Por Juliana L. M. Iamamura, Bruno A. T. Iamamura, João A. V. Junior e Mateus D. Teixeira*

Capítulo VII

Diagnósticos e ensaios elétricos em motores industriais

Motores elétricos representam até 70% do consumo de energia de algumas indústrias no Brasil. Tal aspecto mostra a relevância desse equipamento para o setor industrial brasileiro, demandando preocupação com o correto dimensionamento, operação e manutenção de motores elétricos.

Entretanto, não é isso que se observa quando adentramos uma instalação elétrica industrial típica brasileira. Problemas como sobrecarga, vibração, qualidade de energia e má conservação são regras em diversos casos. Da mesma forma, os setores de operação e produção de uma grande empresa imperam sobre a área de manutenção, impedindo a realização de troca e manutenção coerente dos motores. Os resultados são altos custos de manutenção, queima de motores, problemas de aquecimento na instalação e elevada conta de energia elétrica.

Com respeito à manutenção de motores, o presente artigo apresenta alguns relevantes testes a serem executados no dia a dia da manutenção industrial que podem colaborar para a redução de queimas e consequente aumento de vida útil desses equipamentos.

Manutenção preditiva

Procedimentos para manutenção preditiva dos motores de indução trifásicos

A manutenção preditiva dos motores elétricos busca reconhecer o aparecimento de falhas em estágio inicial e identificar as máquinas que estão submetidas a condições de operação estressante e que possivelmente irão apresentar problemas, caso permaneçam operando sob tais condições. Assim, essas inspeções regulares visam a reduzir perdas com reparos e paradas não programadas.

O aquecimento excessivo dos motores de indução trifásicos está entre as principais causas de falhas desse equipamento. O fio esmaltado utilizado nas bobinas do estator degrada sua isolação elétrica de forma acelerada quando submetido a temperaturas acima dos limites especificados pelo fabricante, o que favorece a formação de curto-circuito entre as espiras da máquina ou com o estator. Se as bobinas do motor ficarem regularmente submetidas a uma temperatura de dez graus acima da especificada, sua vida útil reduz pela metade. Dessa forma, na manutenção preditiva é de suma importância monitorar os aspectos elétricos que podem levar a máquina ao sobreaquecimento.

Medição da tensão de alimentação

Um dos procedimentos em uma manutenção preditiva é verificar os níveis de tensão nas três fases de alimentação da máquina. Se estiverem desequilibradas ou abaixo dos valores nominais do motor, existe a possibilidade dessa rede elétrica levá-lo a um sobreaquecimento e redução da sua vida útil.

A redução da tensão de alimentação nas três fases implica em uma redução da corrente magnetizante e, por consequência, no fluxo magnético nas bobinas, o qual tende a reduzir o torque. Todavia, a máquina deve fornecer o torque solicitado pela carga e, para tanto, o motor de indução perde um pouco de velocidade e aumenta a corrente induzida no rotor, recompondo o torque pelo aumento da corrente. Esse aumento da corrente provoca o aumento das perdas no estator e no rotor da máquina e, por consequência, aquecimento e perda de eficiência.

A sobretensão nas três fases de forma equilibrada não é tão preocupante no aspecto de aquecimento como a redução da tensão. A corrente nas bobinas reduz, mas as perdas no material ferromagnético aumentam. Nessa condição de operação, a máquina não apresenta um aquecimento excessivo, mas a elevação da tensão de forma expressiva pode comprometer a rigidez dielétrica do esmalte isolante do fio condutor.

A tensão desequilibrada produz um desequilíbrio de corrente que pode comprometer o motor de indução no

aspecto de aquecimento e vibração. Um desequilíbrio de tensão de 1% pode provar um desequilíbrio de corrente superior a 5%. Uma corrente desequilibrada produz um fluxo girante com módulo variável que, por sua vez, provoca oscilações na força produzida no rotor, aumentando da vibração. Essas vibrações podem danificar os mancais e enrolamentos. O desequilíbrio da corrente também pode sobreaquecer um dos enrolamentos do motor.

