

ESTUDO TEÓRICO-EXPERIMENTAL EM REGIME PERMANENTE DO GERADOR SÍNCRONO OPERANDO ISOLADAMENTE

W. E. Vanço*, F. B. Silva**, A. M. A. Barbosa*, F. A. S. Gonçalves*, C. A. Bissochi Jr.* e G. C. Guimarães**

Universidade Federal de Uberlândia, Faculdade de Engenharia Elétrica da.

*Núcleo de Máquinas Elétricas, Uberlândia – MG

**Núcleo de Dinâmica de Sistemas Elétricos, Uberlândia – MG

wagner_vanco@hotmail.com, fbentosilva@hotmail.com, alessandro.araujo@cemig.com.br, felipeadrianosg@gmail.com, bissochi.jr@gmail.com, gcaixetag@gmail.com

Resumo - Este artigo apresenta um estudo teórico-experimental do funcionamento de geradores síncronos isolados em regime permanente. Propõem-se aqui suprir cargas residenciais, comerciais e industriais por meio de geradores síncronos ilhados quando há falta de energia elétrica da concessionária local, e também para atendimento de demanda de carga em horário de ponta.

Palavras-Chave – Carga isolada, gerador isolado, gerador ilhado, gerador síncrono, regime permanente.

STUDY THEORETICAL-EXPERIMENTAL OF SYNCHRONOUS GENERATOR IN PERMANENT REGIME ISOLATED

Abstract - This paper presents a theoretical and experimental study of the operation of synchronous generators isolated in permanent regime. It is proposed here to supply residential, commercial and industrial loads through synchronous generators isolated when there is lack of electricity from the local utility, and also attend to load peak demand.

Keywords - Island generator, isolated generator, load isolated, permanent regime, synchronous generator.

I. INTRODUÇÃO

A energia elétrica consumida por estabelecimentos comerciais, indústrias, e consumidores individuais é predominantemente produzida pela geração síncrona, devido esta forma de geração ser facilmente colocada em operação paralela com um sistema elétrico de potência. Fato é que em países industrializados existem centenas de geradores síncronos conectados por linhas de transmissão, fornecendo energia elétrica para cargas espalhadas por áreas de milhares de quilômetros quadrados. Estas máquinas também podem operar isoladamente, alimentando cargas em áreas de difícil acesso onde o alto custo inviabiliza a implementação de uma linha de transmissão de energia elétrica, e também como

unidade emergencial para indústrias, hospitais, dentre outros [1].

A crise energética brasileira, que ocorreu em 2015, pode ser considerada a pior na história do país, agravada pela prolongada estiagem, atrelado aos baixos níveis dos reservatórios das usinas hidrelétricas, colocou o sistema elétrico brasileiro em estado de alerta, cujas consequências levaram próximo ao racionamento de energia e aumento na tarifa de energia [2]. A solução encontrada, a priori, em termos financeiros e técnicos, é o uso da geração síncrona acionada por um motor primário de combustão a óleo diesel, como fonte energética, onde podem ser utilizados grupos geradores a diesel em sistemas de geração emergencial e operação isolada no horário de ponta, seja na indústria e em estabelecimentos comerciais, visando aumentar a confiabilidade e o fornecimento, reduzindo também os custos do preço na fatura de energia em virtude do maior preço do kWh no horário de ponta [3,4].

Segundo os dados da Agência Nacional de Energia Elétrica (Aneel), houve uma expansão da geração síncrona isolada devido à preocupação dos usuários residenciais quanto ao cenário crítico da crise em 2015, devido possíveis riscos de apagão. Assim, os geradores de energia com funcionamento a diesel começam a ganhar cada vez mais espaço em prédios residenciais, casas e condomínios fechados, dedicados para atender toda a demanda em casos da perda do abastecimento de energia local [5].

Diante do exposto surge busca-se aqui realizar o estudo de geradores síncronos operando isoladamente.

