

A Study of the Effects of Magnetic Saturation and Spatial Harmonics on Isolated Salient-Pole Synchronous Generators

W. Vanço, F. Silva, and J. Monteiro

Abstract—This article presents a study of the effects caused in isolated salient-pole synchronous generator due to magnetic saturation and spatial harmonics, these effects cause harmonic distortion in the generated voltage and current. An experimental analysis is necessary to verify the magnitude of the distortion of the generated voltage and current, focusing on which are the components generated by the non-linear constructive aspects of the salient-pole synchronous generator. The quality of generated energy depends on which harmonic components prevail in the total distortion, whether zero, positive or negative. In this way the study is based on the negative effects caused by these harmonious components of a constructive nature of the salient-pole synchronous generator.

Index Terms—Harmonic Distortion, Magnetic Saturation, Salient-Pole, Space Harmonics, Synchronous Generator.

I. INTRODUCTION

HARMÔNICOS espaciais e a saturação magnética estão presentes em geradores síncronos de polos salientes, provocando distorção na tensão gerada, e consequentemente, de corrente. Estas distorções harmônicas são inerentes de aspectos construtivos e do projeto da máquina síncrona. As componentes harmônicas espaciais, são consequência das distribuições espaciais da densidade de fluxo magnético originado por seus enrolamentos. A saturação magnética é a relação da corrente de excitação e da tensão gerada, onde observa-se que no valor nominal de tensão gerada, a máquina opera na região de saturação.

Poucos trabalhos mencionam os efeitos dos harmônicos espaciais na qualidade da energia elétrica gerada. Neste sentido, apenas dois trabalhos foram publicados abordando harmônicos espaciais em geradores síncronos de polos salientes. O primeiro realizado um estudo de falta interna considerando o modelo com harmônicos espaciais [1], já o segundo apresenta, um modelo matemático considerando harmônicos espaciais e temporais (provocados por cargas não lineares), limitando o estudo por um modelo teórico [2]. O estudo sobre harmônicos espaciais em geradores à diesel e síncrono de ímã permanente são apresentados em [3] e [4], respectivamente.

Este trabalho foi apoiado pela Universidade de São Paulo (Escola de Engenharia de São Carlos) sob o subsídio do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico.

W. E. Vanço, Escola de Engenharia de São Carlos (USP), São Carlos, São Paulo, Brazil (e-mail: vanco@usp.br)

F. B. Silva, Universidade de Ouro Preto (UFOP), João Monlevade, Minas Gerais, Brazil (e-mail: fbentosilva@hotmail.com)

J. R. A. Monteiro, Escola de Engenharia de São Carlos (USP), São Carlos, São Paulo, Brazil (e-mail: jrm@sc.usp.br)

Uma modelagem de máquinas síncronas cuja teoria apresenta uma função de enrolamento que contabiliza todos os harmônicos espaciais e considerado um entreferro não-simétrico para o cálculo de indutâncias de enrolamento de máquina é apresentado em [5], onde não se busca estudar a distorção provocada pelos harmônicos espaciais, mas sim sobre o efeito da excentricidade do entreferro dinâmico nas indutâncias de uma máquina síncrona de polos salientes, usando a abordagem de função de enrolamento modificada. Outro estudo similar utilizando ferramenta computacional de elementos infinitos é apontado em [6].

Vários estudos que contemplam modelos que consideram a saturação em geradores síncronos de polos salientes são dados em [7-22], estes expressam simulações destes modelos com parâmetros do gerador ou análise dos harmônicos presente na força magneto motrizgerada (f.m.m) e não contemplam os efeitos dos harmônicos espaciais. Uma análise em regime transitório considerando a saturação magnética é mostrado em [23], e trabalhos sobre a saturação durante uma falta desbalanceada são tratados em [24,25].

Outros estudos que consideram os efeitos da saturação utilizando os elementos finitos são apresentados por [26-29]. Em se tratando de geradores síncronos de polos lisos, existem estudos que consideram modelos considerando saturação magnética [30-34]. Estes estudos limitam-se aos parâmetros do gerador síncrono de polos lisos, tais como a reatância saturada, não contemplando estudo da distorção harmônica provocada pelos efeitos da saturação.

Diante do apresentado, verifica-se a necessidade do estudo e análise dos efeitos provocados no próprio gerador síncrono de polos salientes quanto aos harmônicos inerentes aos aspectos construtivos do mesmo em operação em regime permanente e ilhado.

A contribuição deste trabalho destaca-se na análise quantitativa das componentes harmônicas em relação às perdas ôhmicas nos enrolamentos de armadura e a análise qualitativa no que se refere ao estudo das oscilações provocadas pelas componentes harmônicas nos geradores síncronos de polos salientes que operam isoladamente.

Ao mensurar a distorção harmônica provocada pela conjuntura de efeitos dos harmônicos espaciais e da saturação magnética do gerador síncrono de polos salientes, observa-se qual a natureza da componente harmônica mais expressiva, seja de sequência zero, positiva e/ou negativa.

Neste contexto, este artigo apresenta análises experimentais em geradores síncronos de polos salientes de bancadas didáticas e comerciais, visando quantificar e analisar as

consequências dos efeitos dos harmônicos de natureza espacial na qualidade de energia gerada em geradores síncronos de polos salientes isolados. Cabe ressaltar que geradores síncronos que operam isoladamente são sujeitos a maiores danos devidos as componentes harmônicas por possuir um circuito único (gerador-carga), diferentemente de um gerador síncrono conectado à rede elétrica no qual possui evasão das compontes harmônicas de corrente para o sistema elétrico.

II. DISTORÇÕES HARMÔNICAS

Os harmônicos são classificados por espaciais e temporais, obviamente, suas causas são de natureza diferentes, conforme citado. Em geral, os harmônicos não são bem-vindos e desejáveis [35]. Uma onda senoidal periódica pode ser representada pela soma de ondas senoidais de diferentes frequências múltiplas inteiras da frequência fundamental de um Sistema elétrico, sendo tal definição de harmônicos [36].

Matematicamente, a tensão e corrente podem ser representadas por:

$$i = \sum_{n=1}^n i_n = \sum_{n=1}^n I_n \sin(2\pi nft + \alpha_n) \quad (1)$$

$$v = \sum_{n=1}^n v_n = \sum_{n=1}^n V_n \sin(2\pi nft + \beta_n) \quad (2)$$

Onde,

- n - Ordem harmônica;
- I, V - Corrente e tensão máxima;
- f - Frequência do sistema;
- t - Tempo;
- β_n, α_n - Ângulo de fase de tensão e corrente para cada ordem harmônica.

