

Teste experimental da operação isolada e em paralelo com a rede do gerador de indução trifásico operando de forma bifásica

Experimental test of isolated and parallel operation with the three-phase induction generator operating in two-phase mode

¹ Lucas Miguel F. da Silva, ² Marcellus M. B. da Silva, ³ José Mendes de Sousa, ⁴ Arthur Martins Ribeiro, ⁵ Daniela R. de Oliveira, ⁶ Fernando Bento Silva

¹ Lucas Miguel F. da Silva – Universidade Federal de Uberlândia (lucasmiguelsilva@ufu.br)

² Marcellus M. B. da Silva – Universidade Federal de Uberlândia (marcellusmbarbosa@ufu.br)

³ José Mendes de Sousa – Universidade Federal de Uberlândia (jose-msousa@ufu.br)

⁴ Arthur Martins Ribeiro – Universidade Federal de Uberlândia (arthur.ribeiro23@ufu.br)

⁵ Daniela R. de Oliveira – Universidade Federal de Uberlândia (daniela_oliveira@ufu.br)

⁶ Fernando Bento Silva – Docente Universidade Federal de Uberlândia (fbentosilvaeel@ufu.br)

RESUMO: Este trabalho tem como objetivo analisar a operação isolada e em paralelo com a rede elétrica de um gerador de indução na conexão Fukami. Nesse sentido, o estudo apresenta o esquema de conexão, modelo matemático, os perfis de regulação de tensão, o sincronismo e a injeção de potência na rede.

Palavras-Chave: Auto Excitação. Conexão Fukami. Gerador de Indução. Regulação de Tensão. Sincronismo.

ABSTRACT: This work aims to analyze the isolated and parallel operation with the grid of the induction generator using the Fukami connection. From this perspective, the work presents the connection scheme, mathematical model, voltage regulation profiles, synchronization, and power injection into the electrical grid.

Keywords: Fukami Connection, Induction Generator. Self-Excitation. Synchronization. Voltage Regulation.

Recebido em:
01/06/2026
Publicado em:
14/07/2026

1. INTRODUÇÃO

A máquina de indução trifásica com rotor em gaiola de esquilo há muito tempo desperta o interesse da comunidade científica e da indústria para aplicações em acionamentos ou em sistemas de geração. Por ser uma máquina robusta, construtivamente simples, apresentar baixo índice de manutenção, possuir grande densidade de potência e custo reduzido, seu uso é difundido em inúmeras aplicações industriais (Silva et al., 2016; Silva et al., 2018; Vanço et al., 2016; Vanço et al., 2018a; Vanço et al., 2018b; Vanço et al., 2020; Vanço et al., 2021). Além disso, ela é facilmente substituível por apresentar ampla disponibilidade comercial. Dadas essas características, o uso da máquina de indução como gerador tornou-se uma alternativa viável para a redução de custos em sistemas não convencionais de geração de energia elétrica (Silva et al., 2016; Silva et al., 2018; Vanço et al., 2016; Vanço et al., 2018a; Vanço et al., 2018b; Vanço et al., 2020; Vanço et al., 2021).

No contexto de aplicação de geradores portáteis monofásicos com potência de alguns quilowatts, Fukami et al. (1999) propuseram um novo gerador de indução monofásico autoexcitado com boas características de regulação de tensão. Esse gerador consiste em uma máquina de indução trifásica com rotor em gaiola de esquilo e três capacitores conectados em série e paralelo para o atendimento de carga monofásica. Dadas essas características, o gerador

apresenta uma estrutura significativamente mais simples, além de alta confiabilidade e durabilidade. A configuração assim obtida é denominada de conexão Fukami.

Metello et al. (2024) propuseram a utilização do gerador de indução na conexão Fukami como excitatriz rotativa de um gerador síncrono. Essa proposta visa apresentar uma alternativa para substituir os geradores de ímã permanente utilizados nas excitatrizes rotativas de geradores síncronos. O artigo valida a proposição comparando os resultados obtidos por meio de simulação computacional e de testes experimentais da forma de onda da tensão terminal do gerador síncrono (GS) diante de uma variação de carga dinâmica, conforme estabelecido pela norma NEMA MG-1.

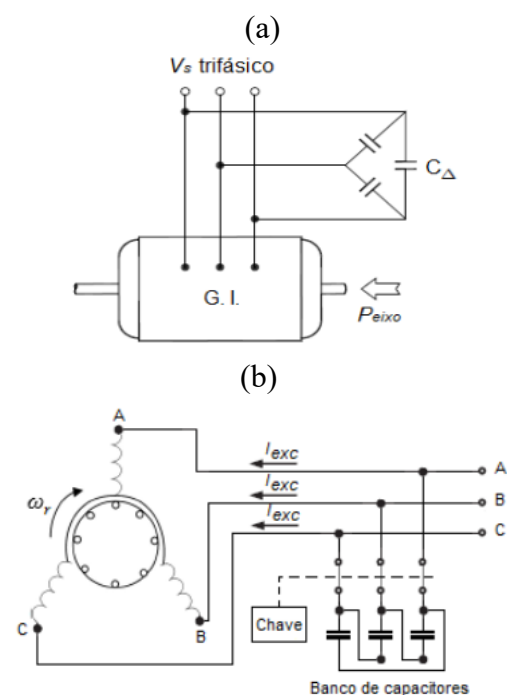
Dentre os artigos encontrados na literatura, nenhum abordou a operação do gerador de indução na conexão Fukami conectado à rede elétrica, restringindo-se apenas a operações isoladas (Fukami et al., 1999; Metello et al., 2024). Diante disso, este trabalho visa apresentar o esquema de conexão, o modelo matemático, o perfil de regulação de tensão, o sincronismo e a injeção de potência ativa na rede.

2. PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO E MODELAGEM MATEMÁTICA DO GERADOR DE INDUÇÃO NA CONEXÃO FUKAMI

A. Gerador de indução gaiola de esquilo autoexcitado na conexão tradicional

O gerador de indução trifásico pode ser conectado à rede elétrica ou operar de forma isolada. Quando conectado à rede, é capaz de gerar tensões trifásicas com frequência constante. Além disso, possui naturalmente a capacidade de autoproteção e um bom desempenho dinâmico, se comparado a outros tipos de geradores. Em operação isolada, o gerador de indução necessita que um banco de capacitores seja conectado aos seus terminais, a fim de fornecer toda energia reativa necessária para sua autoexcitação. A Figura 1 apresenta uma forma de conexão do banco de capacitores aos terminais do gerador de indução na sua conexão tradicional em delta.

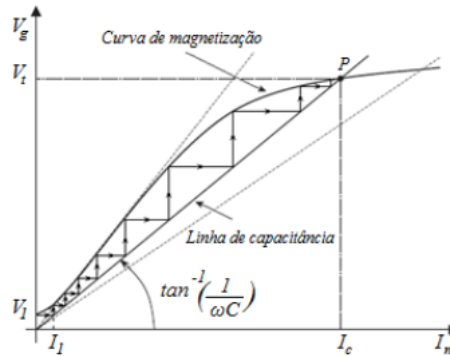
Figura 1 – Conexão do banco de capacitores. (a) Ilustração da conexão do banco de capacitores. (b) Diagrama elétrico da conexão do gerador de indução ligado em Y, juntamente com o banco de capacitores ligado em Δ .



Fonte: adaptado de Boldea (2005).

Quando a máquina de indução é acionada por uma máquina primária, ela apresenta uma tensão muito pequena em seu estator, induzida por seu magnetismo residual. Essa tensão é chamada de tensão remanescente, representada na Figura 2 por V_1 (Simões e Farret, 2015). A tensão remanescente possui frequência proporcional à velocidade de acionamento do rotor, e sua amplitude depende do nível de magnetização do núcleo do gerador. Ela é a responsável pelo processo de autoexcitação do gerador de indução, conforme é ilustrado na Figura 2.

Figura 2 – Processo de Autoexcitação do gerador de indução.

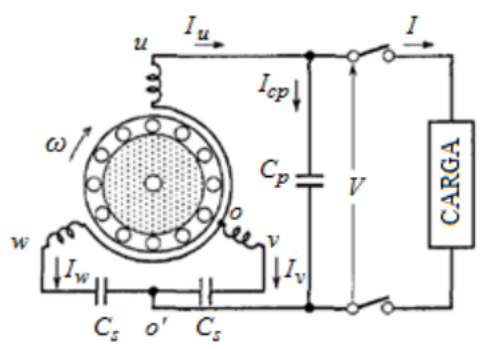


Fonte: Adaptado de Simões e Farret (2015).

B. Gerador de indução gaiola de esquilo auto excitado na conexão Fukami

Nessa conexão o gerador é constituído por uma máquina de indução trifásica com rotor em gaiola, conectada na ligação estrela (Y), com três capacitores: C_p e dois C_s , sendo que o capacitor C_p é ligado em paralelo com a carga monofásica. Com a introdução desta máquina trifásica, além de uma regulação de tensão aprimorada, é também obtida uma vantagem adicional, a peculiaridade de pulsação de potência comum aos geradores de indução monofásicos a vazio não ocorre, porque a potência de excitação nesse gerador é trifásica (Fukami et al., 1999). A Figura 3 apresenta o diagrama de conexão deste gerador.

Figura 3 – Diagrama elétrico do gerador de indução na conexão Fukami.



Fonte: Adaptado de Fukami et al. (1999).

Quando o rotor do gerador é acionado por uma máquina primária, a tensão de saída V será acumulada através dos terminais de alimentação da carga, pelo fenômeno de autoexcitação, devido ao magnetismo residual do rotor e às correntes principais que fluem nos três capacitores C_s e C_p . Em seguida, a tensão de saída V é expressa por uma soma da tensão de fase V_{uo} e da tensão através dos terminais $V_{o'o}$, que atua de modo a aumentar a tensão de saída V devido ao efeito dos dois capacitores em série C_s . Portanto, se os valores dos três capacitores C_s , C_p , forem adequadamente dimensionados, a tensão de saída V terá uma pequena queda de tensão (Fukami et al., 1999).

Analisando o diagrama elétrico apresentado na Figura 3, as tensões terminais para os enrolamentos do estator podem ser dadas pela Equação (1). Uma vez que o enrolamento do estator do gerador está ligado em estrela, os componentes de sequência zero das correntes de fase do estator não fluem nela. Portanto, a Equação (2) expressa as correntes de fase do estator, I_u , I_v e I_w por componentes simétricas.

$$\begin{aligned} V_{uv} &= Z_e I_u - (-jx_{cs}) I_v \\ V_{vw} &= -jx_{cs} I_v - (-jx_{cs}) I_w \\ V_{wu} &= -jx_{cs} I_w - Z_e I_u \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} I_u &= I_+ + I_- \\ I_v &= a^2 I_+ + a I_- \\ I_w &= a I_+ + a^2 I_- \end{aligned} \quad (2)$$

Onde:

V_{uv}, V_{vw}, V_{wu} - Tensões terminais do estator.

I_0 - Correntes do estator.

Z_e - Impedância equivalente da combinação da impedância da carga em paralelo com a reatância do capacitor C_p .

x_{cs} - Reatância capacitiva do capacitor C_s .

I_+ - componentes de sequência positiva das correntes do estator.

I_- - componentes de sequência negativa das correntes do estator.

