



INTEGRAÇÃO DE TECNOLOGIAS PARA DIAGNÓSTICO DE FALHAS EM MOTORES DE INDUÇÃO TRIFÁSICOS

Jorge Nei Brito

FUNREI - Praça Frei Orlando, 170 - São João del Rei - MG - 36307-352 - brito@funrei.br

Paulo César Monteiro Lamim Filho

UNICAMP - Caixa Postal 6051 - Campinas - SP - 13083-970 - lamim@fem.unicamp.br

Lane Maria Rabelo Baccarini

FUNREI - Praça Frei Orlando, 170 - São João del Rei - MG - 36307-352 - rabelo@funrei.br

Pedro Alcântara S. Alvares

Vitek Consultoria Ltda. - Belo Horizonte - MG - pedro@vitek.com.br

***Resumo.** Neste trabalho apresenta-se a implantação do Programa de Manutenção Preditiva na Planta Motor Fire, da FIAT Automóveis, Betim, Minas Gerais. Fez-se o levantamento das linhas bases (bases lines) dos motores de indução trifásicos através da integração de seis tecnologias preditivas: análise de vibração, análise de corrente, análise de fluxo magnético, análise de corrente/tensão parasita, termografia infravermelha e termometria. Através do acompanhamento dessas linhas bases é possível minimizar os custos de manutenção eletromecânica e maximizar a disponibilidade dos equipamentos assistidos, evitando-se falhas prematuras.*

***Palavras-chave:** Motores Elétricos, Falhas Incipientes, Manutenção Preditiva, Motor Fire.*

1. INTRODUÇÃO

A aplicação dos motores elétricos nas plantas industriais tem crescido consideravelmente. Fazer com que o seu uso seja o mais eficiente possível é uma tarefa difícil. Porém, alcançando este objetivo, os resultados são extremamente significativos.

A detecção de falhas em motores elétricos têm chamado a atenção da indústria nos últimos anos. Predizer suas falhas pode significar um aumento da segurança, confiabilidade e resultados econômicos surpreendentes. É necessário conhecer e maximizar suas funções operacionais e entender e minimizar os efeitos dinâmicos e eletromagnéticos que comprometem a vida útil dos motores elétricos. Isto permitirá incluí-los num Programa de Manutenção Preditiva baseado em Confiabilidade.

Cameron *et al.* (1986) desenvolveram no *Robert Gordon Institute of Technology*, Inglaterra, pesquisas que resultaram em expressões para as frequências das vibrações de origem elétrica no estator de um motor de indução trifásico.

Bowers e Davis (1996) desenvolveram no *Coputational Systems Incorporated*, E.U.A, pesquisas que mostravam o benefício de se incluir as tecnologias de medição de temperatura, análise de fluxo e análise de corrente/tensão parasita na monitoração de motores elétricos de indução.

Bowers e Davis (1996) desenvolveram, no *Coputational Systems Incorporated*, E.U.A, o estudo da integração das tecnologias de temperatura e fluxo magnético para detectar e prevenir as falhas de origem mecânica e elétrica em motores de indução trifásicos.

2. VISÃO GLOBAL DAS TÉCNICAS PREDITIVAS

A instrumentação básica corresponde:

- micro computador portátil com os *softwares* necessários à realização dos trabalhos;
- *software* de gerenciamento de dados *CSI Motor View* e *CSI InfrAnalysis*;
- coletor de dados/analizador de sinais dinâmicos *CSI 2120* de um canal, memória ilimitada (cartões), 6400 linhas de resolução, *zoom* (800 linhas), frequência máxima de 40 kHz, capacidade dinâmica maior que 90 dB, analógico/digital.

2.1. Análise de Vibração

Os espectro de vibração dos motores elétricos foram coletados através do acelerômetro, modelo 361B. A análise de vibração geralmente é aplicada para diagnosticar falhas de origens mecânicas (folga mecânica, desbalanceamento, desalinhamento; etc.). Os espectros são coletados, preferencialmente, nos dois lados do motor (*LAA* - lado do acoplamento e *LOA* - lado oposto ao acoplamento) e nas três direções (*V* - vertical, *H* - horizontal e *A* - axial), num total de seis medições para cada coleta. Neste caso específico, os sinais foram coletados em um único ponto (posição vertical, lado oposto ao acoplamento), com o objetivo de verificar a presença de amplitudes em duas vezes a frequência de linha ($2 \times f_1 = 120 \text{ Hz}$). Esta frequência é características de falhas de origem elétrica.

