



DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA ESPECIALISTA PARA DIAGNÓSTICO DE PROBLEMAS EM MOTORES ELÉTRICOS

Jorge Nei Brito

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

Eder Merlim Garcia

UNICAMP - Caixa Postal 6051 - Campinas - SP - 13083-970- 980990@apollo-11.fem.unicamp.br

Robson Pederiva

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

Resumo. *O uso de motores elétricos na indústria é extenso, sendo expostos a uma ampla variedade de ambientes e condições onde o tempo de uso os tornam sujeitos à diversas falhas incipientes. Tais falhas, se não forem detectadas rapidamente, contribuem para a degradação e eventual falha dos mesmos. Neste trabalho, apresenta-se o desenvolvimento do SE_MIT (Sistema Especialista para Diagnóstico de Falhas em Motores de Indução Trifásicos), desenvolvido a partir da shell Expert SINTA. Seu objetivo é ajudar os profissionais da área de manutenção na tarefa de interpretar os espectros coletados através de técnicas preditivas (análise de vibração, análise de corrente e análise de fluxo magnético). Através do SE_MIT é possível diagnosticar falhas de origem mecânica (folga mecânica, desalinhamento e desbalanceamento), falhas de origem elétrica (barras quebradas e desequilíbrio de fase), além da condição normal de funcionamento (assinatura da máquina).*

Palavras-chave: *Sistema Especialista, Motores Elétricos, Análise de Vibração, Análise de Corrente, Análise de Fluxo Magnético.*

1. INTRODUÇÃO

O uso de motores elétricos na indústria é extenso, sendo expostos a uma ampla variedade de ambientes e condições, onde o tempo de uso os tornam sujeitos à diversas falhas incipientes. Tais falhas, se não forem detectadas rapidamente, contribuem para a degradação e eventual falha dos mesmos, Goode e Chow (1995).

Brito et al (1999), analisaram dois métodos para detecção de falhas em motores elétricos com o objetivo de incluí-los no programa de Manutenção Preditiva: análise de vibração e análise de corrente elétrica. Foram estudados falhas de origem mecânica (folga mecânica, desbalanceamento da ventoinha e desalinhamento) e de origem elétrica (*single phase*) e a interação entre eles.

Atualmente existem dois métodos principais para detecção de falhas em motores elétricos: Método Baseado em Modelo e Método Baseado em Conhecimento (Chow, 1997).

O primeiro, baseia-se em modelos matemáticos de um sistema de interesse e, nem sempre, é robusto o suficiente na presença de ruídos ou outras perturbações (Chow e Yee, 1990 e Trutt, 1993). O segundo, tem como objetivo ensinar a máquina a imitar o conhecimento e a intuição humana a fim de que ela tome a decisão que um ser humano tomaria.

O Método Baseado em Conhecimento, principal interesse deste trabalho, caracteriza-se pela utilização de técnicas de Inteligência Artificial, tais como: rede neural artificial (RNA), lógica *fuzzy*

(LF), sistemas especialistas (SE), ou sistemas híbridos (RNA/SE , RNA/LF, ou até mesmo, SE/SE), (Chow e Yee, 1990 e Costello, 1994).

A aplicação dessas técnicas de Inteligência Artificial na detecção de falhas possibilita a realização de diagnóstico *on line* por um computador, pode apresentar o mínimo de interações com o usuário e, em muitos casos, são capazes de diagnosticar falhas sem a ajuda dos especialistas da manutenção.

Dessa forma, tais técnicas vêm substituindo, nos últimos anos, as metodologias convencionais de diagnose de defeitos em motores elétricos. Seu uso crescente é fruto, principalmente, do grande desenvolvimento e disponibilidade dos recursos computacionais, do custo crescente de especialistas humanos em diagnose e do rápido avanço tecnológico.

O presente trabalho utiliza como técnica de Inteligência Artificial para a diagnose de falhas em motores elétricos, um Sistema Especialista, desenvolvido a partir da *shell* Expert SINTA, (Nogueira et al, 1996). Os problemas diagnosticáveis podem ser tanto de origem mecânica (folga mecânica, desalinhamento e desbalanceamento), como de origem elétrica (barras quebradas e desequilíbrio de fase), além de também identificar a situação sem defeito (assinatura da máquina).

2. ENSAIOS EXPERIMENTAIS

Os ensaios experimentais foram realizados numa bancada de teste, Fig. 1, montada no Laboratório de Conversão de Energia da FUNREI - Fundação de Ensino Superior de São João del Rei.



Figura 1. Bancada de teste.