As componentes simétricas de sequência positiva e negativa das tensões podem ser dadas por:

$$V_+ = \frac{1}{3} (V_{uv} + aV_{vw} + a^2V_{wu}) \quad (3)$$

$$V_+ = \frac{1}{3} \{ (Z_e - j2x_{cs})(1 - a^2)I_+ + (Z_e + jx_{cs})(1 - a^2)I_- \}$$

$$V_- = \frac{1}{3} (V_{uv} + a^2V_{vw} + aV_{wu}) \quad (4)$$

$$V_- = \frac{1}{3} \{ (Z_e + jx_{cs})(1 - a)I_+ + (Z_e - j2x_{cs})(1 - a)I_- \}$$

Onde:

$$a = e^{j\frac{2\pi}{3}} \quad \text{Fasor na forma de Euler.}$$

$$a^2 = e^{-j\frac{2\pi}{3}} \quad \text{Fasor na forma de Euler.}$$

Expressando V_+ e V_- em função das impedâncias de sequência positiva e negativa do gerador Z_+ e Z_- , obtém-se:

$$V_+ = -(1 - a^2)Z_+I_+ \quad (5)$$

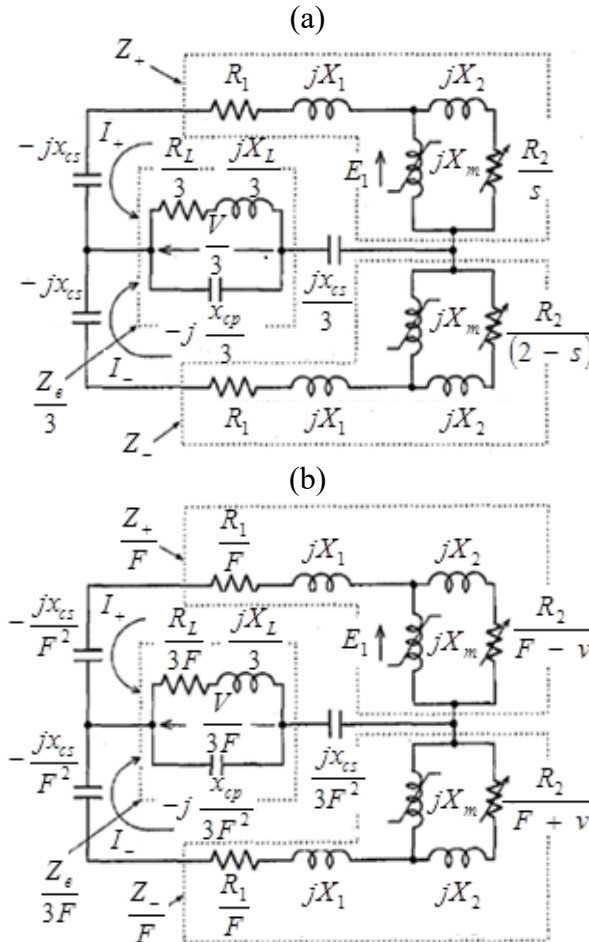
$$V_- = -(1 - a)Z_-I_- \quad (6)$$

Consequentemente, a partir da Equações (3-6), pode-se obter a seguinte matriz de impedâncias relacionadas às componentes de sequência positiva e negativa das correntes do estator:

$$\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{3}Z_e - j\frac{2}{3}x_{cs} + Z_+ & \frac{1}{3}(Z_e + jx_{cs}) \\ \frac{1}{3}(Z_e + jx_{cs}) & \frac{1}{3}Z_e - j\frac{2}{3}x_{cs} + Z_- \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_+ \\ I_- \end{bmatrix} \quad (7)$$

A partir da Equação (7), pode-se obter um circuito equivalente do gerador na frequência nominal f_b , como apresentado na Figura 4 (a), empregando uma relação entre uma matriz de impedância e o circuito elétrico. Além disso, para incluir o efeito da variação de frequência acompanhada de mudança de carga, por unidade de frequência F e velocidade do rotor v devem ser incluídos na Figura 4 (a). Assim, um circuito equivalente final do gerador é obtido como mostrado na Figura 4 (b). Com base neste circuito equivalente, é possível calcular as características de regime permanente do gerador.

Figura 4 – (a) Circuito equivalente do gerador na frequência nominal ($\omega > \omega_b$); (b) Circuito equivalente do gerador, modificado para incluir o efeito da variação de frequência.



Fonte: Adaptado de Fukami et al. (1999).

Sendo na Figura (4) R_1, R_2 as resistências do estator e do rotor (referido ao estator) por fase; X_1, X_2 são as reatâncias do estator e do rotor (referido ao estator) por fase; X_m reatância de magnetização por fase; E_1 é a força contra eletromotriz no estator; x_{cs}, x_{cp} são as reatância capacitivas dos capacitor C_s e C_p ; ω é a velocidade angular do rotor; f_b, ω_b são a frequência nominal e velocidade angular, sendo $\omega_b = 2\pi f_b$; f_{exc}, F são as frequência da tensão gerada e frequência em pu, sendo $F = f_{exc}/f_b$; v velocidade do rotor em pu, sendo $v = \omega/\omega_b$; ω_s velocidade angular síncrona, sendo $\omega_s = 2\pi f$; s escorregamento, sendo $s = (\omega_s - \omega)/\omega_s = (F - v)/F$.

3. RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Foi realizado um conjunto de testes experimentais com o gerador de indução na conexão Fukami, com intuito de levantar a regulação de tensão e o sincronismo do gerador com a rede elétrica na tensão de 220 [V]. Utilizou-se um osciloscópio digital TPS2024B da Tektronix para aquisição dos sinais de tensão, corrente e potências ativas e reativas.

A Tabela 1 apresenta os dados eletromecânicos do gerador de indução utilizado, enquanto a Tabela 2 apresenta os dados dos capacitores utilizados para autoexcitar o gerador. Para o levantamento da regulação de tensão utilizaram-se dois reostatos como carga resistiva, o primeiro com potência de 1200 [W] e resistência de 200 [Ω] e o segundo com potência 1000 [W] e resistência de 500 [Ω]. Os resistores foram conectados na ligação paralela, ambos com tensão nominal de 220 [V]. Como máquina primária foi utilizado um motor de indução de 3 [cv] acionado por inversor de frequência. As bancadas onde foram realizados os testes experimentais são apresentadas na Figura 5.

Tabela 1: Dados eletromecânicos do gerador de indução.

