 5%. A fim de confrontar os parâmetros obtidos, outras metodologias de ensaio foram realizadas. Ressalta-se que os erros de estimação obtidos aumentam à medida que a reatância tende a diminuir, ou seja, há grande dificuldade para obtenção de um valor conciso para a reatância subtransitória, decorrente do curto período do transitório correspondente a este período. A abordagem de forma geral, apresenta erros de estimação elevados além do fato de não considerar a presença do segundo harmônico.

Por sua vez, em Martin et al. (1999) e Best et al. (2010) uma abordagem de estimação no referencial de Park é realizada. A partir do ensaio de curto-circuito os autores extraem os parâmetros de eixo direto, assim como a reatância subtransitória de eixo de quadratura e a constante de tempo de armadura para um gerador de 150 KVA. Destaca-se neste trabalho a investigação do escurcionamento dos parâmetros à medida que se altera a tensão de excitação no estágio pré curto-circuito. Dos resultados, observa-se que a reatância de eixo direto de regime permanente tende a diminuir com o aumento da excitação. Já para o período transitório, os autores ressaltam a dificuldade de se determinar de forma acurada os parâmetros, visto o fato que tal período compreende desde o momento em que o material ferromagnético está saturado (início da resposta) até a condição de estado não saturado. Os autores ressaltam que as equações da literatura descrevem um decaimento exponencial para a reatância transitória, o que não representa a máquina em condições saturadas. Análise análoga é estendida para o período subtransitário, ressaltando uma lacuna da literatura. Ainda é destacado que, máquinas de pequeno porte saturam mais facilmente e com efeitos mais significativos. Destaca-se que a metodologia foi aplicada em um gerador de 150 KVA com excitação do tipo *brushless*, porém adaptado um comutador para a realização do ensaio. Desta forma, investigações para máquinas de porte ainda menores e também para outros tipos de excitação ainda carecem de estudos. O impacto da variação da tensão de campo durante o ensaio de curto-circuito e um modelo matemático de estimação para este caso também é abordado em Victor et al. (2020).

Ensaio de restabelecimento de tensão utilizando algoritmo genético é abordado em Soares et al (2018). São apresentadas duas metodologias de *fitting* para obtenção dos parâmetros. Uma das metodologias consistiu em se estimar a tensão eficaz de restabelecimento a partir de uma soma exponencial cujos expoentes são extraídos através do procedimento de *fitting* com a tensão eficaz transitória do ensaio. A outra metodologia consiste em realizar o *fitting* com a equação geral da literatura que modela o restabelecimento. Em ambos os casos o algoritmo Nelder-Mead é empregado no processo de estimação. Os resultados são confrontados com os obtidos pela metodologia convencional normalizada. Observou-se grandes discrepâncias da reatância e constante de tempo subtransitória dos métodos propostos em relação à metodologia convencional, indicando maior acurácia nos resultados pela metodologia proposta pelos autores. Ressalta-se que, os trabalhos de Soares et al. (2018) e Ávila et al. (2018) foram realizadas na mesma máquina, todavia o primeiro aborda o restabelecimento de tensão enquanto o segundo o curto-circuito. Observou-se que, os parâmetros obtidos pelos métodos tiveram diferenças consideráveis para as reatâncias de eixo direto transitória e subtransitória e respectivas constante de tempo. Tal fato, elucida a necessidade de maiores investigações a respeito do tema, principalmente no que tange

às divergências entre parâmetros obtidos para circuito de armadura aberto e fechado.

Ensaio que visam obter parâmetros transitórios de eixo de quadratura são realizados através de rejeição de carga pela técnica de tentativa e erro (Silva et al., 2017), (Bernardes Jr., 2015) e (Mello et al., 1977). Métodos mais apurados, no entanto, possibilitam realizar rejeição em condição arbitrária (Bortoni et al., 2002a) ou calcular a carga reativa demanda sem a necessidade de aferir o ângulo de carga (Giesbrecht, 2016). Uma abordagem não tradicional de estimação de parâmetros de eixo de quadratura é apresentada em Bortoni et al. (2016b). Os autores aplicam a técnica de forma *on-line* em vários hidrogeradores do Sistema Interligado Nacional (SIN), obtendo erros de estimação máximo de 3% em relação aos valores fornecidos pelos fabricantes. Outros ensaios menos invasivos, porém, com tratamento de dados mais laborioso são os ensaios de resposta em frequência. Em Gustavsen et al. (1999) é abordada a técnica de aproximações racionais de funções no tratamento de dados, enquanto que em Kornrumpf et al. (2018) uma metodologia de ensaio de baixo custo utilizando inversor de frequência e redes neurais é proposta.