Para diagnosticar as falhas incipientes nos motores elétricos, utilizou-se a tecnologia de análise de vibração, análise de corrente e análise de fluxo magnético. Os espectros foram aquiridos através do equipamento *UltraSpec 8000* [1] da *CSI - Computational Systems Incorporated*. Através do software de apoio, o *UltraManager*, tem-se um ambiente mais confortável de trabalho, permitindo análises detalhadas, geração de relatórios técnicos e montagem dos bancos de dados.

Os defeitos foram introduzidos num motor elétrico de indução trifásico [2], WEG (FH 88747), rotor gaiola, 5 CV, 1730 rpm, 220 V, 60 Hz, 4 polos, categoria N, 44 barras no estator, 36 ranhuras no estator, rolamento SKF 6205-2Z, ID-1, carcaça 100L, classe de isolamento B, FS 1,15, Ip/In 7,5, IP 55, 13,8 A, gentilmente cedido pela WEG Motores.

Um gerador CC [3] alimentando um banco de resistência [4] é utilizado como sistema de carga e está acoplado ao motor elétrico através de um acoplamento flexível, gentilmente cedido pela Flender do Brasil Ltda.

Para aquisição dos espectros de frequência utilizou-se um acelerômetro A0720GP [5], SN6714, com sensibilidade de 0.1000 mV. Usou-se uma janela *Hanning* com 3200 linhas e 10 médias, para uma faixa de frequência de 0 a 400 Hz. As amplitudes foram medidas em velocidade (mm/s). Os sinais foram adquiridos com o sensor colocado nas posições vertical, horizontal e axial, tanto do lado do ventilador quanto do lado do acoplamento do motor.

Para aquisição dos espectros de corrente, utilizou-se um *AC Current Probe* [6] da *AEMC Instruments*, modelo MM 185, entrada de 150 A, AC saída de 1 mA/A AC, relação de 1.000 para 0.005. Para aquisição dos espectros de fluxo magnético, utilizou-se o sensor *343 Flux Coil* [7] da *CSI - Computational Systems Cooperation*.

No módulo *UltraSpec Analyzer* foram coletados 5724 espectros com o sensor acelerômetro e 2176 com os sensores alicate amperímetro e espira de fluxo. No módulo *UltraSpec Motor* foram coletados 308 espectros com os sensores alicate amperímetro e espira de fluxo. Este número significativo de espectros foram de extrema importância para o entendimento e montagem das regras do Sistema Especialista proposto.

2. SISTEMA ESPECIALISTA

Sistemas Especialistas são programas de computadores que imitam o comportamento de especialistas humanos dentro de um domínio de conhecimento específico (Liebowitz, 1988). Estes programas são particularmente relevantes para realização de deduções em cima de problemas que envolvem aspectos não estruturados. Assim como os especialistas humanos, estes sistemas usam lógica simbólica e heurística para encontrar soluções para problemas e, da mesma forma, podem cometer erros (Waterman, 1986).

Nos programas convencionais baseados em algoritmos, o conhecimento é inserido dentro do programa código como uma seqüência de operações determinadas sobre dados. Nos Sistemas Especialistas, existe uma separação entre o conhecimento utilizado para resolver o programa e o programa código que o manipula para a obtenção da resposta desejada. Esta separação facilita a modificação do conhecimento, por exemplo, adição de novos fatos, sem interferir com o programa utilizado para manipulá-lo. Na Tab. (1) tem-se um paralelo entre os Programas Convencionais e os Sistemas Especialistas.

Tabela 1. Programas Convencionais versus Sistemas Especialistas, Laufmann (1990)

Programas convencionais	Sistemas Especialistas
Para cada conjunto de dados há uma solução	Mais de uma solução possível
Não há incerteza. Mesmo quando a solução é dada em probabilidade, há certeza na probabilidade.	Não há certezas nas soluções e algumas respostas erradas são toleradas.
Se faltam dados não se pode chegar a uma conclusão. Dados quantitativos.	Dados são incompletos, incertos, subjetivos, inconsistentes, sujeitos a mudança (dados conceituais)
Decisões e dados podem ser reduzidos a números, fórmulas e algoritmos.	Lidam com o conhecimento conceptual que não pode ser reduzido a números.
Relativamente difíceis de se modificar e atualizar.	Relativamente fáceis de modificar, atualizar e aumentar.
Trabalham primariamente com o processamento numérico.	Trabalham primariamente com o processamento simbólico.
Informações e estrutura de controle integrados no corpo do programa.	Estrutura de controle separada do conhecimento utilizado pelo sistema.
Soluções através de algoritmos (passos da solução estão explícitos)	Utilizam procura heurística (passos da solução estão implícitos).
Desenvolvimento linear e direto.	Desenvolvimento cíclico e incremental.