Na Fig. (2), tem-se os espectros de vibração dos motores elétricos da bomba de alta pressão, pertencentes ao *Grupo II*. Na Tab. (2) tem-se as suas frequências e amplitudes.

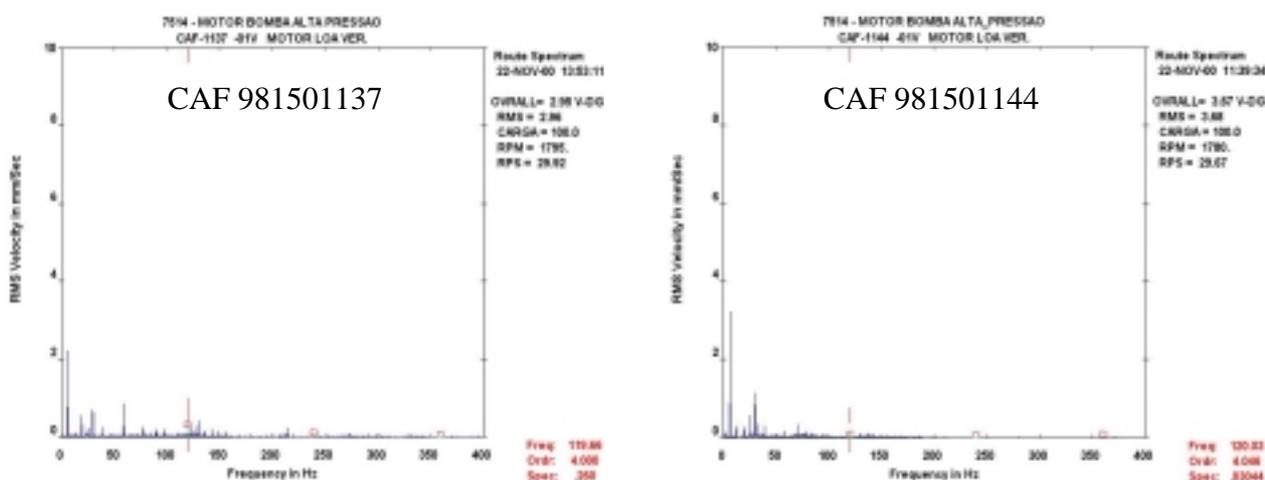


Figura 2. Espectros de vibração dos motores elétricos da bomba de alta pressão, *Grupo II*

Tabela. 2 Quadro das frequências e amplitudes para o Grupo II- análise de vibração.

Motor bomba de alta pressão	Frequência $2 \times f_1$ [Hz]	Amplitude [mm/s]
CAF 981501137	119,98	0,075
CAF 981501144	120,03	0,03

2.2. Análise de Corrente

Os espectros de corrente dos motores elétricos foram coletados através de um alicate amperímetro, modelo *CSI 341B*. A análise é feita nas bandas laterais espaçadas de duas vezes a frequência de escorregamento ($2 \times f_s$) em torno da frequência de linha (f_1). O objetivo dessa

medição é detectar barras quebradas ou trincadas e desequilíbrio das fases de alimentação. Estes espectros são utilizados como linha base para a análise de fluxo magnético.

Na análise de corrente o alicate amperímetro é conectado a cabos energizados, sendo necessário um eletricista para fazer as medições. Essa técnica informa somente a condição do rotor, correspondendo a 10% de todo universo de falhas nos motores elétricos.

Na Tab. (3) tem-se a severidade e recomendações para a análise de corrente, baseado na *Liberty Technologies Inc.*, Filho (2000).