Medição das correntes de alimentação do motor

A operação do motor com subtensão ou tensão desequilibrada não significa que o motor está em uma condição de sobreaquecimento, pois se o carregamento do motor não estiver próximo do nominal, a corrente da máquina também não estará próxima da nominal e, mesmo sendo elevada por alguma característica da alimentação, ainda não alcança patamares comprometedores.

A medição de corrente de linha nos três fios de alimentação do motor trifásico é fundamental para avaliar a condição térmica que o motor está sendo submetido. Se a corrente estiver muito alta, mas equilibrada, o motor pode estar submetido a uma sobrecarga ou operando com um afundamento de tensão.

Caso a subtensão esteja elevando a corrente e produzindo um sobreaquecimento da máquina será necessário atuar na instalação elétrica (alterar o tap dos transformadores, redimensionar os condutores para reduzir a queda de tensão, instalar um banco de capacitores no ponto de conexão do motor).

Estando os níveis de tensão de alimentação adequados, se a corrente

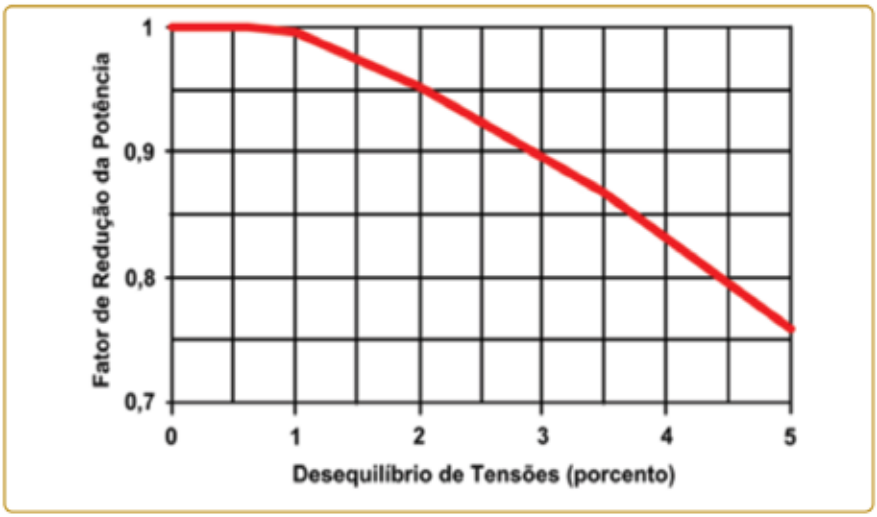

Figura 1 – Fator típico de redução da potência útil devido a um sistema de tensões desequilibrado.

estiver muito alta, o motor está submetido a uma sobrecarga. Se essa sobrecarga estiver excedendo o fator de serviço da máquina, ela vai sobreaquecer e sua vida útil será comprometida. Na situação de sobrecarga, a solução é especificar outro motor de maior potência.

Caso as correntes apresentem um desequilíbrio, a norma ABNT NBR 17094 recomenda reduzir a potência útil do motor para evitar sobreaquecimento, conforme mostra a Figura 1.

