

# Analysis of Harmonic Distortion Influence in a Distributed Synchronous Generator

Renan C. Casimiro, Vinícius A. Lacerda, Rodrigo P. Bataglioli, Denis V. Coury  
Escola de Engenharia de São Carlos

Universidade de São Paulo  
São Carlos, Brasil

Email: renan.casimiro@usp.br, vinicius.albernaz.freitas@usp.br, rodrigo.bataglioli@usp.br, coury@sc.usp.br

**Abstract**—In conventional electrical systems, the generators are located far from the load centers. However, considering the distributed generation, the impact of harmonic distortion in the generators can not be neglected. Thus, this article presents an analysis of the impact caused by harmonic currents in the voltage generated by distributed synchronous generators. Results show that, although the harmonic distortion level increases with the proximity to non-linear loads, the highest harmonic current level is not enough to affect the field current in order to result in a distortion of the electromotive force generated by the synchronous machine.

**Keywords**—Distributed generation, harmonic modeling, non-linear loads, synchronous generator.

## I. INTRODUÇÃO

O sistema elétrico é constituído basicamente por três segmentos: geração, que realiza a função de converter alguma forma de energia em energia elétrica; transmissão, que é responsável pelo transporte da energia elétrica dos centros de produção aos de consumo; e distribuição, que distribui a energia elétrica recebida do sistema de transmissão aos grandes, médios e pequenos consumidores [1].

Contudo, nas últimas décadas este padrão tem sido modificado. A principal alteração neste modelo é a inclusão e o crescimento da geração distribuída. Neste novo modelo, o agente que anteriormente era apenas consumidor, agora tem a possibilidade de gerar energia elétrica [2]. Como os sistemas tradicionais não foram projetados para lidar com situações de fluxos de energia bi-direcionais, ou seja, com energia sendo injetada tanto pela usina geradora como pelo gerador distribuído, diversos impactos ocorrem sobre a proteção e a qualidade no fornecimento da energia elétrica. [3].

Além disso, nos últimos anos tem-se aumentado significativamente a quantidade de cargas não lineares conectadas ao sistema elétrico [4]. O crescimento da utilização destas cargas no sistema elétrico é devido à expansão do uso de equipamentos eletrônicos como retificadores a diodo, a *Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor* (MOSFET), que é o tipo de transistor de efeito de campo mais utilizado [5], e o *Silicon Controlled Rectifier* (SCR) [6].

Quando as correntes provenientes deste tipo de carga circulam pelas impedâncias do sistema elétrico elas induzem tensões harmônicas, ou seja, as cargas não-lineares são geradoras de correntes e tensões harmônicas [4]. Este tipo de carga causa numerosos problemas na qualidade da energia do

sistema de distribuição. Ao injetarem componentes harmônicas elas elevam o valor eficaz da corrente do sistema, aumentando assim as perdas, reduzindo o fator de potência, aquecendo os componentes do sistema e causando distorções na forma de onda da tensão no ponto de acoplamento comum [7].

Quando estas cargas são conectadas à um sistema de distribuição que não possui um barramento de rede forte o suficiente para absorver esta corrente, ela flui por um caminho de menor impedância. Caso haja um gerador distribuído próximo ao ponto de conexão desta carga não-linear, ele pode atuar como um caminho de menor impedância para a corrente harmônica do que a subestação. Deste modo, uma parcela desta corrente harmônica irá circular pelo gerador síncrono distribuído.

Este artigo, portanto, apresenta uma análise sobre a influência que a corrente harmônica gerada pela carga não linear conectada ao sistema de distribuição provoca em um gerador síncrono distribuído. A Seção II introduz os conceitos da modelagem harmônica de um gerador síncrono. A Seção III descreve como os testes foram conduzidos e o sistema simulado. A Seção IV apresenta os resultados e discussões.

## II. MODELO HARMÔNICO DO GERADOR SÍNCRONO

O objetivo desta seção é apresentar uma modelagem harmônica do gerador síncrono, de forma que possa ser reproduzida a condição anormal de operação, considerando a variação do tempo no estator e as indutâncias mútuas entre o rotor e o estator [8]. Além disso, há também uma breve apresentação sobre o conceito de convolução, e de uma propriedade desta operação que será utilizada para o desenvolvimento dos cálculos. Estes cálculos estão relacionados ao tempo e a frequência das tensões e correntes envolvidas nas análises.

O modelo harmônico do gerador síncrono é baseado nas reatâncias de sequências positiva, negativa e zero, como pode ser observado em (1), (2) e (3):

$$X_+(h) = jhX_+ \quad (1)$$

$$X_-(h) = jhX_- \quad (2)$$

$$X_0(h) = jhX_0 \quad (3)$$

sendo que  $h$  é a ordem da componente harmônica e  $X_+$ ,  $X_-$  e  $X_0$  são as reatâncias de sequência positiva, negativa e zero, respectivamente.