Tabela 3. Severidade e recomendações para análise de corrente, Filho (2000)

\neq em dB $f_1 - 2 \times f_s$	Avaliação da condição	Ação recomendada.
> 50 dB	excelente	nenhuma
44 a 50 dB	boa	nenhuma
39 a 44 dB	moderada	continuar inspeção e analisar somente a tendência
35 a 39 dB	desenvolvendo trinca na barra do rotor ou juntas com alta resistência	reduzir intervalo de inspeção e observar curva de tendência
30 a 35 dB	provavelmente duas barras trincadas ou quebradas ou juntas de altas resistências	fazer análise espectral de vibrações para confirmar a fonte do problema
25 a 30 dB	muitas barras trincadas e/ou quebradas, várias trincas nos anéis de curto e falhas severas em toda gaiola	desmontar o rotor para inspeção
< 25 dB	severa	desmontar ou substituir o rotor para inspeção

Na Fig. (3) tem-se o espectro de corrente do *Grupo II*. Para cada motor elétrico forneceu-se a linha base através do espectro de corrente, sempre para a fase A.

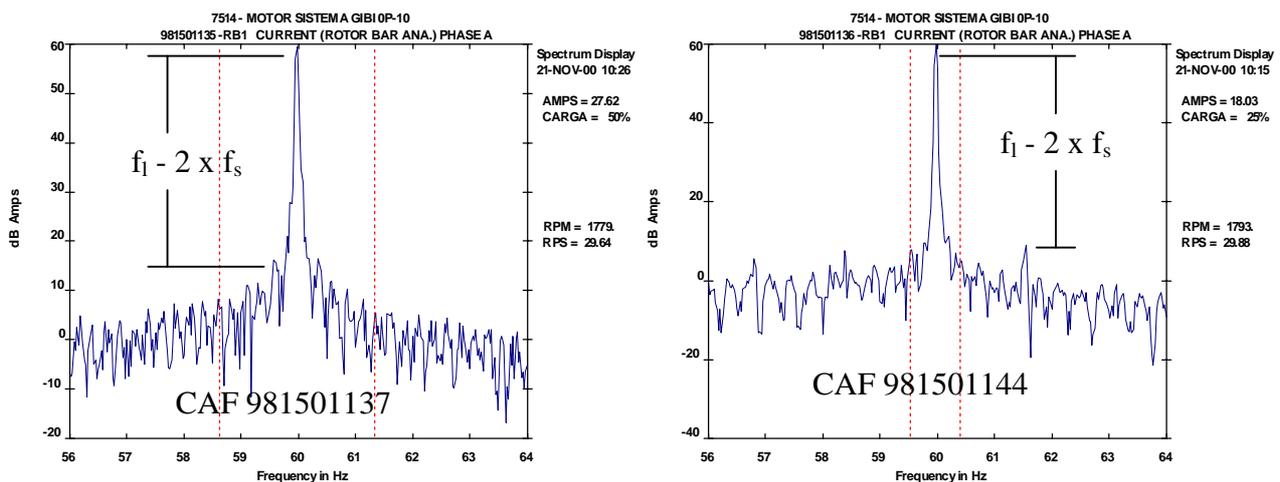


Figura 3. Espectro de corrente dos motores do *Grupo II*

Na Tab. (4) tem-se as diferenças em dB entre a $f_1 - 2 \times f_s$ e o número provável de barras trincadas ou quebradas. Na Tab. (5) tem-se as correntes das três fases e o possível desbalanceamento das mesmas.

Tabela 4. Quadro geral das barras quebradas através da análise de corrente, *Grupo II*

Motor bomba de alta pressão	$f_1 - 2 \times f_s$	Número provável de barras trincadas ou quebradas
CAF 981501137	51,16	Condição excelente
CAF 981501144	50,88	Condição excelente

Tabela 5. Quadro geral das correntes através da análise de corrente, *Grupo II*

Motor bomba de alta pressão	Fase A [A]	Fase B [A]	Fase B [A]	% da Corrente Desbalanceada
CAF 981501137	27,62	28,05	28,66	1,4
CAF 981501144	18,03	16,88	18,27	5,2

2.3. Análise de Fluxo Magnético

Os espectros de fluxo foram coletados através da espira de fluxo, modelo CSI 343P. A espira de fluxo deve ser fixada axialmente, no centro do motor e no lado oposto ao acoplamento (*LOA*). Este procedimento é necessário para garantir a repetibilidade e comparação dos dados coletados.

Na análise de fluxo magnético os espectros são coletados de forma segura, não havendo necessidade de acessar os painéis elétricos. É possível detectar falhas de barras rotativas do rotor, falhas no estator, desequilíbrio de fase e curto circuito (entre fase e entre espiras).