II. MAQUINA SÍNCRONA

Uma das características importantes da máquina síncrona é que o seu fator de potência pode ser controlado pela corrente de campo. Em outras palavras, o fator de potência da corrente do estator pode ser controlada alterando o campo de excitação. No entanto, o comportamento de um gerador síncrono conectado a um barramento infinito é muito diferente de um gerador síncrono de polos salientes operando isoladamente [6].

Quando um gerador síncrono é conectado ao barramento infinito, a tensão e frequência nos terminais da armadura são valores fixos de acordo com o sistema, assim as correntes de armadura irão produzir uma componente do campo magnético de entreferro, que gira na velocidade síncrona em função da frequência do sistema [1].

$$n_s = \left(\frac{120}{p} \right) f_e \quad (1)$$



XIV CEEL - ISSN 2178-8308
03 a 07 de Outubro de 2016
Universidade Federal de Uberlândia - UFU
Uberlândia - Minas Gerais - Brasil

Onde,

n_s - Velocidade síncrona [rpm];

p - Número de polos;

f_e - Frequência do sistema [Hz].

Quando um gerador opera isoladamente, a tensão terminal deve ser regulada pela corrente de campo, por meio de um regulador de tensão, e a frequência deve ser fixada no valor da frequência do sistema (50/60 Hz) conforme variação da carga no circuito isolado.

A. Características construtivas

O gerador considerado neste estudo, será o gerador síncrono de polos salientes, o rotor desses geradores é ilustrado pela Figura 1, são feitos por chapas laminadas de material magnético, que são justapostas, formando os polos magnéticos, e um enrolamento que é excitado com corrente contínua, é essa excitação que produz campo magnético. Vale lembrar que nos rotores de polos salientes, os enrolamentos de campo são alojados nas sapatas polares, ao contrário de máquinas com polos lisos, onde o enrolamento de campo é montado nas ranhuras da própria superfície do rotor [7]. Os rotores de polos salientes são constituídos de uma certa descontinuidade no entreferro ao longa da periferia do núcleo de ferro, a existência das regiões interpolares que possuem o entreferro significativo, mostra visivelmente a saliência dos polos [8]. Os rotores das máquinas de polos salientes são fabricados de 4 polos ou mais, com maior número de polos são utilizados para operar em baixa rotação, um exemplo é em usinas hidrelétricas [1]. Cabe, portanto a nível de projeto saber qual gerador com determinado números de polos é a melhor escolha.

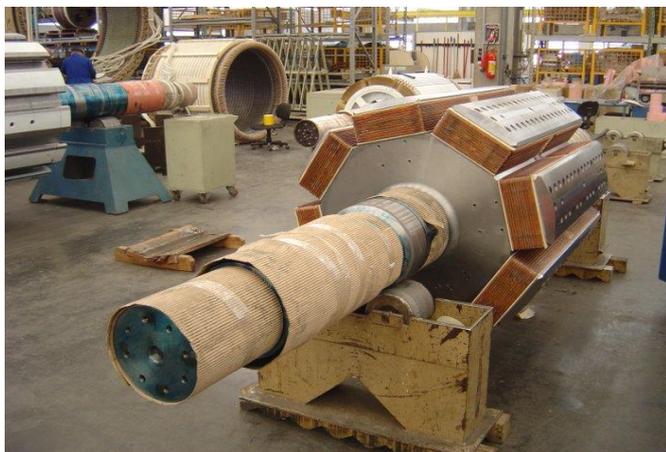


Fig. 1. Rotor de polos salientes. Fonte: WEG

O estator é composto do mesmo material do rotor, que estão arrançados para formação de ranhuras axiais, nesta forma pode-se colocar as bobinas que constituem o enrolamento estatórico [7]. É no estator que são induzidas as tensões alternadas, devido ao movimento do rotor com seu campo magnético continua [9]. As características magnéticas do estator que são de alta permeabilidade, possibilita um caminho magnético de baixa relutância para o fluxo, dessa forma reduzindo o fluxo disperso [1]. A Figura 2 mostra a construção do estator na carcaça da máquina síncrona.

