

# Detecção de Desequilíbrio de Tensão e de Desalinhamento no Motor de Indução através da Análise do Fluxo de Dispersão

Ana C. S. Araújo\*. Paulo C. M. Lamim Filho\*. Lane M. R. Baccarini\*.  
Fabiano B. Batista\*\*

\* *Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de São João del-Rei, MG, Brasil  
(e-mail: anacarolinasantosaraujo@hotmail.com, lamim@ufsj.edu.br, rabelo@ufsj.edu.br)*

\*\* *Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de São João del-Rei, MG, Brasil  
(e-mail: fabianchini@ufsj.edu.br)*

**Abstract:** The three-phase induction motors are vital component in the industrial sector, mainly due to the versatility, robustness and low cost. Although, these machines are subject to different types of failures that compromise its operation and the integrity of its components. Among various faults of the induction motor, there are the misalignment and the unbalanced voltage supplies. If those failures have not been detected, they can cause irreversible damage to the engine and losses in the industrial process. Therefore, the importance of reliability and availability required for electric motors is constantly increasing. In this scenario, the paper shows the Stray Flux Signature Analysis (SFSA) for detection of misalignment and unbalanced voltage supplies in the three-phase induction motor and compares to traditional methodology, Motor Current Signature Analysis (MCSA). Experimental tests in the *Laboratório de Máquinas e Transformadores (LAMET)* of the *Universidade Federal de São João del-Rei (UFSJ)* were used to validate the effectiveness of the technique. The obtained results showed stray flux monitoring as a reliable e simple alternative for the detection of misalignment and unbalanced voltage supplies in the induction motor, avoiding invasive testing and unexpected machine maintenance downtime.

**Resumo:** Os motores de indução trifásicos são largamente empregados no setor industrial devido sua versatilidade, robustez e baixo custo. No entanto, estas máquinas estão sujeitas a diversos tipos de falhas que comprometem o seu funcionamento e a integridade de seus componentes. Dentre essas falhas estão as de desalinhamento e as de desequilíbrio de tensão. Se não detectadas podem causar danos irreversíveis ao motor e perdas no processo industrial. Assim, a importância da confiabilidade e da disponibilidade exigidas para os motores elétricos crescem constantemente. Neste cenário, o presente trabalho apresenta a Análise da Assinatura de Fluxo de Dispersão (SFSA) para detecção de falha de desalinhamento e desequilíbrio de tensão no motor de indução trifásico comparando-a com uma técnica tradicional, Análise da Assinatura de Corrente do Motor (MCSA). Testes experimentais no Laboratório de Máquinas e Transformadores (LAMET) da Universidade Federal de São João del-Rei (UFSJ) foram usados para validar a eficácia dessa ferramenta. Os resultados obtidos mostraram a análise dos sinais de fluxo como uma confiável e simples alternativa para detecção de falha de desalinhamento e de desequilíbrio de tensão, evitando testes invasivos e paradas inesperadas para manutenção da máquina.

**Keywords:** stray flux; fault diagnostic; unbalanced voltage supplies; misalignment; induction motor.

**Palavras-chaves:** fluxo de dispersão; diagnostico de falha; falha de desalinhamento; falha de desequilíbrio de tensão; motor de indução.

## 1. INTRODUÇÃO

O motor de indução, na contemporaneidade, tem grande aplicação na área industrial. Estes equipamentos estão sujeitos a estresses de várias naturezas (térmicos, elétricos, mecânicos ou ambientais) podendo afetar as características eletromagnéticas e mecânicas do motor que opera em condições normais (Sakhalkar and Korde, 2018 ; Bednarz and Dybkowski, 2018). Dentre os vários defeitos que os motores de indução estão submetidos, têm-se a falha de desalinhamento e de desequilíbrio tensão que prejudicam

diretamente a eficiência da máquina e sua vida útil (Haroun et al., 2015; Lashkari and Poshtan, 2015).

Devido à importância do motor de indução, a operação anormal desse representa um problema muito relevante nos processos indústrias (Constantin and Firețeanu, 2015). Portanto, é de suma importância a detecção rápida e eficaz da ocorrência da falha no equipamento. Quando isso não acontece, danos podem ser provocados, o que pode acarretar perda temporária ou até mesmo permanente da máquina.

Várias técnicas para a detecção preditiva de falhas em motores elétricos têm sido bastante difundidas e consolidadas nos últimos anos, a maioria delas utiliza a análise do espectro de vibração ou/e a Análise da Assinatura da Corrente do Motor (*Motor Current Signature Analysis – MCSA*) (Castelli et al., 2008; Krishna and Kishan, 2013). A MCSA é capaz de verificar assimetrias ou falhas do motor pela análise espectral da corrente do estator, utilizando como ferramenta matemática a Transformada Rápida de Fourier (FFT). Esta tem como uma das vantagens a simplicidade de medição de corrente por se tratar de um método não intrusivo (Noureddine et al., 2016). No entanto, essa técnica tem suas restrições como, por exemplo, a dificuldade de se identificar a falha para condições em que a máquina opera com baixo escorregamento devido a assinatura de falha ser de baixa frequência (Maleskpour et al., 2017; Martinez-Roman et al., 2015) e na baixa eficiência dessa ferramenta quando se há interação entre a falha e harmônicos inseridos pelo inversor (Chernyavska and Vitek, 2017).