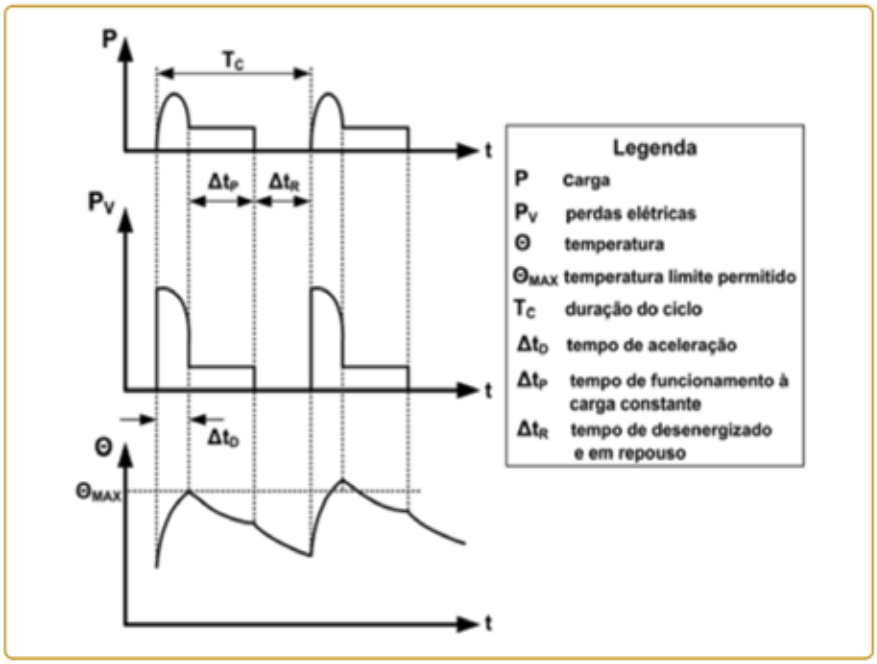

Figura 2 – Regime intermitente com partidas.

Regime de operação

O transitório de partida do motor de indução é uma condição estressante para a máquina, visto que a corrente chega a ser várias vezes superior à nominal. Assim, é importante verificar se esse transitório não está sendo muito longo ou se a periodicidade das partidas não está condizente com o tipo de regime da máquina.

A Figura 2 mostra um regime de partida da máquina no qual a temperatura ultrapassa o limite permitido devido a sucessivas partidas, cujo tempo de funcionamento com carga constante (Δt_P) e o tempo de repouso (Δt_R) não são suficientes para o esfriamento do motor. Isso pode ocorrer quando o motor é especificado para um regime de operação e passa a operar em condição mais estressante. Nesse caso, é necessário especificar um motor que suporte esse novo regime de operação.

Se o tempo de aceleração (Δt_D) estiver muito longo devido à carga com inércia elevada, o motor também pode sofrer um sobreaquecimento. A especificação de um motor de maior potência é necessária para reduzir o transitório de partida.

Rendimento

A redução do rendimento do motor é um importante indicador de que a máquina está com problemas. Assim, será apresentada uma metodologia para estimar o rendimento da máquina. Na Figura 3 percebe-se que o torque varia de forma praticamente linear com a velocidade angular no eixo do motor, quando operando com baixo escorregamento.

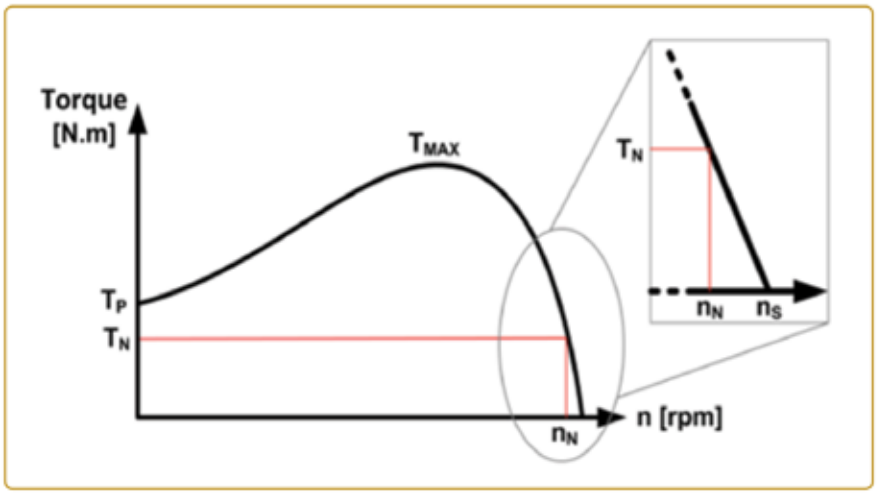

Figura 3 – Curva de torque do motor de indução em função da velocidade.

Para o cálculo aproximado do rendimento é necessário medir a potência ativa na entrada do motor (PIN) e a velocidade no eixo (n). Dados de placa como velocidade nominal (nN), velocidade síncrona (nS) e potência útil nominal (PN) também são necessários. De posse desses dados pode-se utilizar a equação a seguir para calcular o rendimento aproximado.

$$\eta = \frac{P_N \cdot \frac{n}{n_N} \cdot \frac{(n_S - n)}{(n_S - n_N)}}{P_{in}}$$

Caso o motor esteja operando próximo da condição nominal, o rendimento deve estar próximo do especificado pelo fabricante; se o rendimento estiver baixo, uma avaliação mais detalhada do motor deve ser realizada. Quando o motor está operando em uma condição de baixo carregamento, o rendimento é comprometido pela inadequada especificação da máquina.