Com relação as reatâncias, a de sequência positiva é idêntica a reatância síncrona, a de sequência negativa é idêntica a reatância subtransitória de eixo direto (eixo-d), e a reatância de sequência zero depende do passo do enrolamento do estator, variando de 0,1 a 0,7 da reatância subtransitória de eixo-d. Desta forma, tem-se:

$$X_+ = X_s \quad (4)$$

$$X_- = X_d'' \quad (5)$$

$$0,1X_d'' \leq X_0 \leq 0,7X_d'' \quad (6)$$

#### A. Gerador síncrono alimentado por corrente harmônica

Para o desenvolvimento deste estudo de caso será considerada a situação onde o gerador síncrono distribuído é alimentado por correntes harmônicas provenientes da carga não-linear conectada ao sistema.

As correntes harmônicas aplicadas ao estator do gerador síncrono seguem a seguinte notação exponencial:

$$i_a = i_h e^{j(h\omega t + \angle i_h)} \quad (7)$$

$$i_b = i_h e^{j(h\omega t + \angle(i_h \mp 2\pi/3))} \quad (8)$$

$$i_c = i_h e^{j(h\omega t + \angle(i_h \pm 2\pi/3))} \quad (9)$$

sendo que o símbolo  $\mp$  de (7) - (9) se refere à subtração ou soma que será realizada em dependência da sequência de fases. Caso a componente harmônica seja de sequência negativa, a operação é de soma, enquanto que caso seja de sequência positiva, a operação é de subtração. O fluxo ligado à fase  $a$  possui contribuições do campo e dos enrolamentos das fases  $b$  e  $c$ . Os fluxos referentes a cada fase são descrito por:

$$\psi_a = i_h \frac{L_d' + L_q'}{2} e^{j(h\omega t + \angle i_h)} + i_h \frac{L_d' - L_q'}{2} e^{j((h \mp 2)\omega t \mp 2\alpha + \angle i_h)} \quad (10)$$

$$\psi_b = i_h \frac{L_d' + L_q'}{2} e^{j(h\omega t \mp 2\pi/3 + \angle i_h)} + i_h \frac{L_d' - L_q'}{2} e^{j((h \mp 2)\omega t \mp 2\alpha \pm 2\pi/3 + \angle i_h)} \quad (11)$$

$$\psi_c = i_h \frac{L_d' + L_q'}{2} e^{j(h\omega t \pm 2\pi/3 + \angle i_h)} + i_h \frac{L_d' - L_q'}{2} e^{j((h \mp 2)\omega t \mp 2\alpha \mp 2\pi/3 + \angle i_h)} \quad (12)$$

sendo que  $\alpha$  é o ângulo do enrolamento de campo no instante  $t = 0$ .

Como as tensões referentes às fases  $a$ ,  $b$  e  $c$  do estator são obtidas a partir da derivada temporal de (10), (11) e (12) [9], tem-se:

$$v_a = j i_h h \omega \frac{L_d' + L_q'}{2} e^{j(h\omega t + \angle i_h)} + i_h \frac{L_d' - L_q'}{2} j(h \mp 2) \omega e^{j((h \mp 2)\omega t \mp 2\alpha + \angle i_h)} \quad (13)$$

$$v_b = j i_h h \omega \frac{L_d' + L_q'}{2} e^{j(h\omega t \mp 2\pi/3 + \angle i_h)} + i_h \frac{L_d' - L_q'}{2} j(h \mp 2) \omega e^{j((h \mp 2)\omega t \mp 2\alpha \pm 2\pi/3 + \angle i_h)} \quad (14)$$

$$v_c = j i_h h \omega \frac{L_d' + L_q'}{2} e^{j(h\omega t \pm 2\pi/3 + \angle i_h)} + i_h \frac{L_d' - L_q'}{2} j(h \mp 2) \omega e^{j((h \mp 2)\omega t \mp 2\alpha \mp 2\pi/3 + \angle i_h)} \quad (15)$$

de modo que:

$$\frac{L_d' + L_q'}{2} = L_{aa} - L_{ab} - \frac{3}{4} \frac{L_{af}^2}{L_{ff}} \quad (16)$$

$$\frac{L_d' - L_q'}{2} = -\frac{3}{4} \frac{L_{af}^2}{L_{ff}} \quad (17)$$

de forma que,  $L_{aa}$  é a indutância própria do enrolamento da fase  $a$ ,  $L_{ab}$  é a indutância mútua entre os enrolamentos das fases  $a$  e  $b$ ,  $L_{af}$  é a indutância mútua entre os enrolamentos da fase  $a$  e de campo e  $L_{ff}$  é a indutância própria do enrolamento de campo [10].