Uma técnica que apresenta maior sensibilidade do que a MCSA para alguns tipos de falhas que não podem ser distinguíveis diante de condições específicas de carga e características de construção do motor é a Análise da Assinatura de Fluxo de Dispersão (*Stray Flux Signature Analysis - SFSA*), a qual o monitoramento de fluxo é simples e pode ser implementado com baixo custo. A SFSA utiliza sinais de força eletromotriz (FEM) induzida pelo fluxo de dispersão em bobinas localizadas perto do motor, os quais correspondem à taxa de variação do fluxo magnético no tempo. Embora o número de trabalhos explorando o assunto seja bastante reduzido em comparação com métodos baseados em sinais de corrente, a confiabilidade dos sinais de fluxo de dispersão para o diagnóstico de falhas foi comprovada para vários tipos de falhas (Salem et al., 2017; Park et al., 2019; Panagiotou et al., 2018; Filho et al., 2020).

Neste contexto, a proposta deste trabalho consiste no estudo da Análise da Assinatura de Fluxo de Dispersão (SFSA) para detecção de falha de desalinhamento e desequilíbrio de tensão no motor de indução trifásico comparando-a com uma técnica mais tradicional, Análise da Assinatura de Corrente do Motor (MCSA).

## 2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

### 2.1 Tipos de Falhas

O presente artigo traz um estudo das modulações características da falha de desalinhamento e de desequilíbrio de tensão em um motor de indução trifásico, levando em consideração que a presença dessas falhas gera aumento de temperatura, do ruído e da vibração provocando uma redução direta da eficiência da máquina.

#### 2.1.1 Desalinhamento

O desalinhamento é uma das falhas mecânicas mais comum em máquinas rotativas elétricas. Além de causar mais de 70% dos problemas de vibração de máquinas rotativas (Haroun et

al., 2015), esta pode levar à quebra parcial ou total de um motor em longo prazo. Geralmente, esta falha ocorre quando duas máquinas são acopladas visto que a vibração é frequentemente produzida por forças reativas no acoplamento quando dois eixos acoplados não são perfeitamente colineares. O desalinhamento pode ser radial, angular ou em muitos casos os dois combinados, seja no plano horizontal ou no vertical. (Behera et al., 2014)

- Desalinhamento angular ou axial acontece quando as linhas de centro do eixo das máquinas se interceptam, formando um ângulo. Fortes vibrações axiais na frequência de rotação do rotor ( $f_r$ ) representam o desalinhamento angular, que também podem vir seguidas de altos níveis múltiplos da rotação.

- Desalinhamento paralelo ou radial ocorre quando os centros dos eixos das máquinas não coincidem. A vibração característica na direção radial surge a  $2f_r$  do eixo. O desalinhamento paralelo pode ser vertical ou horizontal. O nível mais alto de vibração ocorre na direção do desalinhamento, ou seja, se o desalinhamento é horizontal, a maior vibração ocorrerá na horizontal.

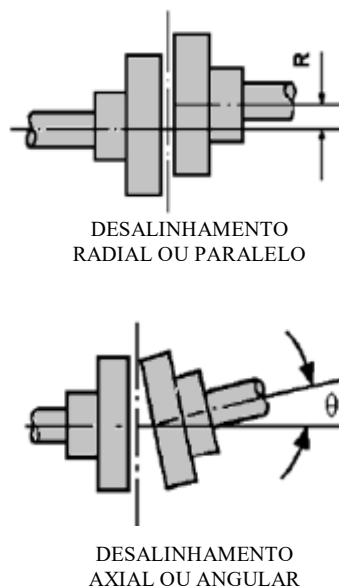


Fig. 1 Tipos de desalinhamento (SENAI, 2010)

A frequência características de falha além de ser influenciada pelo tipo de desalinhamento, pode ser também influenciada pela posição do sensor de fluxo. A direção do fluxo de dispersão capturado determinará as componentes de frequências que será mais bem visualizada no espectro (Ceban et al., 2012; Pastor- Osorio et al., 2019; Romary et al., 2013).

A característica marcante do desalinhamento é o aparecimento de vibrações nas direções radial e axial. A vibração axial é geralmente o melhor indicador. O tipo de acoplamento influencia bastante a forma do espectro de vibração, sendo assim, o efeito do desalinhamento na assinatura de vibração é complexo.

A Tabela 1 mostra as componentes mais importantes amplificadas por danos no rotor, sendo  $s$  o esorregamento e  $f$  a frequência de alimentação do motor.