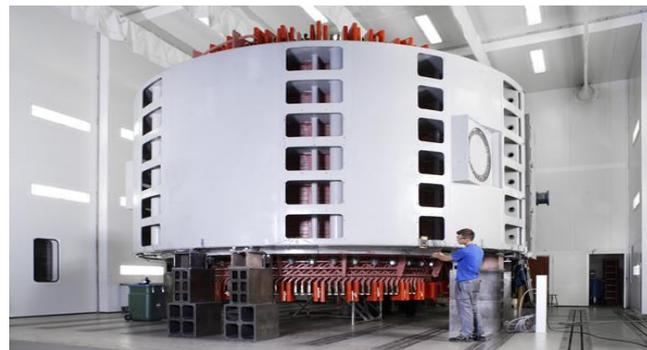


Fig. 2. Construção do estator de um gerador síncrono de médio porte. Fonte: VOITH.

A carcaça, protege e apoia a máquina, é nela que os pacotes de chapas e enrolamentos são inseridos. São construídas carcaças horizontais e verticais, e com a necessidade de proteção conforme o ambiente, composta em chapas de aço soldada, formando um cilindro rígido e robusto para a ser a base da máquina síncrona [7]. As escovas estacionárias de carvão têm por função conduzir a corrente contínua quando o enrolamento de campo é excitado, é por meio delas que ocorre o contato com os anéis coletores ou também conhecidos como anéis deslizantes girantes [1].

O enrolamento amortecedor, cuja função é amortecer as oscilações transitórias, como uma variação brusca de carga, alterações súbitas de tensão e variações de velocidade, mantendo uma estabilidade melhor na máquina, vale lembrar que apenas na ocorrência de transitórios é que surge uma tensão induzida neste enrolamento, e conseqüentemente de corrente [10]. Em motores síncronos pode desenvolver o papel como dispositivo de arranque, similar a atuação do enrolamento em gaiola de esquilo em motores de indução [7].

A característica construtiva mais importante e afins prático é possuir um enrolamento de campo único de potência menor no rotor, e o enrolamento de maior potência usualmente polifásico no estator [1].

B. Rendimento

As perdas nas máquinas síncronas ocasionam a redução do rendimento, influenciam diretamente quanto ao seu custo de funcionamento [10], o aquecimento ligado a potência de saída nominal sem danificar o isolamento da máquina, as principais perdas são mecânicas, ôhmicas, ferro e suplementares. O rendimento é alto quando a máquina opera em plena carga e menor com carregamento baixo [1]. O rendimento é dado pela equação (2).

$$\text{Rendimento} = \frac{\text{Potência de Entrada} - \text{Perdas}}{\text{Potência de Entrada}} \quad (2)$$

C. Perdas mecânicas

As perdas mecânicas são devidas ao atrito nas escovas e mancais, ventilação e na potência utilizada para refrigerar a máquina (sistema de ventilação, sendo ventiladores próprios ou externos (retirando a potência para forçar o ar para dentro da máquina por meio dos condutos externos). Perdas por atritos e ventilação são medidas pela potência de entrada

quando a máquina síncrona estiver na velocidade apropriada, sem a carga e excitação [11]. Geralmente as perdas mecânicas são calculadas com as perdas no núcleo [1].

D. Perdas ôhmicas

Perdas pelo efeito Joule ou RI^2 , relacionada as resistências dos enrolamentos e das condições de fluxo, a resistência varia de acordo com a temperatura, elevação na temperatura dos condutores implica em maior resistência e consequentemente pela relação joulica, maiores perdas [1].

E. Perdas no ferro

Segundo [1], são as perdas pelas correntes de Foucault e histerese, perdas por correntes parasitas existem devido a alteração de densidades de fluxo no ferro da armadura quando somente a excitação da máquina está sendo alimentada, essas perdas podem ser calculadas pela expressão (3).

$$P_p = K_e (B_{máx} f \delta)^2 \quad (3)$$

Onde,

K_e - Dependente das unidades usadas, do volume e resistividade do ferro;

$B_{máx}$ - Densidade de fluxo máxima;

f - Frequência;

δ - Espessura das chapas.

Quanto as perdas por histerese, é usualmente calculada pela equação (4) deduzida por procedimentos experimentais.

$$P_h = K_h (B_{máx}^n f) \quad (4)$$

Onde,

K_h - Dependente das características e volume do ferro;

n - Variação do valor entre 1,5 a 2,5.