O valor eficaz da tensão e corrente para n componentes harmônicas pode ser escrito respectivamente por:

$$i_{rms} = \sqrt{\sum_{n=1}^{\infty} I_n^2} \quad (3)$$

$$v_{rms} = \sqrt{\sum_{n=1}^{\infty} V_n^2} \quad (4)$$

O fator de potência com distorção harmônica é determinado por:

$$FP = \frac{\text{Potência Ativa}}{\text{Potência Aparente}} = \frac{\sum_{n=1}^{\infty} i_n rms v_n rms \cos(\phi_n)}{i_{rms} v_{rms}} \quad (5)$$

Ou ainda, ser calculado por:

$$FP = \frac{\cos(\phi_1)}{\sqrt{1 + THD_i^2}} \quad (6)$$

É bastante usual mensurar o nível de distorção harmônica total (THD), mostrando a dimensão total da poluição harmônica em relação à componente fundamental. A distorção harmônica total para corrente e tensão são dadas por:

$$THD_i(\%) = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} I_n^2}}{I_1} \times 100 \quad (7)$$

$$THD_v(\%) = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} V_n^2}}{V_1} \times 100 \quad (8)$$

A distorção harmônica individual (IHD) é um parâmetro para se calcular o conteúdo de cada ordem harmonica em relação a fundamental, sendo que a distorção harmônica individual de corrente e tensão são calculadas por:

$$IHD_i(\%) = \left(\frac{I_h}{I_1} \right) \times 100 \quad (9)$$

$$IHD_v(\%) = \left(\frac{V_h}{V_1} \right) \times 100 \quad (10)$$

A representação da forma de onda distorcida por uma série de senóides pode ser representada pela teoria convencional de análise de circuitos elétricos, tendo a necessidade de se analisar cada frequência em particular. A distorção harmônica da tensão é o resultado da corrente harmônica circulando através da impedância de um determinado circuito elétrico, para cada respectivo harmônico existe uma queda de tensão de mesma frequência, dessa forma, totalizando a distorção.

III. HARMÔNICOS ESPACIAIS EM MÁQUINAS SÍNCRONAS

As componentes harmônicas espaciais causam ondulações mecânicas, ou seja, oscilações de torque de natureza inerente das características construtivas do gerador síncrono. A saturação magnética é responsável pela geração de terceiro harmônico e seus múltiplos devido a saturação do material ferromagnético. Quanto aos demais harmônicos de sequência zero, positiva e negativa, são devidos ao fator de passo do gerador síncrono de polos salientes (pleno ou encurtado) [37,38].

As correntes de quinto e sétimo harmônico de natureza espacial resultam em um torque contínuo de sexto harmônico de natureza espacial no rotor da máquina síncrona de polos salientes,

Levando-se em consideração a distribuição senoidal da força magneto motriz gerada por cada enrolamento, devido à interação de harmônicos, os efeitos dos harmônicos espaciais dos componentes de fmm , sua resultante é:

$$fmm = \sum fmm_n \quad (11)$$

Tem-se,

$$fmm_n = \sum KI_n \left[\begin{array}{l} \cos(\theta) \cos(n\omega t) + \\ \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) \cos[n(\omega t - \frac{2\pi}{3})] + \\ \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \cos[n(\omega t + \frac{2\pi}{3})] \end{array} \right] \quad (12)$$

Onde,

fmm - Força magneto motriz (A.e);

fmm_n - Força magneto motriz de ordem harmônica n

(A.e);

K - Constante com o projeto do enrolamento da máquina;

I_n - Valor máximo da componente harmônica da corrente do estator;

θ - Ângulo espacial com origem em uma das fases do estator (graus);

n - Componente harmônica;

ω - Velocidade síncrona.

Utilizando (12), para valores ímpares de “ n ”:

$$n = 1 \rightarrow fmm_1 = 1,5 \times K \times I_1 \times \cos(\theta - \omega t) \quad (13)$$

$$n = 3 \rightarrow \text{zero} \quad (14)$$

$$n = 5 \rightarrow fmm_5 = 1,5 \times K \times I_5 \times \cos(\theta + 5\omega t) \quad (15)$$

$$n = 7 \rightarrow fmm_7 = 1,5 \times K \times I_7 \times \cos(\theta - 7\omega t) \quad (16)$$

Para as demais ordens harmônicas espaciais, a regra é apenas mudar o índice “ n ”, ou seja para a próximo valor de “ n ”:

$n = 9$ igual a $n = 3$,

$n = 11$ igual a $n = 5$,

$n = 13$ igual a $n = 1$, e assim sucessivamente.

As equações para cada ordem harmônica (13) a (16) expressam as fmm_s cuja velocidades angulares são constantes (em relação ao estator, Fig. 1), de acordo com elas pode-se expressar essas “ fmm_s ” pela equação horária do movimento circular uniforme [38]:

$$\theta = \omega t \quad (17)$$

$$\theta = -5\omega t \quad (18)$$

$$\theta = 7\omega t \quad (19)$$

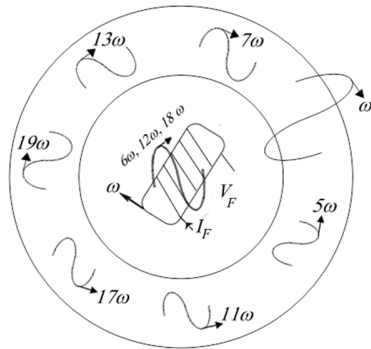


Fig. 1. Componente da “fmm”. Fonte: [39].

Tanto para harmônicos de natureza espacial e temporal pode-se concluir:

1. A componente fundamental possui velocidade angular “ ω ” (sequência positiva), a componente de quinto harmônico velocidade de “ 5ω ”, mas no sentido oposto a componente fundamental (sequência negativa) e a componente de sétimo harmônico com velocidade angular de “ 7ω ” e sentido igual a componente fundamental (por ser de sequência positiva).

2. O campo magnético gerado pela componente de quinto harmônico do estator, produz no enrolamento de campo do rotor uma tensão induzida de “ 6ω ” resultado de (“ $5\omega + \omega$ ”) e a componente de sétimo harmônico produz a mesma tensão induzida de “ 6ω ” (“ $7\omega - \omega$ ”). Essas tensões induzidas de frequência “ 6ω ” no rotor, produzem uma corrente de excitação na mesma frequência provocando perdas na superfície do rotor. Para as demais componentes harmônicas múltiplos da frequência “ 6ω ” são induzidos.