Medição da resistência do enrolamento do estator

A resistência das fases individuais pode ser medida usando uma ponte convencional. Desequilíbrios pequenos, como 1%, podem representar problemas, como fixação de solda, o que pode levar a uma falha rápida e catastrófica. Desequilíbrios maiores podem representar que o enrolamento de estator pode estar desconectado do sistema. A

resistência do enrolamento, que varia com o projeto da máquina, também pode representar um enrolamento impropriamente conectado.

Medição da resistência de isolamento (RI)

Os testes de medição da resistência de isolamento são provavelmente os testes de diagnóstico mais utilizados para verificação das condições dos enrolamentos do estator de motores elétricos. Este teste consegue identificar com sucesso problemas de poluição e contaminação na isolação dos enrolamentos do estator. Em motores mais antigos, o teste também pode detectar isolamentos termicamente deteriorados. Os testes de resistência de isolamento são utilizados há mais de 70 anos e são realizados com megômetros.

O teste mede a resistência do isolamento elétrico entre os condutores de cobre e o núcleo do estator (Figura 4). Idealmente, essa resistência é infinita, pois o objetivo do isolamento é bloquear o fluxo de corrente entre o cobre e o núcleo. Na prática, a resistência não é infinitamente alta. Geralmente, quanto menor a resistência de isolamento, mais provável é que haja um problema com o isolamento.

A grande desvantagem da medição da resistência de isolamento é que ela é muito dependente da temperatura. Um aumento de temperatura de 10 °C pode reduzir a resistência de isolamento de 5 a 10 vezes. Pior ainda, o efeito da temperatura é diferente para cada tipo material de isolamento e contaminação.

Para resolver este problema foi desenvolvida a medição do índice de polarização (PI), criado para tornar a interpretação menos sensível à temperatura. PI é uma proporção do IR em duas épocas diferentes. O PI é a razão do IR medido após a tensão ter sido aplicada durante 10 minutos (R10) ao IR medido após um minuto (R1).

$$PI = R_{10}/R_1$$

Se assumirmos que R10 e R1 foram medidos com o enrolamento na mesma temperatura, o que geralmente é bastante razoável, então o "fator de correção de temperatura" será o mesmo para R1 e R10 e será distribuído. Assim, PI é relativamente insensível à temperatura.

Descargas parciais

As descargas parciais (PD) são pequenas descargas elétricas que ocorrem em enrolamentos do estator de máquinas elétricas convencionais alimentadas em 60 Hz, geralmente, em tensão superior a 1 kV, porém máquinas com tensões menores alimentadas por inversores de frequência tipo PWM também podem experimentar o fenômeno.

As descargas parciais são inexistentes ou desprezíveis em enrolamentos de estator bem fabricados e que estão em boas condições. No entanto, se existe algum problema com o isolamento do estator, ou o enrolamento se deteriorou devido ao superaquecimento, ao movimento da bobina ou à contaminação, então a PD ocorrerá.

Um teste PD mede os pulsos de corrente resultantes da PD dentro de um enrolamento. Há uma grande quantidade de métodos offline e online para quantificar a atividade PD, como testes de sonda TVA (corona), sonda ultrassônica e ultravioleta. A correta interpretação dos sinais de descargas parcias pode auxiliar na localização de defeitos bem como sua causa, porém, a mesma demanda ser realizada por profissional com grande conhecimento no assunto.

Vibração

Todos os motores elétricos produzem vibrações que são a imagem dos esforços mecânicos entre suas peças. Dessa forma, uma boa concepção de um motor em excelente estado de funcionamento produzirá muito poucas vibrações. Entretanto, a deterioração do funcionamento de um motor elétrico conduz normalmente a um aumento dos níveis de vibração e o seu estudo permite obter informações muito úteis sobre a saúde do motor. A modificação da vibração de um motor constitui uma das primeiras manifestações físicas de uma anomalia, o que pode resultar em degradações e, talvez, em uma pane.