3. DETERMINAÇÃO DOS PARÂMETROS DA MÁQUINA SÍNCRONA DE POLOS SALIENTES

3.1 Transformada de Park

Por volta de 1920 R. H. Park introduziu um novo método de análise de máquina elétrica (Park, 1928). Usualmente conhecida como transformada “dq0”, é uma importante ferramenta para simplificação das equações da máquina síncrona através da introdução de um referencial rotacional para as variáveis do estator.

A transformada de Park tem por finalidade projetar grandezas trifásicas equilibradas em dois vetores ortogonais (*eixo d e eixo q*), que giram na frequência angular. Considerando ‘G’ uma grandeza genérica (no estudo em questão ‘G’ descreve corrente). A transformada dq0 de ‘G’, da base de sequência de fases para a base de eixos segundo o referencial dq0 podem ser obtidas de acordo com (1).

$$\begin{bmatrix} G_d \\ G_q \\ G_0 \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos\theta & \cos(\theta - 120^\circ) & \cos(\theta + 120^\circ) \\ -\sin\theta & -\sin(\theta - 120^\circ) & \sin(\theta + 120^\circ) \\ \frac{1}{3} & \frac{1}{3} & \frac{1}{3} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} G_a \\ G_b \\ G_c \end{bmatrix} \quad (1)$$

3.2 Coordenadas dq0 na Resposta ao Curto-Circuito do Gerador Síncrono.

Os parâmetros dos geradores síncronos devem ser conhecidos com precisão para representar rigorosamente o comportamento transitório da máquina. No entanto, a determinação das reatâncias transitórias e subtransitórias, juntamente com suas constantes de tempo, em geradores síncronos de pequeno porte são difíceis de se estimar devido às pequenas constantes de tempo da máquina (Tindall et al., 1996). A Fig. 1 retrata o perfil das correntes de armadura da máquina síncrona de pequeno porte ensaiada quando

submetida a um curto-circuito trifásico abrupto com tensão de campo à 20% da tensão de armadura nominal.

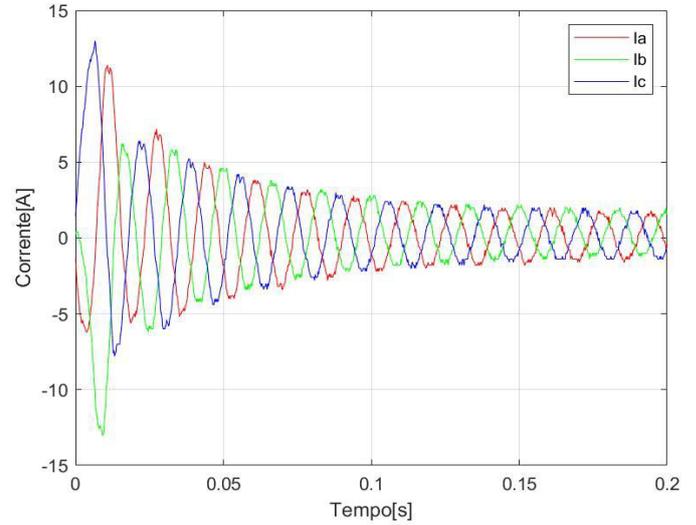


Fig. 1: Oscilografia das correntes de armadura durante o transitório de curto-circuito trifásico abrupto a 20% de excitação.

Ao analisar a Fig. 1, nota-se que aproximadamente seis ciclos foram suficientes para que a resposta do gerador ao curto-circuito atingisse o valor de regime permanente, fato oposto aos geradores de grande porte, que apresentam constantes de tempo da ordem de segundos (Anderson et al., 1977). Uma solução proposta em Martin et al. (1999) é a utilização da transformada de Park, um procedimento que tem a vantagem de decompor as correntes de fase em correntes de eixo direto e em quadratura, e assim, melhorar a identificação dos parâmetros das regiões transitórias e subtransitórias.