IV. PERDAS ÔHMICAS DEVIDO A HARMÔNICOS

Perdas pelo efeito Joule ou RI^2 , são maiores devido à corrente harmônica, cujo valor eficaz é definido pela equação (3), nota-se que o valor eficaz de uma corrente não senoidal é maior do que se fosse apenas senoidal, implicando em perdas nos enrolamentos, como dado por (20).

$$P_{enr} = R_s I_{rms}^2 = R_s I_1^2 + R_s \sum_{n>1} I_n^2 \quad (20)$$

Devido ao acréscimo das componentes harmônicas, as perdas também sofrem um aumento. Relacionando as perdas no cobre com “THD” de corrente, levando em consideração a corrente não senoidal sem a componente contínua [40], obtém-se:

$$P_{enr} = R_s I_1^2 + THD_i^2 \times R_s I_1^2 = R_s I_1^2 (1 + THD_i^2) \quad (21)$$

Isto implica que as perdas nos enrolamentos da máquina síncrona em relação ao regime senoidal (ou componente fundamental) é acrescida proporcionalmente pela relação da distorção total de corrente ao quadrado.

V. ANÁLISE DO EXPERIMENTAL

O diagrama elétrico do procedimento experimental dos geradores síncronos suprindo uma carga trifásica linear é mostrado na Fig. 2.

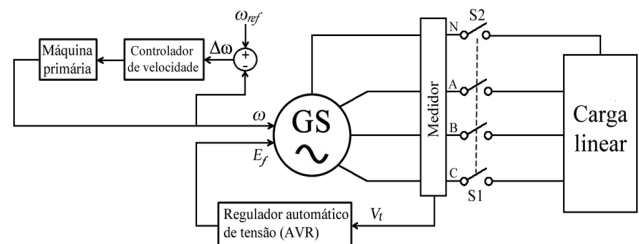


Fig. 2. Diagrama elétrico dos geradores síncronos alimentando uma carga linear trifásica.

Foram utilizados 3 geradores para análise da poluição de harmônicos espaciais. A Tabela I contém os dados de placa e parâmetros do gerador síncrono de 1,5 kVA, um gerador de bancada didática. A Tabela II apresenta os dados de placa e parâmetros do gerador síncrono de 2,0 kVA, também um gerador de bancada didática. E a Tabela III contém os dados de placa e parâmetros de um gerador síncrono comercial de 15,0 kVA.

As leituras oscilografadas correspondem à tensão fase ou de linha e corrente de linha nos 3 geradores. Uma carga linear trifásica é conectada (fechando-se a chave S1 na Fig. 2) ao gerador síncrono de polos salientes em regime permanente.

TABELA I
DADOS E PARÂMETROS DO GERADOR DE SÍNCRONO DE 1,5 kVA

Parâmetros	Valores
Potência nominal	1,5 [kVa]
Tensão nominal de linha	380 [V rms]
Corrente nominal	2,3 [A rms]
Ligação	Y
Frequência	60 [Hz]
Velocidade mecânica síncrona	1800 [rpm]
Rendimento	0,85
Fator de potência nominal	0,80
Momento de inércia	0,00928 [kg.m ²]
Constante de inércia	0,11 [s]
Reatância de eixo direto, X_d	1,827 [pu]
Reatância de eixo direto, X_{ds}	1,338 [pu]
Reatância de eixo em quadratura, X_q	1,124 [pu]
Reatância transitória de eixo direto, X'_d	0,312 [pu]
Reatância subtransitória de eixo direto, X''_d	0,176 [pu]
Reatância subtransitória de eixo em quadratura, X''_q	0,111 [pu]
Constante de tempo transitória de curto-circuito de eixo direto, T'_d	17,6 [ms]
Constante de tempo subtransitória de curto-circuito de eixo direto, T''_d	5,30 [ms]
Constante de tempo subtransitória de curto-circuito de eixo em quadratura, T''_q	5,25 [ms]
Reatância de dispersão, X_l	0,263 [pu]
Resistência do estator, R_s	0,107 pu

TABELA II
DADOS E PARÂMETROS DO GERADOR DE SÍNCRONO DE 2,0 kVA

Parâmetros	Valores
Potência nominal	2,0 [kVa]
Tensão nominal de linha	220 [V rms]
Corrente nominal	5 [A rms]
Ligação	YY
Frequência	60 [Hz]
Velocidade mecânica síncrona	1800 [rpm]
Rendimento	0,85
Fator de potência nominal	0,80
Momento de inércia	0,0494 [kg.m ²]
Constante de inércia	0,438 [s]
Reatância de eixo direto, X_d	1,850 [pu]
Reatância de eixo direto, X_{ds}	0,945 [pu]
Reatância de eixo em quadratura, X_q	1,436 [pu]
Reatância transitória de eixo direto, X'_d	0,370 [pu]
Reatância subtransitória de eixo direto, X''_d	0,22 [pu]
Reatância subtransitória de eixo em quadratura, X''_q	0,2 [pu]
Constante de tempo transitória de curto-circuito de eixo direto, T'_d	2,4 [s]
Constante de tempo subtransitória de curto-circuito de eixo direto, T''_d	0,02 [s]
Constante de tempo subtransitória de curto-circuito de eixo em quadratura, T''_q	0,02 [s]
Reatância de dispersão, X_l	0,07 [pu]
Resistência do estator, R_s	0,056 pu

TABELA III
DADOS E PARÂMETROS DO GERADOR DE SÍNCRONO DE 15,0 kVA

Parâmetros	Valores
Potência nominal	15,0 [kVa]
Tensão nominal de linha	220 [V rms]
Corrente nominal	39,36 [A rms]
Ligação	Y
Frequência	60 [Hz]
Velocidade mecânica síncrona	1800 [rpm]
Rendimento	0,85
Fator de potência nominal	0,80
Momento de inércia	0,04052 [kg.m ²]
Constante de inércia	0,048 [s]
Reatância de eixo direto, X_d	2,33 [pu]
Reatância de eixo direto, X_{ds}	1,2 [pu]
Reatância de eixo em quadratura, X_q	1,4 [pu]
Reatância transitória de eixo direto, X'_d	0,58 [pu]
Reatância subtransitória de eixo direto, X''_d	0,35 [pu]
Reatância subtransitória de eixo em quadratura, X''_q	0,38 [pu]
Constante de tempo transitória de curto-circuito de eixo direto, T'_d	1,2 [s]
Constante de tempo subtransitória de curto-circuito de eixo direto, T''_d	0,035 [s]
Constante de tempo subtransitória de curto-circuito de eixo em quadratura, T''_q	0,06 [s]
Reatância de dispersão, X_l	0,09125 [pu]
Resistência do estator, R_s	0,495 pu

Realizando a FFT nos sinais de tensão de fase ou de linha e corrente de linha nos 3 geradores, têm-se o nível de poluição harmônica de natureza espacial. Visto que uma carga linear não pode gerar harmônico, a presença de componentes harmônicas só pode ser explicada pela não linearidade dos geradores, ou seja, pela presença de harmônicos espaciais.

Gerador 1 – Gerador síncrono de 1,5 kVA

As Figs. 3 e 4 mostram a tensão de fase do gerador 1 e seu respectivo espectro harmônico.

