

IDENTIFICAÇÃO DE FALHAS UTILIZANDO INFORMAÇÕES DE SENSORES PRESENTES NO QUADRO DE COMANDO DOS MOTORES.

Lane M. R. Baccarini¹, Benjamim. R. de Menezes², Leandro H. Batista³ e Walmir M. Caminhas²

¹Departamento de Engenharia Elétrica – Universidade Federal de São João del Rei

²Departamento de Engenharia Eletrônica – Universidade Federal de Minas Gerais

³Instituto Tecnológico de Aeronáutica - ITA

rabelo@ufsj.edu.br, brm@cpdee.ufmg.br, leandrohbatista@gmail.com e caminhas@cpdee.ufmg.br

Resumo - A evolução das técnicas de produção tem elevado de forma sensível a capacidade produtiva das plantas industriais, podendo-se afirmar que esse aumento é causado principalmente pelo aumento da capacidade produtiva dos seus equipamentos. Como as etapas do ciclo de vida dos equipamentos exigem elevados investimentos, notadamente as etapas de manutenção necessitam garantir altos índices de operação. Tais índices podem ser obtidos através da redução do número de falhas e o gerenciamento das suas severidades. Atualmente existem diversos métodos de diagnóstico, porém muitos se mostram de baixo custo/benefício, ineficazes ou mesmo de difícil aplicação em processos reais. Outra questão existente é o fato de que muitos processos rodam de forma contínua ou estão em ambientes agressivos para o homem, exigindo que o monitoramento seja feito sem a parada do acionamento, de forma não invasiva e, principalmente, sem expor o técnico ao contato direto com a máquina. Assim, este trabalho apresenta um sistema de diagnóstico de falhas elétricas e mecânicas em motores de indução, em tempo real, utilizando apenas as informações de sensores presentes no painel de comando dos motores.

Palavras-Chave – Método de diagnóstico não invasivo, Motor de Indução, Falhas Elétricas e Mecânicas

FAULTS IDENTIFICATION BY USING THE INFORMATION OF THE SENSORS PRESENTS IN MOTOR CONTROL CENTER.

Abstract – The evolution of the production techniques has increased, perceptively, the product capacity of industrial plants. It is known, that this evolution is due mainly to increased production capacity of its equipment. Since the life equipment cycle demands high investments, the maintenance processes needs to assure high level of operability and availability of those equipments. A high availability index could be obtained through the reduction of the faults risks and the management of its severity. Nowadays, there are many methods for faults diagnosis, but, many of them have low-cost benefits, are inefficient or are difficult to be used in real process. It is important to know that many processes cannot be stopped or are placed in an aggressive environment for

the workers, demanding that the ideal monitoring condition of the equipment is done for in-service process. Thus it is necessary a nonintrusive methods that offer safety for operations personnel as well. This work presents a online systems for mechanical and electrical faults in induction motor that requires only the information from the sensors presents in motor control center.

Keywords – Non-invasive diagnose method, Induction Machine, Electrical and Mechanical Faults.

I. INTRODUÇÃO

Dentre todos os sistemas eletromecânicos existentes, verifica-se a supremacia numérica das máquinas de indução trifásicas. Estima-se que mais de 90% dos acionamentos são realizados por estes motores. E, portanto, a confiabilidade exigida para os motores cresce constantemente devido à importância de suas aplicações. Mas, as máquinas elétricas estão sujeitas a falhas que, dependendo da sua importância na planta fabril e do seu tipo, podem causar prejuízos materiais, econômicos e sociais significativos. Como as etapas do ciclo de vida destes equipamentos exigem elevados investimentos, notadamente as etapas de manutenção e operação necessitam garantir altos índices de disponibilidade e confiabilidade. Tais níveis de desempenho podem ser obtidos através da redução do número de falhas e o gerenciamento das suas severidades, que fornece ainda, como benefício adicional, o aumento da segurança da planta industrial [1].

Atualmente existem diversos métodos de diagnóstico de falhas, porém muitos deles se mostram de baixo custo/benefício, ineficazes ou mesmo de difícil aplicação em processos reais [2]. Outra questão existente é o fato de que muitos processos rodam de forma contínua ou estão em ambientes agressivos, exigindo que o monitoramento ideal seja feito sem a parada do acionamento, ou seja, de forma não invasiva e, principalmente, sem expor o técnico ao contato direto com a máquina [3].

A utilização de inversores de frequência é cada vez mais difundida [4]. A economia de energia, as melhorias do processo de controle e o aumento da eficiência são fatores que, dentre outros, têm influenciado fortemente na crescente utilização de sistemas de acionamentos a velocidade variável. Entretanto, existem implicações adicionais. A principal desvantagem é que a forma de onda da tensão não é senoidal, o que acarreta a presença de componentes harmônicas nas correntes do estator que dão origem a elevadas componentes de fluxo no entreferro. Estas componentes harmônicas de

Artigo submetido em 09/08/2010. Primeira revisão em 31/07/2012, segunda revisão em 02/12/2012. Aceito para publicação em 02/12/2012 por recomendação do editor João Onofre Pereira Pinto.

fluxo implicam em aumento de perdas no núcleo e pulsação de velocidade e conjugado, aumentando o risco de falhas [5].

Existem inúmeros trabalhos publicados nos meios científicos, nacionais e estrangeiros, na área de diagnóstico de falhas em máquinas rotativas, que utilizam diferentes sensores e diferentes técnicas de análise dos sinais [5-13]. Para um bom diagnóstico do sistema, é necessário monitoramento contínuo e alarme rápido frente à ocorrência de falhas. Entretanto, o monitoramento em tempo real de eventos em uma planta industrial não é uma tarefa simples, uma vez que o impacto da falha no seu estágio inicial pode ser pequeno e pode ser mascarado por ruídos de medições e mudanças nas condições de operação das máquinas rotativas. Para isso é necessário utilizar ferramentas e estratégias apropriadas de forma a maximizar o sucesso na execução de cada etapa. Portanto, a detecção antecipada de falhas ainda é um dos grandes desafios da engenharia.