Comparando (13) e (14), percebe-se que o termo da componente harmônica da tensão adicional possui sequência de fase positiva e duas ordens harmônicas de diferença. Por exemplo, se for aplicada uma corrente de ordem  $h = 7$  com sequência positiva, tem-se que a componente harmônica de tensão adicional é de ordem 5 com sequência de fase negativa. Caso seja aplicada uma corrente de ordem 5 com sequência de fase negativa, tem-se que a tensão harmônica adicional será de ordem 7 com sequência de fase positiva. Conclui-se, portanto, que ao submeter o gerador síncrono à corrente harmônica, ele próprio produzirá tensões distorcidas descritas por (13)-(15).

A Figura 1 ilustra a teoria descrita, evidenciando a relação entre as componentes harmônicas com sequências positiva, negativa e zero para correntes e tensões.

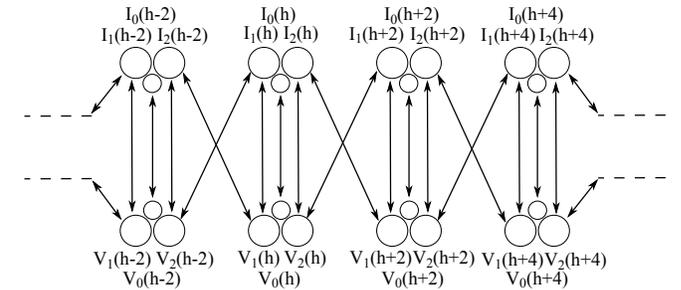


Fig. 1: Derivação das correntes e tensões harmônicas no gerador síncrono.

Este efeito ocorre pois, uma componente harmônica de sequência negativa de ordem  $h$  induz frequências de ordem  $(h+1)$  vezes a fundamental nos circuitos do rotor. Isto sucede devido ao fato de que correntes harmônicas com sequência negativa de ordem  $h$  no enrolamento do estator geram um campo magnético girante com velocidade de rotação  $h$  vezes maior do que o campo magnético síncrono e em sentido oposto ao da rotação do rotor, resultando assim um efeito líquido de campo girante igual a  $(h+1)$  vezes a velocidade síncrona. Isto irá induzir correntes harmônicas de ordem  $(h+1)$  nos circuitos do rotor.

Quando a componente harmônica que circula pelo estator é de sequência zero, tem-se que o campo girante produzido por ela é nulo. Isso ocorre pois a defasagem entre as fases  $a$ ,  $b$  e  $c$  são anuladas, não sendo capaz de produzir uma força magnetomotriz no campo da máquina, de forma a produzir um campo girante.

### B. Convolução

A convolução é uma operação matemática que a partir de duas funções gera uma terceira função que mede a soma do produto dessas funções ao longo da região subentendida pela superposição destas em função do deslocamento existente entre elas [11].

Para calcular a corrente que circula pelo enrolamento de campo do gerador quando há uma corrente harmônica no enrolamento de armadura, utiliza-se a seguinte propriedade de sinais: a convolução de sinais de tempo periódicos é transformada em multiplicação dos coeficientes de frequência, e a multiplicação de sinais de tempo periódicos também corresponde à convolução das representações de Fourier [11]. Esta relação é representada por (18) e (19).

$$X(\omega) * Y(\omega) \longleftrightarrow x(t) \cdot y(t) \quad (18)$$

$$X(\omega) \cdot Y(\omega) \longleftrightarrow x(t) * y(t) \quad (19)$$

A tensão produzida por um gerador síncrono é resultado de uma convolução entre a corrente contínua que circula pelo circuito do rotor e o enrolamento físico do circuito de armadura distribuído senoidalmente no estator da máquina. A equação (20) exemplifica esta operação.

$$A * \text{sen}(\omega_0 t) \longleftrightarrow A \cdot 2\pi\delta(\omega) \cdot j\pi[\delta(\omega + \omega_0) - \delta(\omega - \omega_0)] \implies B \cdot \text{sen}(\omega_0 t) \quad (20)$$

sendo que  $A$  representa o valor da corrente CC no rotor da máquina,  $B$  é uma constante proveniente das multiplicações e  $\omega_0$  se refere à frequência de rotação do rotor em relação ao enrolamento senoidalmente distribuído do gerador. As funções convoluídas no domínio do tempo são transformadas em multiplicações no domínio da frequência através da transformada de Fourier. Após realizar as operações no domínio da frequência, retornou-se o resultado para o domínio do tempo, de forma a auxiliar a visualização deste efeito. Quando o circuito do rotor possui, além da componente CC, uma componente harmônica, como ocorre com a presença de cargas não-lineares no sistema esta corrente resultante também convolveu com o enrolamento físico da armadura produzindo os resultados apresentados por (21).