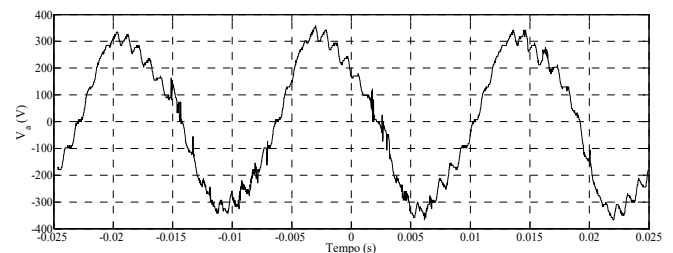


Fig. 3. Tensão de fase do gerador síncrono de polos salientes 1.

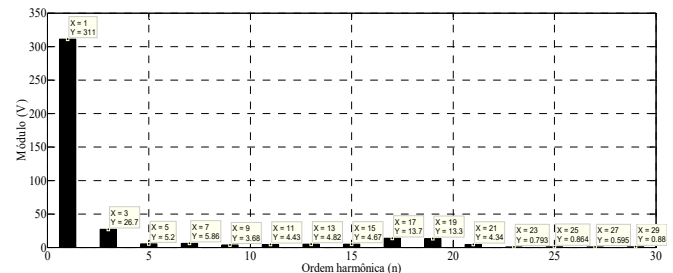


Fig. 4. Espectro harmônico da tensão de fase do gerador síncrono de polos salientes 1.

Aplicando-se (4) e (8), nos valores das componentes harmônicas presentes na Fig. 4, obtêm-se os valores da tensão eficaz, $V_{rms} = 221,3135$ [V] e da distorção harmônica total de tensão, $THD_v = 13,0263\%$.

Isso implica que o aumento da tensão em relação a fundamental foi de 1,3135 V, acréscimo provocado devido aos harmônicos espaciais. Quanto à distorção total de tensão, a maior componente é a de sequência zero, ou seja, a componente de terceiro harmônico espacial, produzido devido à característica inerente da saturação magnética e pelo aspecto construtivo do enrolamento de passo curto. Desse modo para se evitar a circulação da corrente de 3º harmônico, a chave S2, deve permanecer aberta. A leitura dos sinais de tensão e corrente de fase é realizado no ponto N da conexão estrela do gerador síncrono 1.

A corrente de linha do gerador 1 e seu respectivo espectro harmônico são mostradas pelas Figs. 5 e 6.

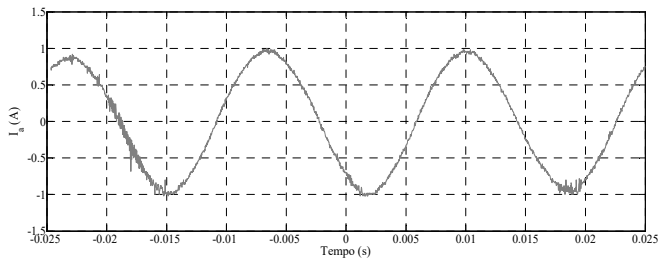


Fig. 5. Corrente de linha do gerador síncrono de polos salientes 1.

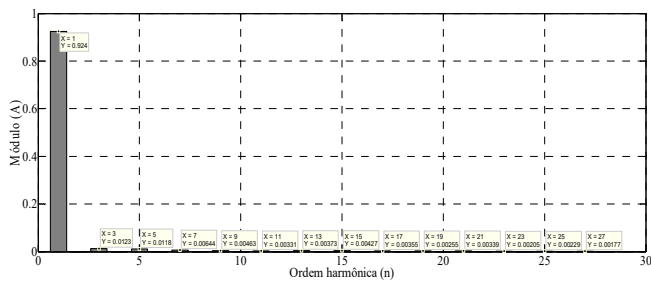


Fig. 6. Espectro harmônico da corrente de linha do gerador síncrono de polos salientes 1.

Nota-se pela Fig. 6, que com a desconexão do neutro do gerador, a componente de 3º harmônico em sua corrente linha é eliminada, desse modo evita-se perdas ôhmicas provocadas por esta componente. No entanto, as demais componentes de sequência positiva e negativa na tensão e na corrente, resulta em um torque eletromagnético oscilante de frequência 6ω natural. O mesmo vale para as componentes 11º e 13º, 17º e 19º para torque eletromagnético na frequência natural provocada por estes harmônicos espaciais de frequência 12ω e 18ω , respectivamente.

Aplicando (7), nos valores das componentes harmônicas presentes na Fig. 6, obtêm-se o valor da $THD_i = 6,2052\%$, o que implica conforme equação (21), um aumento das perdas ôhmicas no enrolamento de armadura de aproximadamente 0,39%.

A perda ôhmica nos enrolamentos do estator são obtidas a partir da resistência do estator mostrada na Tabela I, sendo abaixo convertido de [pu] para [SI]. O valor da corrente

fundamental encontra-se na Fig. 6 e com o THD_i calculado, têm-se:

$$R_{Spu} = \frac{R_s}{Z_{base}}; R_s = R_{Spu} \times \frac{V_{base}^2}{S_{base}}$$

$$R_s = R_{Spu} \times \frac{V_{base}^2}{S_{base}} = 0,107 \times \frac{380^2}{1500} = 10,3005 \text{ } [\Omega]$$

Logo,

$$P_{enr} = R_s I_1^2 + THD_i^2 \times R_s I_1^2 = R_s I_1^2 (1 + THD_i^2)$$

$$P_{enr} = 10,3005 \times \left(\frac{0,924}{\sqrt{2}} \right)^2 (1 + 0,062052^2)$$

$$P_{enr} = 4,4141 \text{ } [W]$$

O carregamento nominal é de 2,3 [A_{rms}] para o gerador 1, no ensaio realizado obtêm-se $0,924 \div \sqrt{2}$ [A_{rms}], que corresponde 28,4072% do carregamento nominal. Portanto para este carregamento, tem-se o equivalente de 4,4141 [W] de perdas ôhmicas devido aos harmônicos espaciais na resistência de cada fase do enrolamento de armadura.

Gerador 2 – Gerador síncrono de 2,0 kVA

A tensão de linha do gerador 2 e seu respectivo espectro harmônico é mostrada nas Figs. 7 e 8.

Novamente, aplicando-se (4) e (8) nos valores das componentes harmônicas presentes na Fig. 8, obtêm-se os valores $V_{rms} = 219,197$ [V] e $THD_v = 3,5662\%$.

