



COMPARAÇÃO ENTRE OS MÉTODOS DE DETERMINAÇÃO DO DESEQUILÍBRIO DE TENSÃO ATRAVÉS DE ENSAIOS REALIZADOS EM MOTORES DE INDUÇÃO TRIFÁSICOS

Cássio Alves de Oliveira*¹, Marcos José de Moraes Filho^{1,2}, Vinícius Marcos Pinheiro¹, Bruno Lemos Neves¹, Augusto Wohlgemuth Fleury Veloso da Silveira¹, Luciano Coutinho Gomes¹

¹FEELT – Universidade Federal de Uberlândia

²SENAI – Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial

Resumo – Este trabalho apresenta um estudo a respeito de motores de indução trifásicos alimentados por tensões desequilibradas. Os ensaios foram realizados em uma plataforma experimental que permite a análise de motores de até 5 CV. São abordados os métodos de determinação do fator de desequilíbrio, além da apresentação dos resultados experimentais para ensaios com desequilíbrio em amplitude e ângulo de fase.

Palavras-Chave – Motores de indução trifásicos, plataforma experimental, desequilíbrio de tensão, ensaios.

COMPARISON BETWEEN UNBALANCED VOLTAGE METHODS CALCULATION THROUGH TESTS ON THREE-PHASE INDUCION MOTORS

Abstract – This paper presents a study about three-phase induction motors fed by unbalanced voltages. The tests were carried out on a test bench that allows the analysis of motors until 5 CV. Methods to determine unbalance factor are discussed, in addition to experimental results for tests with unbalance caused by amplitude and angle phase.

Keywords – Three-phase induction motors, test bench, unbalanced voltage, tests.

I. INTRODUÇÃO

Essenciais nos processos industriais, os motores elétricos movimentam todo tipo de máquinas e equipamentos. Estima-se que, no mundo, existam mais de 300 milhões de motores, que consomem o equivalente a aproximadamente 40% da produção mundial de energia elétrica [1]. O motor de indução trifásico (MIT) é considerado o principal equipamento de transformação de energia elétrica em energia mecânica motriz [2] e diversos motivos o tornam uma escolha viável: é uma máquina robusta, de baixo custo, fácil manutenção, elevada eficiência e adaptável a variadas situações de carga.

*cassio.alves.eng@outlook.com

A correta seleção de um motor elétrico para determinada aplicação é fator determinante no custo de sua operação. O uso de motores eficientes pode reduzir as perdas de carga, já que menor eficiência leva a custos operacionais mais elevados. Dessa forma, testes precisos e confiáveis de motores são essenciais. Para se medir com precisão a eficiência do motor, é necessário calcular as perdas e verificar parâmetros de projeto como, por exemplo, corrente, tensão, potência etc. [3].

A necessidade crescente de busca por processos mais econômicos, com utilização racional e eficiente da energia elétrica, tem implicado na realização de estudos detalhados para a otimização dos processos industriais [4]. As indústrias têm se esforçado para otimizar o tempo de operação dos processos produtivos e a identificação e correção de problemas elétricos e mecânicos associados às máquinas de indução são fundamentais para a elevação dos níveis de confiabilidade do sistema e para o aumento da capacidade operacional.

Os custos de manutenção podem ser mantidos em valores mínimos pela detecção antecipada de índices que possam levar à ocorrência de falhas em motores. Nestes casos, podem ser executados serviços de manutenção com menores custos, quando comparados aos elevados custos de manutenções corretivas, onde normalmente são exigidos reparos ou substituições de equipamentos ou componentes danificados [5].

Diante do cenário exposto, este trabalho apresenta a proposta de uma plataforma para ensaios de motores de indução trifásicos acoplados a cargas mecânicas para efetuar a medição e o monitoramento de parâmetros elétricos e mecânicos e analisar o seu desempenho em situações próximas àquelas encontradas em aplicações reais. Os ensaios abordados se referem a situações de tensões desequilibradas e podem fornecer informações a respeito do desempenho da máquina, indicar melhorias nas instalações e estabelecer melhor eficiência nas aplicações.