Logo, a análise da vibração do motor é um dos parâmetros a ser privilegiados em uma manutenção preventiva destes equipamentos. Além de detectar um possível defeito, o emprego de técnicas de manutenção através da análise vibratória permite o acompanhamento da evolução de certas falhas. Assim, é possível reparar um motor somente no bom momento, quando estão programadas as paradas de produção, ou ainda quando uma peça de reposição está disponível. Outra vantagem que podemos destacar é que o método utilizado para medir a vibração

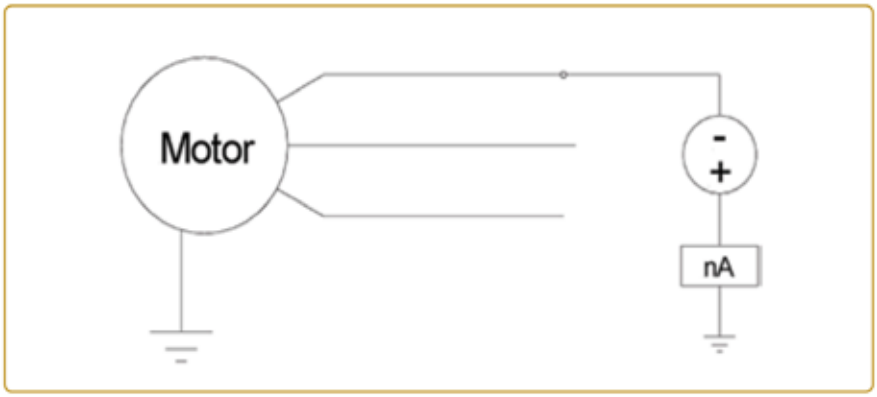

Figura 4 - Conexão de fonte DC de alta tensão e amperímetro (nA) para medir a resistência de isolamento entre o revestimento de bobina do e o núcleo do estator [6].

é não invasivo, podendo até utilizar sensores sem contato. Isto permite que as medidas possam ser realizadas sem que o motor seja retirado do seu funcionamento normal.

Um sistema mecânico é considerado em vibração quando ele possui um movimento de vai e vem em torno de uma posição de equilíbrio. Para medir uma vibração, pode-se pensar em um primeiro momento em utilizar o tato ou ainda o ouvido. Contudo, estas técnicas são limitadas pela precisão dos sentidos humanos. Este é o motivo pelo qual é preferível utilizar uma sonda de vibração. O objetivo desta sonda é transformar a vibração em um sinal elétrico utilizável.

Uma análise vibratória detalhada de um sistema mecânico pode ser obtida através de uma análise de forma de deflexão operacional (ODS – Operating Deflaction Shape). Nesta análise é possível saber quais são as deformações que ocorrem relacionadas a cada frequência. Além disso, é possível identificar as frequências com maior vibração e, ainda, localizar os pontos na estrutura onde ela é mais prejudicial. Contudo, para efetuar uma análise de forma de deflexão operacional, é necessário dispor de ao menos dois sensores de vibração, um bom material eletrônico para a aquisição dos dados e de um software para a compilação destes dados. Além de estes equipamentos serem onerosos, é necessária uma pessoa especializada para realizar a análise corretamente.

Dessa forma, será apresentada nesta seção uma compilação de técnicas mais simples de análise vibratória aplicada a motores de indução trifásicos, utilizando apenas um sensor de vibração. É evidente que este tipo de análise resulta em um estudo menos detalhado do que uma ODS, porém, é mais abordável como uma primeira abordagem.

Para esta técnica de análise vibratória mais simples, normalmente utilizam-se acelerômetros piezoelétricos dispostos

o mais próximo possível dos mancais da máquina. Logo, deve-se evitar a região do meio da carcaça que não fica próxima aos mancais. A fixação dos acelerômetros deve ser feita sempre em partes rígidas da máquina, por exemplo, nunca na tampa do ventilador. Além disso, é importante efetuar ao menos duas medidas, uma para vibrações radiais e outra para vibrações axiais.

É interessante conhecer a frequência de ressonância destes sensores para saber qual é a máxima frequência que se pode analisar. Outra característica importante é a forma como o acelerômetro será fixado no motor, já que isto altera a frequência de ressonância do sistema. Uma forma muito simples e eficaz de se fixar os acelerômetros é utilizar colas instantâneas de cianoacrilato.