Parâmetros	Valores
Potência	3cv
Tensões de ligação	380/220V
Corrente nominal	4,95/8,57A
I_p/I_n	6,8
Polos/Rotação	4/1710rpm
Fator de potência	0,85
Frequência	60Hz
Rendimento	79,3%
Categoria	N

Tabela 2: Dados dos capacitores utilizados.

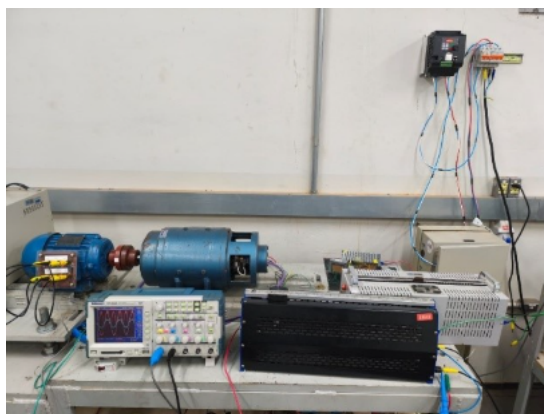
Parâmetros	Valores	
	Capacitor C_s	Capacitor C_p
Tensão nominal	380V	380V
Frequência	60Hz	60Hz
Capacitância	35 μ F	30 μ F

Figura 5 – Bancada utilizada nos testes experimentais.

(a) Conjunto gerador de indução, máquina primária e capacitores. (b) Conjunto carga resistiva, osciloscópio e inversor de frequência ao fundo.



(a)



(b)

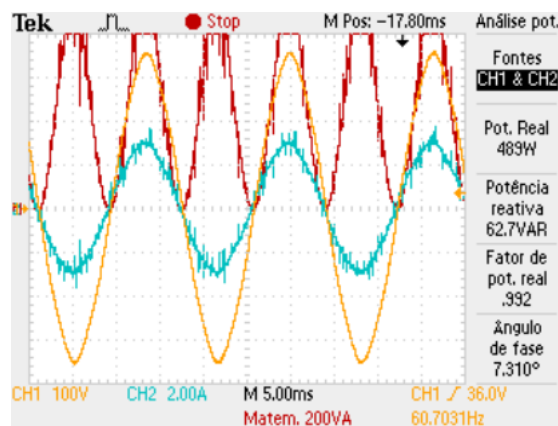
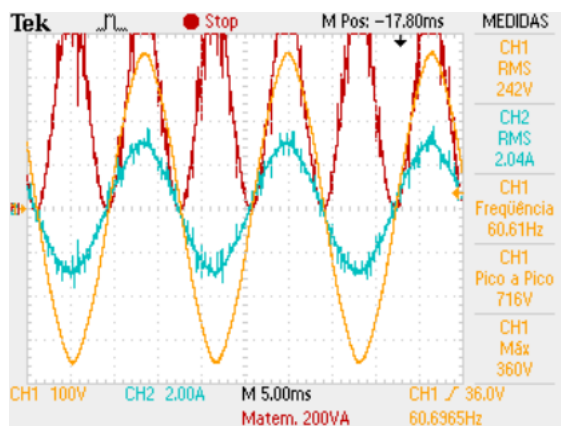
A. Ensaio para obter a regulação de tensão do gerador de indução na conexão Fukami

Os resultados obtidos no teste de regulação de tensão do gerador de indução foram registrados no osciloscópio e plotados graficamente no software Matlab®. A Figura 6 apresenta os resultados obtidos pelo osciloscópio.

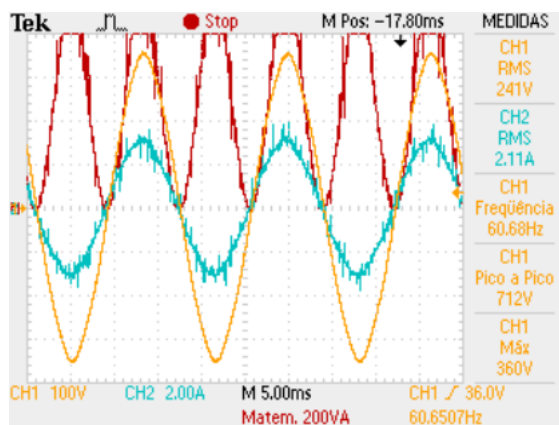
Figura 6 – Resultados obtidos no teste de regulação de tensão do gerador de indução.

(a) Tensão terminal e corrente elétrica na carga.

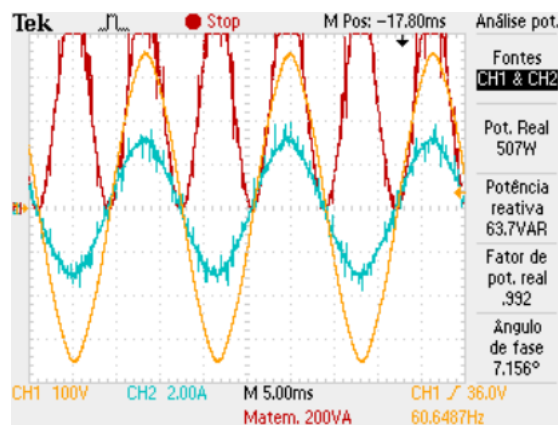
(b) Potência ativa na carga.



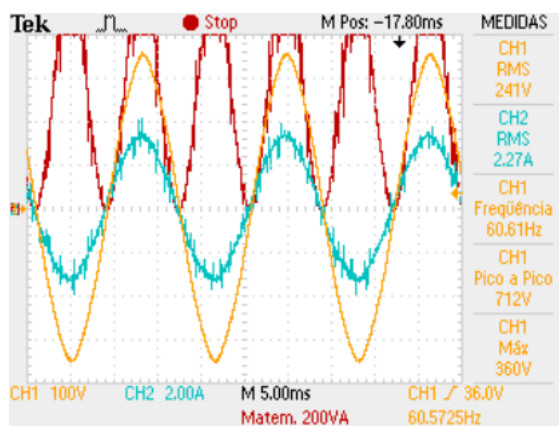
(c) Tensão terminal e corrente elétrica na carga.