II. DESEQUILÍBRIO DE TENSÃO

No contexto do módulo 8 dos Procedimentos de Distribuição da Agência Nacional de Energia Elétrica (PRODIST/Aneel), o desequilíbrio de tensão pode ser

definido como um fenômeno caracterizado por qualquer diferença verificada nas amplitudes entre as três tensões de fase de um determinado sistema trifásico, e/ou na defasagem elétrica de 120° entre as tensões de fase do mesmo sistema.

O surgimento dos desequilíbrios está normalmente relacionado com a distribuição inadequada de cargas monofásicas no sistema de distribuição, que é trifásico, o que contribui para o surgimento de tensões de sequência negativa. Este problema também é agravado quando consumidores com alimentação trifásica possuem inadequada distribuição das cargas em seu circuito interno.

Outros fatores que contribuem para o aparecimento das tensões desequilibradas são: assimetria nas impedâncias dos enrolamentos de um transformador trifásico, transposição incorreta de linhas de transmissão, motores elétricos trifásicos que possuem impedâncias desequilibradas etc. [6].

Em motores de indução, os desequilíbrios de tensão provocam fluxos desbalanceados de correntes, que resultam no surgimento de correntes de sequência negativa, originando, entre outras complicações:

- Aumento das perdas no estator, no rotor e no ferro;
- Sobreaquecimento da máquina, o que pode resultar em redução da vida útil;
- Oscilações de conjugado;
- Aumento no custo com manutenções.

A Tabela I apresenta os limites para o indicador de desequilíbrio de tensão, de acordo com o módulo 8 do PRODIST. Tais limites correspondem ao máximo valor a ser observado no sistema de distribuição.

Tabela I: Limites para os desequilíbrios de tensão.

Indicador	Tensão nominal	
	$V_n \leq 1,0 \text{ kV}$	$1 \text{ kV} < V_n < 230 \text{ kV}$
FD95%	3,0%	2,0%

Na Tabela I, o termo FD95% indica o valor do fator de desequilíbrio que foi superado em apenas 5% em 1008 leituras válidas.

A. Métodos de determinação do desequilíbrio

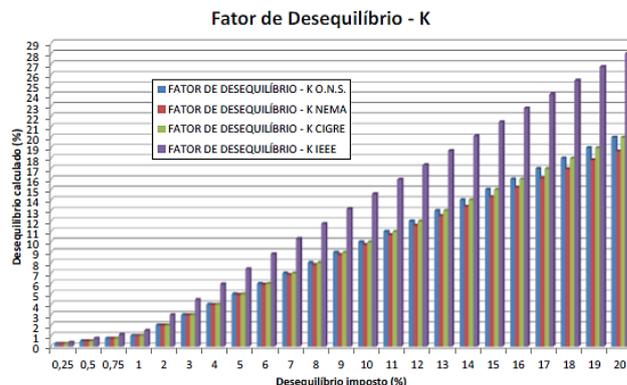
São conhecidos quatro métodos para a determinação do desequilíbrio de tensão: o método das componentes simétricas, o método CIGRÉ, o método NEMA (*National Electrical Manufacturers Association of USA*) e o método IEEE (*Institute of Electrical and Electronic Engineers*). As metodologias são baseadas em estudos efetuados por órgãos nacionais e internacionais com base em indicadores de qualidade de energia elétrica.

A Figura 1, retirada de [7], apresenta um gráfico com resultados obtidos para cada um dos métodos de determinação de desequilíbrio, onde K representa o fator de desequilíbrio e ONS se refere ao Operador Nacional do Sistema Elétrico, órgão responsável pela coordenação e controle do sistema elétrico, e que observa os procedimentos definidos no módulo 8 do PRODIST, sob supervisão da Aneel.