Assim, considerando que: i) os custos de manutenção são elevados; ii) motores de indução são utilizados em mais de 90% dos acionamentos; iii) muitos motores são alimentados por inversores PWM, que geram harmônicos que comprometem a vida útil da máquina; iv) a necessidade de método não intrusivo de diagnóstico; v) o alto percentual de falhas de curto-circuito que é uma falha severa e de evolução rápida, necessitando de um método contínuo de monitoramento; este trabalho tem por objetivo propor uma técnica de diagnóstico de falhas elétricas e mecânicas em motores de indução trifásicos utilizando as informações dos sinais de sensores presentes na planta industrial.

Em [2] foi desenvolvido um modelo matemático assimétrico do motor de indução trifásico que permite simular as seguintes condições: ausência de falhas; presença de falhas mecânicas, barras quebradas e/ou trincadas, curto-circuito entre espiras; assimetrias no sistema de alimentação do motor, presença de ruídos nos sinais de corrente, tensão e velocidade. A vantagem da simulação computacional é permitir testar algoritmos em acionamentos de diferentes potências e condições de operação.

Adotando o modelo proposto em [2] várias simulações foram realizadas considerando motores de diferentes características: (3HP, 220V); (50HP, 460V); (500HP, 2300V) e (2250 HP, 2300V). As análises no tempo e na frequência do conjugado, velocidade e dos fluxos, correntes e tensões de estator e de rotor, permitiram desenvolver uma técnica de diagnóstico de falhas elétricas (barras quebradas e curto-circuito) e de falhas mecânicas (desalinhamento, folga mecânica e desbalanceamento).

Após a definição do algoritmo de diagnóstico foram realizadas mais de 13.000 (treze mil) simulações para avaliar a eficiência do método proposto. A técnica foi validada numa bancada constituída por um motor de indução e um gerador CC que foi utilizado como carga. O motor foi construído de modo a permitir testes não destrutivos de quebras de barras e curtos-circuitos entre espiras de uma mesma bobina.

II. TÉCNICA PROPOSTA

A. Curto-circuito Entre Espiras

A deterioração do isolamento do estator começa com curto-circuito envolvendo poucas espiras de uma mesma fase. A corrente de falta que é de aproximadamente duas

vezes a corrente de rotor bloqueado, provoca aquecimento localizado que rapidamente se estende para outras seções do enrolamento [14]. O tempo de evolução de falhas de curto-circuito entre espiras para as demais falhas não pode ser estimado, pois depende das condições de operação do motor. O que se sabe é que a velocidade de evolução é rápida, justificando o monitoramento contínuo do motor.

O diagnóstico de curto-circuito inicial, envolvendo poucas espiras de uma mesma bobina não é uma tarefa trivial, pois a falha tem impacto pequeno nas características do motor. Assim, utilizando o modelo de falhas [2], várias simulações foram realizadas para estator simétrico e curto-circuito de 1% ($\mu = 0,01$) e curto-circuito de 3% ($\mu = 0,03$) do total do número de espiras de uma fase. No simulador o percentual de curto-circuito é definido pela letra grega μ . Analisou-se também o comportamento do motor acionando cargas diferentes da nominal, desequilíbrios de calibração dos sensores de medição e desequilíbrios das tensões de alimentação.

A Figura 1 mostra o comportamento das componentes de sequência positiva e negativa das impedâncias, em função do escorregamento para dois motores de potências de 500 HP e 3 HP. Os gráficos são referentes à situação de estator simétrico (ausência de falhas). A variação do escorregamento do motor é consequência da alteração do percentual de carga. Assim, observa-se que a impedância de sequência negativa sofre variações desprezíveis com a carga.

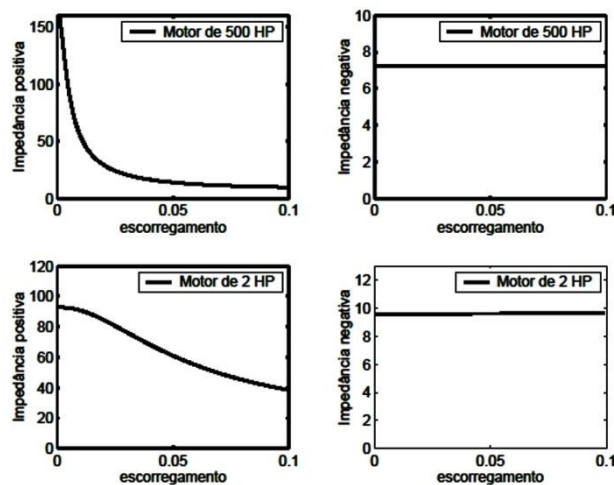


Fig. 1. Valores das Impedâncias de sequência positiva e negativa para a situação de estator simétrico.

Partindo-se do conhecimento de que o vetor de sequência negativa apresenta a mesma frequência do de sequência positiva, mas sentido contrário de rotação adotou-se o seguinte método para separação das duas componentes. As grandezas abc foram transformadas para os eixos dq que giram com a mesma velocidade e sentido da componente de sequência positiva. Sendo assim, tem-se nas componentes dq duas parcelas: uma contínua e a outra alternada com frequência de duas vezes a frequência das grandezas originais. A parcela contínua é devido a componente de sequência positiva e a alternada é consequência da presença da componente de sequência negativa. Aplicando a matriz inversa de transformação (dq para abc) nas parcelas continua

e alternada é possível obter, respectivamente, as componentes abc de sequência positiva e negativa.

A Tabela 1 mostra os valores das componentes de sequências positiva e negativa das impedâncias do motor de 500HP, considerando: desequilíbrios das tensões de alimentação; operação com carga nominal e carga reduzida; percentuais de espiras em curto-circuito iguais a $\mu = 0$ (ausência de falha), $\mu = 0,01$ e $\mu = 0,03$. Os resultados confirmam que as impedâncias de sequência negativa independem do grau de desequilíbrio entre as tensões e do percentual de carga. Entretanto, esses valores alteram significativamente com a presença de espiras em curto-circuito.