**Tabela 1. Frequência característica de falha de acordo com a dispersão do fluxo**

Frequência de falha	Direção do fluxo predominante
$s \cdot f$	Axial
$3 \cdot s \cdot f$	Axial
$f \pm 2 \cdot s \cdot f$	Radial

Outras literaturas (Verucchi et al., 2016; Sousa et al., 2016) mostraram que a presença de desalinhamentos aumenta as amplitudes dos componentes em  $f \pm fr$  (onde  $f$  é a frequência da linha e  $fr$  é a frequência rotacional do rotor) nos sinais de corrente do estator.

### 2.1.2 Desequilíbrio de tensão

Os motores de indução estão sujeitos a falhas incipientes (barras quebradas, rolamentos danificados, curto-circuito, etc.) e falhas externas (sobrecarga mecânica, desequilíbrio de fase, subtensão, sobretensão, rotor bloqueado, etc.). Dentre essas falhas, o desequilíbrio de tensão e a perda de uma fase de alimentação do motor de indução são considerados como as faltas externas mais frequentes na planta industrial (Refaat et al., 2013).

Algumas das principais causas do desequilíbrio de tensão nas máquinas se deve: a tensão de alimentação instável, cargas monofásicas desigualmente distribuídas no mesmo sistema de energia, um circuito aberto no sistema primário de distribuição e ocorrência de descargas atmosféricas em circuitos de distribuição (Williams, 1954).

Além disso, a ocorrência de desequilíbrio de tensão no motor degrada o desempenho da máquina levando ao encurtamento da vida útil do equipamento. Isso se deve ao aumento das perdas, da presença de correntes de linha desequilibradas, alteração no tempo de partida e do aquecimento excessivo do motor. Assim, um diagnóstico rápido e preciso é de suma relevância para se evitar danos permanentes (Lashkari and Poshtan, 2015).

O desequilíbrio de fase é uma falha na parte estacionária do motor e de acordo com as literaturas se os defeitos estão localizados no estator, as forças resultantes não giram e podem ser definida por (1) e (2) (Lamim Filho et al., 2014).

$$f_{estator} = \frac{k}{2} [\cos(\theta) - \cos(2\omega t + \theta)] \quad (1)$$

$$f_{estator} = \frac{k}{2} [\text{sen}(\omega t) \cdot \text{sen}(\omega t + \theta)] \quad (2)$$

Onde:  $\omega$  é a velocidade síncrona do motor e  $k$  um número inteiro positivo.

Logo, a vibração resultante tem uma componente constante e outra alternada em duas vezes à frequência da rede. As frequências de rotação do rotor e de esorregamento também influenciam no sistema, e podem gerar modulações em torno de duas vezes a frequência da rede (Almeida, 1996).

Conforme (1), a frequência característica do desequilíbrio de fase é de duas vezes a frequência da rede. Devido à componente de sequência negativa, tem-se no espectro de vibração modulações da frequência de rotação (Lamim Filho et al., 2014).

### 2.2 Transformada de Hilbert

A Transformada de Hilbert (HT) trata-se de ma técnica clássica na área de Processamento de Sinais Digitais, amplamente utilizada na detecção de falhas em motores de indução.

Tendo um sinal modulado representado por  $x(t)$ , a Transformada de Hilbert deste sinal pode ser expressa por (3) (Zayed, 1998).

$$H[x(t)] = y(t) = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{x(\tau)}{t - \tau} d\tau \quad (3)$$

Um sinal analítico  $z(t)$  em (4) pode ser constituído pela soma de sua parte real  $r(t)$  e imaginária  $y(t)$ . Sendo a parte real o próprio sinal e a parte imaginária sendo obtida por meio da aplicação da Transformada de Hilbert deste sinal.

$$z(t) = r(t) + jy(t) \quad (4)$$

O envelope ou sequência de tempo moduladora de  $z(t)$  é definido como módulo do sinal analítico.

O sinal analítico,  $z(t)$ , pode ser transcrita em sua forma polar como em (5).

$$z(t) = A(t)e^{j\theta(t)} \quad (5)$$

Onde as variáveis  $A(t)$  representa a amplitude e  $\theta(t)$  a fase instantânea do sinal analítico.

## 3. METODOLOGIA

Os testes experimentais foram executados no Laboratório de Máquinas e Transformadores (LAMET) da Universidade Federal de São João del-Rei (UFSJ). A bancada, Figura 2, é composta por um motor de indução trifásico WEG 3CV, 220V, 60Hz, 4 polos, classe de isolamento N, FS 1,15, Ip/In 6,5, IP 55, velocidade nominal de 1735rpm e alimentado por meio de um variador de tensão trifásico. O motor foi acoplado a um gerador CC alimentando um banco de resistência no qual é utilizado como sistema de carga. Para garantir a mesma condição de funcionamento em todos os testes realizados foi inserido, entre o motor de indução e o gerador, um transdutor ligado a um torquímetro digital para medir o valor de torque. O torque de carga é controlado variando-se a corrente de campo da máquina CC com a utilização de um *varivolt* monofásico e um retificador de tensão.