As três grandezas que podem ser medidas em uma vibração são: o deslocamento, a velocidade e a aceleração. A aceleração é mais comumente utilizada nestes tipos de análise. Porém, a representação deste sinal em função do tempo é difícil de ser estudada, logo, uma ferramenta matemática (Transformada de Fourier) permite transformar este sinal em um espectro das amplitudes do sinal em função da frequência. Como os sinais de vibrações dos motores elétricos são somas de várias senoides, o sinal que será analisado é uma sucessão de picos em diferentes frequências. Os picos observados não representam somente defeitos: como foi dito anteriormente, uma máquina sadia vibra.

Os defeitos elétricos traduzem-se normalmente por uma elevação do pico na frequência de duas vezes a frequência de alimentação. Logo, em uma alimentação a 60 Hz deve-se olhar o pico a 120 Hz. Para diagnosticar qual é o tipo de defeito elétrico, os outros tipos de ensaios propostos anteriormente são mais recomendados. É importante ressaltar que este pico existe normalmente.

Os defeitos de excentricidade ou de

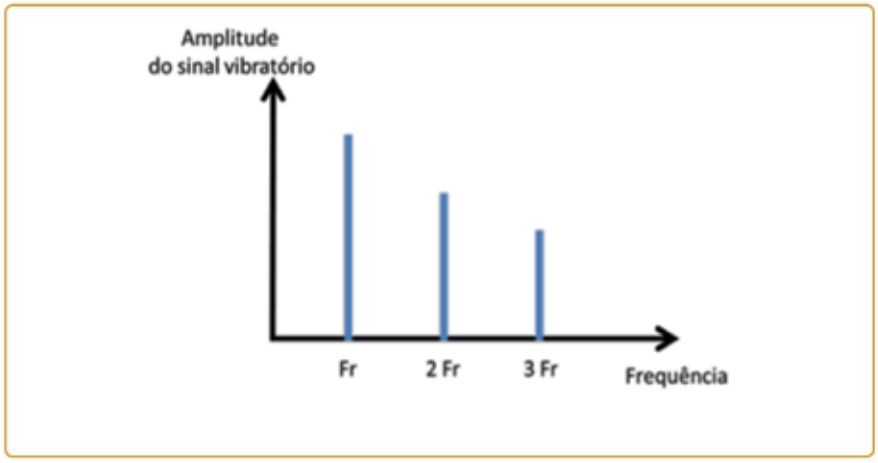

Figura 5 – Espectro típico de um defeito de excentricidade ou desequilíbrio.

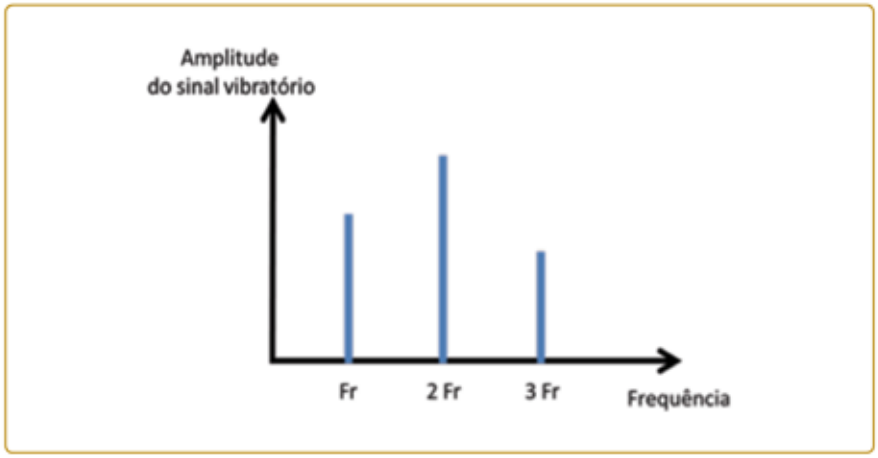

Figura 6 – Espectro típico de um desalinhamento entre eixos.