TABELA 1

Valores das impedâncias positiva Z_{pos} e negativa Z_{neg}				
Percentual de curto-circuito (%)	Carga nominal		Carga reduzida (10% de carga)	
	Z_{pos} (Ω)	Z_{neg} (Ω)	Z_{pos} (Ω)	Z_{neg} (Ω)
0 ($\mu=0$)	38,43	7,12	72,72	7,12
1 ($\mu=0,01$)	38,03	6,22	70,21	6,24
3 ($\mu=0,03$)	37,22	3,07	65,57	3,07

B. Barras Quebradas

Os autores deste trabalho desenvolveram em [3] um método de diagnóstico de barras quebradas utilizando as informações dos sinais dos sensores de corrente e de tensão. O método denominado "Observador em Modos Deslizantes para o Diagnóstico de Barras Quebradas" utiliza como parâmetro de falha o resíduo do conjugado que representa a diferença entre o conjugado calculado pelo Modelo Discreto (T_{dis}) e o obtido pelo Modelo em Modos Deslizantes (T_{obs}). Este último foi desenvolvido de modo a rejeitar perturbações nos parâmetros do rotor. Assim, as assimetrias provocadas pela presença de falhas no rotor produzem impactos diferentes nos dois modelos gerando um resíduo. A evolução de severidade da falha aumenta o nível do resíduo de conjugado. A Figura 2 ilustra o algoritmo proposto.

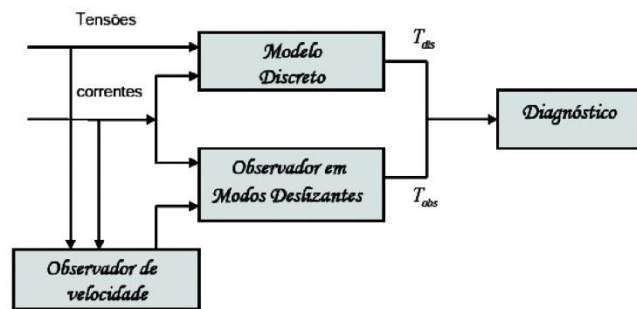


Fig. 2. Sistema de Diagnóstico de Barras Quebradas

Para a obtenção dos valores dos conjugados é necessário também o conhecimento da velocidade. Assim, visando tornar o método mais robusto e não invasivo, o sinal de velocidade é obtido por um estimador [14] que calcula a velocidade através da equação:

$$w_s = \frac{R_r I_{sq}}{\lambda_s - aux \cdot I_{sd}} \quad (1)$$

sendo:

$$aux = L_{ss} \left(1 - \frac{L_m^2}{L_{ss} L_{rr}} \right) \quad (2)$$

Os parâmetros que aparecem nas equações são: λ_s - enlace de fluxo de estator; I_{sd} e I_{sq} - correntes de estator de eixos direto e quadratura; L_m , L_{ss} e L_{rr} - indutâncias mútua, própria do estator e do rotor. As correntes I_{sq} e I_{sd} são obtidas através da matriz de transformação de referência do eixo abc para o eixo dq. Os fluxos são determinados a partir do conhecimento das tensões e correntes.

Normalmente utiliza-se como diagnóstico de barras quebradas o espectro de frequência da corrente do estator. Assimetrias no rotor produzem bandas laterais em torno da frequência da rede definidas pela equação: $f \pm 2kf_s$, sendo k um número inteiro e maior que zero. O parâmetro f_s é a frequência das tensões induzidas no rotor e é denominada frequência de escorregamento, pois depende da diferença entre a velocidade síncrona (n_1) e a velocidade do motor (n).

$$f_s = sf = \left(\frac{n_1 - n}{n_1} \right) f \quad (3)$$

Observa-se que a análise do espectro de frequência somente pode ser utilizada para operação do motor à plena carga, pois nas condições de carga reduzida a frequência de escorregamento é próxima de zero. O método de diagnóstico de barras quebradas desenvolvido apresenta as seguintes vantagens: (i) utilização de apenas sinais de tensão e corrente; (ii) não é afetado pelas características de carga; (iii) permite o diagnóstico de falhas incipientes, ou seja, o desenvolvimento de trincas nas barras.

C. Falhas Mecânicas

Para o diagnóstico de falhas mecânicas as equipes de manutenção de uma empresa utilizam o sinal de vibração. As técnicas que utilizam análise da assinatura de vibração são predicadas em dois fatos básicos: (i) os modos de falha possuem componentes distintos de frequência de vibração que podem ser isolados e identificados; (ii) a amplitude de cada componente de vibração permanecerá constante a menos que haja uma mudança na dinâmica operacional da máquina. Entretanto, as técnicas são invasivas, pois os sinais de vibração são captados através de acelerômetros posicionados nas estruturas dos equipamentos [7].

Assim, este trabalho mostra que a presença de falhas mecânicas pode ser realizada através do sinal de corrente. A presença de falhas mecânicas produz modulação de corrente na frequência $f - f_r$ sendo f_r a frequência de rotação do motor. A amplitude da componente aumenta com a severidade da falha. Portanto este padrão será indicado para a detecção de falhas mecânicas.

D. O Decisor

A Figura 3 mostra o fluxograma das etapas de análise para o diagnóstico final do motor. O 1º braço é responsável pela detecção de barras quebradas, o 2º pela detecção de falhas mecânicas e, o 3º braço fornece a análise das condições dos enrolamentos do estator.

O "padrão bq" representa o resíduo de conjugado. O "limiar bq" é a amplitude do resíduo conjugado em duas vezes a frequência de escorregamento. Valores acima do limiar indicam a presença de barras quebradas e/ou trincadas.

O padrão que caracteriza falha mecânica é a amplitude da corrente em $f - f_r$. Na simulação, adotou-se o valor de -45 dB como o limite de resíduo. Valores superiores a este, caracterizam a presença de falhas mecânicas. Na prática este limite pode ser obtido após ajustes das condições de operação do motor, ou seja, obtenção da condição conhecida como "assinatura do motor".