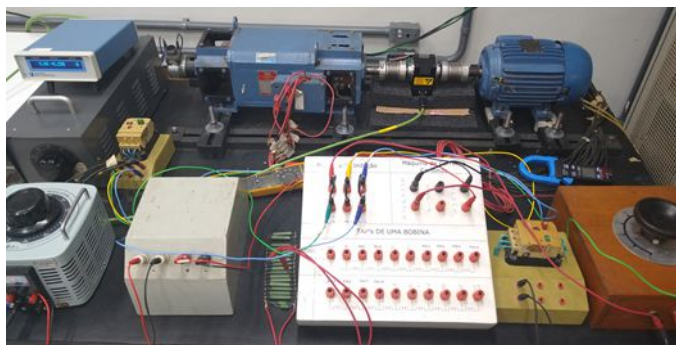


Fig. 2 Bancada Experimental

Na etapa de coleta dos dados, usou-se um alicate amperímetro (A622 AC/DC - 100 Hz Tectronix) para os sinais de corrente. Já para os sinais da força eletromotriz utilizou-se um sensor de fluxo de dispersão axial. A bobina foi fixada no lado interno da tampa traseira do motor de indução trifásico. Esta foi projetada para garantir que o sinal de força eletromotriz induzida esteja na faixa de  $\pm 100$  mV, tendo assim quarenta voltas de fio de cobre com 0,405 mm de diâmetro.

Para a aquisição de sinais de FEM e de corrente, seus respectivos sensores foram conectados a uma placa de aquisição (NI PCI4461 da National Instruments) de dois canais analógicos de entrada simultâneas de 24-bits (taxa de amostragem máxima de 80 kHz) e dois canais analógicos de saídas analógicas simultâneas de 24-bits (taxa de amostragem de 204,8 kS/s) com faixa de entrada de  $\pm 316$  mV até 42,4 V. A placa também possui um filtro anti-aliasing até 92 kHz. A ferramenta para o processamento de sinais utilizada foi o software VibSoft-80, configurado para uma frequência de 5,12 kHz, durante 1,6 segundos, gerando um total de 8192 amostras. O filtro anti-aliasing foi configurado para o tipo passa baixa com frequência de corte de 2,5 kHz.

Para a execução do algoritmo de análise, monitoramento e diagnóstico de falhas foi usado o software Matlab 2015a.

A fim de simular a condição de falha, o desalinhamento promovido entre os eixos do motor de indução e do gerador CC foi do tipo paralelo, de 6mm. Para testes de desequilíbrios de tensão um resistor variável foi inserido em série com o enrolamento do estator da fase C e o seu valor foi ajustado para que a tensão fosse 10V menor que nas outras fases, o que representa 3,1% de desequilíbrio.

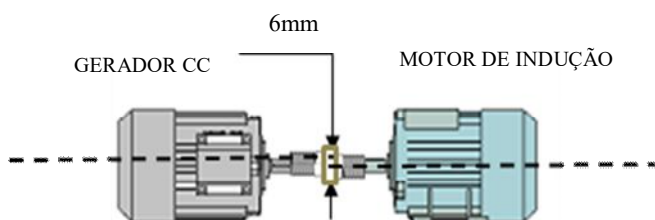


Fig. 3 Desalinhamento entre o eixo do motor e a carga acoplada.

#### 4. RESULTADOS

Os ensaios consistiram na análise de dois tipos de falhas: desequilíbrio de tensão e desalinhamento. Os sinais de força eletromotriz, induzidos pelo fluxo de dispersão do estator do motor de indução, foram adquiridos para o estado do motor operando com 100% de carga. A fim de comparar os resultados obtidos dos sinais de fluxo, foram coletados também sinais de corrente dos enrolamentos de estator com o motor operando em plena carga. Para cada condição de funcionamento da máquina, com e sem falha, foram realizados cinco testes de forma aleatória o qual apresentou repetibilidade nos resultados.

Ao realizar a análise dos espectros sem demodulação dos sinais de corrente e de fluxo do motor de indução visualização dos componentes da frequência harmônica que foram mais excitados com as imperfeições de desalinhamento e desequilíbrio de fase acaba sendo extremamente difícil. Dada esta dificuldade, este trabalho propõe a aplicação da análise de envelope.

Aplicando a análise do envelope da Transformada de Hilbert dos dados de corrente e de fluxo, na Figura 4, Figura 5 e Figura 6, respectivamente, têm-se os espectros dos sinais demodulados de fluxo do motor operando com a porcentagem de 100% de carga na condição de sem defeito, com desalinhamento e com desequilíbrio de tensão. Já na Figura 7, Figura 8 e Figura 9 são exibidos os espectros dos sinais demodulados de corrente coletados sob o mesmo cenário dos sinais de fluxo. Depois de comparar os espectros de corrente e de fluxo magnético, foi possível verificar que os 2°, 4°, 6° e 8° harmônicos da frequência de linha (120Hz, 240Hz, 360Hz e 480Hz) foram os mais excitados pela inserção do desalinhamento e do desequilíbrio de fase. Nota-se uma divergência entre os valores de diferença das amplitudes com e sem defeitos da operação do motor de indução nos espectros do sinal de corrente e do sinal de fluxo.