Em (3) e (4), a frequência e densidade de fluxo podem ser trocadas pela velocidade e tensão, respectivamente. Porém feito um ajuste pelas constantes de proporcionalidade K_e e K_h .

F. Perdas suplementares

Essas perdas são determinadas por ensaios e são de difícil precisão, elas são originadas pela distribuição não uniforme de corrente no cobre e por perdas adicionais no núcleo, que é o efeito da distorção do fluxo magnético no ferro quando a máquina estiver com carga (correntes de carga) [1].

G. Vida Útil

A vida útil de um gerador síncrono está relacionado com sua ordem mecânica e térmica, quanto a primeira ordem é a velocidade máxima que o gerador pode suportar sem comprometer estruturalmente o rotor e mancais, quanto a segunda ordem, a temperatura, a corrente que nos enrolamentos não pode ultrapassar seu valor máximo projetado para que não danifique o isolamento e consequentemente a redução da vida útil, isso se deve pelo fato que a temperatura de funcionamento da máquina

síncrona estar ligada com o tempo estimado de durabilidade do equipamento. A equação (5) relacionam duas constantes A e B, T que é a temperatura, o tempo estimado de vida útil é pela taxa de deterioração do isolamento, conforme esta equação uma curva exponencial resulta no tempo de vida do gerador [1].

$$Vida\ útil = A e^{B/T} \quad (5)$$

Uma forma empírica de se avaliar a vida útil dos isoladores é pela regra dos 10°C, significa que a cada aumento da temperatura em 10°C a vida útil cai em torno de 50%.

III. MODELAGEM MATEMATICA

O equacionamento para a máquina síncrona de polos salientes é dado segundo [12] e [13].

As equações elétricas para máquina síncrona são definidas por (6)-(17).

$$v_{qs} = r_s i_{qs} + \omega_r \lambda_{ds} + \frac{d\lambda_{qs}}{dt} \quad (6)$$

$$v_{ds} = r_s i_{ds} - \omega_r \lambda_{qs} + \frac{d\lambda_{ds}}{dt} \quad (7)$$

$$v'_{q1} = r'_{q1} i'_{q1} + \frac{d\lambda'_{q1}}{dt} \quad (8)$$

$$v'_{q2} = r'_{q2} i'_{q2} + \frac{d\lambda'_{q2}}{dt} \quad (9)$$

$$v'_{fd} = r'_{fd} i'_{fd} + \frac{d\lambda'_{fd}}{dt} \quad (10)$$

$$v'_d = r'_d i'_d + \frac{d\lambda'_d}{dt} \quad (11)$$

$$\lambda_{qs} = X_{ls} i_{qs} + X_{mq} (i_{qs} + i'_{q1} + i'_{q2}) \quad (12)$$

$$\lambda_{ds} = X_{ls} i_{ds} + X_{md} (i_{ds} + i'_{fd} + i'_d) \quad (13)$$

$$\lambda'_{q1} = X_{lq1} i'_{q1} + X_{mq} (i_{qs} + i'_{q1} + i'_{q2}) \quad (14)$$

$$\lambda'_{q2} = X_{lq2} i'_{q2} + X_{mq} (i_{qs} + i'_{q1} + i'_{q2}) \quad (15)$$

$$\lambda'_{fd} = X_{lfd} i'_{fd} + X_{md} (i_{qs} + i'_{fd} + i'_d) \quad (16)$$

$$\lambda'_d = X'_{ld} i'_d + X_{md} (i_{ds} + i'_{fd} + i'_d) \quad (17)$$

Onde,

$v_{qs}, i_{qs}, \lambda_{qs}$ - Tensão, corrente e fluxo concatenado do estator de eixo em quadratura (pu).

$v_{ds}, i_{ds}, \lambda_{ds}$ - Tensão, corrente e fluxo concatenado do estator de eixo direto (pu).

$v'_{q1}, i'_{q1}, \lambda'_{q1}$ - Tensão, corrente e fluxo concatenado do enrolamento amortecedor 1 (pu).