O esquema básico do Sistema Especialista MIT é mostrado na Fig.2. As regras são construídas a partir do conhecimento de Especialista Humano e na Base de Conhecimento, montada a partir da análise dos espectros dos testes experimentais. A máquina de inferência, *Expert SINTA*, aplica os métodos para inferir novo conhecimento a partir de um dado conhecido. A interface homem/máquina tem características de adquirir/mostrar e de procurar/explicar o conhecimento.

O *Expert SINTA* é uma ferramenta computacional que utiliza técnicas de Inteligência Artificial para geração automática de Sistemas Especialistas, ou seja, permite a criação de bases de conhecimento computacionais modeladas a partir de indicações de especialistas humanos. O *Expert SINTA* é uma *shell, freeware*, desenvolvido pelo LIA - Laboratório de Inteligência Artificial da Universidade Federal do Ceará, Nogueira et al (1996).

Trata-se de uma ferramenta que utiliza um modelo de representação do conhecimento baseado em regras de produção e probabilidades, tendo como objetivo principal simplificar o trabalho de implementação de Sistemas Especialistas através do uso de uma máquina de inferência compartilhada, da construção automática de telas e menus, do tratamento probabilístico das regras de produção e da utilização de explicações sensíveis ao contexto da base de conhecimento modelada.

A arquitetura mais comum de Sistemas Especialistas é a que envolve regras de produção. Essas regras são simplesmente um conjunto de condições no estilo *SE... ENTÃO...*, com a possibilidade de inclusão de conectivos lógicos relacionando os atributos no escopo do conhecimento e o uso de probabilidades. Na Fig. (3) tem-se o exemplo de duas regras implementadas no *SE_MIT*.

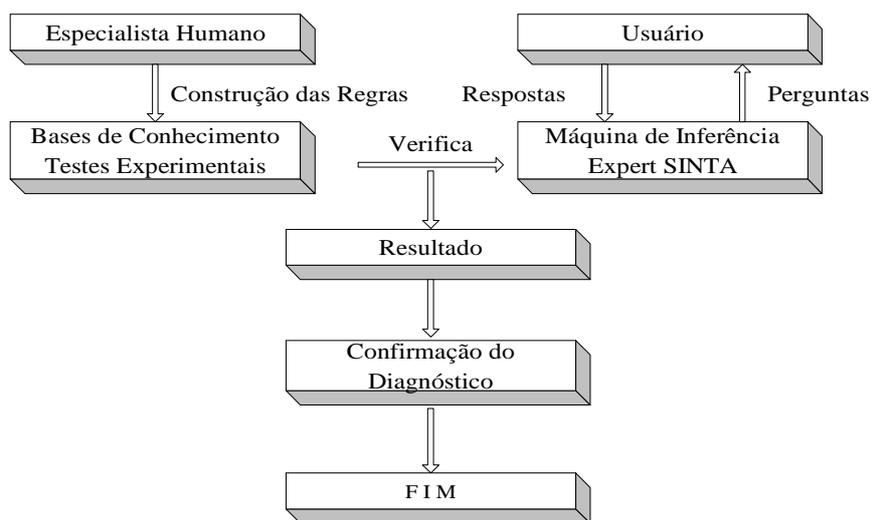


Figura 2. Estrutura do Sistema Especialista MIT

```

REGRA 63
SE Tecnologia de Análise Espectral = Análise de Fluxo Magnético
E Eixo das Amplitudes = dB
E [ΔF] Diferença entre Amplitudes (60Hz e Maior Pico em 2xfs ao seu redor) = Menor que 27,00 dB
ENTÃO Falha de Origem Elétrica no Motor = O Motor apresenta Barras Quebradas e/ou Trincadas CNF 100%
REGRA 64
SE Tecnologia de Análise Espectral = Análise de Corrente
E Eixo das Amplitudes = dB
E [ΔC] Diferença entre Amplitudes (60Hz e Maior Pico em 2xfs ao seu redor) = Maior que 49,00 dB
ENTÃO Falha de Origem Elétrica no Motor = O Motor não apresenta Barras Quebradas e/ou Trincadas CNF 100%
  
```

Figura 3. Regras implementadas no *SE_MIT*

3. DEFINIÇÃO DA ESTRATÉGIA DE DIAGNÓSTICO

Em virtude da grande complexidade do assunto optou-se por definir uma estratégia de diagnóstico que separasse a origem das falhas. Essa estratégia é definida logo no início de uma

consulta, através de uma série de perguntas. Na primeira ou segunda resposta fornecida pelo usuário, o *SE_MIT* é direcionado para buscar a origem da falha (mecânica ou elétrica).