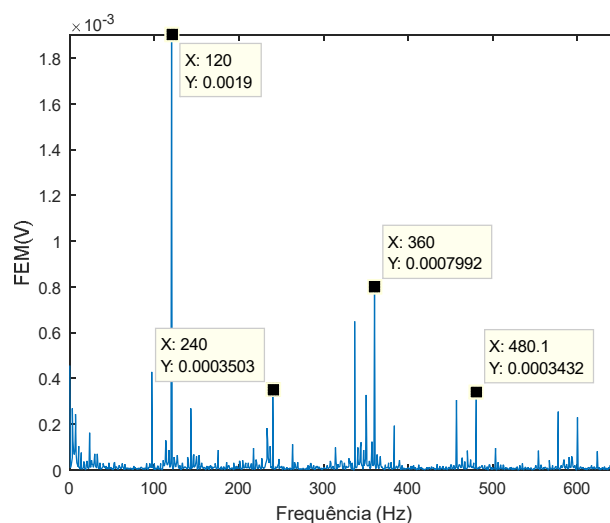


Fig. 4 Espectro do envelope do sinal de fluxo, motor operando sem falha.

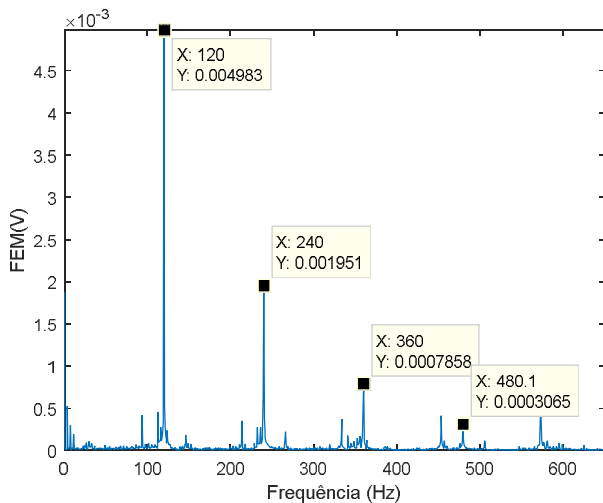


Fig. 5 Espectro do envelope do sinal de fluxo, motor operando com falha de desalinhamento.

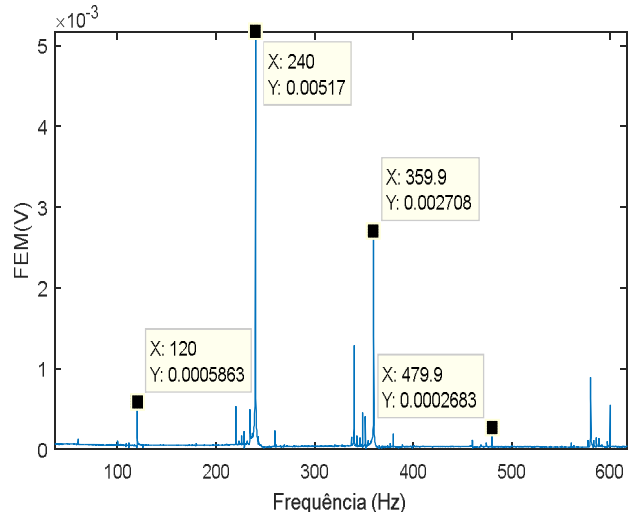


Fig. 8 Espectro do envelope do sinal de corrente, motor operando com falha de desalinhamento.

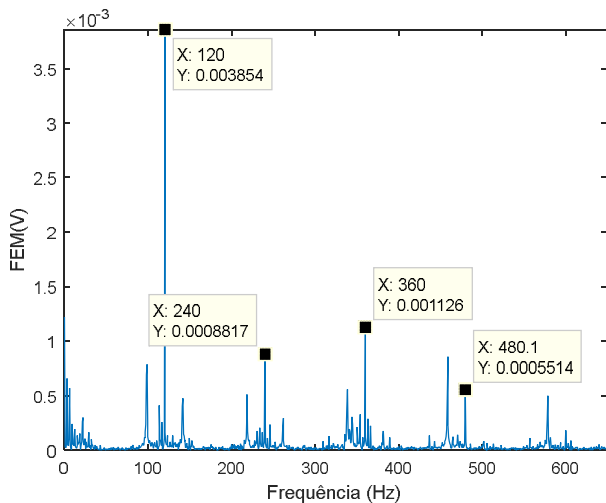


Fig. 6 Espectro do envelope do sinal de fluxo, motor operando com falha de desequilíbrio de tensão.