Os resultados exibidos na Figura 1 foram obtidos utilizando-se os mesmos valores de tensão referentes a um nível de desequilíbrio imposto. É possível observar a discrepância entre os valores calculados pelo método IEEE em

comparação com os demais, à medida em que se aumenta o desequilíbrio imposto.

Figura 1: Fator de desequilíbrio de tensão calculado em função do desequilíbrio imposto [7].



1) Método das componentes simétricas

Indicado pelo PRODIST para a determinação do fator de desequilíbrio, o método das componentes simétricas trata da decomposição das tensões desequilibradas em três sequências equilibradas: sequência positiva (representada por três fasores equilibrados com sequência de fase ABC), sequência negativa (com fasores equilibrados, porém na sequência ACB) e sequência zero (representada por três fasores equilibrados e sem defasamento entre si).

A conexão dos motores de indução trifásicos é realizada em triângulo (ou delta) ou em estrela não-aterrada. Dessa forma, embora existam tensões de sequência zero em condições de desequilíbrio, as correntes resultantes serão nulas, devido ao fato de não existir caminho para a circulação dessas correntes. Portanto, as componentes de sequência zero do fluxo magnético se anulam no entreferro para a máquina trifásica simétrica, não produzindo efeito no rotor [8]. Consequentemente, a expressão para o cálculo do desequilíbrio de tensão relaciona apenas as componentes de sequência positiva e negativa:

$$FD\% = \frac{V_-}{V_+} \cdot 100 \quad (1)$$

Onde:

FD – Fator de desequilíbrio de tensão.

V_- – Magnitude da tensão eficaz de sequência negativa.

V_+ – Magnitude da tensão eficaz de sequência positiva.

2) Método CIGRÉ

Também indicado como alternativa pelo PRODIST, o método CIGRÉ utiliza uma série de manipulações algébricas para expressar o desequilíbrio a partir dos módulos das tensões de linha:

$$FD\% = \frac{1 - \sqrt{3 - 6\beta}}{1 + \sqrt{3 - 6\beta}} \cdot 100 \quad (2)$$

$$\beta = \frac{V_{ab}^4 + V_{bc}^4 + V_{ca}^4}{(V_{ab}^2 + V_{bc}^2 + V_{ca}^2)^2} \quad (3)$$

Onde:

V_{ab} , V_{bc} e V_{ca} – Magnitudes das tensões eficazes de linha.

3) Método NEMA

O método NEMA analisa o desvio das tensões de linha em relação ao seu valor médio:

$$FD\% = \frac{\Delta V}{V_m} \cdot 100 \quad (4)$$

Onde:

ΔV – Máximo desvio da tensão de linha em relação ao valor médio.

V_m – Média aritmética dos módulos das tensões de linha.

4) Método IEEE

O IEEE define o fator de desequilíbrio como sendo a razão da diferença entre o maior e o menor valor dos módulos das tensões de linha e a sua média aritmética:

$$FD\% = \frac{(V_{m\acute{a}x} - V_{m\acute{i}n})}{\frac{(V_{ab} + V_{bc} + V_{ca})}{3}} \cdot 100 \quad (5)$$

Onde:

$V_{m\acute{a}x}$ – Maior valor dentre os módulos das tensões de linha.

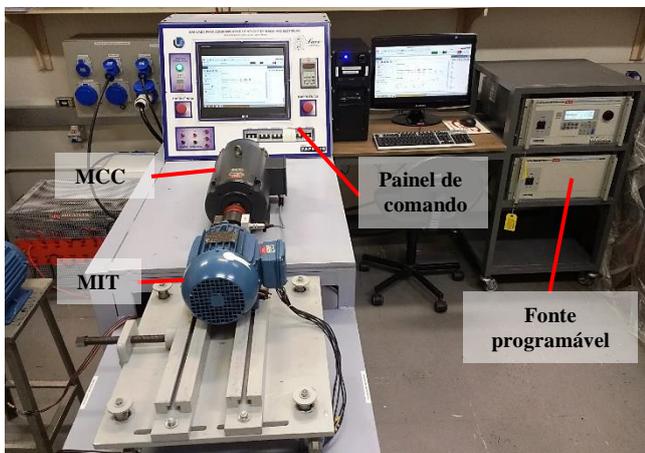
$V_{m\acute{i}n}$ – Menor valor dentre os módulos das tensões de linha.