A primeira pergunta define a tecnologia utilizada para aquisição dos sinais: *Análise de Vibração*, *Análise de Corrente* ou *Análise de Fluxo Magnético*. A segunda define o eixo das amplitudes: *linear* ou *dB*.

No *SE_MIT* as análises de corrente e fluxo magnético são usadas somente no diagnóstico de falhas de origem elétrica. A análise de vibração, pode ser utilizada para diagnosticar falhas de origem elétrica e mecânica. As amplitudes dos espectros de origem mecânica são plotadas na escala *linear* e os de origem elétrica em *dB*.

Estas duas perguntas não são suficientes para direcionar o *SE_MIT* na busca da origem da falha. Por exemplo, o *Desbalanceamento de Fase*, só será separado da seqüência de busca por falhas de origem mecânica quando o conjunto de frequências determinísticas for definido.

Apesar do Sistema Especialista *SE_MIT* diagnosticar as falhas de origem elétrica e mecânica, escolheu-se barras quebradas para ilustrar sua aplicação.

4. APLICAÇÃO DO *SE_MIT* PARA DIAGNÓSTICO DE BARRAS QUEBRADAS

Na Fig. (4) tem-se o fluxograma para o diagnóstico de barras quebradas através da análise de corrente, amplitudes em dB. O diagnóstico é feito através da diferença em dB da amplitude em $1 \times f_1$ (f_1 = frequência de linha) e a maior de uma das bandas laterais espaçadas em $2 \times f_s$ (f_1 = frequência de escorregamento).

