



Análise biespectral em sinal de corrente do motor de indução trifásico para detecção de falha no estator

Bispectrum analysis in three-phase induction motor current sign with for detection stator fault

Cesar Luís Guimaraes Benito¹, Marcelo Favoretto Castoldi²,
Wesley Angelino de Souza³, Alessandro Goedel⁴

RESUMO

O Motor de Indução Trifásico (MIT) tem grande importância na indústria. De acordo com o relatório (PROCEL, 2021), 24,5% da energia consumida pelo país provém de sistemas motrizes. Assim, devido a grande quantidade de máquinas em operação nas indústrias, é de grande importância que sejam desenvolvidos métodos para diagnóstico de falhas ocorridas nos MITs. Parte do avanço está voltado para o monitoramento e detecção de falhas on-line de forma que o responsável pela máquina tenha informações em tempo real da condição do MIT aumentando assim o tempo de vida útil do produto que é benéfico para o consumidor. Este estudo possui como finalidade implementar um programa capaz de detectar falhas ocorridas no estator de um MIT através do método *Motor Current Signature Analysis* (MCSA).

PALAVRAS-CHAVE: Análise de Assinatura das Correntes; Motor de Indução Trifásico; Falha de Estator.

ABSTRACT

The Three-Phase Induction Motor (MIT) has great importance in industry. According to the (PROCEL, 2021) report, 24.5% of the energy consumed by the country supplies motor systems. Therefore, due to the large number of machines in operation in industries, it is of great importance that methods are developed to diagnose failures occurring in MITs. Part of the advancement is focused on online monitoring and fault detection so that the person responsible for the machine has real-time information on the condition of the MIT, thus increasing the useful life of the product, which is beneficial for the consumer. This study aims to implement a program capable of detecting faults occurring in the stator of an MIT through the *Motor Current Signature Analysis* (MCSA) method.

KEYWORDS: Motor Current Signature Analysis; Three-phase Induction Motor; Stator Fault.

FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Dentre as principais falhas presentes nos MITs podemos destacar, de acordo com (YAKHNI et al., 2023), falhas de rolamento e estator que juntas representam 78% das falhas. Segundo (BAZAN et al., 2017), as falhas de estator representam até 36% dos casos de falhas elétricas. O método MCSA é um método muito utilizado para detecção de falhas de estator por se tratar de um método não invasivo. A utilização de sensores de alto custo podem tornar o método inviável economicamente, por isso (BAZAN et al., 2017) recomenda sensores de efeito Hall para aquisição do sinal de corrente.

¹ Voluntário (PIVIC). Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Cornélio Procópio, Paraná, Brasil. E-mail: cesarlgbenito@alunos.utfpr.edu.br. ID Lattes: 1507017209634559.

² Docente no Curso de Engenharia Elétrica/DAELE. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Cornélio Procópio, Paraná, Brasil. E-mail: marcastoldi@utfpr.edu.br. ID Lattes: 6178029384175205.

³ Docente no Curso de Engenharia Elétrica/DAELE. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Cornélio Procópio, Paraná, Brasil. E-mail: wesleyangelino@utfpr.edu.br. ID Lattes: 8594457321079718.

⁴ Docente no Curso de Engenharia Elétrica/DAELE. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Cornélio Procópio, Paraná, Brasil. E-mail: agoedel@utfpr.edu.br. ID Lattes: 1920650157123774.



TRANSFORMADA RÁPIDA DE FOURIER

A Transformada Rápida de Fourier (FFT – “*Fast Fourier Transform*”) é um algoritmo computacional, apresentado por (COOLEY; TUKEY, 1965), capaz de calcular a Transformada Discreta de Fourier (DFT – “*Discrete Fourier Transform*”) com um custo computacional muito inferior ao método direto. A FFT é responsável por converter um sinal originalmente no domínio do tempo para uma representação no domínio da frequência. Esta transformada possui uma grande importância em uma vasta gama de aplicações incluindo a área de Processamento Digital de Sinais (PDS).