A análise destas falhas é feita através da inspeção de duas faixas espectrais: baixa frequência e alta frequência. Em baixa frequência tem-se informações referentes a condição do rotor, desbalanceamento de tensão e algumas falhas do estator. Em alta frequência os espectros apresentam uma família de frequência da passagem de ranhura que permite avaliar a condição do estator. A máxima frequência para coletar estes espectros é de quinze vezes a frequência de linha ($f_1 = 60$ Hz).

Na Tab. (6) tem-se as principais falhas em motores elétricos e suas respectivas frequências determinísticas, em alta e baixa frequência, onde: f_1 é a frequência de linha [60 Hz], p é o número de pólos, f_s é a frequência de escorregamento, $N = 1, 2, 3, \dots$, RPS é a rotação por segundo e PSP é a frequência de passagem de ranhuras.

Tabela 6. Severidade e recomendações para a análise de fluxo magnético

Descrição da Falha	Baixa Frequência			Alta Frequência
	$f_1 - p \times f_s$	$f_1 \pm N \times RPS$	$f_1 + p \times RPS/2$	$2 \times f_1$ (PSP)
Barras do rotor trincadas ou quebradas	Diminui	Não muda	Não muda	Não se manifesta
Curto entre espiras	Diminui	Aumenta	Aumenta	Variação
Desequilíbrio de fase	Diminui	Aumenta	Aumenta	Não se manifesta
Sobrecarga	Variação desprezível	Variação desprezível	Não muda	Variação desprezível

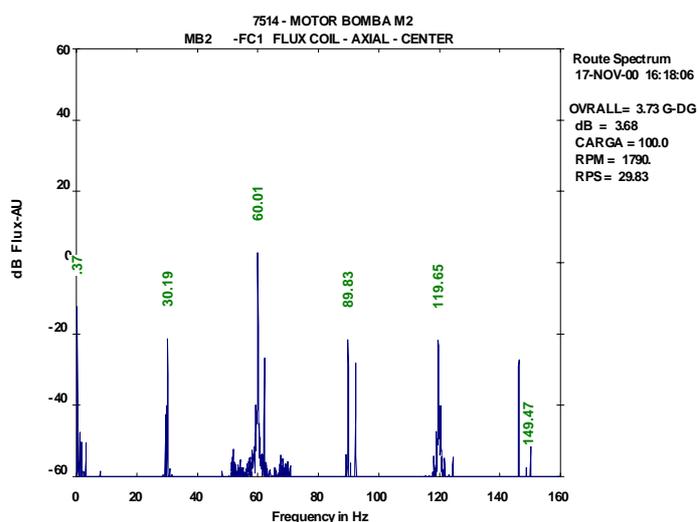
Através dos espectros de fluxo magnético de baixa e alta frequência, forneceu-se a linha base para cada motor elétrico.

Na Tab. (7) tem-se as $f_1 - p \times f_s$ e o número provável de barras trincadas ou quebradas. Estas são as frequências e amplitudes que deverão ser monitoradas no Programa de Manutenção Preditiva.

Tabela 7. Barras quebradas, análise de fluxo, *Grupo II*.

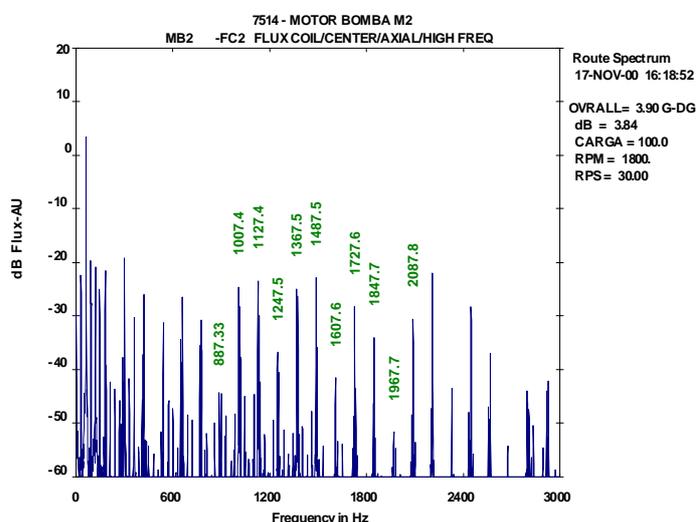
Motor bomba de alta pressão	$f_1 - p \times f_s$ [dB]	Número provável de barras trincadas ou quebradas
CAF 981501137	50,71	0,5
CAF 981501144	53,37	0,4

Na Figuras (4) e (5), tem-se o espectro de fluxo dos motores elétricos da bomba 2, pertencentes ao *Grupo II*, para baixa e alta frequência, respectivamente.