$v'_{q2}, i'_{q2}, \lambda'_{q2}$ - Tensão, corrente e fluxo concatenado do enrolamento amortecedor 2 (pu).

$v'_{fd}, i'_{fd}, \lambda'_{fd}$ - Tensão, corrente e fluxo concatenado do enrolamento de campo (pu).

v'_d, i'_d, λ'_d - Tensão, corrente e fluxo concatenado do enrolamento amortecedor de eixo direto (pu).

r_s, X_{ls} - Resistência e reatância de dispersão do enrolamento de armadura (pu).

r'_{q1}, X'_{lq1} - Resistência e reatância de dispersão do enrolamento amortecedor 1 (pu).

r'_{q2}, X'_{lq2} - Resistência e reatância de dispersão do enrolamento amortecedor 2 (pu).

r'_{fd}, X'_{lfd} - Resistência e reatância de dispersão do enrolamento de campo (pu).

r'_d, X'_d - Resistência e reatância de dispersão do enrolamento amortecedor de eixo direto (pu).

X_{mq}, X_{md} - Reatância de magnetização de eixo em quadratura e direto.

As equações mecânicas são descritas por (18)-(21).

$$T_e = \lambda_{ds} i_{qs} - \lambda_{qs} i_{ds} \quad (18)$$

$$\omega_m = \left(\frac{2}{p} \right) \omega_r \quad (19)$$

$$\frac{d}{dt} \omega_m = \frac{1}{2H} (T_e - T_L) \quad (20)$$

$$\frac{d}{dt} \theta_m = \omega_m \quad (21)$$

Onde,

T_e, T_L - Torque elétrico e mecânico (pu).

ω_r, ω_m - Velocidade angular elétrica e mecânica do rotor (pu).

H - Constante de inércia (segundo).

θ_m - Posição mecânica angular (radianos).

p - Número de polos.

IV. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

As Figuras 3, 4 e a Tabela I, mostram o gerador utilizado no procedimento experimental, a composição da carga indutiva, e os parâmetros do gerador síncrono, respectivamente.



Fig. 3. Gerador síncrono de polos salientes acionado por um motor de corrente contínua.

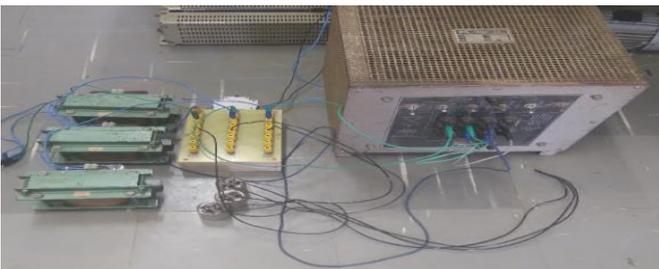


Fig. 4. Carga RLC, de predominância indutiva.

TABELA I – PARÂMETROS DO GERADOR SÍNCRONO

PARÂMETROS	VALORES
Potência nominal	2 [kVA]
Tensão nominal	380 [V rms]
Corrente nominal	3,0 [A rms]
Frequência	60 [Hz]
Rotação	1800 [rpm]
Fator de potência nominal	0,80
Rendimento	0,85
Momento de inércia	0,0494 [kg.m ²]
Constante de inércia	0,438 [s]
Reatância de eixo direto, Xd	1,850 pu
Reatância de eixo direto saturada, Xds	0,945 pu
Reatância de eixo em quadratura, Xq	1,436 pu
Reatância transitória de eixo direto, X'd	0,370 pu
Reatância subtransitória de eixo direto, X''d	0,220 pu
Reatância subtransitória de eixo em quadratura, X''q	0,200 pu
Constante de tempo transitória de curto circuito de eixo direto, T'd	2,40 [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, Xl	0,077 pu
Reatância de Potier, XP	0,262 pu
Resistência dc do estator, Rsd	0,056 pu
Resistência ac do estator, Rsac	0,068 pu

A tensão e corrente de fase do gerador síncrono, é mostrada pela Figura 5. Como pode ser visto, o valor da tensão é de 311 V (pico), atendendo com valor nominal a carga isolada.