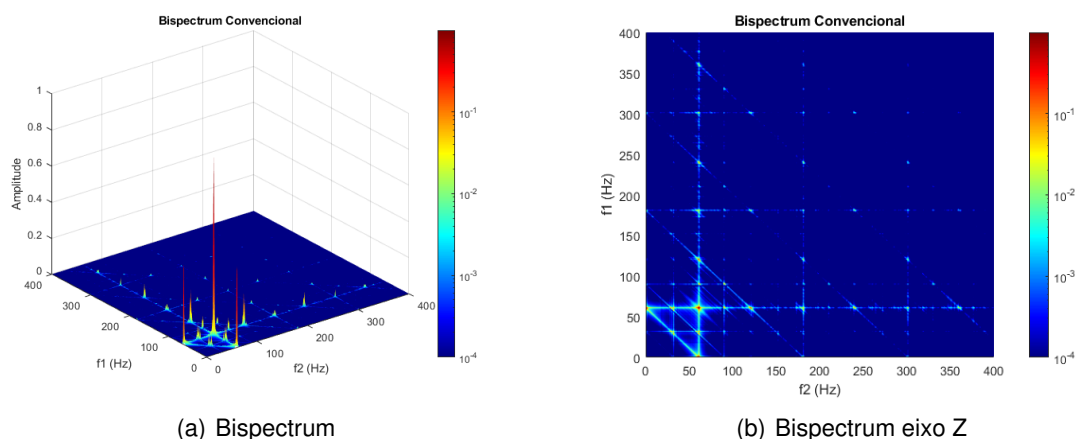
BISPECTRUM

O bispectrum é um método de análise espectral de ordem superior (HOS – “*High Order Spectra*”), caracterizado como uma ferramenta de alta precisão utilizada na área de processamento de sinais. É um método capaz de identificar não linearidades com relação às frequências, retendo informações de fase e eliminando ruídos gaussianos (HUANG et al., 2019). O Bispectrum Convencional (CB – “*Conventional Bispectrum*”) divide o sinal em três componentes de frequência diferentes, sendo calculado para todas as combinações possíveis e com um custo computacional inferior às outras HOSs. O CB pode ser calculado como mostrado na Eq. (1) onde $X(f)$ representa a DFT de um sinal $x(t)$ onde $X^*(f)$ representa o conjugado complexo do mesmo sinal.

$$B_{conv}(f_1, f_2) = E\{X(f_1)X(f_2)X^*(f_1 + f_2)\} \quad (1)$$

Isso resulta em um espectro bidimensional que mostra as interações de frequência entre os três componentes como pode ser exemplificado na Figura 1.

Figura 1 – Resultados obtidos da análise biespectral



Fonte: Autoria própria.

Modulation Signal Bispectrum (MSB), também é uma técnica avançada utilizada em análise de sinais não estacionários. Muito utilizada para analisar como a modulação de frequência e amplitude varia em um sinal ao longo do tempo, isso a diferencia da análise CB apresentada anteriormente. Esse método auxilia na identificação e quantificação dos componentes de modulação em um sinal, o que é de grande utilidade para sistemas de comunicação, análise de falha e análise de vibrações.



$$B_{MS}(f_1, f_2) = E\{X(f_2 + f_1)X(f_2 - f_1)X^*(f_2)X^*(f_2)\} \quad (2)$$

FREQUÊNCIA DE FALHA EM ESTATOR

De acordo com (JUNG; LEE; KWON, 2006) a partir de simulações de modelo de curto-circuito entre espiras pode-se perceber que a corrente de curto-circuito flui no enrolamento no sentido contrário gerando uma Força magnetomotriz (FMM) negativa o que reduz a FMM produzida pela fase. Desta forma o motor encontra-se desbalanceado de seu eixo gerando uma variação de gap entre estator e rotor, logo frequências harmônicas são introduzidas no sinal da corrente e proporcionalmente no espectro de potência do sinal. O autor também definiu que para encontrar as frequências harmônicas de falha devemos aplicar a seguinte equação:

$$f_{estator} = \left(\frac{n}{p}(1 - s) \pm k\right)f \quad (3)$$

Na Eq. (3) temos os índices $n = 1, 2, 3, \dots, k = 1, 3, 5, \dots, p$ é o número de par de polos do motor, s é o escorregamento e f é a frequência de alimentação do motor em Hz.