Para o diagnóstico de curto-circuito inicial entre espiras é utilizada como termo de comparação a impedância de sequência negativa. Este valor é obtido com os enrolamentos sem defeitos. Na presença de curto-circuito têm-se variações significativas desta impedância. Neste caso, o sistema de diagnóstico deve acionar um alarme para que ocorra a parada do equipamento, uma vez que o curto-circuito evolui rapidamente.

O decisor fornecerá como saída as respostas individuais de cada classificador. Não foi necessária a utilização de algoritmo de decisão, uma vez que os três especialistas não interagem entre si de modo a comprometer o diagnóstico. Esta afirmativa será analisada e reiterada tanto pelas simulações quanto através dos testes experimentais.

E. Avaliação do Sistema de Detecção

Para testar a eficiência do decisor no diagnóstico correto do estado do motor, várias simulações foram feitas para diferentes condições de operação e de assimetrias na rede. Serão apresentados os resultados para os motores de 500HP e 3CV. Este último motor corresponde ao motor da bancada de teste. Testes de ensaio de rotor livre e de rotor travado foram realizados e os parâmetros do circuito equivalente foram obtidos. Na Tabela 2 tem-se o número total de testes realizados para cada situação de falha e para cada motor.

TABELA 2
Número total de simulações

MOTOR	Sem Defeito	Barra Quebrada	Curto-circuito	Falha Mecânica	Total de Simulação
3 CV	1301	1206	1256	1211	4974
500 HP	2154	2059	2022	1946	8181

Para cada simulação foram gerados números aleatórios entre 0 e 3 que indicam as seguintes situações: • 0 - operação normal, sem falha; • 1 - barra quebrada; • 2 - curto-circuito entre espiras de uma mesma fase; • 3 - falha mecânica.

Para a situação de barras quebradas, foram gerados valores aleatórios entre 1 e 28 (Motor de 3 CV) e 1 a 32 barras (Motor de 500 HP), que indicam a barra quebrada. Para as outras situações, o rotor é simétrico, ou seja, não existem barras quebradas e ou trincadas.

Os percentuais de espiras em curto-circuito e de falha mecânica também foram gerados de forma aleatória utilizando a função *rand* do *Matlab*.

As tensões de alimentação do motor foram alteradas de forma desigual, para as três fases, na faixa de $\pm 1\%$ da tensão nominal do motor. O conjugado da carga foi diferente para cada teste, dentro da faixa de 105%, a 40% do conjugado nominal do motor. Na Figura 4 tem-se o algoritmo do programa para a simulação de falhas aleatórias.

Os limiares de falhas foram definidos da seguinte forma:

- **barra quebrada**: resíduo de conjugado maior que 0,1% do conjugado de carga;
- **curto-circuito entre espiras**: variação da impedância de sequência negativa Z_{neg} maior que 10% do valor da impedância para estator simétrico;
- **falha mecânica**: componente de frequência $f - f_r$ maior que -45 dB.

Para todos os testes realizados de simetria da máquina (sem defeito), falha mecânica e curto-circuito, o algoritmo forneceu o diagnóstico correto do motor. O algoritmo errou somente em alguns testes de barras quebradas (4%), fornecendo como saída do sistema a mensagem de ausência de falha.

A falha de curto-circuito entre espiras é considerada uma falta severa, pois a parada do motor deve ser imediata, prejudicando o processo. No caso de pequenos níveis de falhas mecânicas, a manutenção da máquina pode ser feita de forma programada. Desta forma, o decisor não pode errar no diagnóstico de falhas mecânicas, ou seja, diagnosticá-las como curto-circuito. E, este problema não ocorreu, ou seja, o sistema não forneceu falsos alarmes indicando presença de espiras em curto-circuito.

A mesma análise foi realizada para o caso de falhas de barras quebradas que também não podem ser classificadas como curto-circuito. O decisor também não forneceu falsos alarmes, pois barras quebradas não foram diagnosticadas como curto-circuito. As componentes de correntes $f \pm 2f_s$, que são consequências de barras quebradas, não interferem no cálculo da impedância de sequência negativa. Estes harmônicos são filtrados pelo algoritmo que calcula as parcelas negativas de correntes e tensões de eixos dq.

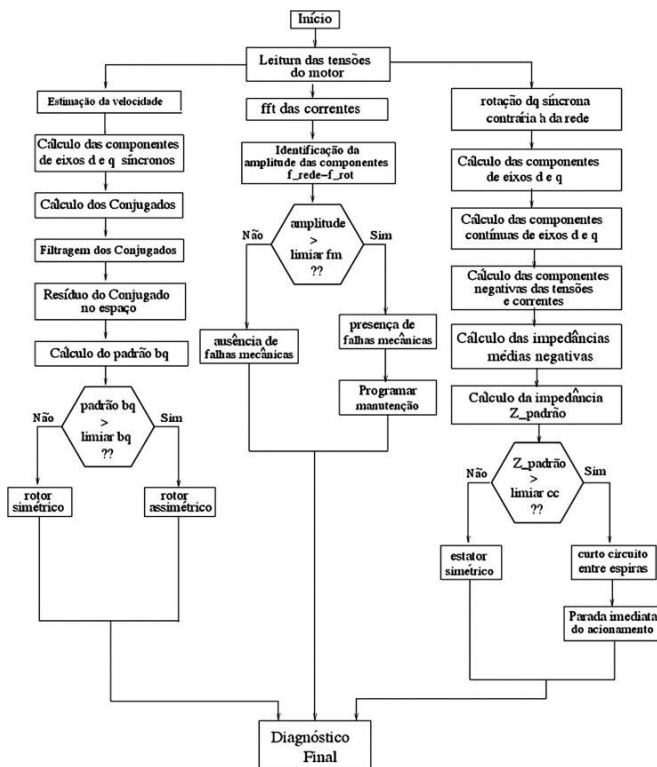


Fig. 3. Fluxograma que representa o decisor.