III. PRINCIPAIS ELEMENTOS DA PLATAFORMA EXPERIMENTAL

A plataforma experimental, apresentada na Figura 2, foi desenvolvida de forma a viabilizar a análise do desempenho de motores de indução trifásicos por meio de ensaios diversos. Com a finalidade de facilitar a manipulação de todos os equipamentos necessários à realização dos trabalhos, toda a planta foi acomodada em uma bancada que conta com os principais dispositivos de proteção contra eventuais falhas que possam ocorrer durante a realização dos ensaios.

A base estrutural metálica da bancada foi idealizada para ensaios de motores com potências de até 5 CV com diversos tipos de carcaças, uma vez que ela permite o ajuste de posicionamento do motor sob teste de acordo com o seu tamanho. A base possui chapas de aço carbono com espessura de meia polegada, cuja finalidade é reduzir a vibração do sistema quando em funcionamento.

Figura 2: A plataforma de ensaios.



A bancada permite a conexão dos eixos das máquinas com diferentes alturas por meio de uma plataforma móvel regulada,

onde a máquina sob teste estará afixada. A estrutura possui pés de borracha ajustáveis para um melhor alinhamento com o piso, de forma a compensar pequenos desníveis.

Além do motor de indução trifásico, que é a máquina sob teste, integram a plataforma uma máquina de corrente contínua (MCC), um conversor CC-CC e uma fonte programável, cujas características principais são destacadas a seguir.

A. Máquina de Corrente Contínua

As máquinas de corrente contínua caracterizam-se por sua versatilidade. Por meio das diversas combinações, elas podem apresentar uma ampla variedade de características de tensão *versus* corrente ou de conjugado *versus* velocidade para operações dinâmicas e em regime permanente. Devido à facilidade com que podem ser controlados, sistemas de máquinas CC são utilizados com frequência em aplicações que exigem ampla faixa de velocidades ou de controle preciso da saída do motor.

Recentemente, a tecnologia de estado sólido que é utilizada nos acionamentos em corrente alternada desenvolveu-se o suficiente para que esses sistemas estejam substituindo as máquinas CC em aplicações quase que exclusivamente relacionadas a estas. Entretanto, a flexibilidade das máquinas CC, associada à simplicidade de seus sistemas de acionamento, irá assegurar o seu uso continuado em uma ampla variedade de aplicações [9].

O enrolamento de campo da MCC pode ser conectado de diferentes maneiras em relação ao enrolamento de armadura e cada configuração possui vantagens e desvantagens. Os sistemas de excitação podem ser:

- Em série: as correntes de campo e de armadura são iguais;
- Em paralelo: a tensão de campo e a tensão de terminal de armadura são iguais;
- Composta: utiliza conexão série e conexão paralela;
- Independente: os enrolamentos de campo e de armadura possuem alimentação separada.

A configuração em série foi, historicamente, a mais utilizada devido ao seu alto conjugado de partida. Com a evolução dos conversores eletrônicos de potência, a configuração independente tem sido empregada devido à maior facilidade na implementação de estratégias de controle [10].

O acionamento da máquina de corrente contínua em processos industriais é feito usualmente por meio do controle da tensão nos terminais da armadura, uma vez que essa estratégia permite ajustes relativamente rápidos, além de possibilitar o controle do conjugado através do controle da corrente de armadura.