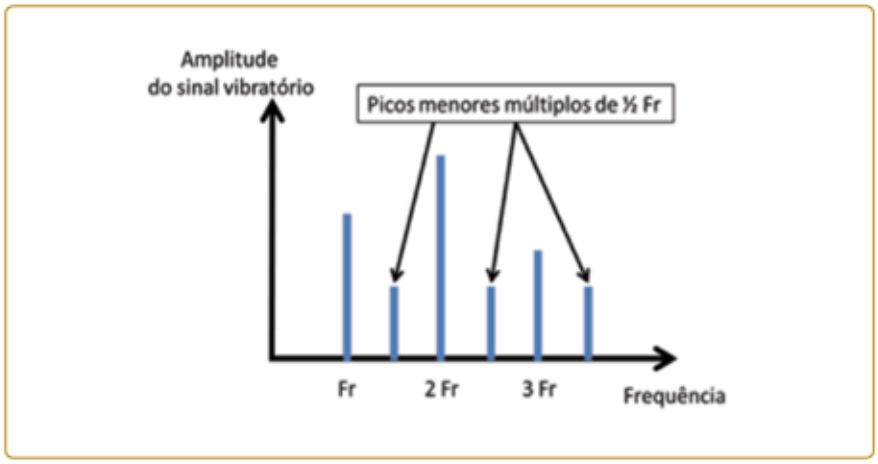

Figura 7 – Espectro típico de um jogo entre o eixo e os rolamentos.

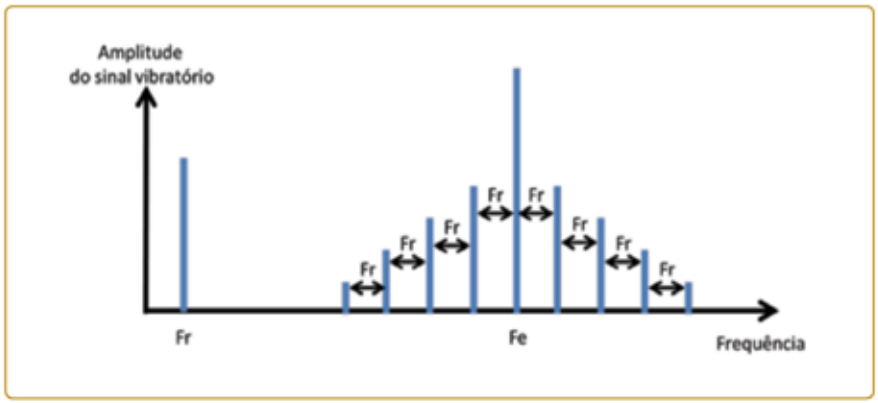

Figura 8 – Espectro típico de um problema nas engrenagens.

desequilíbrio do rotor vão induzir picos na frequência de rotação. Por exemplo, um motor girando a 1780 rpm terá picos na frequência de 1780 dividido por 60 segundos, ou seja, 29,67 Hz. Além disso, surgirão picos menores em frequências de duas e/ou três vezes a frequência de rotação. A figura a seguir ilustra um espectro de um defeito de excentricidade, em que Fr é a frequência de rotação. É evidente que nenhuma máquina é perfeitamente equilibrada, logo, sempre irão existir pequenos picos na frequência de rotação da máquina.

No caso de um motor acoplado pelo eixo, se houver um desalinhamento entre eixos, geralmente, o pico na frequência de duas vezes a frequência de rotação será maior que o pico da frequência de rotação. Às vezes, pode ocorrer de o maior pico acontecer em três ou quatro vezes a frequência de rotação, o que caracteriza também um desalinhamento entre eixos.

No caso em que o motor não está bem preso à fundação, ou ainda que haja um jogo entre o eixo e os rolamentos, surgirão, além de picos múltiplos da frequência de rotação, outros picos menores múltiplos de 1/2 ou 1/3 da frequência de rotação.

Em motores em que a transmissão se faz por correias, no caso de uma deterioração de uma parte da correia, haverá picos na frequência de rotação da correia. Uma análise da correia pode ser feita utilizando uma lâmpada estroboscópica.