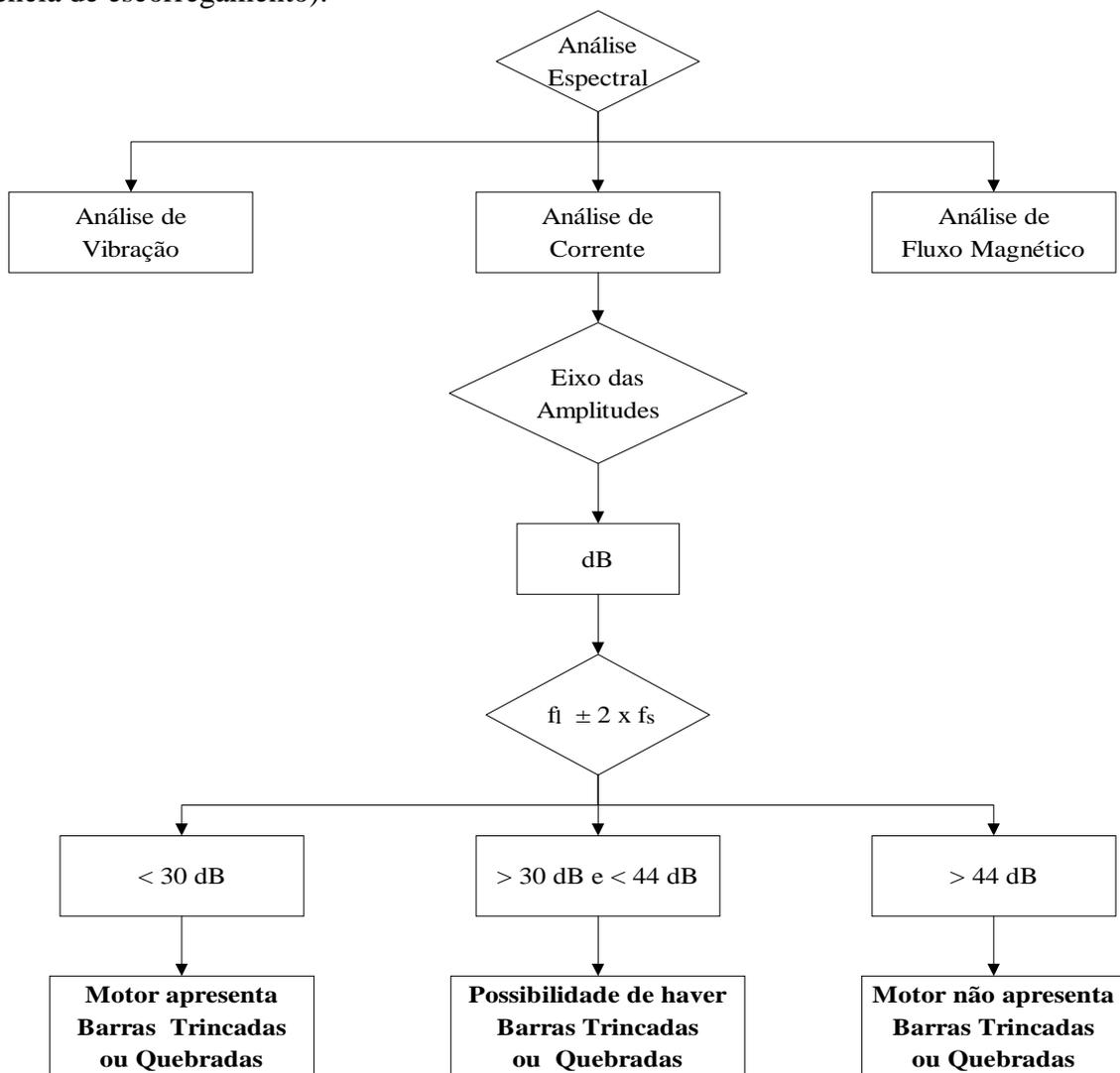


Figura 4. Fluxograma para diagnóstico de barras quebradas através da análise de corrente

A partir espectro de corrente mostrado na Fig. (4), o Sistema Especialista *SE_MIT* fará o diagnóstico da falha.

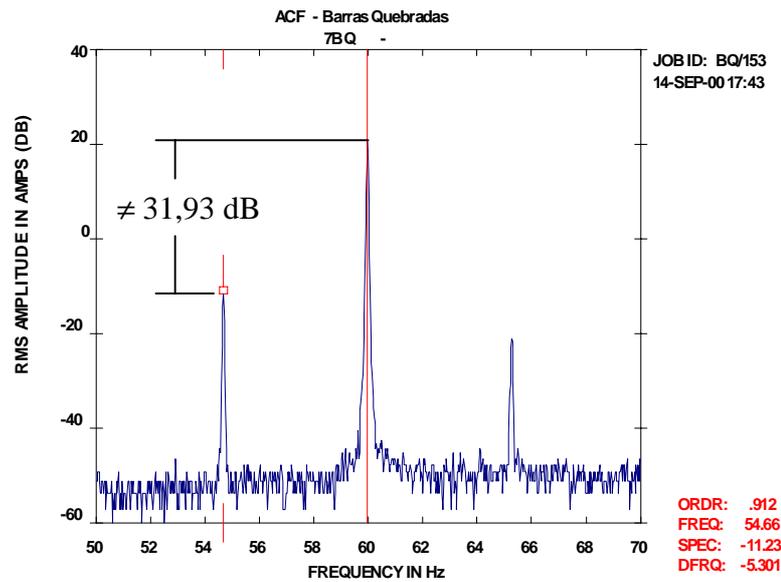


Figura 4. Espectro de corrente para sete barras quebradas

O usuário deverá fornecer algumas informações necessárias para que as regras do sistema sejam aceitas. Estes dados são perguntados ao usuário, por se tratarem de dados que o Sistema Especialista não pode concluir sozinho.

A entrada de dados é interativa, sendo as perguntas personalizadas feitas diretamente ao usuário. Explicações à respeito da importância de cada resposta do diagnóstico da falha são também disponíveis.

Na Fig. (5) tem-se o resultado da consulta ao *SE_MIT*. Se as premissas das regras tiverem sido satisfeitas, significa que o Sistema Especialista foi capaz de diagnosticar o defeito e uma resposta será dada ao usuário. No caso em estudo a resposta foi *O Motor apresenta Barras Quebradas e/ou Trincadas*, com um grau de confiança de 100%. Caso contrário, o Sistema Especialista informaria que não foi capaz de diagnosticar o defeito, afirmando que nenhum valor foi encontrado.