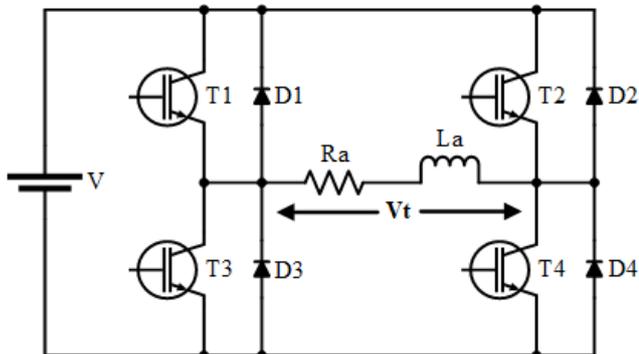
B. Conversor CC-CC classe E

O conversor CC-CC classe E opera nos quatro quadrantes do plano conjugado *versus* velocidade e a sua topologia está representada na Figura 3. A operação em quatro quadrantes permite aceleração e frenagem nos dois sentidos de rotação da máquina.

O par de transistores T1-T4 ou o par T2-T3 será acionado simultaneamente. Quando um par é desligado, a continuidade da corrente se dá pela condução dos diodos em antiparalelo

com o outro par, fazendo com que a tensão sobre os terminais da MCC se inverta. O retorno de energia para a fonte se dá pela absorção da energia acumulada na indutância de armadura e não pela diminuição da energia presente na massa girante acoplada ao eixo da máquina [10].

Figura 3: Topologia de um conversor CC-CC classe E.



O acionamento no primeiro e segundo quadrantes é feito quando se aplica sinal de comando simultâneo a T1 e T4, com T2 e T3 desligados. De forma equivalente, a operação no terceiro e no quarto quadrantes se dá quando um sinal de comando é aplicado a T2 e T3, deixando T1 e T4 desligados. A Figura 4 apresenta o conversor que integra a plataforma de ensaios.

O conversor CC-CC classe E permite a utilização da modulação por largura de pulso (*PWM – Pulse Width Modulation*) como estratégia para o chaveamento. Assim, a tensão média pode ser alterada de acordo com o intervalo de tempo no qual as chaves permanecem ligadas.

Figura 4: Módulo conversor CC-CC que integra a plataforma de ensaios.



C. Fonte programável

A fonte programável que integra a plataforma é desenvolvida pela AMETEK Programmable Power. É um equipamento de alta eficiência que fornece uma saída precisa, com baixa distorção. O modelo CSW5550 da marca California Instruments permite conexão em paralelo com até oito módulos do mesmo modelo para aumentar a potência de saída. O dispositivo possui ainda as interfaces remotas GPIB, RS232 e USB.

A programação da fonte pode ser feita através do teclado do painel frontal ou por meio de um *software* específico. Neste último caso, o fabricante fornece duas opções de interface para sistema operacional Windows. A programação via *software* oferece as vantagens do armazenamento das configurações para utilização futura.

A leitura de dados é mostrada no *display* do painel frontal da fonte programável ou por meio da tela do *software*. Além disso, a fonte dispõe também de opções para armazenar os dados de leitura em arquivo de texto com possibilidade de configuração do intervalo de tempo para atualização desses dados, à medida em que os ensaios vão sendo realizados.

IV. RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Na plataforma de ensaios, o motor de indução trifásico será acionado através da fonte programável. As principais características do MIT sob ensaio são apresentadas na Tabela II.

Tabela II: Características do MIT sob ensaio.

Motor de indução trifásico – Rotor em gaiola	
Fabricante	WEG
Potência de saída	2,2 (3,0) kW (cv)
Tensão (Δ/Y)	220 / 380 V
Corrente (Δ/Y)	8,39 / 4,86 A
Frequência	60 Hz
Velocidade mecânica	3450 rpm – 2 polos
Rendimento	81,9%
Fator de potência	0,84
Categoria	N

A máquina de corrente contínua com sistema de excitação independente é acoplada ao eixo do MIT e seu circuito de armadura é conectado ao conversor CC-CC e a um banco de resistências, configurando o funcionamento dessa máquina como gerador.