$$\text{sen}(\omega_0 t) * \text{sen}(\omega_1 t) \longleftrightarrow j\pi[\delta(\omega + \omega_0) - \delta(\omega - \omega_0)] \cdot j\pi[\delta(\omega + \omega_1) - \delta(\omega - \omega_1)] \implies C \cdot \text{sen}(\omega_0 + \omega_1) + C \cdot \text{sen}(\omega_0 - \omega_1) \quad (21)$$

sendo que  $C$  representa uma constante e  $\omega_1$  representa a frequência da componente harmônica injetada. A Figura 2 ilustra o espectro de frequência obtido a partir da transformada

de Fourier para a convolução entre uma constante de valor unitário e um seno com frequência de 60 Hz, representando a operação ideal do gerador. A Figura 3 ilustra a soma de uma constante de valor 1,36 e um seno com frequência de 360 Hz convoluindo com um seno de 60 Hz. Vale ressaltar que a amplitude de todos os senos é unitária. As raias laterais da componente 6, harmônicas de ordem 5 (300 Hz) e 7 (420 Hz), evidenciam os efeitos apresentados em (20) e (21).

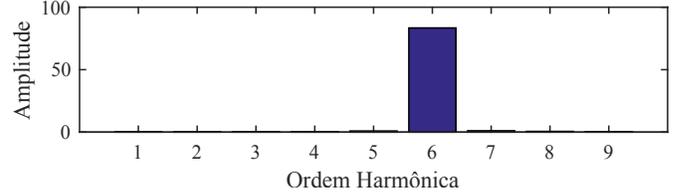


Fig. 2: Espectro de frequência resultante da convolução entre a constante 1,36 e seno de 60 Hz.

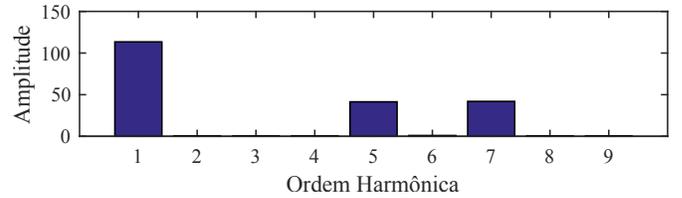


Fig. 3: Espectro de frequência resultante da convolução entre seno de 60 Hz e a contante 1,36 somada ao seno de 360 Hz.

## III. METODOLOGIA

De forma a avaliar a influência das correntes harmônicas nos geradores distribuídos com máquina síncrona, no que tange a penetração harmônica e, por consequência a tensão harmônica gerada pela máquina, nessa seção é descrita a metodologia utilizada no presente trabalho.

A análise foi realizada simulando uma carga não-linear injetando correntes trifásicas com componentes harmônicas em um sistema que possui uma rede com barra fraca, uma carga linear e um gerador síncrono distribuído. Este sistema foi implementado no simulador em tempo real denominado RTDS.

O sistema utilizado é adaptado de [12] e é apresentado na Figura 4. Os parâmetros dos componentes do sistema são apresentados na Tabela I, enquanto que os parâmetros do gerador síncrono são apresentados na Tabela II.

TABELA I: Parâmetros dos Componentes do sistema

|  |                         |
|--|-------------------------|
| Tensão da rede                               | 13,8 kV                 |
| Frequência da rede                           | 60 Hz                   |
| X/R da rede                                  | 0,6037                  |
| Impedância do equivalente de rede            | 6,348 $\Omega$          |
| Impedância da linha de distribuição por fase | 5,672 + j1,866 $\Omega$ |
| Potência da carga linear                     | 1,33 MVA                |
| FP da carga linear                           | 0,952                   |

Sendo que o *short circuit ratio* ( $SCR$ ), é definido como a razão da potência aparente de curto circuito do barramento pela potência CC do mesmo [13]. O parâmetro  $S$  é a potência

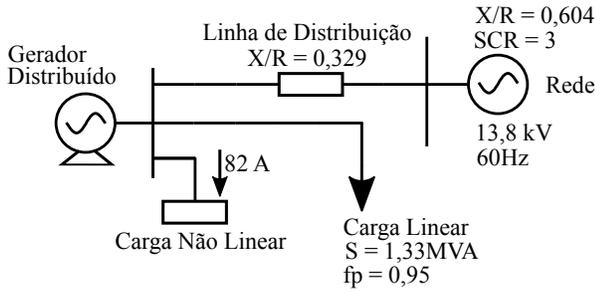


Fig. 4: Diagrama unifilar do sistema.