A expressão da corrente instantânea em qualquer uma das fases apresentada na Fig. 1 pode ser obtida por (2). Por meio de (1) é possível obter as correntes de eixo direto (3) e em quadratura (4), utilizando a transformada de Park. Como o curto-circuito aplicado a máquina é do tipo trifásico franco, a corrente de sequência zero é nula (Martin et al., 1999).

$$i(t) = E_A \left[\frac{1}{X_d} + \left(\frac{1}{X_d'} - \frac{1}{X_d} \right) e^{-\frac{t}{T'}} + \left(\frac{1}{X_d''} - \frac{1}{X_d'} \right) e^{-\frac{t}{T''}} \right] \cos(\omega_0 t + \gamma) - \frac{E_A}{2} \left(\frac{1}{X_d''} - \frac{1}{X_q''} \right) e^{-\frac{t}{T_a}} \cos(\gamma) - \frac{E_A}{2} \left(\frac{1}{X_d''} - \frac{1}{X_q''} \right) e^{-\frac{t}{T_a}} \cos(2\omega_0 t + \gamma) \quad (2)$$

$$i_d = E_A \left[\left(\frac{1}{X_d''} - \frac{1}{X_d'} \right) e^{-\frac{t}{T''}} + \left(\frac{1}{X_d'} - \frac{1}{X_d} \right) e^{-\frac{t}{T'}} + \frac{1}{X_d} \right] \cos(\omega_0 t) - \frac{E_A}{X_d''} e^{-\frac{t}{T_a}} \cos(\omega_0 t) \quad (3)$$

$$i_q = -\frac{E_A}{X_q''} e^{-\frac{t}{T_a}} \sin(\omega_0 t) \quad (4)$$

Vale salientar que a equação (2) integra os dois regimes transitórios e o regime permanente da máquina, juntamente

com a componente contínua e a parcela de segundo harmônico. Sendo essa última a principal vantagem da metodologia proposta neste artigo, que além de poder estimar o parâmetro X_q'' , as estimações dos parâmetros levam em consideração o segundo harmônico presente na resposta oscilatória da máquina. Contudo, ambos os casos não se mostram presentes na metodologia convencional.

4. DESCRIÇÃO DOS PROCEDIMENTOS DE ENSAIO.

Os ensaios foram realizados 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 *testbed* 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, conforme mostrado pelas Fig. 2 e 3. 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 (1984). 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 até 20% da tensão nominal de armadura, e cinco ensaios foram realizados a fim de averiguar o desvio padrão dos parâmetros. Procedimentos análogos foram realizados para excitações de 30% e 40% a fim de se verificar a influência da saturação nos parâmetros da máquina. Os terminais do estator foram conectados na entrada de um contator, cuja saída foi curto-circuitada. O fechamento do contator e, conseqüentemente, 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. Assim, foram adquiridas as formas de onda do curto-circuito abrupto.

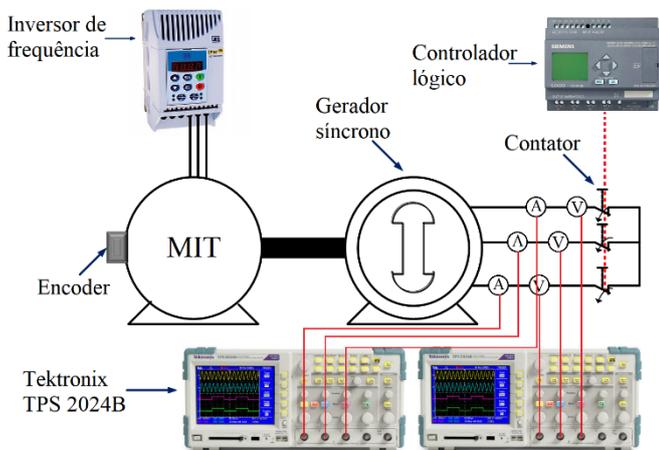


Fig. 2: Diagrama esquemático do *testbed* desenvolvido para ensaios de curto-circuito abrupto em geradores síncronos.