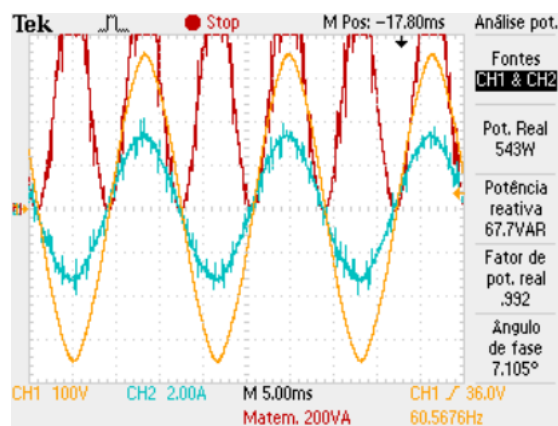
(d) Potência ativa na carga.



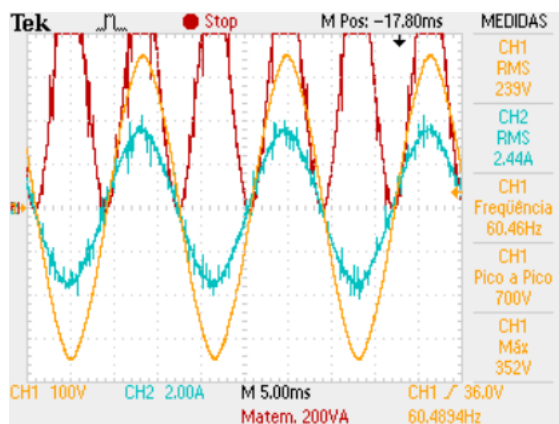
(e) Tensão terminal e corrente elétrica na carga.



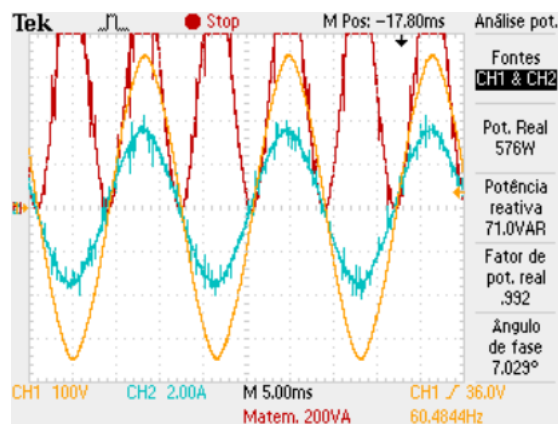
(f) Potência ativa na carga.



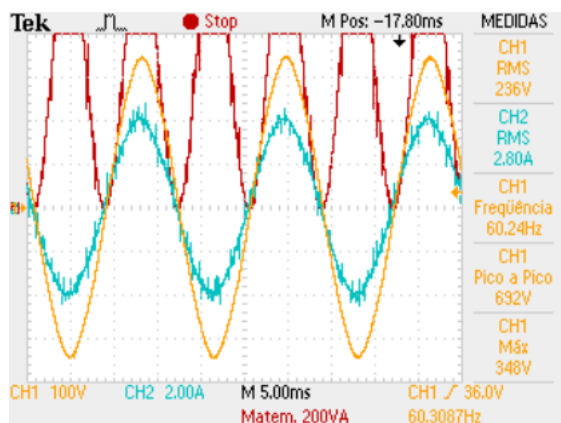
(g) Tensão terminal e corrente elétrica na carga.



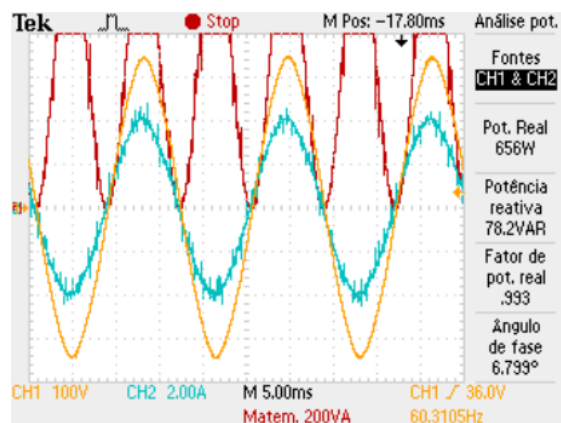
(h) Potência ativa na carga.



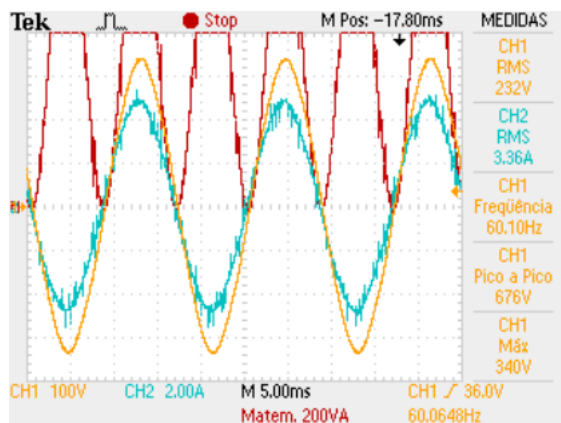
(i) Tensão terminal e corrente elétrica na carga.



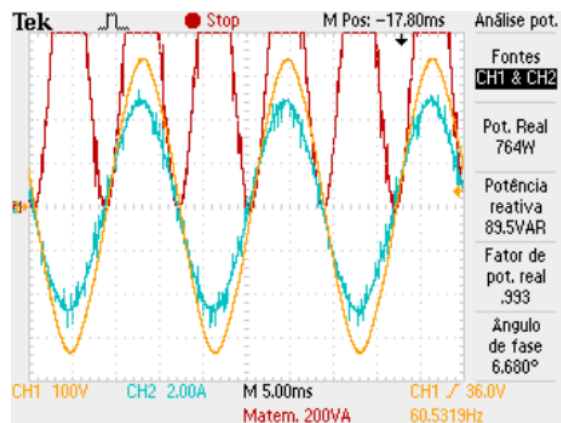
(j) Potência ativa na carga.