A. Ensaio com desequilíbrio de amplitude

Para o ensaio com desequilíbrio por amplitude, a fonte programável foi configurada para fornecer tensões com desequilíbrio em torno de 5% acima e abaixo da tensão fase-neutro nominal de alimentação. As leituras fornecidas pela fonte são apresentadas na Tabela III. O motor de indução trifásico foi acionado com carga nominal.

Tabela III: Ensaio com desequilíbrio de amplitude – resultados fornecidos pela fonte programável.

Fase	A	B	C
Frequência (Hz)	60	60	60
Tensão fase-neutro (V)	127	133	120
Ângulo de fase	0°	120°	240°
Corrente (A)	7,767	9,702	7,116
Potência (W)	653	1059	755
Fator de potência	0,66	0,82	0,89

É possível observar, através dos resultados apresentados na Tabela III, a distribuição não-uniforme das correntes em cada fase da máquina, o que provoca aquecimento desigual dos enrolamentos. A Figura 5 apresenta as formas de onda das correntes.

A Tabela IV apresenta a composição das tensões fase-fase para o cálculo do fator de desequilíbrio e a Tabela V apresenta os resultados para cada método de determinação apresentado.

Observando a Tabela V, é possível constatar que, pelo método das componentes simétricas, o fator de desequilíbrio encontrado se aproxima do percentual limite estabelecido pelo PRODIST, mas ainda dentro da faixa permitida para o valor

da tensão nominal. Com relação aos outros métodos de cálculo, o único a apresentar maior disparidade em relação aos demais foi o proposto pelo IEEE.

Figura 5: Ensaio com desequilíbrio de amplitude – forma de onda das correntes de linha.

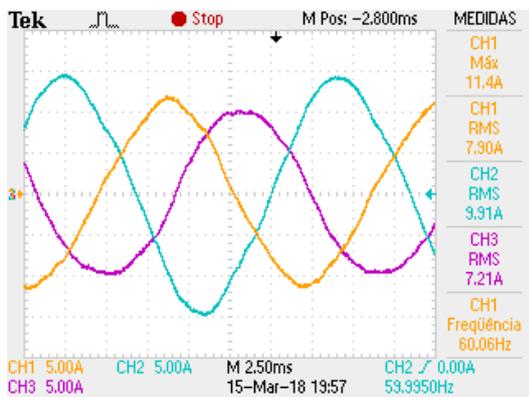


Tabela IV: Ensaio com desequilíbrio de amplitude – tensões fase-fase.

	V_{ac}	V_{cb}	V_{ba}
Tensão fase-fase (V)	213,937	219,201	225,187
Ângulo de fase	-162,936°	30°	-118,349°

Tabela V: Determinação do fator de desequilíbrio para cada método apresentado.

Método	FD%
Componentes simétricas	2,966
CIGRÉ	2,330
NEMA	2,618
IEEE	5,126

B. Ensaio com desequilíbrio de ângulo de fase

Na Tabela VI são mostrados os resultados fornecidos pela fonte programável para o ensaio com desequilíbrio de ângulo de fase. Os valores dos módulos das tensões foram mantidos constantes.

Tabela VI: Ensaio com desequilíbrio de ângulo de fase – resultados fornecidos pela fonte programável.

Fase	A	B	C
Frequência (Hz)	60	60	60
Tensão fase-neutro (V)	127	127	127
Ângulo de fase	0°	124°	237°
Corrente (A)	9,774	7,789	6,930
Potência (W)	953	876	625
Fator de potência	0,76	0,88	0,71

Para este ensaio, novamente é possível constatar a distribuição não-uniforme das correntes, conforme ilustra a Figura 6.

A Tabela VII apresenta a composição das tensões fase-fase para o cálculo do fator de desequilíbrio e a Tabela VIII apresenta os resultados para cada método de determinação apresentado.