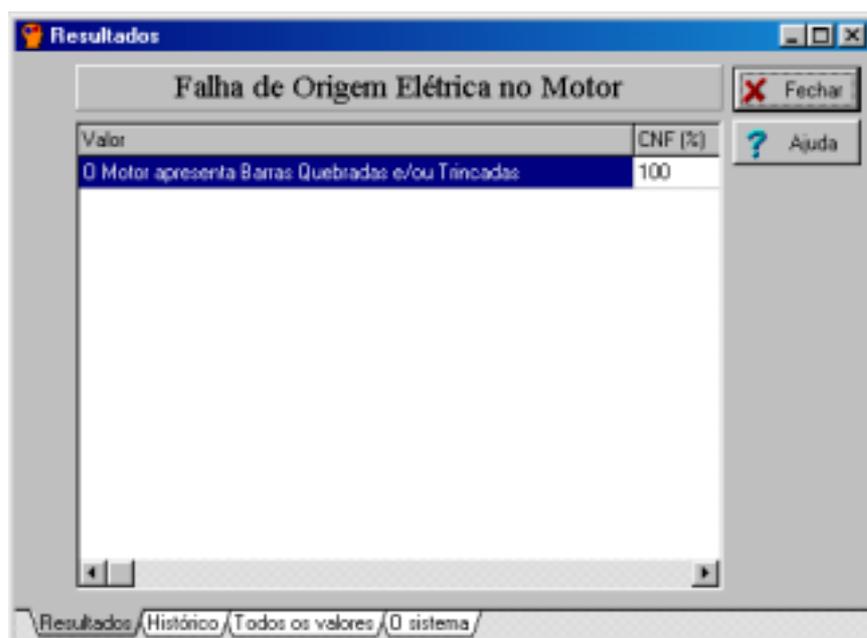


Figura 5. Resultado da consulta ao *SE_MIT* para o diagnóstico elétrico

A tela de *Resultados*, tem-se ainda três outros tipos de informações. Na opção *Histórico*, Fig. (6) é mostrado, passo a passo, todo o processo de busca realizado pela máquina de inferência para a conclusão do diagnóstico.

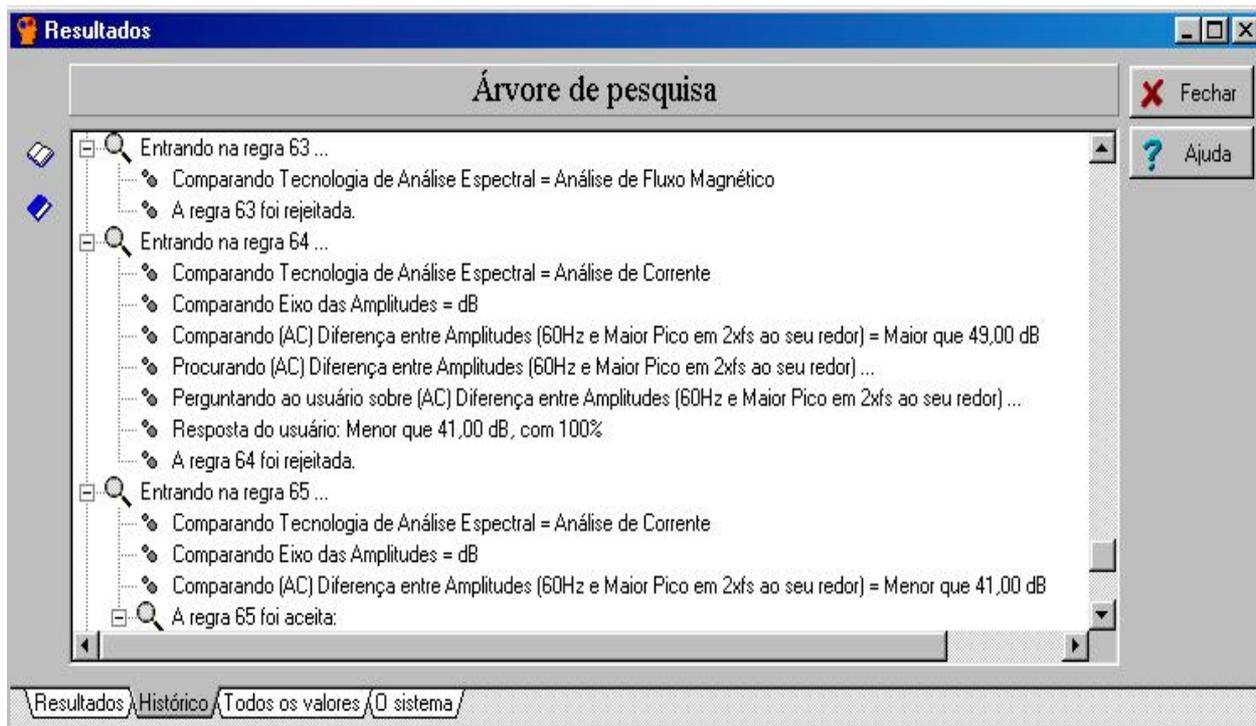


Figura 6. *Histórico* do diagnóstico elétrico

Na opção *Todos os Valores*, Fig. (7) são mostrados todos os valores assumidos pelas variáveis.