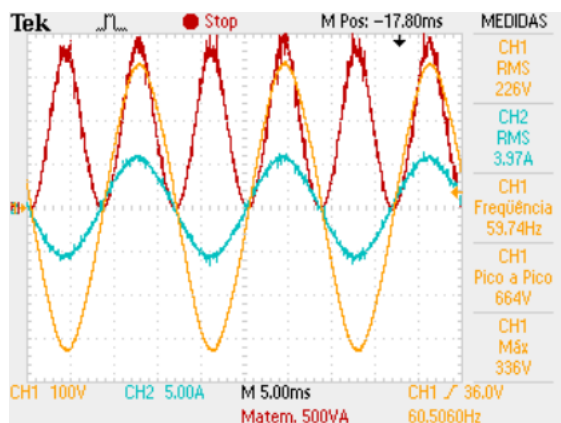
(k) Tensão terminal e corrente elétrica na carga.



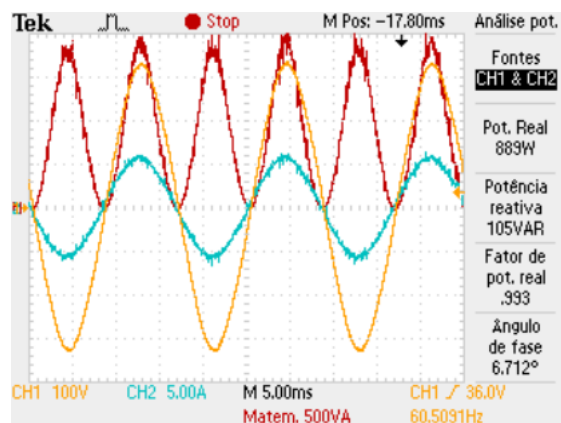
(l) Potência ativa na carga.



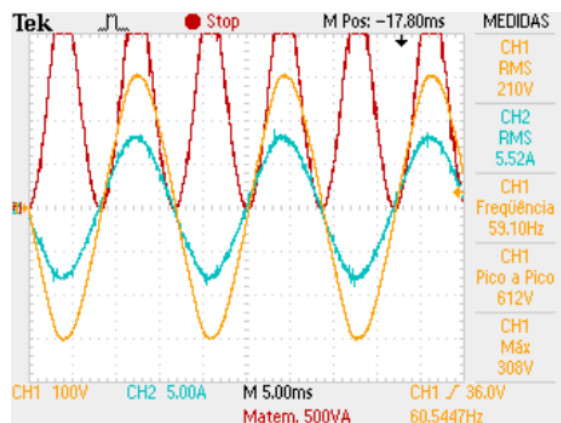
(m) Tensão terminal e corrente elétrica na carga.



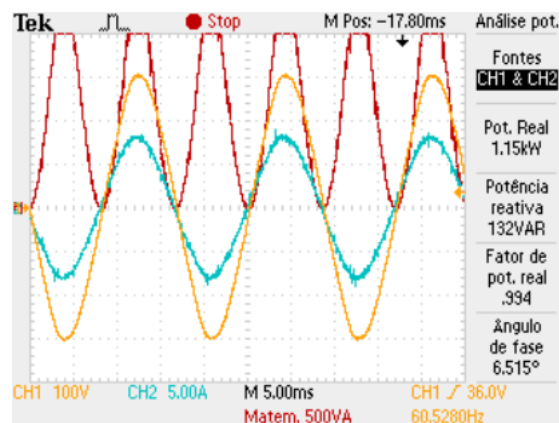
(n) Potência ativa na carga.



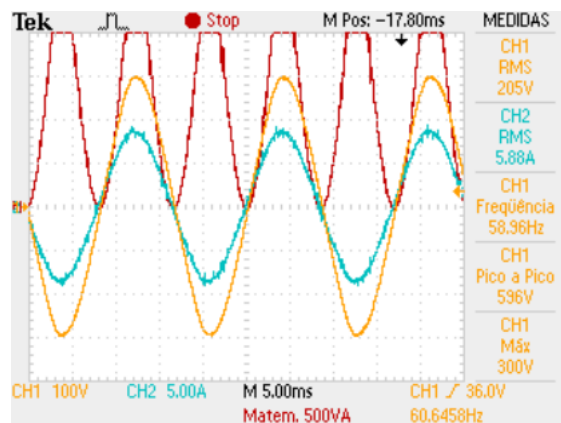
(o) Tensão terminal e corrente elétrica na carga.



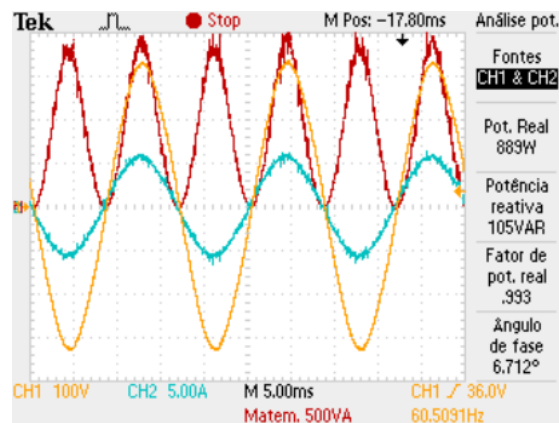
(p) Potência ativa na carga.



(q) Tensão terminal e corrente elétrica na carga.



(r) Potência ativa na carga.



A regulação de tensão, gráfico tensão terminal em função da corrente terminal e regulação de frequência, gráfico de frequência terminal por potência terminal, são apresentados nas Figuras 7 e 8 respectivamente.

Figura 7 – Regulação de tensão, gráfico $V_t \times I_t$.