Comparado ao gerador 1, o gerador síncrono 2 possui uma melhor distribuição do passo pleno, ou seja, sua construção é mais elaborada, o que atenua a distorção da tensão de linha gerada de componentes de alta frequência ou seja, acima de 1000 Hz. Essa diferença é notória na tensão gerada ao comparar com a Fig. 3 com a Fig. 7, e pelos respectivos espectros harmônicos da tensão gerada do gerador 1 e 2, ilustrados pelas Figs. 4 e 8.

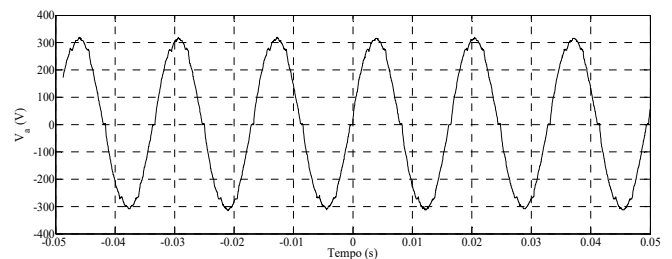


Fig. 7. Tensão de linha do gerador síncrono de polos salientes 2.

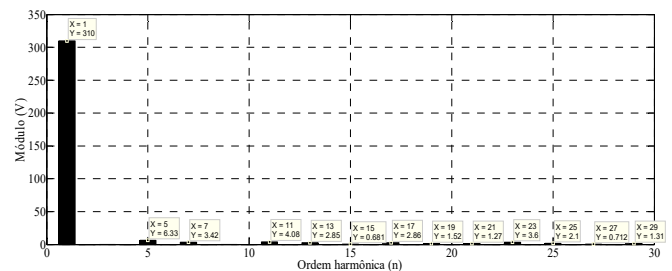


Fig. 8. Espectro harmônico da tensão de linha do gerador síncrono de polos salientes 2.

A corrente de linha do gerador 2 e seu respectivo espectro harmônico são plotados nas Figs. 9 e 10.

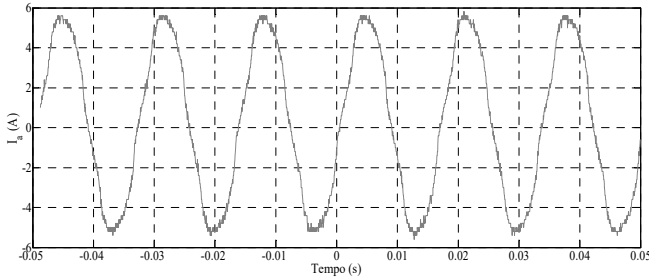


Fig. 9. Corrente de linha do gerador síncrono de polos salientes 2.

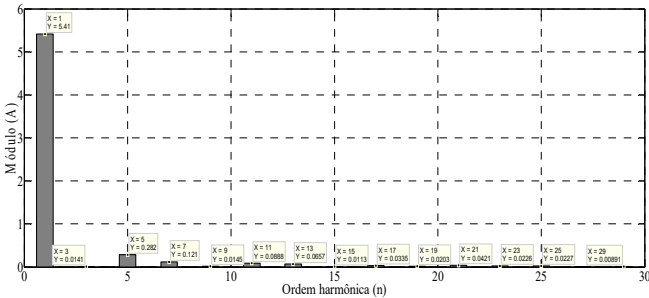


Fig. 10. Espectro harmônico da corrente de linha do gerador síncrono de polos salientes 2.

Percebe-se pelas Fig. 8 e 10, que a conexão com o neutro da carga pode ser optativa para o gerador 2, visto que a saturação não é significativa para geração de 3° harmônico e o mesmo vale para o harmônico de terceira ordem gerado pelo passo de enrolamento curto. Não obstante as demais componentes de sequência positiva e negativa (5° e 7° ordem) na tensão e na corrente são mais acentuadas do que no caso do gerador anterior, provocando um torque oscilante maior de frequência natural de 6ω devido aos harmônicos espaciais.

Aplicando-se (7) nos valores das componentes harmônicas presentes na Fig. 10, obtém-se $THD_i = 6,2277\%$, o que implica um aumento das perdas ôhmicas no enrolamento de armadura de aproximadamente 0,39%, conforme (21). Isso significa que as perdas ôhmicas irão depender sempre da poluição harmônica total, independente de qual passo será melhor elaborado no projeto construtivo do gerador síncrono de polos salientes, tal afirmação é comprovada conforme THD_i dos geradores 1 e 2, os quais apresentam características construtivas distintas (saturação, enrolamentos de passo curto e pleno) apresentando perda ôhmicas similares.

O mesmo é válido para a ondulação de torque eletromagnético provocadas pelas componentes positivas e negativas na tensão e corrente gerada. Os geradores podem apresentar diferenças nas componentes oscilantes de 6ω , 12ω e 18ω , mas a ondulação total do torque eletromagnético será próxima para os geradores 1 e 2, dadas as distorções de tensão e correntes apresentadas.

A perda ôhmica nos enrolamentos do estator são obtidas a partir da resistência do estator mostrada na Tabela II, realizando a conversão de [pu] para [SI]. O valor da corrente fundamental encontra-se na Fig. 10 e com o THD_i calculado, têm-se:

$$R_s = R_{s\ pu} \times \frac{V_{base}^2}{S_{base}} = 0,056 \times \frac{220^2}{2000} = 1,3552 [\Omega]$$

Logo,

$$P_{enr} = R_s I_1^2 + THD_i^2 \times R_s I_1^2 = R_s I_1^2 (1 + THD_i^2)$$

$$P_{enr} = 1,3552 \times \left(\frac{5,41}{\sqrt{2}} \right)^2 (1 + 0,062277^2)$$

$$P_{enr} = 19,9089 [W]$$

O carregamento nominal é de 5 [A_{rms}] para o gerador 3, no ensaio realizado obtém-se $5,41 \div \sqrt{2}$ [A_{rms}], que corresponde 76,5089% do carregamento nominal. Portanto para este carregamento, tem-se o equivalente de 19,9089 [W] de perdas ôhmicas devido aos harmônicos espaciais na resistência de cada fase do enrolamento de armadura do gerador 2.

Gerador 3 – Gerador síncrono de 15,0 kVA

As Figs. 11 e 12 mostram a tensão de fase do gerador 3 e seu respectivo espectro harmônico.

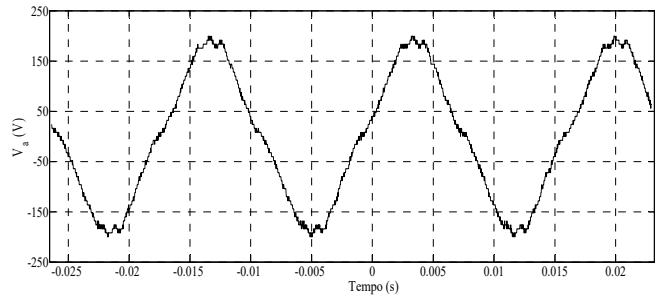


Fig. 11. Tensão de fase do gerador síncrono de polos salientes 3.