Frequência [Hz]	Amplitude [dB]
30,19	- 20,30
60,01	3,09
89,83	- 20,20
119,65	- 20,90
149,47	- 59,36

Figura 4. Motor bomba de alta pressão CAF 981501137, baixa frequência



Frequência [Hz]	Amplitude [dB]
887,33	- 44,07
1007,40	- 24,43
1127,40	- 23,24
1247,50	- 36,65
1367,50	- 24,79
1487,50	- 22,65
1607,60	- 41,43
1727,60	- 28,16
1847,70	- 33,81
1967,70	- 51,57
2087,80	- 30,45

Figura 5. Motor bomba de alta pressão CAF 981501137, alta frequência

2.4. Análise de Corrente/Tensão Parasita no Eixo do Motor

A análise de corrente/tensão parasita é uma técnica recente e ainda pouco aplicada no meio industrial. A presença de correntes parasitas circulando pelo eixo do motor, ocasiona uma micro soldagem ou flautamento na pista externa do rolamento, conhecido como *Usinagem por Descarga Elétrica - UDE*.

Para a medir a corrente/tensão parasita no eixo do motor, utilizou-se o sensor *shaft probe*, modelo *CSI 348SP*.

Os motores elétricos apresentam níveis de tensão e corrente parasitas, embora estes níveis possam ser muito pequenos. O que interessa é saber a partir de que nível se tem um problema. A literatura pesquisada indica diferentes interpretações dos níveis de tensão e corrente aceitáveis ou não.

Os diferentes métodos de aquisição dos sinais, equipamentos, lubrificação dos rolamentos, folgas nos rolamentos, tipos de rolamentos, velocidade de rotação, umidade, entre outros, são alguns fatores que podem influenciar na definição destes níveis.

Até que estudos mais significativos sejam realizados, os valores de severidade apresentados na Tab. (8) são recomendados. Nesta tabela, o valor da tensão de danos ao mancal (*TBD - Tension Bearing Damage*), pode ser definido a partir de medidas diretas em campo ou então fixado através da experiência. Entretanto, o valor do TBD pode, para início de trabalhos, ser ≤ 1 mA. Este é um valor típico para a amplitude da frequência característica da velocidade de rotação dos motores de corrente alternada.

As amplitudes apresentadas na Tab. (8) têm três faixas: *baixa* que significa pequena probabilidade de dano continuado, *questionável* onde os níveis são medidos e a máquina tem um histórico de problemas crônicos os quais podem ser relatados e conseqüentemente uma ação corretiva deve ser considerada e *alta* que é considerada não comum, mas com provável presença de dano devido à usinagem por descarga elétrica entre o eixo e a terra (*EDM - Electric Discharge Machine*). Nas máquinas novas, se a faixa alta ou a questionável for detectada, deve-se checar com o fabricante os níveis de segurança ou a garantia contra danos relacionados com *EDM*.

Tabela 8. Severidade e recomendações para a análise de corrente/tensão parasita

Medições	Amplitudes		
	Baixa	Questionável	Alta
Tensão [V] RMS ou DC	< 1	1 a 3	> 3
Corrente [mA] RMS ou DC	$TBD \leq 1$	$TBD \leq 1$	$TBD \leq 1$
Pico de Tensão [V]	< 3	3 a 10	> 10

Nos espectros de corrente e tensão as amplitudes são plotadas em decibéis (*dB*) e as frequências em Hertz (*Hz*). Na forma de onda da corrente as amplitudes são plotadas em miliampère (*mA*) e o tempo em milisegundos (*ms*). Na forma de onda da tensão as amplitudes são plotadas em Volts (*V*) e o tempo em milisegundos (*ms*).