Analisando a Tabela VIII, é possível constatar que, pelo método das componentes simétricas, o fator de desequilíbrio encontrado ultrapassa o percentual limite estabelecido pelo PRODIST, mas caso o método de cálculo seja o CIGRÉ, o

valor é mantido dentro da faixa permitida para a tensão nominal. Mais uma vez o método proposto pelo IEEE apresenta maior discrepância em relação aos demais.

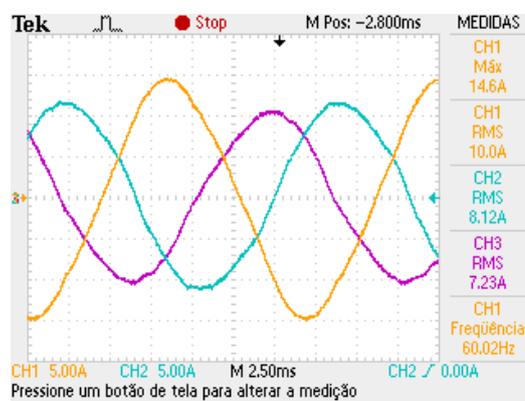
Tabela VII: Ensaio com desequilíbrio de ângulo de fase – tensões fase-fase.

	V_{ac}	V_{cb}	V_{ba}
Tensão fase-fase (V)	223,220	211,807	224,269
Ângulo de fase	28,5°	-89,5°	152°

Tabela VIII: Determinação do fator de desequilíbrio para cada método apresentado.

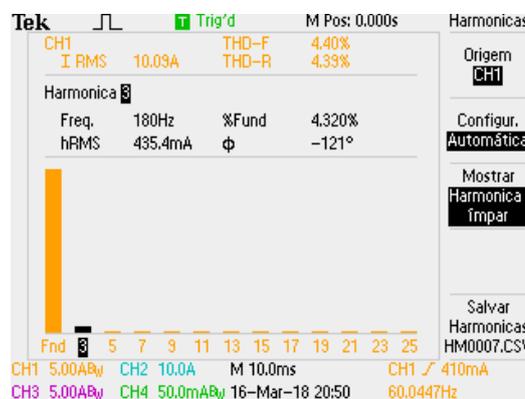
Método	FD%
Componentes simétricas	3,602
CIGRÉ	2,829
NEMA	3,621
IEEE	5,670

Figura 6: Ensaio com desequilíbrio de ângulo de fase – forma de onda das correntes de linha.

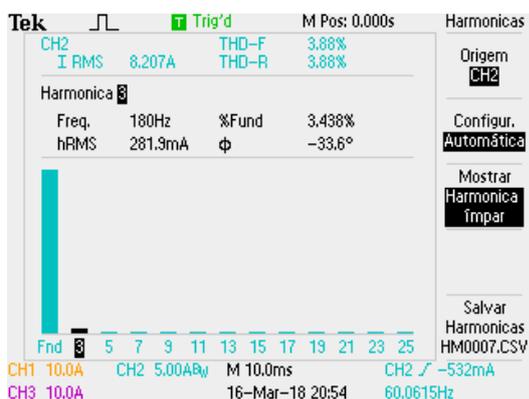


A Figura 7 mostra o espectro de harmônicos em cada fase para as correntes de linha. Os resultados indicam que desequilíbrios de tensão podem também ocasionar o surgimento de distorções harmônicas. No caso do ensaio em questão, destaca-se o maior percentual de harmônicos de terceira ordem.

Figura 7: Ensaio com desequilíbrio de ângulo de fase – espectro de harmônicos das correntes de linha: (a) fase A; (b) fase B; (c) fase C.



(a)



(b)



(c)

V. CONCLUSÕES

A plataforma experimental implementada contribui de forma continuada para ensaios com motores de indução trifásicos com potência de até 5 CV. A reprodução do seu funcionamento em situações próximas àquelas encontradas em aplicações reais, adequando o motor ao perfil de carga, permite efetuar a análise completa do seu desempenho.