Fig. 3: Imagem do *testbed* para a realização dos ensaios em laboratório.

Vale destacar que 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 a corrente de campo.

5. DESCRIÇÃO DO ALGORITMO GENÉTICO

Desenvolvidos por John Holland e sua equipe na Universidade de Michigan, os algoritmos Genéticos (AGs) são algoritmos de busca e otimização global baseados em mecanismos da seleção natural e sobrevivência do indivíduo mais adaptado (Izidoro, 2014).

Os AGs são compostos por procedimentos de tomadas de decisões que evoluem uma população de indivíduos, em que cada indivíduo carrega uma solução para o problema proposto. O diagrama que ilustra o funcionamento do algoritmo está representado na Fig. 4. A cada processo do AG uma nova geração é criada com isso os melhores indivíduos são selecionados. Essa seleção é feita por meio de uma função de aptidão (*fitness*). Os indivíduos são criados através dos operadores genéticos (cruzamento e mutação) em indivíduos pré-selecionados (seleção), a fim de se obter um novo indivíduo que carrega o material genético das melhores entidades antecedentes.

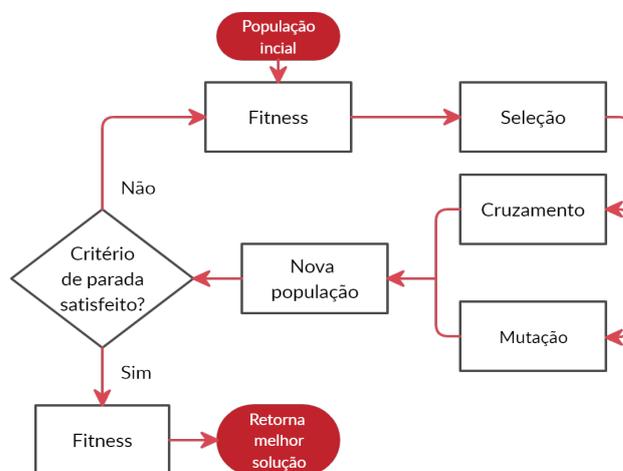


Fig. 4: Fluxograma do algoritmo. Adaptado de (Izidoro, 2014).

A função aptidão (*fitness*), utilizada neste estudo, é conhecida como somatório do erro quadrático e está representada em (5).

$$J = \frac{\sum_{n=1}^k [I_e(n) - I_{eq}(n)]^2}{k} \quad (5)$$

Onde ‘J’ representa a função objetivo a ser minimizada, ‘ $I_e(n)$ ’ a curva da corrente obtida no ensaio, após a transformada $dq0$, no instante ‘n’, ‘ $I_{eq}(n)$ ’ a curva de corrente obtida direto do algoritmo, sendo representada por (3) para eixo direto e (4) para eixo em quadratura. A constante ‘K’ é definida como o tamanho do vetor ‘ $I_{eq}(n)$ ’. A avaliação é feita com o intuito de se obter os melhores indivíduos, sendo definidos como aqueles que minimizam a função objetivo.

Após a realização da *fitness*, são selecionados os melhores indivíduos através de um torneio. Nesse método de seleção, um subconjunto ‘i’ de indivíduos é sorteado aleatoriamente da população. O torneio é responsável por evitar convergência prematura do AG uma vez que aumenta o espaço de busca do algoritmo. Neste estudo, o número de selecionados foi definido como 4. Esse processo é repetido até a população atingir seu tamanho total, definido como 150 indivíduos. A mutação e o cruzamento são feitos nos indivíduos selecionados e por meio de sua representação binária foram aplicados os operadores genéticos.

A taxa de mutação e cruzamento que melhor adaptou a este trabalho foi de 13% e 20%, respectivamente. Após a realização do cruzamento e da mutação é obtido uma nova população, e esse processo é repetido até que a condição de parada definida como 200 interações seja satisfeita.

6. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Com o propósito de se obter os parâmetros de eixo direto e em quadratura da máquina síncrona de 2 KVA, foi utilizado o algoritmo genético para estimar os parâmetros através das curvas providas do ensaio de curto-circuito após a aplicação da transformada de Park (R. H. Park, 1928). Os resultados obtidos foram analisados de forma numérica, através dos valores adquiridos em diferentes níveis de excitação e desvios-padrões presente na evolução do próprio algoritmo. Posteriormente, o erro de aproximação foi avaliado de forma gráfica tanto no referencial cartesiano quanto no referencial de Park.

6.1 Resultados obtidos através da curva da corrente de eixo direto do gerador síncrono.

Os resultados obtidos por intermédio da curva estimada de eixo direto são sumarizados na Tabela 1, onde estão apresentados os valores médios de cada parâmetro e seus respectivos desvios-padrões. Salienta-se que foram realizadas cinco repetições dos ensaios para obtenção dos valores estatísticos.

Tabela 1: Parâmetros obtidos para o eixo direto.

V	X_d	$X'd$	$X''d$	$T'd$	$T''d$	Ta
[p.u.]	[p. u.]	[p. u.]	[p. u.]	[ms]	[ms]	[ms]
0,2	1,652 ± 0,04	0,55 ± 0,03	0,138 ± 0,001	149,589 ± 0,000	36,790 ± 0,000	8,781 ± 0,000
0,3	1,55 ± 0,07	0,56 ± 0,02	0,147 ± 0,001	142,785 ± 0,000	36,408 ± 0,0000	9,669 ± 0,000
0,4	1,54 ± 0,03	0,58 ± 0,02	0,136 ± 0,001	145,210 ± 0,000	34,979 ± 0,0000	8,098 ± 0,000

Devido à saturação do material ferromagnético do gerador, pode-se observar a diminuição da reatância de eixo direto (X_d) com o aumento da tensão de excitação da máquina.

Substituindo os valores médios dos parâmetros obtidos na excitação de 0,4 p.u. em (3), plotou-se a oscilografia de eixo direto da corrente estimada em conjunto com a corrente obtida do ensaio, Fig. 5.

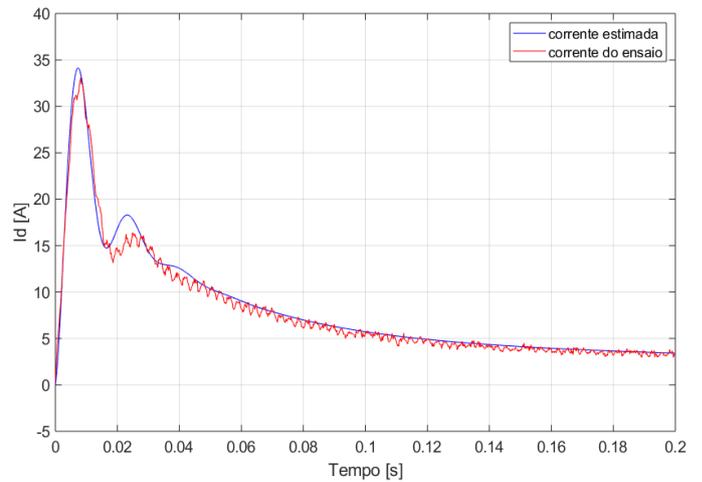


Fig. 5: Oscilografia da corrente de eixo direto proveniente do ensaio e a estimada pelo algoritmo.

6.2 Resultados obtidos através da curva da corrente de eixo em quadratura do gerador síncrono.

Os resultados obtidos pelo procedimento de *fitting* entre a corrente de eixo de quadratura derivada do ensaio e a estimada por (4), resultou nos parâmetros dispostos na Tabela 2, enquanto que um comparativo gráfico, para excitação de 0,2 p.u. é apresentado na Fig. 6.

Tabela 2: Parâmetros obtidos para o eixo de quadratura.