TABELA II: Parâmetros do Gerador Síncrono

| Parâmetro | Valor    | Parâmetro  | Valor     |
|-----------|----------|------------|-----------|
| S         | 10 MVA   | $X_d'$     | 2,5 pu    |
| V         | 13,8 kV  | $X_d''$    | 0,254 pu  |
| f         | 60 Hz    | $R_a$      | 0,0017 pu |
| $X_a$     | 0,1 pu   | $T_d'$     | 7,8 s     |
| $X_d$     | 2,06 pu  | $T_d''$    | 0,066 s   |
| $X_d'$    | 0,398 pu | $T_{q0}''$ | 0,075 s   |
| $X_d''$   | 0,254 pu |            |           |

aparente do gerador e  $V$  e  $f$  são a amplitude da tensão e a frequência gerada por ele, respectivamente. Além disso,  $R_a$  é o valor da resistência de armadura e  $X_a$  é o valor da reatância de dispersão do estator.  $T_{d0}'$  e  $T_{d0}''$  são as constantes de tempo de circuito aberto nos instantes transitório e subtransitário para o eixo-d, respectivamente. Por fim,  $T_{q0}''$  é a constante de tempo de circuito aberto subtransitário para o eixo-q.

A simulação foi iniciada com o sistema operando apenas com a carga linear conectada ao circuito. Posteriormente a carga não-linear foi inserida, passando a contribuir com a injeção de componentes harmônicas no sistema. Uma parcela desta corrente foi fornecida pelo equivalente de rede, enquanto a outra parcela foi suprida pelo gerador distribuído.

A carga não-linear foi modelada como uma fonte de corrente harmônica. O valor da magnitude da corrente harmônica que passa a circular no sistema foi ajustado de modo que a carga não-linear possuía a mesma magnitude de corrente da carga linear, resultando em uma corrente de 82A.

Na simulação foi considerada a inserção de cargas com componentes harmônicas de 5ª, 7ª e 9ª ordem separadamente, de modo a verificar a influência de componentes com seqüências negativa, positiva e zero, respectivamente.

#### IV. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Como na simulação a carga não-linear adicionada ao sistema possuía ora componente harmônica de 5ª ordem, ora de 7ª e ora de 9ª ordem, a análise acerca do comportamento das correntes elétricas no gerador síncrono também foi realizada separadamente.

##### A. Corrente harmônica de 5ª ordem

Nesta situação, a carga não linear injetava no sistema uma corrente harmônica com componente de 5ª ordem. Pelo fato de o barramento da rede não ser forte o suficiente para fornecer esta corrente, grande parte desta foi suprida pelo gerador síncrono.

Ao percorrer o gerador distribuído, esta corrente gerou distorções na forma de onda da corrente que circulava pelo campo da máquina. A corrente resultante no rotor é apresentada na Figura 5.

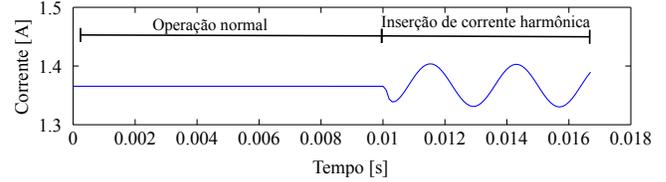


Fig. 5: Forma de onda da corrente no campo do gerador síncrono quando componente harmônica de 5ª ordem é drenada pela carga não-linear.

Ao aplicar a transformada de Fourier para analisar a corrente elétrica no campo do gerador, percebeu-se a presença de uma componente harmônica com 6ª ordem, anteriormente inexistente no sistema, conforme apresentado na Figura 6.

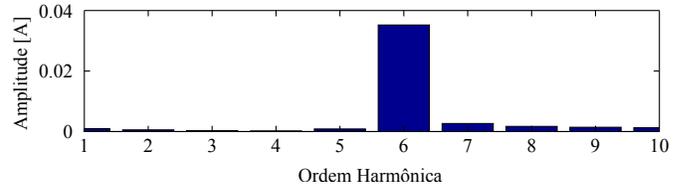


Fig. 6: Componentes harmônicas da corrente no campo do gerador síncrono quando componente harmônica de 5ª ordem é drenada pela carga não-linear.