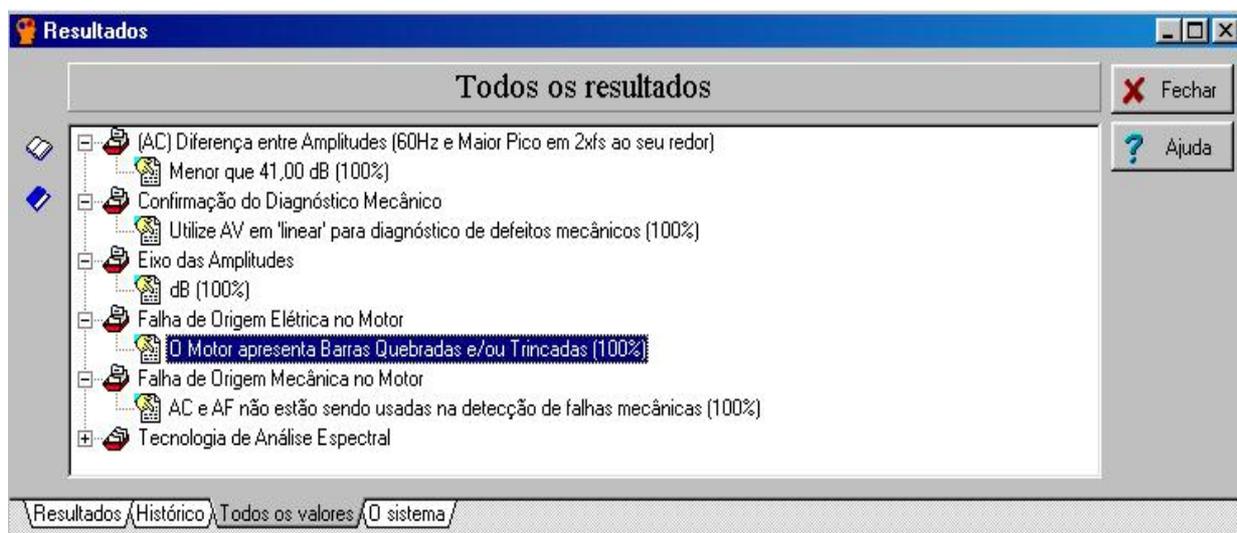


Figura 7. *Todos os Valores* do diagnóstico elétrico

Na opção *O Sistema*, Fig. (8), são mostradas todas as sessenta e sete regras implementadas para diagnosticar as falhas de origem mecânica e elétrica nos motores de indução trifásico.