Excitação [p.u.]	Xq'' [p. u.]	Ta [ms]
0,2	0,1894 ± 0,0004	9,5719 ± 0,0000
0,3	0,1258 ± 0,0001	6,4223 ± 0,0000
0,4	0,1750 ± 0,0321	9,8000 ± 0,0000

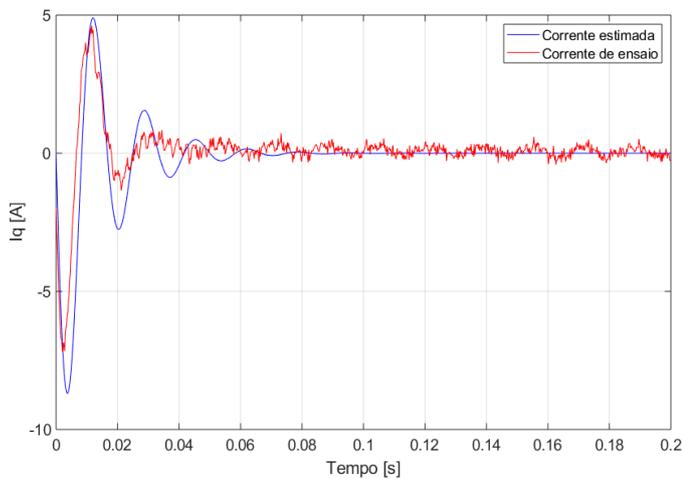


Fig. 6: Oscilografia da corrente de eixo de quadratura proveniente do ensaio e a estimada pelo algoritmo.

Os valores de ' T_a ' obtidos a partir das duas diferentes correntes de eixo apresentam boa concordância. Todavia, sugere-se que o valor mais fidedigno a este parâmetro seria o obtido por intermédio da corrente de eixo direto. Isso pode ser explicado pelo fato que ' X_d'' ' de maneira geral se mostrou menor que ' X_q'' '. Desta forma, com uma corrente oscilante no eixo direto mais expressiva, presume-se solução mais precisa para este parâmetro.

6.3 Resultados obtidos no referencial cartesiano

Aplicando a transformada inversa de Park à cada amostra das correntes de eixo direto e quadratura estimadas, obteve-se as oscilografias da Fig. 7, Fig. 8 e Fig. 9 para excitação de 0,4 p.u., 0,3 p.u. e 0,2 p.u. respectivamente, referentes a corrente da fase "A". Na Tabela 3, é apresentado o erro percentual do procedimento de *fitting*.

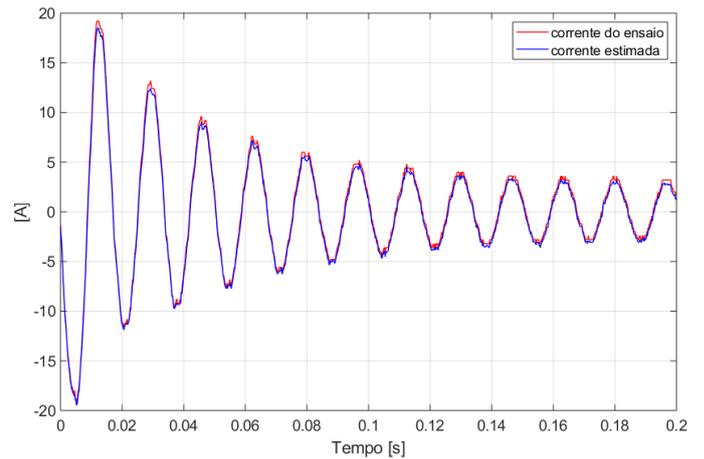


Fig. 7: Oscilografia da corrente proveniente do ensaio e a estimada pelo algoritmo no referencial cartesiano para excitação de 0,4 p.u..

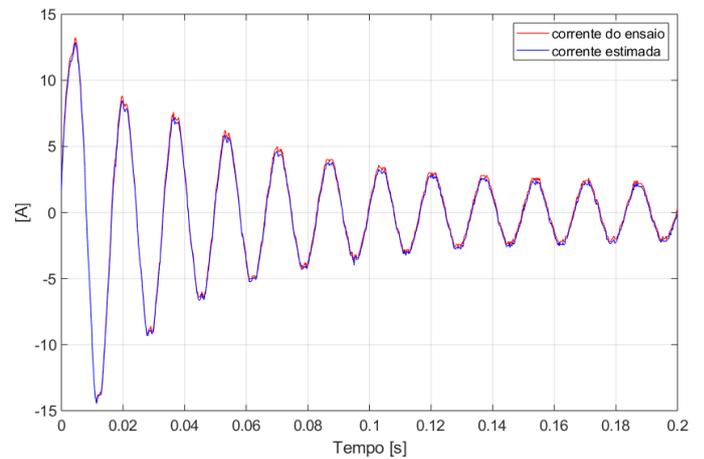


Fig. 8: Oscilografia da corrente proveniente do ensaio e a estimada pelo algoritmo no referencial cartesiano para excitação de 0,3 p.u..