A forte presença de uma componente harmônica de 6ª ordem no caso analisado é um fenômeno esperado. Uma componente harmônica de seqüência negativa de ordem  $h$  irá induzir frequências de  $(h + 1)$  vezes a fundamental nos circuitos do rotor. Este efeito se deve ao fato de que correntes harmônicas de seqüência negativa de ordem  $h$  no enrolamento do estator criam um campo magnético girante com velocidade de rotação  $h$  vezes maior do que o campo magnético síncrono e em sentido oposto ao da rotação do rotor, refletindo no efeito líquido de que o campo magnético cruza os circuitos do rotor com uma velocidade igual a  $(h + 1)$  vezes a velocidade síncrona. Este campo magnético resultante é responsável por induzir correntes harmônicas de ordem  $(h + 1)$  no circuito de campo.

A tensão de saída do estator apresentou a composição harmônica ilustrada pela Figura 7 para esta situação.

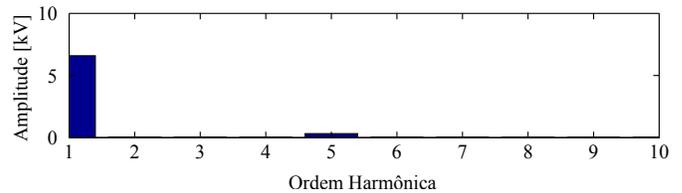


Fig. 7: Componentes harmônicas da tensão no estator do gerador síncrono quando uma componente harmônica de 5ª ordem é drenada pela carga não-linear.

Neste caso, esperava-se encontrar componentes harmônicas de 5ª e 7ª ordem na tensão do estator [8]. Contudo, ao realizar

a simulação do sistema, além da componente fundamental, apenas a harmônica da ordem drenada pela carga não-linear surgiu no sinal de tensão do estator. Isto se deve aos seguintes fatores: alta isolamento magnética entre os enrolamentos dos circuitos de armadura e campo, alta impedância dos parâmetros do gerador síncrono e principalmente ao fato de a corrente harmônica injetada não possuir magnitude grande o suficiente para causar este efeito no estator.

### B. Corrente harmônica de 7ª ordem

Neste caso, a carga não-linear consumia no sistema uma corrente com componente harmônica de 7ª ordem. Semelhantemente ao que ocorreu quando a carga havia drenado uma componente harmônica de 5ª ordem, parte desta corrente foi direcionada ao gerador síncrono distribuído.

Ao atravessar a máquina síncrona, esta corrente originou distorções na forma de onda da corrente que circulava pelo rotor. A corrente resultante no campo é ilustrada na Figura 8.

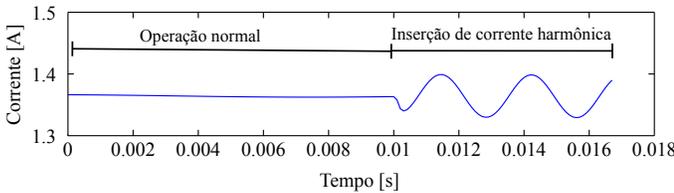


Fig. 8: Forma de onda da corrente no campo do gerador síncrono quando componente harmônica de 7ª ordem é drenada pela carga não-linear.

Ao aplicar a transformada de Fourier para analisar a corrente elétrica no campo do gerador, identificou-se a presença de uma componente harmônica de 6ª ordem, anteriormente inexistente no sistema, conforme ilustrado na Figura 9.

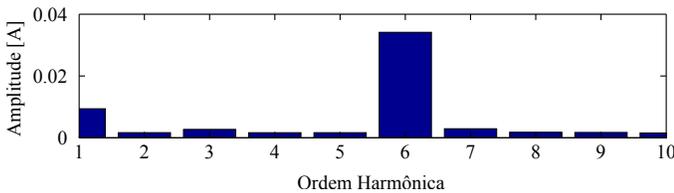


Fig. 9: Componentes harmônicas da corrente no campo do gerador síncrono quando componente harmônica de 7ª ordem é drenada pela carga não-linear.

A forte presença de um espectro harmônico de 6ª ordem apresentado pela Figura 9 é um fenômeno esperado. Uma componente harmônica de sequência positiva de ordem  $h$  irá induzir frequências de  $(h - 1)$  vezes a fundamental nos circuitos do rotor. Este efeito deve-se ao fato de que correntes harmônicas de sequência positiva de ordem  $h$  no enrolamento do estator criam um campo magnético girante com velocidade de rotação  $h$  vezes maior do que o campo magnético síncrono e no mesmo sentido da rotação do rotor, refletindo no efeito líquido de que o campo magnético cruza os circuitos do rotor com uma velocidade igual a  $(h - 1)$  vezes a velocidade síncrona. Este campo magnético resultante é responsável por induzir correntes harmônicas de ordem  $(h - 1)$  no circuito de campo.