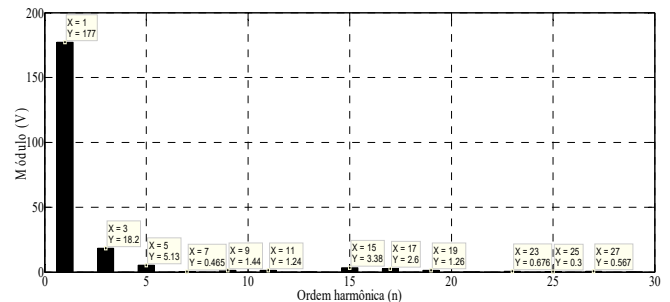


Fig. 12. Espectro harmônico da tensão de fase do gerador síncrono de polos salientes 3.

Aplicando-se (4) e (8) nos valores das componentes harmônicas presentes na Fig. 4, obtém-se os valores: $V_{rms} = 126,1159 [V]$ e $THD_v = 11,0821\%$.

O aumento da tensão em relação à fundamental foi de aproximadamente 0,96V, este acréscimo é provocado devido aos harmônicos espaciais do gerador 3, um gerador comercial. Em relação à distorção total de tensão, a maior componente é a de sequência zero.

A corrente de linha do gerador 3 e seu respectivo espectro harmônico são mostrados pelas Figs. 13 e 14.

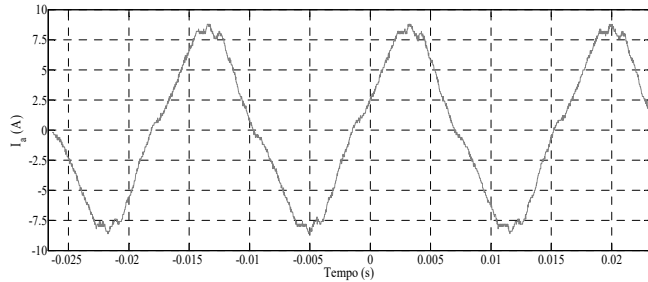


Fig. 13. Corrente de linha do gerador síncrono de polos salientes 2.

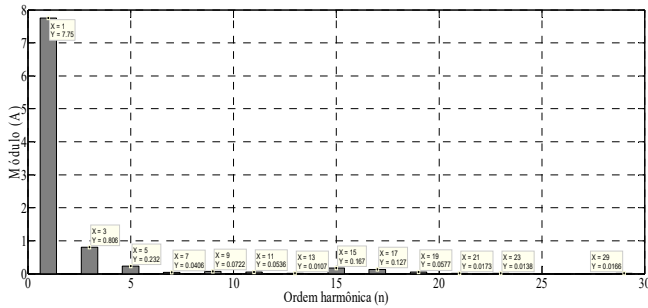


Fig. 14. Espectro harmônico da corrente de fase/linha do gerador síncrono de polos salientes 1.

Neste gerador, manteve-se a chave S2 permanece fechada para mostrar que quando o neutro é conectado, necessariamente a corrente de terceiro harmônico circula e é devido à tensão harmônica espacial gerada, conforme pode-se observar na Fig. 14.

Aplicando-se (7) nos valores das componentes harmônicas presentes na Fig. 13, obtém-se o valor da $THD_i = 11,2655\%$, o que implica um aumento das perdas ôhmicas no enrolamento de armadura de aproximadamente 1,27%, conforme (21).

A perda ôhmica nos enrolamentos do estator são obtidas a partir da resistência do estator mostrada na Tabela III, realizando a conversão de [pu] para [SI]. O valor da corrente fundamental encontra-se na Fig. 14 e com o THD_i calculado, têm-se:

$$R_s = R_{s\ pu} \times \frac{V_{base}^2}{S_{base}} = 0,495 \times \frac{220^2}{15000} = 1,5972 [\Omega]$$

Logo,

$$P_{enr} = R_s I_1^2 + THD_i^2 \times R_s I_1^2 = R_s I_1^2 (1 + THD_i^2)$$

$$P_{enr} = 1,5972 \times \left(\frac{7,75}{\sqrt{2}} \right)^2 (1 + 0,112655^2)$$

$$P_{enr} = 48,5746 [W]$$

O carregamento nominal é de 39,36 $[A_{rms}]$ para o gerador 2, no ensaio realizado obtém-se $7,75 \div \sqrt{2} [A_{rms}]$, que corresponde 13,8511% do carregamento nominal. Portanto para este carregamento, tem-se o equivalente de 48,5746 [W] de perdas ôhmicas devido aos harmônicos espaciais na resistência de cada fase do enrolamento de armadura do gerador 3.

Vale destacar que a contribuição do terceiro harmônico no THD_i é de aproximadamente 0,64%. Desta forma, se o neutro

da carga for desconectado, a parcela desta contribuição em relação as perdas ôhmicas totais diminuiriam.

Quanto a oscilação de torque eletromagnético provocadas pelas componentes positivas e negativas na tensão e corrente gerada, tem-se como a mais expressiva de sexta ordem (6ω).

VI. CONCLUSION

Com os resultados apresentados, mostra-se que geradores síncronos de polos salientes comerciais tendem a ter maiores perdas ôhmicas devido a componente de terceiro harmônico em relação à geradores síncronos de polos salientes de bancada. Isso significa que geradores de bancada são melhores elaborados em relação a saturação magnética e o passo curto, responsável pela geração do 3º harmônico espacial.

As componentes harmônicas de sequência zero, ou seja, de 3º harmônico e seus múltiplos não causam oscilação no torque eletromagnético. Quanto as componentes de sequência positiva e negativa, tem-se uma oscilação ou pulsação natural do torque eletromagnético na frequência de 6 vezes a frequência fundamental e múltiplos desta.

Portanto, devido à presença das componentes harmônicas espaciais, o torque eletromagnético desenvolvido pelo gerador síncrono de polos salientes tem natureza pulsante na predominância da frequência de 6ω , conforme mostrado pelos resultados apresentados. Esse torque pulsante de natureza dos harmônicos espaciais, resultam em ruídos audíveis de menor escala e vibrações naturais indesejadas no rotor (inerente do aspecto construtivo do gerador síncrono).

Também haverá oscilação de correntes induzidas nos enrolamentos do rotor (enrolamento de campo e amortecedores), devido aos harmônicos especiais geradores, provocando acréscimo de perdas ôhmicas no enrolamento de campo da máquina síncrona de polos salientes.

Destaca-se que os harmônicos espaciais provenientes dos aspectos construtivos do gerador síncrono de polos salientes, causam aumento das perdas elétricas, que estão relacionadas ao estresse dielétrico ocasionado pelo aumento da distorção de tensão e pelo estresse térmico devido o aumento da distorção de corrente gerada.