METODOLOGIA

Para a determinação das falhas foi utilizado um banco de dados do Laboratório de Sistemas Inteligente (UTFPR-CP) de um motor de 1cv e 60 Hz. A Tabela 1 a seguir possui as quatro aquisições feitas para este motor, cada uma delas representando sua respectiva falha à torque nominal do MIT. A aquisição Aq 4, por exemplo, representa o motor operando com 4 N de torque e 10% de falha.

Tabela 1 – Exemplo de tabela.

	0 %	3 %	5%	10 %
4 N	Aq 1	Aq 2	Aq 3	Aq 4

Fonte: Autoria Própria

O objetivo deste trabalho é desenvolver um método de processamento dos dados obtidos do sinal de corrente do estator. Pequenas variações de parâmetros geram modulação de fase (PM) e modulação de amplitude (AM). A Eq. (4) descreve um sinal senoidal no tempo enquanto $A(t)$ e (t) representam a amplitude instantânea e a fase instantânea. De acordo com (YAKHNI et al., 2023) novas expressões de $A(t)$ e (t) são descritas nas Eq. (5) e (6) na presença de falhas.

$$I(t) = A(t) \cdot (t) \quad (4)$$

$$A(t) = I \cdot [1 + \cos(2\pi f_{AM}t + \phi_{AM})] \quad (5)$$

$$\phi(t) = 2\pi f_e t + \beta \cos(2\pi f_{PM}t + \phi_{PM}) + \phi_I \quad (6)$$

Na Eq. (5), para o caso de modulação de amplitude, temos os índices α , f_{AM} e ϕ_{AM}



XIII Seminário de Extensão e Inovação XXVIII Seminário de Iniciação Científica e Tecnológica da UTFPR

Ciência e Tecnologia na era da Inteligência Artificial: Desdobramentos no Ensino Pesquisa e Extensão
20 a 23 de novembro de 2023 - Campus Ponta Grossa, PR



representando respectivamente o índice de modulação, a frequência do sinal modulante e a fase inicial de modulação. Na Eq. (6), para o caso de modulação de fase, temos os índices β , f_{PM} , ϕ_{PM} e ϕ_I representando respectivamente o índice de modulação, a frequência do sinal modulante, a fase inicial de modulação e a fase inicial do sinal original.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

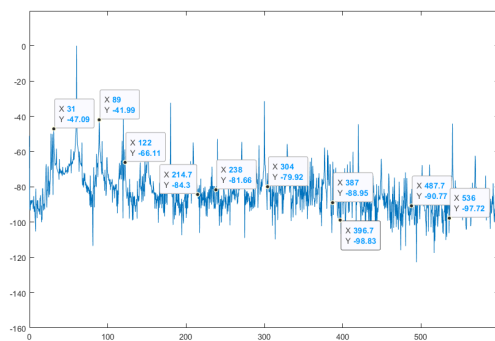
Nesta seção são apresentados e discutidos os resultados obtidos por meio do processamento digital realizado sobre o sinal de corrente do estator. A seguir temos a Tabela 2 com os respectivos valores das frequências de falha em estator e posteriormente a Figura 2 com os respectivos espectros de potência dos sinais saudável e com 10% de falha.

Tabela 2 – Frequências de falha em estator.

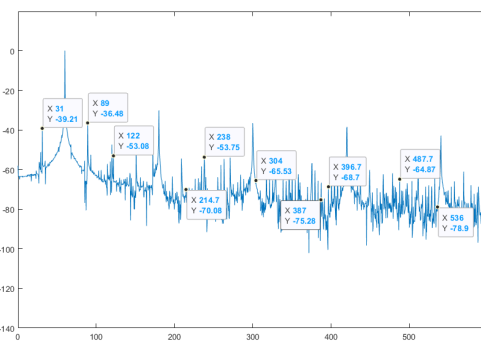
(Hz)	31	89	122	214.7	238	304	387	396.7	487.7	536
------	----	----	-----	-------	-----	-----	-----	-------	-------	-----

Fonte: Autoria Própria

Figura 2 – Espectros dos sinais



(a) Espectro de potência sinal saudável



(b) Espectro de potência sinal com 10% de falha

Fonte: Autoria própria.