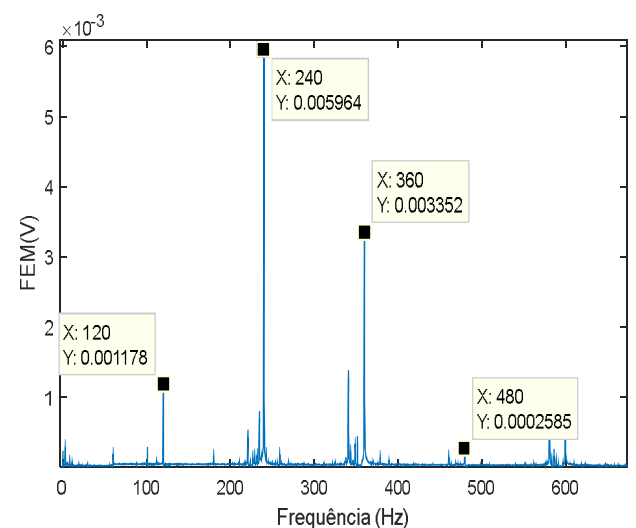


Fig. 9 Espectro do envelope do sinal de corrente, motor operando com falha de desequilíbrio de tensão.

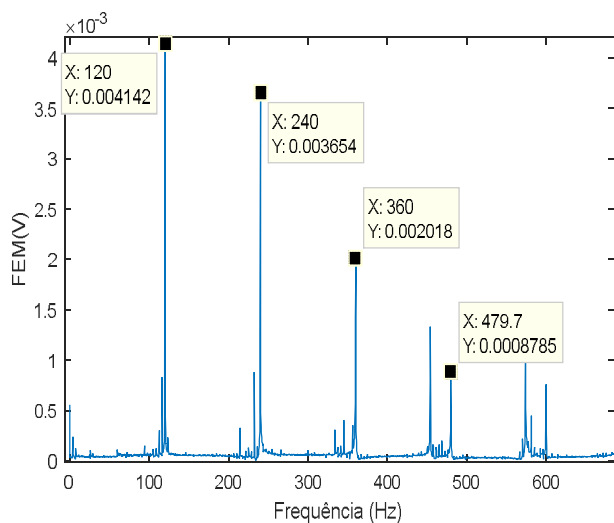


Fig. 7 Espectro do envelope do sinal de corrente, motor operando sem falha.

Essa diferença pode ser realçada em cada frequência o qual no espectro dos sinais da força eletromotriz consegue-se identificar a presença ou ausência das falhas, Figura 10. Nota-se uma alta sensibilidade do fluxo de dispersão frente à ocorrência dessas falhas. No entanto, a diferença entre a média da amplitude da força eletromotriz do motor operando em condições normais e em falha de desequilíbrio de tensão ou de desalinhamento vai diminuindo de acordo com o aumento do grau das componentes harmônicas das frequências.

As curvas das médias dos sinais de correntes estão muito próximas o que pode gerar um diagnóstico difícil das falhas em estudo, na Figura 11. Essa pequena variância entre o estado com e sem operação normal prejudica o diagnóstico da falha. Portanto, essa ferramenta pode ser considerada como incerta e capaz de apresentar um falso positivo ou negativo para detecção de desalinhamento e desequilíbrio de tensão no motor de indução.

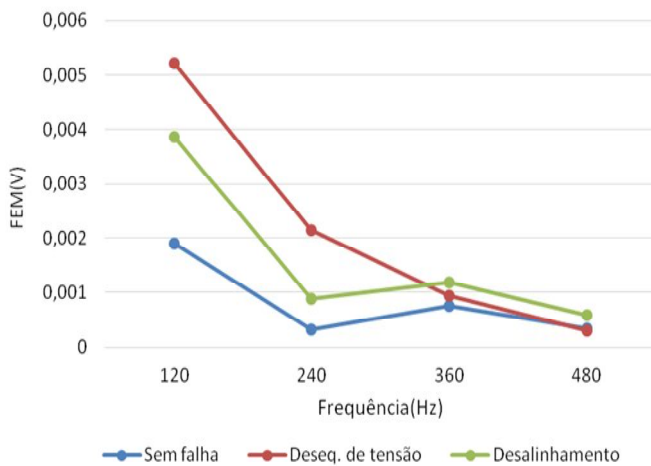


Fig. 10 Média das amplitudes do espectro do envelope do sinal de fluxo em cada frequência de análise

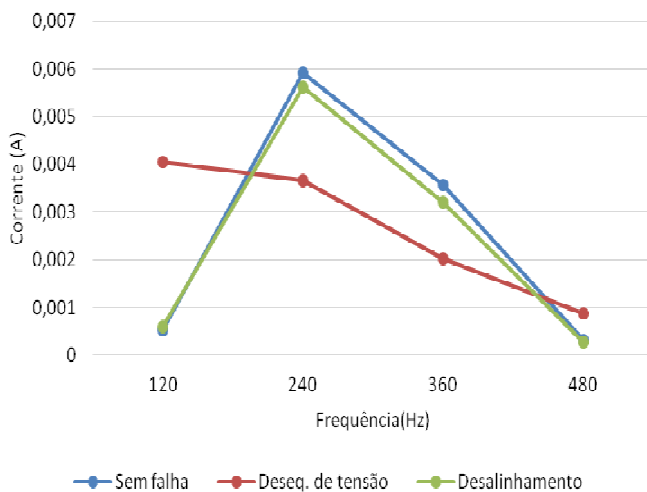


Fig. 11 Média das amplitudes do espectro do envelope do sinal de corrente em cada frequência de análise