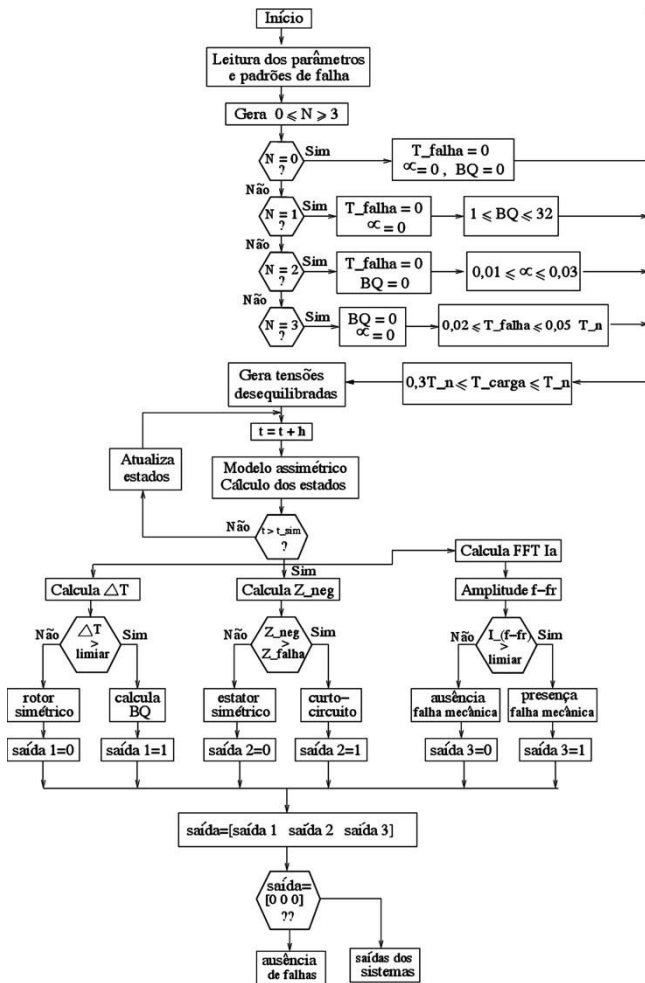


Fig. 4. Fluxograma para simulação de falhas aleatórias.

III. RESULTADOS EXPERIMENTAIS

A. Descrição da Bancada de Teste

O motor de indução (3 CV, 220 V, 60 Hz) foi modificado de modo a possibilitar testes de falhas elétricas, tais como quebras ou trincas de barras do rotor e curtos-circuitos entre espiras do enrolamento do estator.

Para realizar testes de curto-circuito entre espiras de uma mesma fase, foram extraídas dez derivações em duas bobinas de duas fases distintas. Cada bobina é constituída por 33 (trinta e três) espiras. Como cada fase é formada por 6 (seis) bobinas, tem-se o total de 198 (cento e noventa e oito) espiras por fase. Portanto, o rebobinamento do motor permitiu realizar testes de curto-circuito entre, no mínimo, três espiras e, no máximo, 33 espiras correspondendo aos percentuais de $\mu = 1,5\%$ a $\mu = 16,67\%$. A Figura 5 mostra a foto do estator, onde os cabos brancos são as derivações dos enrolamentos e os cabos pretos são os terminais para o fechamento e alimentação das três fases.

As barras originais do rotor foram retiradas utilizando produto químico decapante para a limpeza da ranhura. Foram construídas 28 barras de cobre eletrolítico do formato da ranhura. De um dos lados do rotor, correspondente ao lado da ventoinha, as barras foram fixadas nos anéis através de parafusos de aço. A retirada ou afrouxamento de um parafuso

permitiu desconectar eletricamente a barra. Assim o projeto permitiu analisar trincas e rompimentos das barras do rotor. A Figura 6.a mostra o estágio intermediário da limpeza do rotor e na Figura 6.b. tem-se o rotor com as barras.

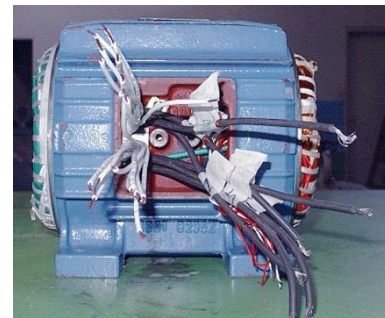


Fig. 5. Estator que foi rebobinado para a realização de curto-circuito entre espiras alojadas na mesma ranhura.

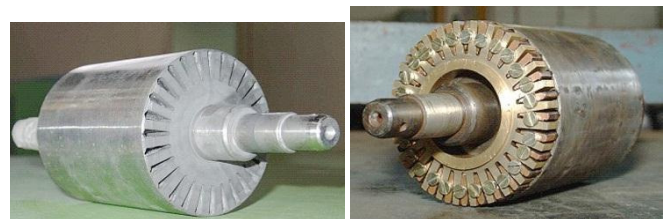


Fig. 6. Fotos do rotor (a) sem as barras (b) após a colocação das barras de cobre.

Para a aquisição de sinais de corrente e tensão foi utilizada a placa PCI-6013 da *National Instruments*. Essa possui 16 canais analógicos de entrada que podem amostrar em até 200 KHz/s e 2 contadores digitais de 24 bits cada. As entradas analógicas possuem resolução de 16 bits.

Para a medição de corrente foram utilizados sensores de efeito hall (LEM, modelo LTA50P). Para a medição das tensões de linha utilizou-se sensores LEM (LV 100-300). Os sinais de tensão passaram por um amplificador com ajuste de ganho e de offset. Projetou-se um filtro de Bessel, passa-baixas, de 4ª ordem com frequência de corte em 1,8 KHz. Para medição de velocidade e posição do rotor utilizou-se um encoder fabricado pela *Dynapar*, modelo HC526, que gera 2096 pulsos por volta e um pulso de referência de posição. O sinal do encoder foi utilizado apenas para testar e validar o estimador de velocidade. Para a implementação do algoritmo de detecção e diagnóstico de falhas foi usado o software *LabView 7* da *National Instruments* que utiliza programação baseada em blocos.

A Figura 7 mostra a foto completa da bancada que é composta por: motor de indução, máquina de corrente contínua, computador, sistema de medição, banco de resistência. O gerador funcionou como carga para o motor de indução. Variando-se a corrente de excitação de campo do gerador CC ou alterando o banco de resistência, conseguiu-se, conseqüentemente, variar a carga do motor.