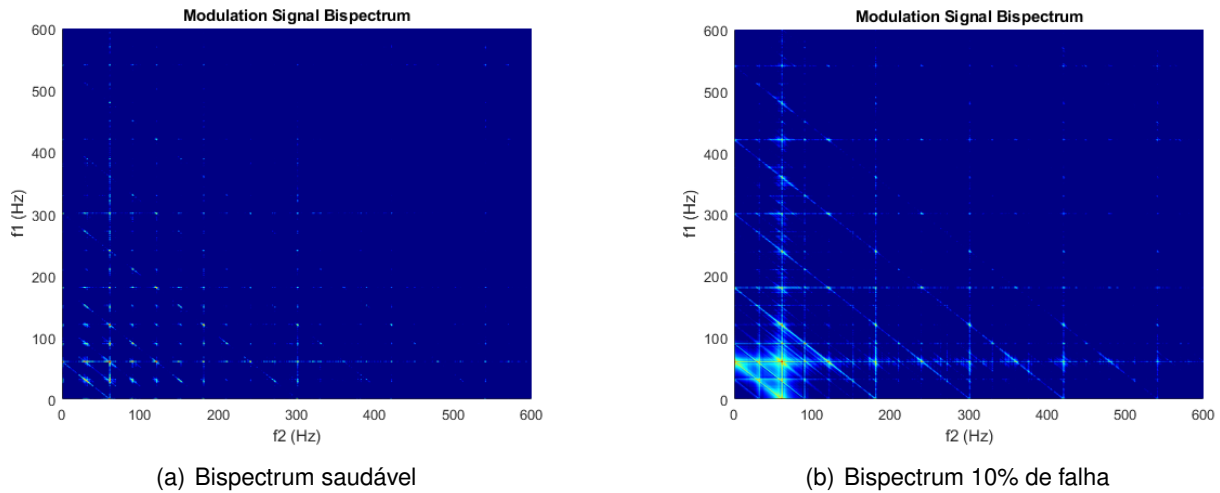
A frequência de falha é proporcional ao escorregamento como visto na Eq. (5), logo a frequência de curto-circuito altera-se de acordo com a variação da velocidade, a qual também possui pequenas oscilações ao longo do tempo. Devido a essas pequenas oscilações a amplitude da frequência de falha calculada pode não aparecer na frequência exata, de acordo com (VITOR et al., 2015) o autor sugere utilizar uma margem de observação com relação a frequência de falha encontrada nos calculos anteriores visto que a variação de velocidade que ocorre durante a aquisição de dados pode deslocar essa frequência de falha no espectro. Percebe-se a diferença entre os espectros de potência da Figura 2, a falha pode ser detectada pela diferença de amplitude existente entre os espectros, as amplitudes das correspondentes frequências de falha na Figura (b) possuem um valor superior as amplitudes da Figura (a).

De acordo com (GODOY et al., 2016), existem áreas do espectro de corrente do estator que podem ser úteis para auxiliar na detecção de falhas nos enrolamentos do estator, neste caso



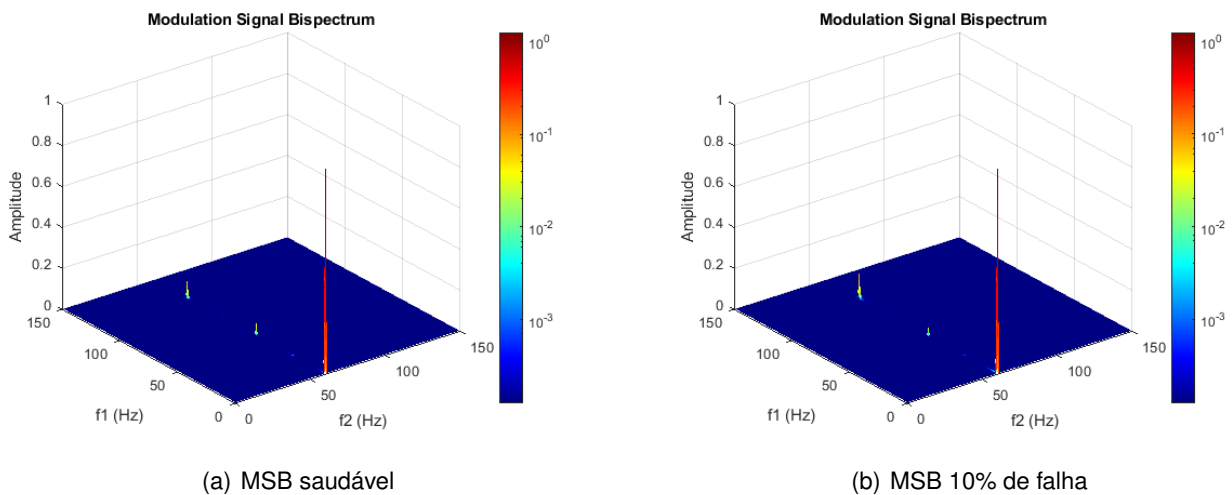
foi determinada a faixa entre 0 a 600 Hz como parte do espectro a ser analisado por conter uma região com informações mais relevantes. Para confirmar a presença das falhas é utilizada a análise Bispectrum. Abaixo temos as Figuras 3 e 4 representando respectivamente os gráficos de CB e MSB para o sinal saudável e com 10% de falha.