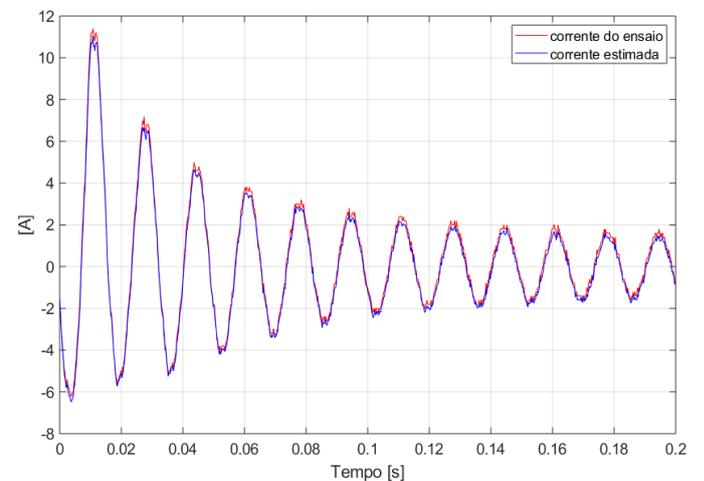


Fig. 9: Oscilografia da corrente proveniente do ensaio e a estimada pelo algoritmo no referencial cartesiano para excitação de 0,2 p.u..

Tabela 3: Erro médio quadrático por nível de excitação.

Excitação [p.u.]	ISE (%)
	I_{abc}
0,2	5,43
0,3	6,29
0,4	9,15

É possível observar que, ao retornar as correntes estimadas para o referencial cartesiano, a forma de onda representa coerentemente os valores medidos. Logo, é possível concluir que tal metodologia culminou em erros inferiores à 10% no referencial cartesiano. Salienta-se que este erro não é referente aos valores dos parâmetros estimados e sim ao erro de *fitting* dada pela função somatório do erro quadrático, apresentada em (5), em que é realizado o somatório do erro entre cada amostra do ensaio em relação à amostra retornada pelo algoritmo. Portanto, devido a janela de amostragem no somatório ser todo o ensaio cominou-se em erros da ordem de até 10%.

Outro ponto importante a se destacar foi o desvio padrão muito baixo para os 5 ensaios realizados em cada excitação. Isso indica que o algoritmo convergiu para seu ótimo global, retornando parâmetros ótimos. Além disso, outro ponto a ser destacado é a capacidade de tal metodologia contabilizar a presença do segundo harmônico e a obtenção do parâmetro ' X_q'' ', algo impraticável na metodologia padrão normalizada.

7. 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 com aplicação de técnicas de otimização por algoritmo genético no referencial de Park. 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.

Os resultados obtidos tiveram desvios-padrões próximos de zero, confirmando a convergência do algoritmo para o mínimo global. Ademais, o critério de erro ISE apresentou valores inferiores à 10% para o *fitting* no domínio do tempo. Todavia, as formas de onda representam fidedignamente o transitório instantâneo da corrente de armadura da máquina. Outro ponto importante foi a capacidade de representar o segundo harmônico que o rotor induz na armadura durante o defeito. Finalmente, a presente metodologia cobre uma lacuna existente nas normas quando se trata da identificação de parâmetros de geradores de pequeno porte.

Por fim, espera-se que o algoritmo desenvolvido para obtenção dos resultados do curto-circuito, possa constituir uma ferramenta útil para a determinação de parâmetros de geradores síncronos de pequeno porte.