B. Testes, Resultados e Análises

Testes de curto-circuito

Para validação do algoritmo de detecção de curto-circuito entre espiras, foram realizados vários testes durante dez dias

consecutivos, em horários diferentes, para a situação de estator simétrico. A realização de testes em horários e dias distintos permitiu analisar a robustez do método frente às variações de tensões da rede de alimentação.



Fig. 7. Fotos da bancada constituída pelo motor de indução, gerador CC, sistema de medição e computador.

Durante os testes acompanhou-se o valor da impedância de sequência negativa que é o padrão de diagnóstico de falhas de curto-circuito. Observou-se que a impedância de sequência negativa é praticamente constante, independente do grau de desequilíbrio das tensões e os percentuais de carga, conforme verificado anteriormente nas simulações. Para a condição de estator simétrico, o valor médio da impedância foi de $7,5 \pm 0,0115 \ (\Omega)$.

Para compor o banco de dados referentes às falhas de curto-circuito, foram coletados os sinais de 25 testes, em dias e horários distintos. Os curtos-circuitos foram efetuados em posições diferentes das bobinas. A corrente de curto-circuito foi limitada em duas vezes a corrente nominal, inserindo um resistor entre os terminais das espiras em curto-circuito.

Na Tabela 3 estão apresentados os resultados das componentes de seqüências negativas de tensões, correntes e impedâncias para curtos-circuitos entre 3, 6 e 15 espiras. Para os 25 testes realizados, a impedância de sequência negativa alterou bastante. O valor médio da impedância foi de $6,48 \pm 1,034 \ \Omega$.

TABELA 3
Valores das componentes de seqüência negativa para os testes de curto-circuito.

Curto-circuito entre 6 espiras			Curto-circuito entre 3 espiras			Curto-circuito entre 15 espiras		
V_{neg} (V)	I_{neg} (A)	Z_{neg} (Ω)	V_{neg} (V)	I_{neg} (A)	Z_{neg} (Ω)	V_{neg} (V)	I_{neg} (A)	Z_{neg} (Ω)
0,48	0,14	3,35	2,19	0,38	5,68	0,88	0,42	2,15
0,78	0,32	2,47	3,46	0,33	9,95	1,04	0,57	1,84
1,14	0,22	5,21	1,16	0,22	5,19	2,85	0,15	17,4
5,29	2,84	0,53	1,15	0,26	4,37	3,04	0,18	17,1
1,22	0,30	3,92	0,43	0,13	2,84	0,24	0,38	0,62
1,08	0,29	3,78	0,63	0,16	3,55	0,76	0,55	1,43
2,92	0,53	5,47	1,76	0,13	13,4			
2,32	0,25	9,25	1,79	0,19	9,5			
1,48	0,11	12,8						
1,50	0,31	4,73						
1,34	0,09	15,5						

Testes de Barras Quebradas

Analisando os espectros de frequência das correntes nos testes realizados de curto-circuito, observou-se que as diferenças entre as amplitudes da componente fundamental e a componente na frequência de $f - 2f_s$ era sempre menor que 30 dB. Para ilustrar tem-se na Figura 8 o espectro de corrente para a condição de operação com carga nominal. O espectro mostra que o motor da bancada apresentou comportamento como se tivesse muitas barras trincadas, ou seja, o fechamento barras-parafusos-anéis não forneceu o contato perfeito em comparação com os motores originais.

Conforme descrito na seção 2(B) o resíduo de conjugado representa a diferença entre o conjugado calculado pelo Modelo Discreto e o obtido pelo Modelo em Modos Deslizantes. Quanto maior o número de barras quebradas maior é o valor do resíduo. Na Figura 9 tem-se o resíduo de conjugado no espaço para as seguintes situações: carga reduzida (9.a), carga nominal (9.b), carga nominal e retirada de um parafuso (9.c), carga nominal e retirada de três parafusos (9.d). Verificou-se que o resíduo de conjugado aumenta à medida que é desfeito o contato elétrico da barra com o parafuso. Assim tem-se o maior resíduo na condição de retirada de três parafusos.

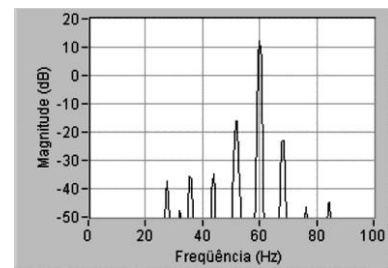


Fig. 8. Espectro de corrente para o motor construído.

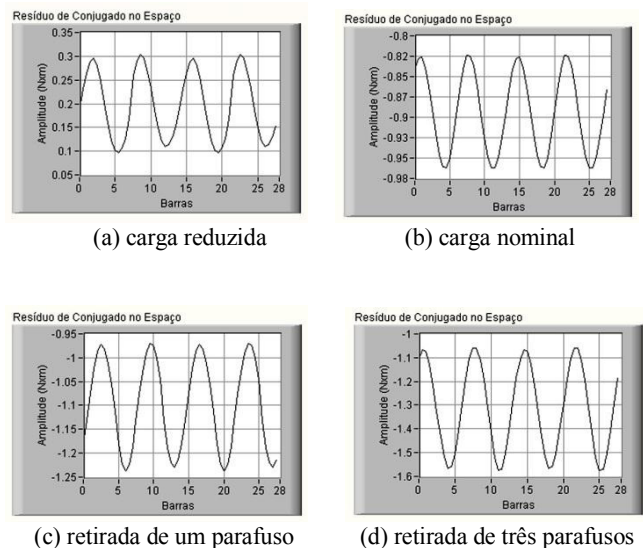


Fig. 9. Resíduo de Conjugado para diversos valores de carga.

Para uma melhor avaliação da eficiência do algoritmo de barras quebradas era necessário obter a assinatura do motor, que correspondia à situação de ausência de falhas. Uma vez

que esta situação não foi conseguida com o rotor modificado, este foi substituído por outro idêntico, ou seja, com as mesmas características de fábrica. Na Figura 10 tem-se os espectros das correntes para carga nominal e 89% de carga. As diferenças entre as amplitudes da componente fundamental e da componente de modulação $f - 2f_s$ são superiores a 55 dB, o que caracteriza ausência de falhas.