Na Fig. (6) tem-se os espectros e forma de onda da corrente parasita e tensão da bomba de alta pressão CAF 981501137, *Grupo II*. Na Tab. (9) tem-se as amplitudes que deverão ser monitoradas no Programa de Manutenção Preditiva.

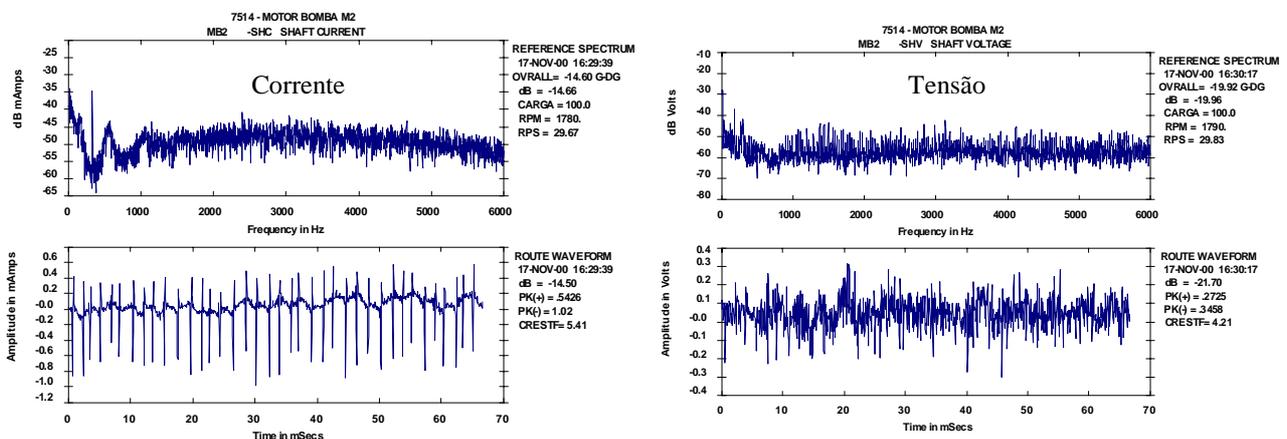


Figura 6. Motor bomba de alta pressão CAF 981501137, *Grupo II*

Tabela 9. Tensão e corrente: Análise de Corrente Parasita.

Motor bomba de alta pressão	Tensão [V]	Corrente [mA]	Pico de Tensão [V]
CAF 981501137	0,119	0,328	0,340
CAF 981501144	0,090	0,320	0,370

2.5. Análise Termográfica

A análise termográfica ou termografia infravermelha é uma técnica preditiva que permite o acompanhamento de temperaturas e a visualização de imagens térmicas, conhecidas por termogramas.

A termografia infravermelha foi aplicada para detectar anomalias nas temperaturas dos componentes e realizar um estudo dos seus limites a serem adotados no plano de termometria.

O sistema completo para inspeção térmica e coleta das imagens é composto de: câmara termográfica de matriz de foco plano (*FPA*) de alta resolução, coletor de dados *CSI Infra Route*, monitor de imagens e gravação *Sony* de 8 mm, câmara digital *Cannon*, além de baterias e acessórios.

2.6. Análise Termométrica

A análise termométrica vem de termometria (*termo* de calor e *metro* de medir, medição), que é a forma de se medir a temperatura ou o calor gerado pelos corpos.

A termometria industrialmente conhecida, pode ser dividida em duas: termometria “convencional” e termometria infravermelha. A primeira utiliza termoelementos, tais como termopares e termoresistências ou *RTD*. A segunda usa sensores de temperatura que medem a energia emitida pelo objeto através do espectro eletromagnético infravermelho.

Neste trabalho, a análise termométrica foi adotada logo após a definição dos limites de temperaturas fixados pela análise termográfica. Estas temperaturas, Fig. (7), foram coletadas através de um radiômetro *Raytek MX4* e transferidas para um computador. Através do *software DataTemp MX*, versão 1.01, da *Infrared Graph Software*, fez-se a análise das mesmas, gerando um banco de dados.