Além disso, os harmônicos espaciais de tensão se tornam responsáveis pela geração de harmônicos temporais não característicos. Visto que não é a natureza da carga que gera a distorção harmônica de corrente e sim o efeito dos harmônicos espaciais de tensão, ocasionados em detrimento dos aspectos construtivos e de projeto da máquina síncrona. Como apresentado no trabalho, foi utilizado uma carga linear equilibrada, e mesmo assim há presenças de harmônicos temporais de corrente, que não foram gerados pela carga, mas pela relação dos harmônicos espaciais de tensão com a impedância da carga. Sendo que estas correntes distorcidas são as responsáveis pela criação de forças magnetomotrizes, cujas interação dão origens as frequências induzidas de 6ω , 12ω , 18ω nos rotores dos geradores síncronos e a oscilação de torque eletromagnético.

Os harmônicos espaciais se expressivos contribuirão para redução da vida útil do gerador síncrono de polos salientes, desse modo, para evitar as anomalias provocadas por

harmônicos espaciais recomenda-se um projeto de construção com melhor material ferromagnético atenuando-se a contribuição do terceiro harmônico espacial. Também se recomenda a melhoria da distribuição do passo de enrolamento pleno e curto, ocasionando atenuação de oscilação total de torque eletromagnético pulsante de natureza espacial.

REFERENCES

- [1] X. Tu, L.-A. Dessaint, M. El Kahel, A. Barry. Modeling and experimental validation of internal faults in salient pole synchronous machines including space harmonics. *Mathematics and Computers in Simulation*. vol. 71(4), pp. 425-439. Jun. 2006.
- [2] M. Berto Alves, L. A. Borba and L. Martins. Modeling of synchronous machines based on the interference of harmonics on power systems feeding nonlinear loads. *IEEE Latin America Transactions*. vol. 10(2), pp. 1563-1573. March 2012.
- [3] G. Hemmatipoor, M. Monadi, A. Darabi and S. Shadmani. Modeling Small Diesel Generator Connected to Non Linear Loads Base on Space and Time Harmonics. *Future Computer Sciences and Application (ICFCSA), 2011 International Conference on, Hong Kong*. pp. 114-118. 2011.
- [4] Bonet-Madurga, J., Díez-González, A. Modelling of permanent magnet synchronous motors with spatial harmonics. *European Transactions on Electrical Power*. vol. 12(5), pp. 369-375. October 2002.
- [5] N. A. Al-Nuaim and H. Toliyat. A novel method for modeling dynamic air-gap eccentricity in synchronous machines based on modified winding function theory. *IEEE Transactions on Energy Conversion*. vol. 13(2), pp. 156-162. Jun 1998.
- [6] H. A. Toliyat and N. A. Al-Nuaim. Simulation and detection of dynamic air-gap eccentricity in salient-pole synchronous machines. *IEEE Transactions on Industry Applications*. vol. 35(1), pp. 86-93. Feb 1999.
- [7] Saeedeh Hamidifar, Narayan C. Kar. A state space synchronous machine model with multifunctional characterization of saturation using Levenberg-Marquardt optimization algorithm. *Electric Power Systems Research*. vol. 102, pp. 33-41. September 2013.
- [8] J. Matsuki, T. Okada and M. Yamanaka. Determination of saturated synchronous reactances of synchronous machines by using air-gap permeance distributions. *Advances in Power System Control, Operation and Management, 1993. APSCOM-93., 2nd International Conference*. pp.310-315. 1993.
- [9] J. C. Wang, H. D. Chiang, C. T. Huang and Y. T. Chen. Identification of synchronous generator saturation models based on on-line digital measurements. *IEEE Proceedings - Generation, Transmission and Distribution*. vol. 142(3), pp. 225-232. May 1995.
- [10] J. Matsuki, T. Okada and M. Yamanaka. Monitoring of magnetic saturation level of a synchronous generator under load. *IEEE Transactions on Energy Conversion*. vol. 10(2), pp. 225-231. Jun 1995.
- [11] H. Tsai, A. Keyhani, J. A. Demcko and D. A. Selin. Development of a neural network based saturation model for synchronous generator analysis. *IEEE Transactions on Energy Conversion*. vol. 10(4), pp. 617-624. Dec 1995.
- [12] J. R. Marti and K. W. Louie. A phase-domain synchronous generator model including saturation effects. *IEEE Transactions on Power Systems*. vol. 12(1), pp. 222-229. Feb 1997.
- [13] J. R. Marti and K. W. Louie. A phase-domain synchronous generator model including saturation effects. *IEEE Transactions on Power Systems*. vol. 12(1), pp. 222-229. Feb 1997.
- [14] Nhut-Quang Dinh and J. Arrillaga. A salient-pole generator model for harmonic analysis. *IEEE Transactions on Power Systems*. vol. 16(4), pp. 609-615. Nov 2001.
- [15] K. Shima, K. Ide, M. Takahashi and K. Oka. Steady-state magnetic circuit analysis of salient-pole synchronous machines considering cross-magnetization. *IEEE Transactions on Energy Conversion*. vol. 18(2), pp. 213-218. June 2003.
- [16] J. Cros, M. Taghizadeh, J. R. Figueroa, L. Radaorozandry and P. Viarouge. Simplified design model for fast analysis of large synchronous generators with magnetic saturation. *Electric Machines and Drives Conference, 2009. IEMDC '09. IEEE International, Miami, FL*. pp. 1515-1522. 2009.
- [17] L. A. Snider and I. R. Smith. Measurement of inductance coefficients of saturated synchronous machines. *Electrical Engineers, Proceedings of the Institution*. vol. 119(5), pp. 597-602. May 1972.
- [18] M. Stiebler and A. Campeanu. Simulation of saturated salient pole synchronous machines. *Electrical Machines (ICEM), XIX International Conference on Rome*, pp. 1-6. 2010.
- [19] M. Despalatovic, M. Jadric and B. Terzic. Modeling of Saturated Synchronous Generator Based on Steady-State Operating Data. *IEEE Transactions on Industry Applications*. vol. 48(1), pp. 62-69. Feb. 2012.
- [20] M. Despalatović, M. Jadrić and B. Terzić. Modeling of saturated synchronous generator based on steady-state operating data. *Electrical Machines (ICEM), XIX International Conference on Rome*. pp. 1-6. 2010.
- [21] M. Mirošević, Z. Maljković and M. Mišković. The effect of implementing of dynamic cross saturation on modeling of synchronous generator. *Power Engineering, Energy and Electrical Drives (POWERENG), Fourth International Conference on, Istanbul*. pp. 1477-1481. 2013.
- [22] M. Michna, F. Kutt, S. Racewicz and M. Ronkowski. Nonlinear model of synchronous generator for autonomous electrical power systems analysis. *IEEE 23rd International Symposium on Industrial Electronics (ISIE), Istanbul*. pp. 853-858. 2014.
- [23] I. R. Smith and L. A. Snider. Prediction of transient performance of isolated saturated synchronous generator. *Electrical Engineers, Proceedings of the Institution*. vol. 119(9), pp. 1309-1318. September 1972.
- [24] K. W. Louie and J. R. Marti. Saturation in synchronous generators during unbalanced faults. *Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering*. vol. 2, pp. 819-822. 2004.
- [25] K. W. Louie, "A study on magnetic saturation effects in a synchronous generator during unbalanced faults., 2004. *International Conference on Power System Technology*. vol. 2, pp. 1496-1501. 2004.
- [26] Zhou Ji et al.. Study on the operation behaviors of saturated synchronous generators considering the effect of multiple factors. *Electrical Machines and Systems, ICEMS 2001. Proceedings of the Fifth International Conference on, Shenyang*. vol. 1, pp. 156-159. 2001.
- [27] K. Shima, K. Ide and M. Takahashi. Finite-element calculation of leakage inductances of a saturated salient-pole synchronous machine with damper circuits. *IEEE Transactions on Energy Conversion*. vol. 17(4), pp. 463-470. Dec 2002.
- [28] K. Yamazaki, Kei Ando, Kazuyoshi Nishioka, K. Shima, T. Fukami and Keisuke Shira. Assist effects of additional permanent magnets in salient-pole synchronous generators. *Electrical Machines (ICEM), XIX International Conference on, Rome*. pp. 1-6. 2010.
- [29] Y. Guo, D. Wang, D. Liu, X. Wu and J. Chen. Magnetic circuit calculation of non-salient pole synchronous generator based on distributed magnetic circuit method. *Electrical Machines and Systems (ICEMS), 2011 International Conference on, Beijing*. pp. 1-6. 2011.
- [30] H. Rehaoulia, H. Henaou, G.A. Capolino. Modeling of synchronous machines with magnetic saturation, *Electric Power Systems Research*. vol. 77(6), pp. 652-659. April 2007.
- [31] N. C. Kar, T. Murata and J. Tamura. Characteristic of cylindrical-rotor synchronous generator. *IEEE Transactions on Energy Conversion*. vol. 15(3), pp. 269-276. Sep 2000.
- [32] E. Kyriakides, G. T. Heydt and V. Vittal. Online Parameter Estimation of Round Rotor Synchronous Generators Including Magnetic Saturation. *IEEE Transactions on Energy Conversion*. vol. 20(3), pp. 529-537. Sept. 2005.
- [33] J. P. Hunt. Capability Curves and Excitation Requirements of Saturated Cylindrical Rotor Synchronous Machines. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*. vol. PAS-86(7), pp. 855-859. July 1967.
- [34] C. Kingsley. Saturated synchronous reactance. *Electrical Engineering*. vol. 54(3), pp. 300-305. March 1935.
- [35] Surajit Chattopadhyay, Madhuchhanda Mitra, Samarjit Sengupta. *Electric Power Quality*. Springer Netherlands, New Delhi; 1 ed. 182 p. ISBN: 978-94-007-0635-4. 2011.
- [36] Ewald F. Fuchs and Mohammad A.S. Masoum. *Power Quality in Power Systems and Electrical Machines*. Academic Press, Burlington; 1 ed. 664 p. ISBN: 0128007826. 2008.
- [37] Stephen J. Chapman. *Fundamentos de Máquinas Eléctricas*. McGraw-Hill, bookman; 5 ed. 684 p. ISBN: 978-85-8055-206-5.
- [38] G. J. Wakileh. Harmonics in rotating machines. *Electric Power Systems Research*. vol. 66, pp. 31-37. 2003.
- [39] Wagner E. Vanço, Fernando B. Silva, José R.B.A. Monteiro, José M.M. de Oliveira, Antônio C.B. Alves, Carlos A.B. Júnior. Analysis of the