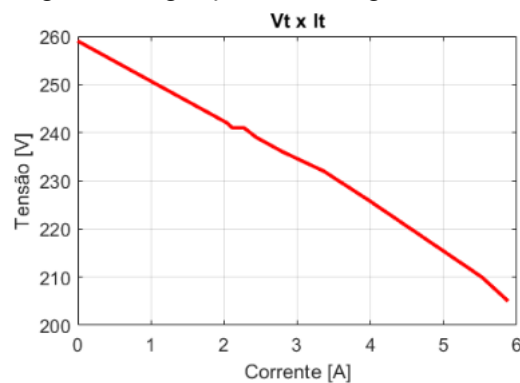
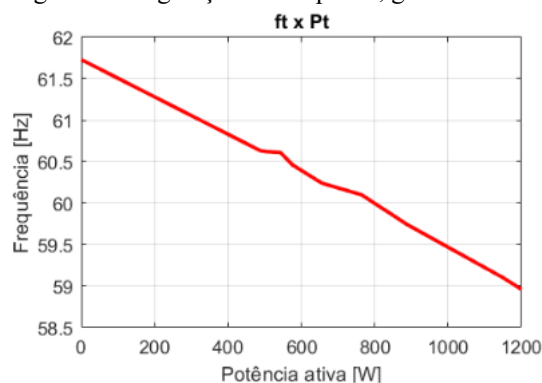


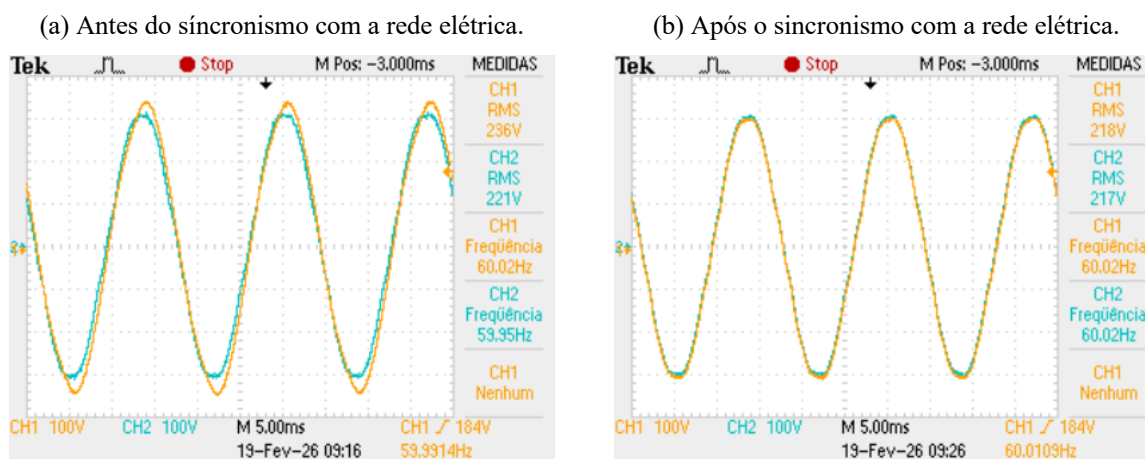
Figura 8 – Regulação de frequência, gráfico $f_t \times P_t$.



B. Sincronismo do gerador com a rede elétrica

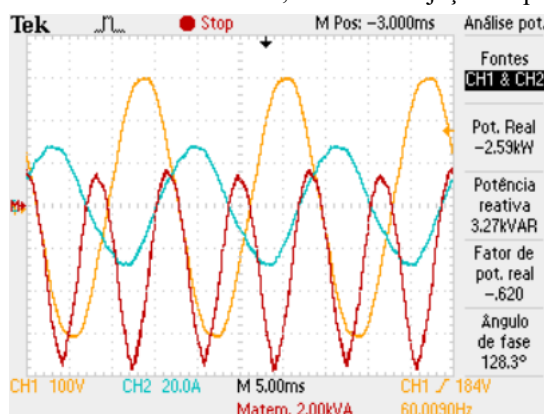
Para realizar o sincronismo do gerador de indução na conexão Fukami com a rede elétrica, utilizou-se o osciloscópio para analisar as formas de onda da tensão gerada com a forma de onda da tensão da rede. Com o auxílio do ajuste de velocidade da máquina primária por meio do inversor de frequência, conseguiu-se que a frequência do gerador ficasse praticamente em fase com a tensão da rede elétrica. A Figura 9 ilustra essa condição.

Figura 9 – Forma de onda da tensão do gerador (cor amarela) juntamente com a forma de onda rede (cor azul).



Após o sincronismo do gerador, a rotação da máquina primária foi ajustada de forma que o gerador de indução injetasse potência ativa na rede, conforme é apresentado na Figura 10. Nota-se que o gerador injeta, neste momento, uma potência acima da nominal (2,59 kW).

Figura 10 – Formas de onda de tensão, corrente e injeção de potência ativa.



C. Análise dos resultados

Ao analisar as Figuras 7 e 8 verifica-se que o gerador de indução na conexão Fukami apresenta uma regulação de tensão e frequência aproximadamente linear, que é uma excelente característica, visto que a rotação do eixo do gerador durante o teste não foi aumentada, não houve controle de frequência da tensão gerada. Sendo essa, uma das condições obrigatórias para que um gerador possa operar de forma isolada. Além disso, o controle de velocidade da máquina primária também implicaria o aumento da tensão gerada e também não se utilizou um regulador de tensão para o gerador, sendo essa, a segunda condição obrigatória para que o gerador possa operar de forma isolada. Diante desses dois cenários, caso o gerador analisado estivesse operando com um regulador de velocidade e tensão, ele conseguiria fornecer perfeitamente sua potência nominal a uma carga isolada (carga puramente resistiva). No caso de carga indutiva, os valores dos capacitores utilizados deveriam ser aumentados para suprir a potência reativa consumida.