Logo, nesta situação em questão, a corrente com componente harmônica de 7ª ordem com sequência de fase positiva drenada pela carga não-linear no sistema, deu origem a uma componente harmônica de 6ª ordem no campo do gerador. A presença das demais frequências no espectro, embora seja baixa, ocorre devido a atuação do controle do gerador, que opera com o objetivo de impedir que este perca o sincronismo.

A tensão gerada na saída do estator apresentou o espectro harmônico ilustrado na Figura 10 para esta situação.

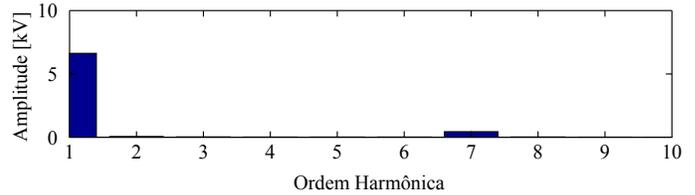


Fig. 10: Componentes harmônicas da tensão no estator do gerador síncrono quando componente harmônica de 7ª ordem é drenada pela carga não-linear.

Assim como no caso da presença da 5ª ordem harmônica, esperava-se encontrar componentes harmônicas com duas ordens abaixo da que foi inserida no sistema além da que foi injetada, ou seja, 5ª e 7ª ordem na tensão do estator [8]. Contudo, ao realizar a simulação do sistema, obteve-se além da componente fundamental, apenas a componente harmônica da ordem drenada pela carga não-linear. Isto deve-se aos mesmos fatores descritos para o caso de injeção de componente harmônica de 5ª ordem.

### C. Corrente harmônica de 9ª ordem

Neste caso, a carga não linear drenava do sistema uma corrente harmônica de 9ª ordem. Pelo mesmo fato descrito anteriormente, grande parte desta corrente era fornecida pelo gerador síncrono.

Ao percorrer o gerador distribuído, esta corrente praticamente não gerou distorções na forma de onda da corrente que circulava pelo campo da máquina. Isto ocorre devido ao fato de que uma corrente de sequência zero não produz campo magnético girante no campo da máquina. A corrente resultante no rotor é apresentada na Figura 11.

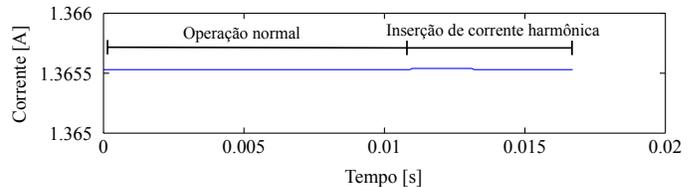


Fig. 11: Forma de onda da corrente no campo do gerador síncrono quando componente harmônica de 9ª ordem é drenada pela carga não-linear.

Pelo fato de a componente harmônica de 9ª ordem possuir sequência de fase zero, o campo girante produzido por esta componente é nulo. Deste modo, não houve distorções significativas na forma de onda da corrente que circula pelo campo, bem como é exemplificado na decomposição dos espectros harmônicos na Figura 12.

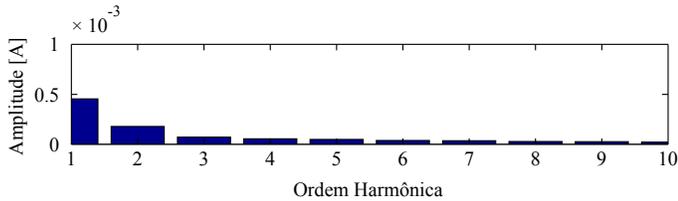


Fig. 12: Componentes harmônicas da corrente no campo do gerador síncrono quando componente harmônica de 9ª ordem é drenada pela carga não-linear.

Ao aplicar a transformada de Fourier para analisar a corrente elétrica no campo do gerador, percebeu-se uma baixa presença de componentes harmônicas, inclusive para a componente fundamental, confirmando assim, o que foi apresentado pela forma de onda, praticamente sem distorções. A Figura 12 ilustra estas componentes harmônicas.

Quanto a tensão de saída da armadura do gerador, observou-se a composição harmônica ilustrada na Figura 13 para esta situação.

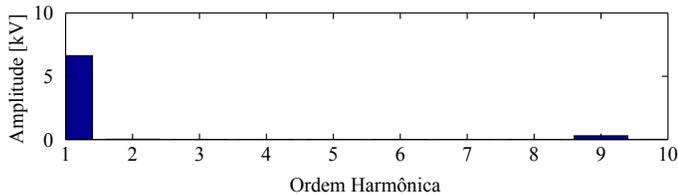


Fig. 13: Componentes harmônicas da tensão no estator do gerador síncrono quando componente harmônica de 9ª ordem é drenada pela carga não-linear.