Quando a transmissão da força nos motores é feita através de engrenagens, no caso de um defeito, os picos de vibração ocorrerão na frequência dos dentes das engrenagens e em seus múltiplos. Para se encontrar qual é esta frequência, basta multiplicar o número de dentes pela frequência de rotação do motor. A figura a seguir ilustra um espectro de um defeito de engrenagens, em que Fr é a frequência de rotação e Fe é a frequência das engrenagens.

Outro defeito bem comum em um motor de indução é o defeito nos rolamentos. Os defeitos mais comuns são na pista externa, na pista interna, nas esferas de aço ou ainda nos retentores das esferas. Se o defeito ocorrer em uma destas quatro partes citadas, podem-se calcular os picos das frequências de vibração, que serão mais importantes. Para estes cálculos é necessário conhecer alguns dados dos rolamentos utilizados, como: o número de esferas, o diâmetro interno, o diâmetro externo e o ângulo de contato das esferas.

Considerações finais

Conforme pode ser visto neste artigo a realização de alguns testes simples pode colaborar para a melhoria da vida útil e consequente redução de custos de manutenção e troca de motores elétricos na indústria.

Como visto, a maioria dos problemas que podem levar à falha de motores industriais pode ser encontrada por meio de uma variedade de testes elétricos. Nenhum teste irá encontrar todos os problemas que podem levar à falha do enrolamento. Para os estatores, os testes de sobretensão, de resistência de isolamento e de descarga parcial são as ferramentas mais importantes disponíveis, permitindo que muitos problemas sejam detectados durante o serviço normal do motor e, assim, facilitando a manutenção preditiva.

Referências

[1] Tahar Belkhir e Med Mohcen Ben Saci, "La maintenance des équipements par l'analyse vibratoire", Mémoire de fin d'etude, Université Kasdi Marbah Ourgla Faculté des Sciences Appliquées, 2016.

[2] Jean le Besnerais, Vincent Lanfranchi, Michel Hecquet e Pascal Brochet, "Bruit audible d'origine magnétique dans les machines asynchrones", Techniques de l'ingénieur, d3580, 2013.

[3] PSA Peugeot – Citroën, "Guide d'aide au suivi vibratoire des machines et installations industrielles", Guides des biens d'equipement, GE29-003G, 1992.

[4] Jacques Morel e Roger Chevalier, "Guide pour l'interpiretation des vibrations des machines tournantes", Tome 1, EDF - Electricité de France - Direction des Etudes et Recherches, Version 1, 1989.

[5] Hubert Faigner, "Stratégies de maintenance – La maintenance préventive", Notes de cours, 2014.

[6] G.C. Stone e I. Culbert. "Electrical Testing of Low and Medium Voltage Motors". Pulp and Paper Industry Technical Conference 2007. 24-28 June, 2007, Williamsburg, VA, USA

JULIANA LUÍSA MÜLLER IAMAMURA possui graduação, mestrado e doutorado em engenharia elétrica pela Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC). Atualmente, é professora adjunta na Universidade Federal do Paraná (UFPR). Atua principalmente com modelagem tridimensional, eletromagnetismo, diagnóstico de faltas e cálculo de perdas no ferro.

BRUNO AKIHIRO TANNO IAMAMURA possui graduação e mestrado em engenharia elétrica pela UFSC. Realizou doutorado em Engenharia Elétrica em cotutela pela UFSC e Université des Sciences et Technologies de Lille (França). Atualmente, é professor adjunto na Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

JOÃO AMÉRICO VILELA JÚNIOR possui graduação e mestrado em engenharia elétrica pela UFU e doutorado em engenharia elétrica pela UFSC. Atualmente, é professor adjunto da UFPR. Tem experiência na área de engenharia elétrica, com ênfase em eletrônica de potência e máquinas elétricas.

MATEUS DUARTE TEIXEIRA é graduado em engenharia industrial elétrica pela UFSJ, com mestrado em engenharia elétrica pela UFU e doutorado em engenharia dos materiais pela UFPR. É pesquisador dos Institutos Lactec e professor da UFPR. Também ocupa a vice-presidência da SBQEE.

CONTINUA NA PRÓXIMA EDIÇÃO

Acompanhe todos os artigos deste fascículo em www.osetoreletrico.com.br

Dúvidas, sugestões e outros comentários podem ser encaminhados para redacao@atitudeeditorial.com.br