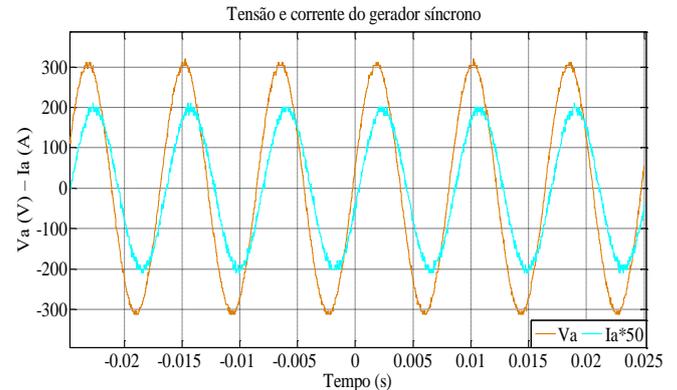


Fig. 5. Tensão e corrente de fase gerada.

A Figura 6, mostra as potências ativa e reativa de fase gerada pelo gerador síncrono isolado, indicando potências geradas muito próximo de 60 Hz.

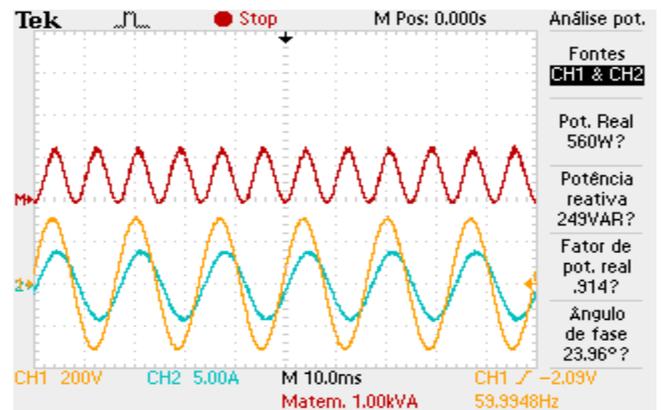


Fig. 6. Potência ativa, reativa e fator de potência da carga.

V. SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL

A simulação computacional foi desenvolvida na arquitetura do Simulink, da plataforma de software para modelagem do Matlab® e os parâmetros de entrada do gerador síncrono para a simulação foram levantados a partir de ensaios em laboratório.

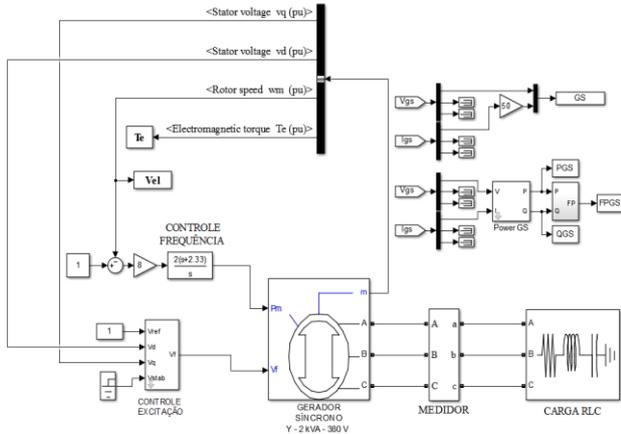


Fig. 7. Modelagem computacional de um gerador síncrono alimentado uma carga indutiva.

A tensão e corrente de fase simulada do gerador síncrono, é mostrada pela Figura 8. Os valores de tensão e corrente, são conforme valor de carga do ensaio experimental.

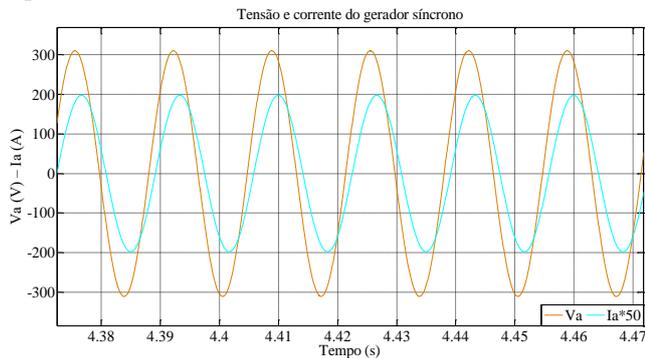


Fig. 8. Tensão e corrente de fase gerada simulada.