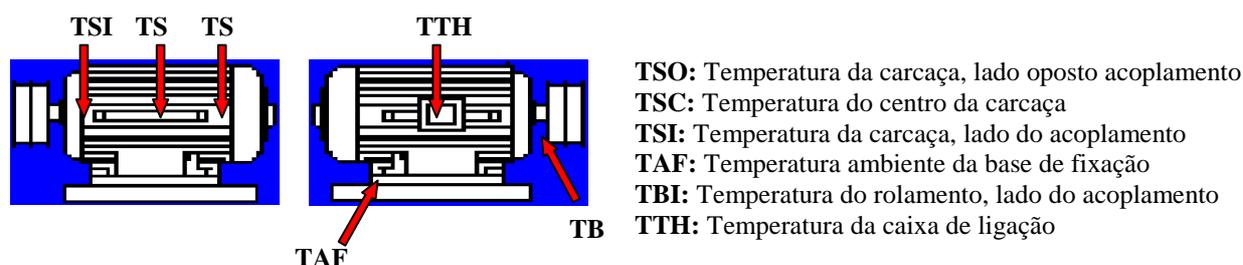


Figura 7. Pontos de medição de temperaturas nos motores elétricos

O limite de temperatura ao qual um motor elétrico pode ser submetido depende dos materiais empregados em sua construção. Os materiais isolantes utilizados são especificados segundo Classes de Isolamento, definidas pelo respectivo limite de temperatura que o material pode suportar continuamente sem que sua vida útil seja afetada, Tab. (10), NBR 7094.

Tabela 10. Limite de temperatura externa (°C) - NBR 7094

Classe de Isolação	A	E	B	F	H
Temperatura ambiente (°C)	40	40	40	40	40
Elevação de temperatura (°C)	60	75	80	100	100
Diferença entre ponto mais quente e temperatura média (°C)	5	5	10	15	15
Temperatura do ponto mais quente (°C)	105	120	130	155	180

Muitas vezes, a diferença entre as temperaturas da carcaça e do interior do motor é maior que o especificado. Em outras ocasiões o motor pode falhar antes de atingir a temperatura máxima especificada para a classe de isolamento do mesmo. Por esse motivo, recomenda-se limites de temperatura máxima externa mais baixos, Tab. (11). Uma vez alcançados esses limites recomenda-se a substituição do motor, evitando-se interrupção na produção.

Tabela 11. Limite de temperatura externa (°C) recomendáveis

Classe de Isolação	A	E	B	F	H
Máxima temperatura externa (°C)	90	100	110	130	140
Temperatura de alerta (°C)	70	80	90	110	120

Os limites de temperatura variam significativamente de acordo com o tipo de mancal (rolamento ou deslizamento) e o tipo de lubrificação adotado. Em mancais de deslizamento de grande porte não só a temperatura, mas também a distribuição de temperaturas é levada em conta, Veratti (1992). Para os mancais de rolamento, tem-se na Tab. (12) as orientações sobre limites de temperatura para mancais de rolamento considerando a temperatura ambiente: 40 °C.

Tabela 12. Limite de temperatura para rolamentos comuns (°C).

Tipo de Lubrificação	Alerta	Máximo
Graxa	70 - 100	> 100
Bano de óleo	65 - 95	> 95
Centralizada	60 - 85	> 85

Segundo a SKF seus rolamentos podem ser normalmente utilizados em temperaturas de até 125 °C. Para rolamentos com gaiolas de poliamida reforçadas com fibra de vidro adota-se o limite de temperatura de 110 °C. Nos acoplamentos o aquecimento pode ser devido ao desalinhamento ou à falta de lubrificação (no caso de acoplamentos auto-compensados). Em ambos os casos adota-se um aquecimento de 20 °C em relação ao ambiente como limite de alerta. Acima desse valor recomenda-se a verificação do mesmo, Veratti (1992).

3. RESULTADOS

Neste trabalho apresentou-se o Programa de Manutenção Preditiva da Planta “*Motor Fire*”, Área Piloto, correspondente à Unidade 7514, sendo também adotado nas outras sete unidades.

Durante o levantamento das *bases lines* detectou-se algumas falhas nos motores elétricos. A integração das tecnologias preditivas foi importante para o diagnóstico dessas falhas. Na maioria dos casos necessitou-se do cruzamento das informações obtidas por mais de uma tecnologia para se chegar ao perfeito diagnóstico.