Nesse mesmo sentido, pelos resultados apresentados nas Figuras 9 e 10, nota-se que o gerador de indução na conexão Fukami também pode ser conectado à rede elétrica. Isso viabiliza permite sua aplicação em pequenos aproveitamentos hidrelétricos, como em microcentrais hidrelétricas, e também com grupos geradores a gás que utilizam o gás metano proveniente da suinocultura para gerar energia elétrica.

4. CONCLUSÃO

O presente trabalho apresentou o gerador de indução trifásico operando de forma bifásica, na conexão Fukami. Também foi apresentado seu modelo matemático, e seus resultados operando de forma isolada sem controle de frequência (velocidade) e tensão terminal, com a finalidade de se obter sua regulação de tensão (gráfico da tensão terminal por corrente terminal) e regulação de frequência (gráfico da frequência terminal por potência ativa). Os resultados mostraram que o gerador operou com regulação de tensão e frequência aproximadamente linear, demonstrando que a conexão bifásica é robusta quando os valores de capacitores utilizados na autoexcitação são especificados de forma correta.

Além disso, também se avaliou a operação do gerador em paralelo com a rede elétrica, onde foi comprovado que o gerador pode fornecer sua potência nominal à rede, visto que o gerador operou com sobrecarga.

Assim, diante dos resultados apresentados, verifica-se que a conexão Fukami permite que o gerador possa operar de forma isolada e conectada a rede elétrica. Essa configuração apresenta um custo muito reduzido para operação com a rede elétrica, visto que não necessita de sistema excitação como no caso dos geradores síncronos bifásicos. Trata-se de uma solução vantajosa para geração de energia elétrica em pequenos aproveitamentos onde se necessita de uma máquina bifásica, tais como microcentrais hidrelétricas e geração de energia com biogás.

5. REFERÊNCIAS

SILVA, F. B. et al. Application of bidirectional switches in the development of a voltage regulator for self-excited induction generators. **International Journal of Electrical Power & Energy Systems**, v. 98, p. 419–429, jun. 2018.

SILVA, F. B.; VANÇO, W. E.; GONÇALVES, F. A. da S.; BISSOCHI JUNIOR, C. A.; CARVALHO, D. P. de; NETO, L. M. Experimental analysis of harmonic distortion in isolated induction generators. **IEEE Latin America Transactions**, v. 14, n. 3, p. 1245–1251, mar. 2016.

VANÇO, W. E.; SILVA, F. B.; MONTEIRO, J. R. B. A.; OLIVEIRA, C. M. R. de; GOMES, L. C. Theoretical-experimental analysis of the induction generator in the use of distributed generation. **IEEE Latin America Transactions**, v. 19, n. 3, p. 396–403, 2021.

VANÇO, W. E.; SILVA, F. B.; OLIVEIRA, J. M. M. de; MONTEIRO, J. R. B. A. Effects of harmonic pollution on salient pole synchronous generators and on induction generators operating in parallel in isolated systems. **International Transactions on Electrical Energy Systems**, v. 30, e12359, 2020.

VANÇO, W. E.; SILVA, F. B.; GONÇALVES, F. A.; BISSOCHI, C. A. Evaluation of the capacitor bank design for self-excitation in induction generators. **IEEE Latin America Transactions**, v. 16, p. 482–488, 2018a.

VANÇO, W. E.; SILVA, F. B.; MONTEIRO, J. R.; OLIVEIRA, C. M. R. de; GOMES, L. C.; CARVALHO, D. P. de. Feasibility analysis of the use of the generation of induction in the distributed generation. **IEEE Latin America Transactions**, v. 16, p. 1921–1927, 2018b.

VANÇO, W. E.; SILVA, F. B.; GONÇALVES, F. A.; SILVA, E. O.; BISSOCHI, C. A.; NETO, L. M. Experimental analysis of self-excited induction generators operating in parallel with synchronous generators applied to isolated load generation. **IEEE Latin America Transactions**, v. 14, p. 1730–1736, 2016.

FUKAMI, T.; KABURAKI, Y.; KAWAHARA, S.; MIYAMOTO, T. Performance analysis of a self-regulated self-excited single-phase induction generator using a three-phase machine. **IEEE Transactions on Energy Conversion**, v. 14, n. 3, p. 622–627, 1999.

METELLO, E.; SILVA, F. B.; MONTEIRO, R. V. A.; RONDINA, J. M.; GUIMARÃES, G. C. Study of a self-excited three-phase induction generator operating as a single-phase induction generator for use in rotating excitation systems for synchronous generators. **Energies**, v. 17, art. 3900, 2024.

BIM, E. **Máquinas elétricas e acionamentos**. 2. ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2012.

BOLDEA, I. **Variable speed generators: the electric generators handbook**. 1. ed. Boca Raton: CRC Press, 2005.

SIMÕES, M. G.; FARRET, F. A. **Modeling and analysis with induction generators**. 3. ed. Boca Raton: CRC Press, 2015.

NOTAS

CONTRIBUIÇÃO DE AUTORIA

Todos os autores contribuíram de maneira equivalente para a concepção e elaboração do manuscrito, coleta de dados, análise dos dados, discussão dos resultados, revisão e aprovação da versão final.

PREPRINTS

O manuscrito não é um preprint.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Universidade Federal de Uberlândia pelo apoio institucional e pela infraestrutura disponibilizada para a realização dos ensaios experimentais.

CONFLITO DE INTERESSES

Os autores declaram não haver conflito de interesses.

DISPONIBILIDADE DE DADOS DE PESQUISA E OUTROS MATERIAIS

Os dados foram publicados no próprio artigo. Todo o conjunto de dados que dá suporte aos resultados deste estudo está incluído no corpo do artigo.

ANUÊNCIA DE AVALIAÇÃO ABERTA

Não se aplica.



O conteúdo deste trabalho pode ser usado sob os termos da licença Creative Commons Attribution 4.0. Qualquer outra distribuição deste trabalho deve manter a atribuição ao(s) autor(es) e o título do trabalho, citação da revista e DOI.