REFERÊNCIAS

- ABNT NBR 5052 (1984). Máquinas Síncronas – Ensaios, p. 122.
- Anderson, P.M. Fouad, A.A. (1977). Power System Control and Stability, Iowa State.
- ANEEL (2012), Ministério de Minas e energia. Resolução normativa N° 482, 13 p.
- Ávila, B.R.A. Faria, I.P. Soares, L. A. Coelho, A.L.M. Sousa C. V. (2018). Estimation of Direct Axis Synchronous Parameters using the Sudden Short-circuit Tests. Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos (SBSE).
- Bernardes Junior, J.V. (2015). Determinação de parâmetros de máquina síncrona através de abertura e fechamento de curto-circuito. UNIFEI. Dissertação de Mestrado. Itajubá, p. 110.
- Best, R. J. Morrow, D. J. Crossley, P. A. (2010). Current transients in the small salient-pole alternator during sudden short-circuit and synchronization events. IET - Electric Power Applications, p. 14.
- Bortoni, E.C. Araújo, B.T. Jardini, J.A. (2016). Estimation of Quadrature Axis Synchronous Reactance Using the Constant Excitation Test. *IEEE Power and Energy Technology Systems Journal*. 8 p.
- Bortoni, E.C. e Jardini J.A. (2002). Identification of Synchronous Machine Parameters Using Load Rejection Test Data. *IEEE transactions on energy conversion*, Vol 17, NO. 2.
- EPE (2019), Ministério de Minas e Energia. Plano decenal de expansão de energia 2029, 393 p.
- Faria, V.A.D., Bernardes Jr., J.V., Bortoni, E.C. (2020). Parameter estimation of synchronous machines considering field voltage variation during sudden short-circuit test. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems, Volume 114*.
- Giesbrecht, M. (2016). A Phasor Diagram Based Method to Determine Load Conditions for Load Rejection Tests for Round Rotor Synchronous Machine Quadrature Axis Parameters Determination. *IEEE*, 6 p.
- Gustavsen, B. e Semlyen A. (1999). Rational approximation of frequency domain responses by vector fitting. *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 14, NO. 3.
- IEC (1985). IEC 34.4 - Methods for determining synchronous machines quantities from tests, 175 p.
- IEEE Std 115 (2009). Test Procedures for Synchronous Machines, 2010, p. 87.
- Izidoro, S.C. (2014). Algoritmos Genéticos para Identificação de Sítios Ativos em Enzimas. Tese de Doutorado, Universidade Federal de Minas Gerais.

- Kamwa, I Pilote, M. Carle, H. Viarouge, Philippe Mpanda-Mabwe, B. Crappe, M. (1995). Computer Software to Automate the Graphical Analysis of Sudden-Short-Circuit Oscillograms of Large Synchronous Machines. *IEEE Transactions on Energy Conversion*.
- Kornrumpf, L.H.D e Nabeta, S.I. (2018). Determination of synchronous machine parameters through the SSFRT test and artificial neural networks. *Institute of engineering and technology journals*, 4p.
- Martin, J.P.; Tindall, C.E.; Morrow, D.J. (1999). Synchronous Machine Parameter Determination using the Sudden Short-circuit Axis Currents. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, v. 14.
- Mello, F.P.D.; Ribeiro, J.R. (1977). Derivation of synchronous machine parameters from tests. *IEEE Transaction on Power Apparatus and Systems*, p. 8.
- Park, R.H. Robertson, B.L. (1928). Abridgment of the reactances of synchronous machines. *Journal of the AIEE*, v. 47, n. 5, p. 345-348.
- Silva, P.V.V., Bortoni, E.C, Rocha, J.J.E. (2017) Identification of synchronous machines parameters using genetic algorithm and load rejection test. *IEEE Power & Energy Society General Meeting*, Chicago.
- Soares, L.A. Pinto, P.P. Faria I.P. Ávila, B.R.A. Coelho, A.L.M. e Sousa, C.V. (2018). Identification of Direct Axis Parameters of the Synchronous Machine Using Optimization Algorithm and Voltage Recovery Test. *Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos (SBSE)*, Niterói.
- Tindall, C.E. et al. (1996). Transient characteristics of small salient-pole alternators. *IEEE transactions on energy conversion*, v. 11, n. 3, p. 539-546.