## 6. CONCLUSÕES

Através dos resultados obtidos, observa-se que há uma alta sensibilidade do fluxo de dispersão frente à análise de desalinhamento mecânico e desequilíbrio de tensão. A demodulação do sinal do fluxo magnético pela análise de envelope provou ser muito útil na verificação de modulações perante as falhas nas frequências: 2º, 4º, 6º e 8º harmônicos da frequência de linha (120Hz, 240Hz, 360Hz e 480Hz).

Portanto, percebe-se que a Análise da Assinatura de Fluxo de Dispersão (SFSA) utilizada para detecção de falha de desalinhamento e desequilíbrio de tensão no motor trifásico de indução se mostrou de forma precisa e com melhor desempenho quando comparada com os resultados da Análise da Assinatura de Fluxo do Motor (MCSA).

Vale ressaltar que o método proposto é simples, de fácil aplicação prática, de modo que pode ser implementado em

qualquer planta industrial, uma vez que requer apenas a medição dos sinais da força eletromotriz que é diretamente proporcional a variação do fluxo induzido. Assim, sua natureza não invasiva devido ao sensor não interferir na variável de medição e sua fácil implementação facilitam a atividade de planejamento das intervenções de manutenção evitando a ocorrência de paradas não programadas e prejuízos materiais, econômicos e sociais.

## AGRADECIMENTOS

Agradecemos FAPEMIG/CAPES/INERGE pelo suporte técnico e financeiro no Laboratório de Máquinas e Transformadores que facilitaram o desenvolvimento da pesquisa.

## REFERÊNCIAS

- Bednarz, S.A. and Dybkowski, M. (2018). On-line detection of the rotor faults in the induction motor drive using parameter estimator. 2018 Int. Symp. Electr. Mach. SME 2018 1–5. <https://doi.org/10.1109/ISEM.2018.8443020>
- Behera, D.P., Behera, R., and Naikan, V.N.A. (2014). Virtual fault simulation for diagnosis of shaft misalignment of rotating machine. Proc. 2014 Int. Conf. Adv. Comput. Commun. Informatics, ICACCI 2014 2476–2480. <https://doi.org/10.1109/ICACCI.2014.6968225>
- Castelli, M.J., Fossati, J.P. and Andrade, M.T. (2008). New methodology to faults detection in induction motors via MCSA. 2008 IEEE/PES Transm. Distrib. Conf. Expo. Lat. Am. T D-LA 1–6. <https://doi.org/10.1109/TDC-LA.2008.4641817>
- Ceban, A., Pusca, R. and Romary, R. (2012). Study of rotor faults in induction motors using external magnetic field analysis. IEEE Trans. Ind. Electron. 59, 2082–2093. <https://doi.org/10.1109/TIE.2011.2163285>
- Chernyavska, I. and Vitek, O. (2017). Analysis of air-gap eccentricity in inverter fed induction motor by means of motor current signature analysis and stray flux of motor. Proc. 2017 IEEE 11th Int. Symp. Diagnostics Electr. Mach. Power Electron. Drives, SDEMPED 2017 2017–Janua, 72–76. <https://doi.org/10.1109/DEMPED.2017.8062336>
- Constantin, A.I. and Firețeanu, V. (2015). Efficiency in the detection of three important faults in induction motors through external magnetic field. 2015 9th Int. Symp. Adv. Top. Electr. Eng. ATEE 2015 430–435. <https://doi.org/10.1109/ATEE.2015.7133843>
- Haroun, S., Seghir, A.N. and Touati, S., Hamdani, S. (2015). Misalignment fault detection and diagnosis using AR model of torque signal. Proc. - SDEMPED 2015 IEEE 10th Int. Symp. Diagnostics Electr. Mach. Power Electron. Drives 322–326.