Neste caso, pode-se verificar que uma corrente harmônica de ordem  $h$  com sequência de fase nula gera apenas uma tensão harmônica com mesma ordem, confirmando o que era esperado [8].

Portanto, é possível observar que não há impactos prejudiciais provocados pela carga não-linear no que diz respeito à tensão gerada pelo gerador síncrono. Apesar de identificar componentes harmônicas circulando pelos circuitos de campo da máquina, onde deveria circular apenas uma corrente CC, quando se analisa a tensão de saída na armadura, a única frequência com intensidade relevante é a fundamental. Isto se deve à isolamento magnética entre os enrolamentos do circuito do rotor e do estator da máquina, aos parâmetros desta e à magnitude da corrente harmônica que circula pelo enrolamento de armadura.

Para os três casos analisados a contribuição de corrente distorcida proveniente do gerador síncrono distribuído é muito menor do que a corrente da carga harmônica, não provocando assim alteração perceptível na forma de onda da corrente na rede.

## V. CONCLUSÃO

Este artigo analisou a influência que a corrente harmônica drenada por cargas não-lineares conectadas a um sistema de distribuição provoca em um gerador síncrono distribuído. Foi observado que uma corrente harmônica de ordem  $h$  injetada no sistema induz, nos circuitos do rotor do gerador, uma corrente

com ordem harmônica superior ( $h + 1$ ) ou inferior ( $h - 1$ ) dependendo da sequência de fase da corrente inserida.

Quanto a tensão de saída, gerada na armadura, não foram observados efeitos de produção de componentes harmônicas diferentes das que foram inseridas pela carga não-linear no sistema. Isto se deve ao fato da isolamento magnética dos enrolamentos dos circuitos do gerador, e à magnitude da corrente harmônica inserida. Entretanto, quando esta é extrapolada para um valor não factível é observado o efeito de produção de componentes harmônicas de ordens diferentes da que foi injetada.

Pesquisas futuras podem ser realizadas com o objetivo principal de analisar a influência dos parâmetros da máquina no nível de penetração harmônica e na amplitude da tensão harmônica gerada por esta.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Laboratório de Sistemas de Energia Elétrica (LSEE), da Escola de Engenharia de São Carlos (EESC- USP) pela infraestrutura proporcionada, assim como à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP), processos nº 2015/24028-7 e nº 2015/21167-6, pelo suporte financeiro disponibilizado para a realização desta pesquisa.

## REFERÊNCIAS

- [1] N. Kagan, C. C. B. De Oliveira, and E. J. Robba, *Introdução aos sistemas de distribuição de energia elétrica*. Edgard Blücher, 2005.
- [2] A. F. Sarabia, "Impact of distributed generation on distribution system," *Aalborg University, Denmark*, 2011.
- [3] N. Hadjsaid and J.-C. Sabonnadière, *Electrical distribution networks*. John Wiley & Sons, 2013.
- [4] C. Sankaran, *Power quality*. CRC press, 2001.
- [5] A. S. Sedra and K. C. Smith, *Microelectronic circuits*. New York: Oxford University Press, 1998, vol. 1.
- [6] D. Â. Teixeira, "Análise das distorções harmônicas: Estudo de caso de um sistema industrial," 2009.
- [7] B. Singh, A. Chandra, and K. Al-Haddad, *Power quality: problems and mitigation techniques*. John Wiley & Sons, 2014.
- [8] E. Fuchs and M. A. Masoum, *Power quality in power systems and electrical machines*. Academic press, 2011.
- [9] A. E. Fitzgerald, C. Kingsley, and A. Kusko, *Máquinas elétricas: conversão eletromecânica da energia, processos, dispositivos e sistemas*. McGraw-Hill, 1975.
- [10] P. Hart and W. Bonwick, "Harmonic modelling of synchronous machines," in *IEE Proceedings B (Electric Power Applications)*, vol. 135, no. 2. IET, 1988, pp. 52–58.
- [11] S. S. HAYKIN and B. Van Veen, *Sinais e sistemas*. Bookman, 2001.
- [12] R. P. Bataglioli, F. A. Mourinho, R. M. Monaro, and D. V. Coury, "Análise de geradores síncronos distribuídos conectados a sistemas com distorções harmônicas de sequência negativa considerando a operação ilhada intencional," in *XII Conferência Brasileira sobre Qualidade de Energia Elétrica (CBQEE)*, Curitiba, PR - Brasil, Aug. 2017.
- [13] J. Zhou and A. Gole, "Estimation of the short circuit ratio and the optimal controller gains selection of a vsc system," in *Int. Conf. on Power Systems Transients*, 2013.