O ensaio com inserção de desequilíbrios de tensão em amplitude e ângulo de fase atesta a versatilidade da plataforma para a investigação do funcionamento de motores de indução trifásicos em condições consideradas não ideais, mas que podem ocorrer em ambientes industriais, sendo que o desconhecimento dessas condições atípicas pode trazer severas avarias aos sistemas.

A plataforma experimental desenvolvida pode ser utilizada para ensaios com motores novos, rebobinados ou ainda os que já estão sendo utilizados por algum tempo nas instalações industriais. A garantia de motores eficientes em processos industriais reduz significativamente as perdas de carga e contribui para minimizar os custos operacionais e de manutenção, uma vez que a correta seleção do motor elétrico para determinada aplicação é fator determinante no custo de sua operação.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Uberlândia

pelo apoio, à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo permanente incentivo à pesquisa.

REFERÊNCIAS

- [1] Cartilha WEG (2017). *Gestão Eficiente da Energia Elétrica: Motores Elétricos, Inversores de Frequência e Geração Solar*. Acedido em 07 de Abril de 2018, em: <http://ecatalog.weg.net/files/wegnet/WEG-cartilha-weg-uso-eficiente-da-energia-eletrica-50030292-catalogo-portugues-br.pdf>.
- [2] W. F. Godoy, I. N. Silva, A. Goedel, R. H. C. Palácios and T. D. Lopes, "Application of intelligent tools to detect and classify broken rotor bars in three-phase induction motors fed by an inverter", *IET Electric Power Applications*, vol. 10, no. 5, pp. 430-439, June 2016.
- [3] T. Izhar, M. Ali and A. Nazir, "Development of a Motor Test Bench to Measure Electrical/Mechanical Parameters", *2017 International Conference on Energy Conservation and Efficiency (ICECE)*, November 2017.
- [4] S. F. Silva, *Identificação de Torque de Carga em Motores de Indução usando Abordagem Baseada em Sistemas Fuzzy*, Dissertação de Mestrado, Universidade de São Paulo, 2007.
- [5] R. Bulgarelli, *Proteção Térmica de Motores de Indução Trifásicos Industriais*, Dissertação de Mestrado, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2006.
- [6] A. B. F. Neves, *Análise dos Efeitos do Desequilíbrio e da Distorsão Harmônica de Tensão no Conjugado e no Rendimento de um Motor de Indução Trifásico*, Dissertação de Mestrado, Universidade de Brasília, 2018.
- [7] V. P. e Silva, *Análise Comparativa do Desempenho do Motor de Indução Trifásico de Alto Rendimento e Linha Padrão em Condições de Alimentação Ideal e não Ideal*, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Uberlândia, 2012.
- [8] P. H. O. Rezende, M. I. Samesima, *Efeitos do Desequilíbrio de Tensões de Suprimento nos Motores de Indução Trifásicos*, *Horizonte Científico*, vol. 6, no. 2, pp. 30. Acedido em 30 de Setembro de 2020, em: <http://www.seer.ufu.br/index.php/horizontecientifico/article/view/4473>.
- [9] S. D. Umans, *Máquinas Elétricas de Fitzgerald e Kingsley*, 7 ed., Porto Alegre, AMGH Editora Ltda., 2014.
- [10] J. A. Pomilio, *Eletrônica de Potência*. Acedido em 30 de Abril de 2018, em: <http://vm1-devel.fee.unicamp.br/feec/node/493>.
- [11] Agência Nacional de Energia Elétrica (2020), *Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST: Módulo 8 – Qualidade da Energia Elétrica*. Acedido em 30 de Setembro de 2020, em: https://www.aneel.gov.br/documents/656827/14866914/M%C3%B3dulo_8-Revis%C3%A3o_10/2f7cb862-e9d7-3295-729a-b619ac6baab9.