A Figura 11 mostra os resíduos de conjugado para as seguintes situações: (a) carga nominal, (b) 89% de carga, (c) 72% de carga e (d) 61% de carga. A maior diferença ocorreu para a situação de conjugado nominal e, este valor foi definido como o limiar. Valores superiores a este caracterizam a presença de trincas e/ou barras quebradas.

Para a análise de barras quebradas, o rotor foi retirado e teve uma das suas 28 barras rompida, com broca de diâmetro de 5 mm. Após o rompimento da barra, vários testes foram realizados para diferentes situações de carga. Durante os testes o motor e o gerador foram deslocados de modo a provocar um desalinhamento. O objetivo era analisar se a presença de falhas mecânicas interferia no diagnóstico de barras quebradas. Para ilustrar, tem-se na Figura 12 os resíduos de conjugado para as seguintes situações: (a) carga nominal; (b) 83% de carga; (c) 72% de carga; (d) desalinhamento e 72% de carga. Para todas as situações o resíduo de conjugado é superior ao limiar de falha.

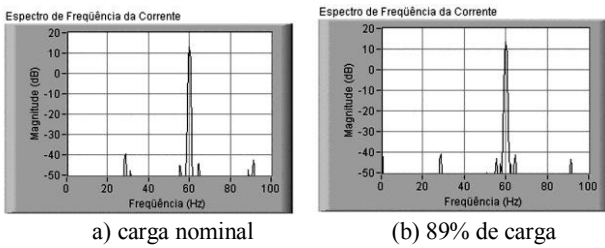


Fig. 10. Espectro da corrente da fase a para a situação de ausência de barras quebradas.

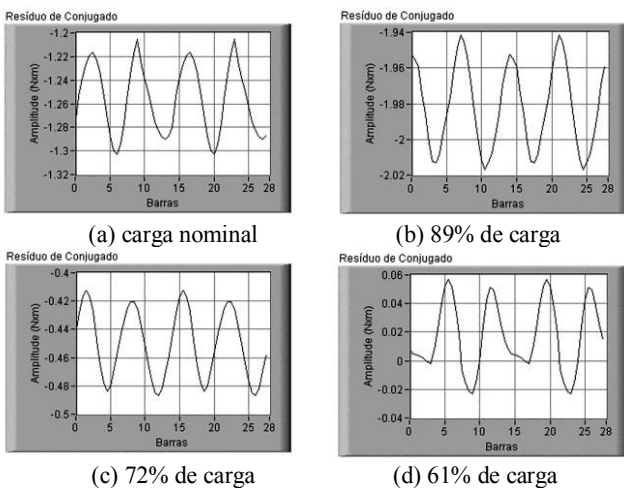


Fig. 11. Resíduos de conjugado, rotor simétrico.

Testes de Falhas Mecânicas

Foram realizados vários testes com falhas mecânicas e observou-se que a amplitude da corrente na frequência $f - f_r$ alterou com o aumento do nível de desalinhamento e

desbalanceamento. Para o teste de desbalanceamento uma massa de 25 g foi presa na ventoinha do motor. Na Figura 13.a é apresentado o espectro de corrente da fase a para a assinatura do motor. A componente de 31 Hz ($f - f_r$) não aparece no espectro, pois sua amplitude é menor que 50 dB. Assim, definiu-se o limite máximo de 45 dB como o limiar de presença de falha mecânica. A Figura 13.b mostra o espectro para situação de desbalanceamento. O led sinaliza a presença de falha mecânica.

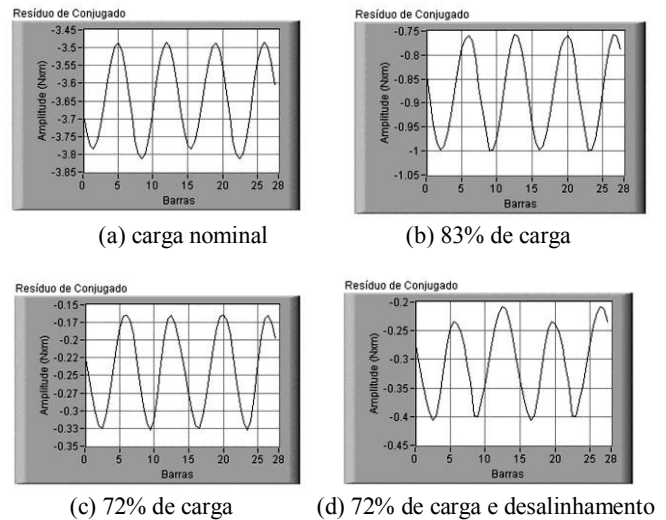


Fig. 12. Resíduos de conjugado, uma barra quebrada

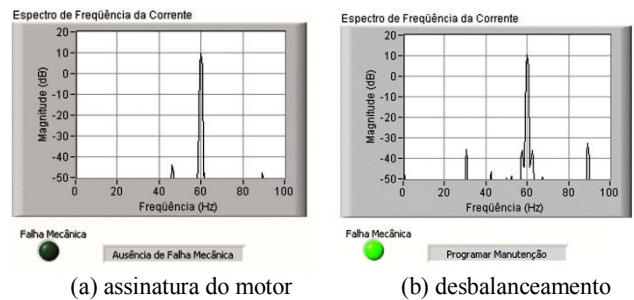


Fig. 13. Espectro de corrente

IV. CONCLUSÕES

O trabalho desenvolveu um sistema de diagnóstico de falhas em motores de indução trifásicos, processando as informações dos sinais de sensores presentes na planta industrial que são os sensores de corrente e tensão.

Para validação da técnica foram realizadas mais de 13.000 (treze mil) simulações de motores de diferentes potências e características de operação.

A bancada de teste foi projetada de modo a permitir a realização de testes não destrutivos de falhas. Os resultados das simulações e experimentais comprovaram a eficiência e robustez do método proposto.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Fapemig (Demanda Universal-APQ-00589-11) pelo suporte financeiro concedido.