Figura 3 – Comparação Bispectrum saudável e com falha



Fonte: Autoria própria.

Figura 4 – Comparação Modulation Singal Bispectrum saudável e com falha



Fonte: Autoria própria.

CONCLUSÃO

De acordo com a literatura é possível confirmar a presença da falha comparando os espectros de potência apresentados na Figura 2 e também os bispectros das Figuras 3.(a) e 3.(b). Na Figura 3.(a) percebe-se apenas a presença de alguns pontos, esses pontos que aparecem no bispectro representam amplitudes geradas através das interações entre as frequências. Já na Figura 3.(b)



percebe-se a presença de um maior número de pontos e uma maior amplitude desses pontos com relação a Figura 3.(a), percebe-se também que houve um maior número de interações entre as frequências na Figura 3.(b). A análise biespectral convencional é utilizada como método comparativo para demonstrar a presença de falha, com o gráfico obtido pode-se aplicar técnicas de classificação como a técnica Kohonen para aferir melhor a presença de falha. Por outro lado, os gráficos de MSB das Figuras 4.(a) e 4.(b) não demonstraram ser eficientes para confirmar a presença de falha em estator, há apenas um aumento na amplitude em 120 Hz.

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer a todos os colegas do Laboratório de Sistemas Inteligentes (UTFPR-CP) por todo conhecimento compartilhado e pela experiência.

CONFLITO DE INTERESSE

Não há conflito de interesse.

REFERÊNCIAS

- BAZAN, Gustavo Henrique et al. Stator fault analysis of three-phase induction motors using information measures and artificial neural networks. **Electric Power Systems Research**, Elsevier, v. 143, p. 347–356, 2017.
- COOLEY, James W; TUKEY, John W. An algorithm for the machine calculation of complex Fourier series. **Mathematics of computation**, v. 19, n. 90, p. 297–301, 1965.
- GODOY, Wagner Fontes et al. Application of intelligent tools to detect and classify broken rotor bars in three-phase induction motors fed by an inverter. **IET Electric Power Applications**, Wiley Online Library, v. 10, n. 5, p. 430–439, 2016.
- HUANG, Baoshan et al. A performance evaluation of two bispectrum analysis methods applied to electrical current signals for monitoring induction motor-driven systems. **Energies**, MDPI, v. 12, n. 8, p. 1438, 2019.
- JUNG, Jee-Hoon; LEE, Jong-Jae; KWON, Bong-Hwan. Online diagnosis of induction motors using MCSA. **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, IEEE, v. 53, n. 6, p. 1842–1852, 2006.
- PROCEL. **Relatório PROCEL 2021**. Brasília: PROCEL: [s.n.], 2021. Disponível em: <http://www.procelinfo.com.br/resultadosprocel2021/>. Acesso em: 7 de Abril de 2023.
- VITOR, Avyner Lorrán de Oliveira et al. **Deteção de falhas de estator em motores de indução trifásicos utilizando transformada wavelet, medida RMS e potência de previsão**. 2015. Diss. (Mestrado) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná.
- YAKHNI, Mohammad F et al. Variable speed induction motors' fault detection based on transient motor current signatures analysis: A review. **Mechanical Systems and Signal Processing**, Elsevier, v. 184, p. 109737, 2023.