As potências ativa e reativa batem com os valores experimentais, conforme esperado, uma vez que a carga experimental é parâmetro de entrada para a carga na modelagem computacional. Os valores da potência ativa e reativa, são dados pelas Figuras 9 e 10, respectivamente.

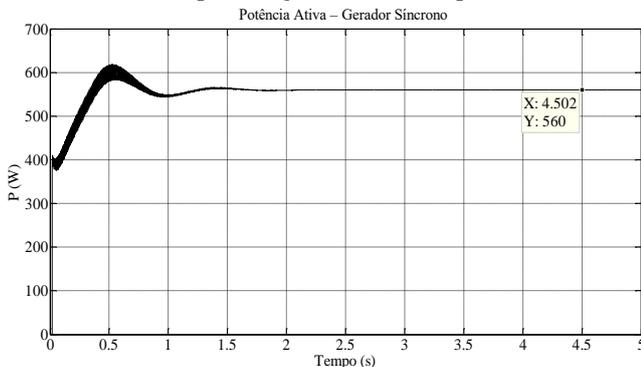


Fig. 9. Potência ativa de fase gerada.

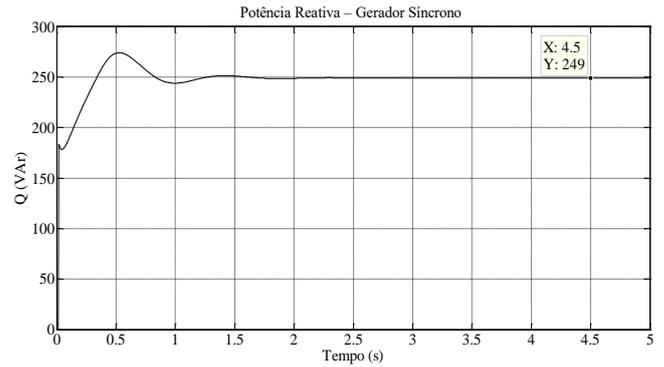


Fig. 10. Potência reativa de fase gerada

O fator de potência, a velocidade do rotor e o torque eletromagnético são ilustrados pelas Figuras 11, 12 e 13, respectivamente. Note que a velocidade se encontra em 1 pu, indicando que o gerador está operando isoladamente em 60 Hz.

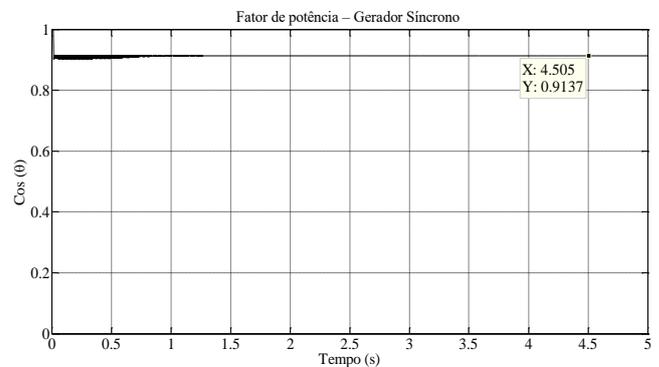


Fig. 11. Fator de potência do circuito isolado.

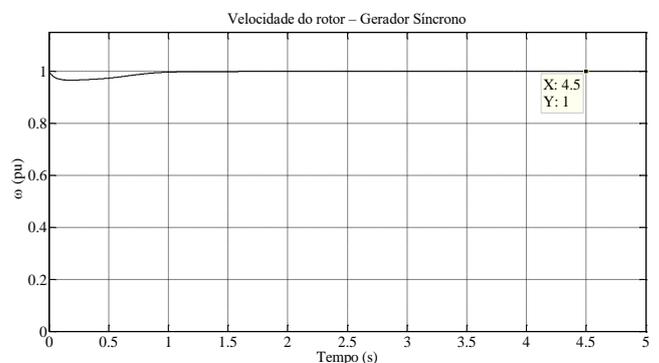


Fig. 12. Velocidade do rotor, indicando geração de eletricidade em 60 Hz.