<https://doi.org/10.1109/DEMPED.2015.7303709>

- Krishna, M.S.R. and Kishan, S.H. (2013). Neural network for the diagnosis of rotor broken faults of induction motors using MCSA. 7th Int. Conf. Intell. Syst. Control. ISCO 2013 133–137. <https://doi.org/10.1109/ISCO.2013.6481136>
- Filho, P.C.M.L., Santos, D.C., Batista, F.B., Baccarini, L.M.R. (2020). Axial Stray Flux Sensor proposal for Three-Phase Induction Motor Fault Monitoring by means of orbital analysis. IEEE Sens. J. 1–1. <https://doi.org/10.1109/jsen.2020.2999547>
- Lamim Filho, P.C.M., Pederiva, R. and Brito, J.N. (2014). Detection of stator winding faults in induction machines using flux and vibration analysis. Mech. Syst. Signal Process. 42, 377–387. <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2013.08.033>
- Lashkari, N. and Poshtan, J. (2015). Detection and discrimination of stator interturn fault and unbalanced supply voltage fault in induction motor using neural network. 6th Annu. Int. Power Electron. Drive Syst. Technol. Conf. PEDSTC 2015 275–280. <https://doi.org/10.1109/PEDSTC.2015.7093287>
- Malekpour, M., Phung, B.T. and Ambikairajah, E. (2017). An envelope-based method with second order generalized integrator adaptive notch filter for diagnosis of rotor bar breakage at very low slips 1–7. <https://doi.org/10.1109/demped.2017.8114319>
- Martinez-Roman, J., Puche-Panadero, R., Kanovic, Z., Sapena-Bano, A., Pineda-Sanchez, M., 2015. Low-Cost Diagnosis of Rotor Asymmetries in Induction Machines Working at a Very Low Slip Using the Reduced Envelope of the Stator Current. IEEE Trans. Energy Convers. 30, 1409–1419. <https://doi.org/10.1109/tec.2015.2445216>
- Noureddine, B., Eddine, Z.S., Mohamed, S. (2016). Experimental exploitation for the diagnosis to the induction machine under a bearing fault - Using MCSA. 2015 4th Int. Conf. Electr. Eng. ICEE 2015. <https://doi.org/10.1109/INTEE.2015.7416710>
- Panagiotou, P.A., Arvanitakis, I., Lophitis, N., Gyftakis, K.N., (2018). FEM Study of Induction Machines Suffering from Rotor Electrical Faults Using Stray Flux Signature Analysis. Proc. - 2018 23rd Int. Conf. Electr. Mach. ICEM 2018 1861–1867. <https://doi.org/10.1109/ICELMACH.2018.8506707>
- Park, Y., Yang, C., Kim, J., Kim, H., Lee, S. Bin, Gyftakis, K.N., Panagiotou, P.A., Kia, S.H., Capolino, G.A. (2019). Stray flux monitoring for reliable detection of rotor faults under the influence of rotor axial air ducts. IEEE Trans. Ind. Electron. 66, 7561–7570. <https://doi.org/10.1109/TIE.2018.2880670>
- Pastor-Osorio, P.A., Antonino-Daviu, J., Quijano-Lopez, A., (2019). Misalignment and rotor fault severity indicators based on the transient DWT analysis of stray flux signals. 2019 IEEE Energy Convers. Congr. Expo. ECCE 2019 3867–3871. <https://doi.org/10.1109/ECCE.2019.8913014>
- Refaat, S.S., Abu-Rub, H., Saad, M.S., Aboul-Zahab, E.M., Iqbal, A. (2013). Discrimination of stator winding turn fault and unbalanced supply voltage in permanent magnet synchronous motor using ANN. Int. Conf. Power Eng. Energy Electr. Drives 858–863. <https://doi.org/10.1109/PowerEng.2013.6635722>
- Romary, R., Pusca, R., Lecointe, J.P., Brudny, J.F. (2013). Electrical machines fault diagnosis by stray flux analysis. Proc. - 2013 IEEE Work. Electr. Mach. Des. Control Diagnosis, WEMDCD 2013 247–256. <https://doi.org/10.1109/WEMDCD.2013.6525184>
- Sakhalkar, N.P., Korde, P. (2018). Fault detection in induction motors based on motor current signature analysis and accelerometer. 2017 Int. Conf. Energy, Commun. Data Anal. Soft Comput. ICECDS 2017 363–367. <https://doi.org/10.1109/ICECDS.2017.8390117>
- Salem, S. Ben, Salah, M., Touti, W., Bacha, K., Chaari, A. (2017). Stray Flux analysis for monitoring eccentricity faults in induction motors: Experimental study. 2017 Int. Conf. Control. Autom. Diagnosis, ICCAD 2017 292–297. <https://doi.org/10.1109/CADIAG.2017.8075673>
- SENAI - Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial (2010). Alinhamento de Máquinas Rotativas. 3–21.
- Sousa, K.M., Dreyer, U.J., Martelli, C., Cardozo Da Silva, J.C. (2016). Dynamic Eccentricity Induced in Induction Motor Detected by Optical Fiber Bragg Grating Strain Sensors. IEEE Sens. J. 16, 4786–4792. <https://doi.org/10.1109/JSEN.2016.2554885>
- Verucchi, C., Bossio, J., Bossio, G., Acosta, G. (2016). Misalignment detection in induction motors with flexible coupling by means of estimated torque analysis and MCSA. Mech. Syst. Signal Process. 80, 570–581. <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2016.04.035>
- Williams, J.E. (1954). Operation of 3-Phase Induction Motors Voltages. AIEE Trans. pt. III-A, Power Appar. Syst. 73 125–133 73, 125–133.
- Zayed, A.I. (1998). Hubert transform associated with the fractional fourier transform. IEEE Signal Process. Lett. 5, 206–208. <https://doi.org/10.1109/97.704973>