oscillations caused by harmonic pollution in isolated synchronous generators. *Electric Power Systems Research*. vol. 147, pp. 280-287. June 2017.

- [40] C. Francisco do Nascimento, A. Albano de Oliveira, A. Goedtel, I. Nunes da Silva and P. Jose Amaral Semi. Neural Network-Based Approach for Identification of the Harmonic Content of a Nonlinear Load in a Single-Phase System. *IEEE Latin America Transactions*. vol. 8(1), pp. 65-73. March 2010.



Wagner Eduardo Vanço é graduado em Engenharia Elétrica, com ênfase em Sistemas Elétricos de Potência (Engenharia de Sistema de Energia) pela Universidade Federal de Uberlândia (2014). Concluiu o Curso de Mestrado em Engenharia Elétrica (2016) pela mesma instituição, com foco em geração isolada.

Atualmente é aluno de doutorado em Engenharia Elétrica pela Universidade de São Paulo (Escola de Engenharia de São Carlos). Desenvolve modelagens específicas de máquinas elétricas, aterramentos elétricos, sistemas elétricos e dispositivos de potência. Atua principalmente com os seguintes temas: qualidade de energia gerada (harmônicos e desequilíbrio), saturação magnética, estudos de geradores síncronos de polos salientes e de geradores de indução com rotor tipo gaiola de esquilo em sistemas isolados e distribuídos.



Fernando Bento Silva Possui doutorado na área de dinâmica de sistemas elétricos (2018), mestrado na área de máquinas elétricas (2015) e graduação em engenharia elétrica na ênfase de sistemas de energia elétrica (2010), pela Universidade Federal de Uberlândia. Atualmente é professor do departamento de engenharia elétrica da Universidade

Federal de Ouro Preto, no campus João Monlevade (ICEA). Desenvolve pesquisas nas seguintes áreas: máquinas elétricas (máquinas síncronas e de indução), dinâmica de sistemas elétricos (desenvolvimento de sistemas de excitação estáticos para geradores síncronos e de indução, modelagem de filtros ativos de potência) e centrais hidrelétricas (especificação de equipamentos eletromecânicos).



José Roberto Boffino de Almeida Monteiro Possui graduação em Engenharia Elétrica pela Universidade de São Paulo (1994), mestrado em Engenharia Elétrica pela Universidade de São Paulo (1997) e doutorado em Engenharia Elétrica pela Universidade de São Paulo (2002). Atualmente é professor da Universidade de São Paulo. Tem

experiência na área de Engenharia Elétrica, com ênfase em Máquinas Elétricas e Dispositivos de Potência, atuando principalmente nos seguintes temas: acionamentos elétricos, máquinas síncronas com ímã permanente no rotor e conversores elétricos de potência.