Através da implantação deste programa e com o acompanhamento destas linha base é possível, maximizar a função operacional e minimizar falhas prematuras nos motores de indução trifásico.

4. AGRADECIMENTOS

A FIAT Automóveis de Betim e a Comau Service.

5. REFERÊNCIAS

- Bowers, S.V. and Davis, W.A., 1996, “Integrated Strategy for Predictive Maintenance of Induction Motors”, Computational Systems, Inc.
- Bowers, S. V. and Davis, W.A., 1996, “Implementation of a Proactive Motor Monitoring Program through Temperature and Flux”, Computational Systems, Inc.

- Brito, J. N., 1996, "Detecção de Problemas em Motores Elétricos Através da Análise de Vibração", Relatório Final, Projeto FAPEMIG TEC 1008/96.
- Brito, J.N., Baccarini, L.M.R. e Pederiva, R., 1999, "Análisis de vibración e análisis de corriente, herramienta de mantenimiento predictivo aplicadas en la detección de problemas en motores eléctricos", Actas del IV Congreso Iberoamericano de Ingeniería Mecánica, Santiago de Chile, Vol. 2.
- Cameron, J.R., Thompson, W. T. and Dow, A. B., 1986, "Vibration and current Monitoring for detecting air gap eccentricity in large induction motors", Proceeding IEEE, Vol. 133, Pt. B, No. 3, pp. 155-163.
- Filho, P. C. M. L., Brito, J. N., Baccarini, L. M. R., Álvares, P. A. S. e Braga, L., 2000, "Plano de Manutenção Preditiva para o Maquinário da Planta Unidade *Motor Fire*", Seminário de Confiabilidade, Tecém - Tecnologia Empresarial Ltda., pp. 1-10.
- Filho, P. C. M. L., Brito, J. N. e Baccarini, L. M. R., 2000, "Programa de Manutenção Preditiva da Planta Unidade *Motor Fire* Unidade 7514", Relatório de Estágio Supervisionado, Cap.5, pp. 71-78.
- Kowal, D., 1999, "Bearing Damage Resulting from Shaft Voltages and Currents", Computational Systems Incorporated.
- Langhorst, P., Tek M., and Hancock, C., 1997, "Dealing with Motor Shaft Voltage and Bearing Currents", Maintenance Technology.
- Murry, R.J. and Mitchell B.F., 1994, "Cost Savings from a Practical Predictive-Maintenance Program", Proceedings Annual Reliability and Maintainability Symposium, pp. 206-209.
- NBR 7094, "Máquinas Elétricas Girantes - Motores de Indução - Especificação".
- Veratti A.B., 1992, "Termografia: Princípios, Aplicações e Qualidade", ICON Tecnologia e Serviços Ltda.
- Verdini, E. e Veratti, A.B., 2000, "Termografia Aplicada em Produção de Petróleo", Revista Eletricidade Moderna, No. 316.

INTEGRATION OF TECHNOLOGIES TO DIAGNOSE FAULTS IN INDUCTION MOTORS

Jorge Nei Brito

FUNREI - Praça Frei Orlando, 170 - São João del Rei - MG - 36307-352 - brito@funrei.br

Paulo César Monteiro Lamim Filho

UNICAMP - Caixa Postal 6051 - Campinas - SP - 13083-970 - lamim@fem.unicamp.br

Lane Maria Rabelo Baccarini

FUNREI - Praça Frei Orlando, 170 - São João del Rei - MG - 36307-352 - rabelo@funrei.br

Pedro Alcântara S. Alvares

Vitek Consultoria Ltda. - Belo Horizonte - MG - pedro@vitek.com.br

Abstract. The implementation of the Predictive Maintenance Program of the FIAT Automóveis's Motor Fire, located in Betim, Minas Gerais, Brazil, is presented in this paper. The bases lines of inductions motors was obtained by six predictive technologies: vibration analysis, current analysis, shaft current/voltage analysis, magnetic flux analysis, termometria and termografia. Through the attendance of theses bases lines is possible to minimize the cost of electric and mechanic maintenance and maximize the inductions motors assisted avoiding premature failures.

Keywords. Induction Motor, Incipient Fault, Predictive Maintenance, Motor Fire.