REFERÊNCIAS

- [1] H. R. Azevedo, S. P. S. Souza, F.R. Martins, “Sistemas para Diagnóstico Automático de falha. Dificuldades e Soluções para Obtenção de Resultados”, *XX Congresso Abraman*, 2005.
- [2] L.M.R. Baccarini, B.R. de Menezes, W.M. Caminhas. “Fault Induction Dynamic model suitable for computer simulation: Simulation Results and experimental validation”, *Mechanical Sysys and Signal Processing*, vol. 24, no. 4, pp. 300-311, 2010.
- [3] L.M.R. Baccarini, J.P.B. Tavares, B.R. de Menezes, W.M. Caminhas, “Sliding mode observer for on-line broken rotor bar detection”, *Electric Power Systems Research*, pp. 1089-1095, 2010.
- [4] H. de Paula. “Uma nova metodologia para a determinação dos fenômenos de alta frequência em sistema de acionamento de motores de indução através de inversores pwm”, Tese de Doutorado, Universidade Federal de Uberlândia, 2005.
- [5] M. E. H., Benbouzid, G.B. Kliman, “What Stator Current Processing-Based Technique to Use for Induction Motor Rotor Faults Diagnosis?”, *IEEE Transaction on Energy Conversion*, vol. 18, no. 2, pp. 1078-1084, 2003.
- [6] H. Henao, C. Demian, e G.A. Capolino, “A frequency-domain detection of stator winding faults in induction machines using an external flux sensor”, *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 39, no 5, pp. 1272 –1279, 2003.
- [7] R. M. Tallam, S. B. Lee, G. C. Stone, G. B. Kliman, J. Yoo, T. J. Habetler, R. G. Harley, “A survey of methods for detection of stator related faults in induction machines”, *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol, 43, no. 4, pp. 920–933, 2007.
- [8] L.M.R. Baccarini, G.L. Soledade, I. Pereira. “Detecção e Diagnóstico de Falhas em Motores por Meio de Sinais Elétricos”, *Petro & Química*, vol. 306, pp. 74-78, 2008.
- [9] S. Wu, T. Chow, “Induction machine fault detection using SOM-based RBF neural networks”, *IEEE Trans. on Ind. Electronics*, vol. 51, no 1, pp. 183-194, 2005.
- [10] A. Siddique, G. S. Yadava, B. Singh, “A review of stator fault monitoring techniques of induction motors”, *IEEE Trans. on Energy Conversion*, vol. 20, no. 1, pp. 106–114, 2005.
- [11] A. M. da Silva, R. J. Povinelli, N. A. O. Demerdash, “Induction machine broken bar and stator short-circuit fault diagnostics based on three-phase stator current envelopes”, *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 55, no. 3, pp. 1310–1318, 2008.
- [12] H. Razik, H. Henao, R. Carlson, “An induction machine model including interbar currents for studying performances during transients and steady state”, *Electric Power Systems Research*, vol. 79, pp. 181–189, 2009.
- [13] A. Widodo, B.-S. Yang, “Wavelet support vector machine for induction machine fault diagnosis based on transient current signal”, *Expert Systems with Applications*, vol. 35, no. 2, pp. 307-316, 2008.
- [14] R. Zhou; J.S. Lai., “Low-speed performance comparison of induction motor sensorless control methods”, in *Proc. of IEEE Workshop on Computers in Power Electronics*, pp. 247-252, August 2000.

DADOS BIOGRÁFICOS

Lane Maria Rabelo Baccarini: Engenheira Eletricista pela Faculdade de Engenharia Elétrica de São João del Rei, atualmente UFSJ. Recebeu uma bolsa de mestrado como premiação de melhor aluna. Mestre em Ciências pela Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI) após ser aprovada com distinção pela Banca avaliadora. É professora do Departamento de Engenharia Elétrica na Universidade Federal de São João del-Rei (UFSJ), desde 1990. Obteve o título de Doutora em Engenharia Elétrica no PPGEE (Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Minas Gerais). Fez estágio de pós-doutorado na UFMG, onde desenvolveu trabalhos de diagnóstico de falhas em geradores síncronos. Possui publicações na área de Aplicação de Técnicas de Aprendizagem de Máquinas (SVM e redes neurais), Detecção e Diagnóstico de Falhas, Eficiência Energética.

Benjamim Rodrigues de Menezes: Formado em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Minas Gerais (1977), mestrado em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal do Rio de Janeiro (1980) e doutorado em Engenharia Elétrica - Institut National Polytechnique de Lorraine (1985). Atualmente é professor titular da Universidade Federal de Minas Gerais. Tem experiência na área de Engenharia Elétrica, com ênfase nas seguintes linhas de pesquisa: Controle de Processos Eletrônicos e confiabilidade de sistemas. Atua principalmente nos seguintes temas: controle por modos deslizantes, acionamento de motor de indução, diagnóstico de falhas e análise da confiabilidade de processos industriais. Tem coordenado e participado de diversos projetos de pesquisa e de desenvolvimento tecnológico.

Leandro Henrique Batista: possui graduação em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Minas Gerais (2008), atualmente é aluno de mestrado do Instituto Tecnológico de Aeronáutica e trabalha como engenheiro de desenvolvimento do produto especializado em software computacional embarcado na Empresa Brasileira de Aeronáutica. Cursou o 4º ano de Engenharia com ênfase em sistemas embarcados na École Supérieure d'Ingénieurs en Électrotechnique et Électronique – Paris (2006-2007). Atualmente trabalha com algoritmos e métodos baseados em modelo para detecção, diagnóstico e isolamento de falhas.

Walmir Matos Caminhas: possui graduação em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Minas Gerais (1987), mestrado em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Minas Gerais (1989) e doutorado em Engenharia Elétrica pela Universidade Estadual de Campinas (1997). Atualmente é professor associado da Universidade Federal de Minas Gerais. Tem experiência na área de Engenharia Elétrica, com ênfase em Controle de Processos, atuando principalmente nos seguintes temas: detecção e diagnóstico de falhas em sistemas dinâmicos e inteligência computacional.