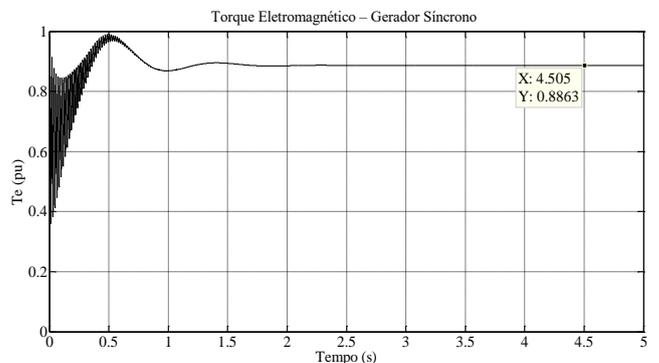


Fig. 13. Torque eletromagnético desenvolvido pelo gerador síncrono isolado.

VI. CONCLUSÕES

Geradores síncronos podem ser utilizados isoladamente como unidades emergenciais em caso de falta de energia da concessionária local, ou usados para reduzir custo na conta de energia em horário de ponta. A vantagem de se utilizar geradores síncronos em grupos diesel, é que possuem fácil regulação de tensão por meio do controlador de corrente de campo, e frequência com a atuação do regulador de velocidade. O estudo teórico-experimental mostra que um gerador síncrono ilhado, atende em condições satisfatórias em valores nominais a tensão e frequência gerada.

REFERÊNCIAS

- [1] E. FITZGERALD, C. KINGSLEY JR, S. D. UMANS. Máquinas Elétricas – Com introdução à eletrônica de potência. Tradução Anatólio Laschuk – 6.ed.- Porto Alegre: Bookman, 2006. 648 p.
- [2] <http://noblat.oglobo.globo.com/geral/noticia/2015/01/brasil-enfrenta-pior-crise-energetica-da-historia.html>
- [3] http://www.bbc.co.uk/portuguese/noticias/2014/03/140325_energia_rebaixamento_br_pai_ac
- [4] <https://www.ambienteenergia.com.br/index.php/2015/02/shoppings-como-fonte-emergencial-para-geracao-de-energia-eletrica/25491>
- [5] <http://www.portalpch.com.br/noticias-e-opnio/noticias-gerais-do-segmento/4718-29-01-2015-geradores-voltam-com-tudo-apos-crise-energetica.html>
- [6] Turan Gonen. Electrical Machines with MATLAB®. Boca Raton, Flórida, EUA: CRC Press, Taylor & Francis Group, 2012. 654 p.
- [7] Lucio Aparecido Borda. Estudo dos harmônicos entre diferentes sistemas de excitação de máquinas síncronas. 2011. 104 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica), Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.
- [8] Características e Especificações de geradores. 2012. 66 p. Curso DT- 5.
- [9] Irving L. Kosow. Máquinas Elétricas e Transformadores (15 ed.). Porto Alegre, RS: Globo Livros, 1996. 668 p.
- [10] Rubens Guedes Jordão. Máquinas Síncronas (2º ed.). São Paulo/Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., 2013. 229 p.
- [11] Manoel Berto. Análise teórica e experimental do comportamento do gerador síncrono de polos salientes em regime permanente não senoidal. 2011. 180 f. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica), Uberlândia.
- [12] Paul Krause, Oleg Wasynczuk, Scott Sudhoff, Steven Pekarek. Analysis of electric machinery and drive systems (3rd ed.). Hoboken, New Jersey, EUA: Institute of Electrical and Electronics Engineers, IEEE Press, 2013. 632 p.
- [13] Prabha Kundur. Power System Stability and Control (1nd ed.). Toronto, Ontario, Canadá: McGraw-Hill Education, 1993. 1200 p.