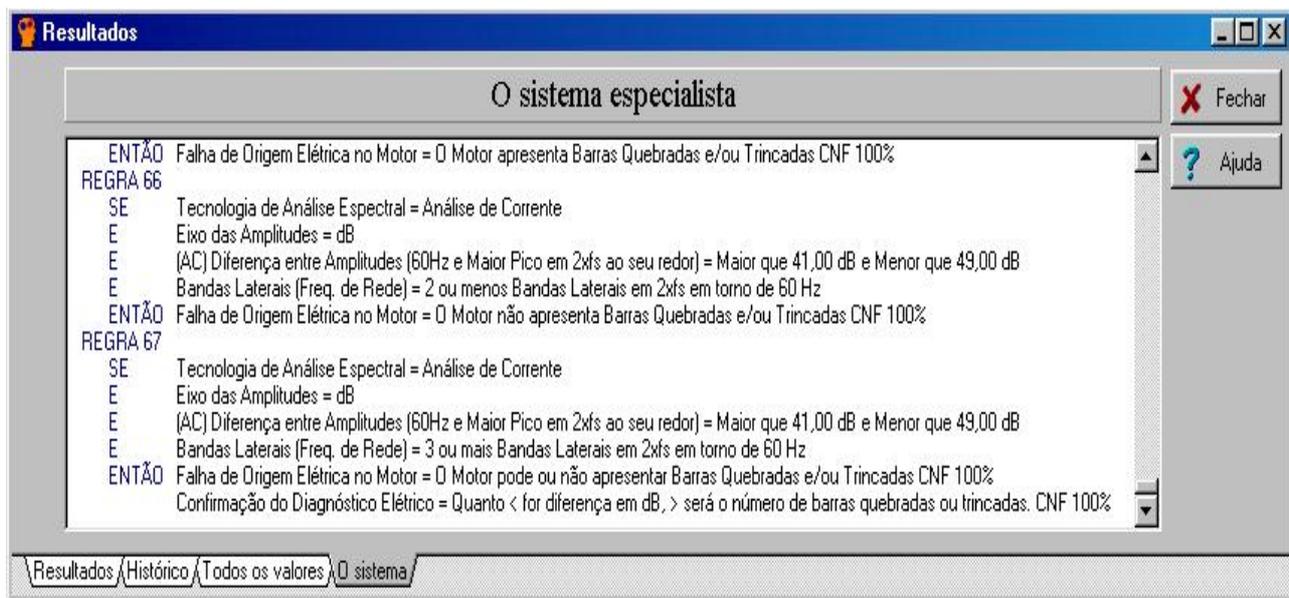


Figura 8. O Sistema do diagnóstico elétrico

5. CONCLUSÕES

Os problemas presentes nos motores de indução trifásico se mostram adequados para representação por meios de regras de produção. Com o auxílio do *Expert SINTA*, o desenvolvimento do Sistema Especialista *SE_MIT* se deu sem quaisquer dificuldades de implementação e teste. As dificuldades com os fatores de confiança foram resolvidas com o conhecimento dos especialistas deste grupo de pesquisa, além da colaboração de especialistas externos. Como nenhum domínio do conhecimento humano é completo e imutável, o Sistema Especialista *SE_MIT* será revisado e ampliado, buscando incluir novos conhecimentos que serão adquiridos ao longo de novas pesquisas e através de troca de experiências com especialistas da área de Manutenção Preditiva.

6. AGRADECIMENTOS

A Flender do Brasil Ltda., a WEG Motores, Bolsa SAE/PRG/UNICAMP, a Fapemig (Projeto TEC 1008/96), ao Grupo SINTA do Laboratório de Inteligência Artificial da UFC.

7. REFERÊNCIAS

- Brito, J.N., Baccarini, L.M.R e Pederiva, R., 1999, “Análisis de Vibración y Análisis de Corriente, Herramientas de Mantenimiento Preditivo Aplicadas en la Detección de Problemas en Motores Eléctricos”, IV Congreso Iberoamericano de Ingeniería Mecánica, CIDIM'99, Santiago, Chile, Volumen 2.
- Chow, M.Y, 1997, “Methodologies of using Neural Network and Fuzzy Logic Technologies for Motor Fault Detection”, World Scientific Publishers.
- Chow, M.Y. and Yee S.O., 1990, “Real Time Application of Artificial Neural Networks for Incipient Fault Detection of Induction Machines”, The third International Conference of Industrial and Engineering Applications of Artificial Intelligence and Expert Systems, Charleston. South Carolina.
- Costello, M.J., 1994, “Shaft Voltages and Rotating Machinery”, IEEE Transactions on Industry Applications Vol. 29, No. 2, pp. 419-426.
- Goode, P.V. and Chow, M.Y., 1995, “Using a Neural/Fuzzy Systems to Extract Heuristic Knowledge of Incipient in Induction Motors: Part I - Methodology” and Part II - Application, IEEE Transaction on Industrial Electronics, Vol. 42, No. 2, pp. 131-146.

- Laufmann, S.C., 1990, "A methodology for evaluating potential KBS applications", IEEE Expert, Vol.5, No.6, pp.43-60.
- Liebowitz, J., 1988, "Useful approaches for evaluating Expert Systems", Vol.3, pp. 86-96.
- Nogueira, H.M., Silva, R.B.A., Alcântara, J. F. e Andrade, R.F., 1996, "Expert SINTA", Anais da Seção de Ferramentas do X Simpósio Brasileiro de Engenharia de Software.
- Nogueira, H.M., Silva, R.B.A., Alcântara, J. F. e Andrade, R.F., 1996, "Expert SINTA", Anais do XII Simpósio Brasileiro de Software, São Carlos, SP.
- Trutt, F.C., 1993, "Prediction of Electrical Behavior in Deteriorating Induction Motors", IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 29, No. 4, pp. 1239-1243.
- Waterman, D. A., 1986, "A Guide to Expert System", Addison-Wesley Publishing Company, Inc.

DEVELOPMENT OF AN EXPERT SYSTEM TO DIAGNOSE FAULTS IN ELECTRIC MOTORS

Jorge Nei Brito

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

Eder Merlim Garcia

UNICAMP - Caixa Postal 6051 - Campinas - SP - 13083-970- 980990@apollo-11.fem.unicamp.br

Robson Pederiva

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

***Abstract.** Industrial motors are subject to incipient faults which, if undetected, can lead to motor failure. The necessity of incipient fault detection can be justified by safety and economical reasons. In this paper is presented the development of the Expert System SE_MIT to diagnose faults in induction motors using the shell Expert SINTA. The main goal is help maintenance personal to diagnose faults through the acquired spectrums collected by predictive technologies (vibration analysis, current analysis and magnetic flux analysis). Through the Expert System SE_MIT is possible to detect electric faults (broken bars and phase unbalance), mechanic faults (unbalance, misalignment and mechanical looseness) and the normal operation condition.*

***Keywords.** Expert System, Electric Motors, Vibration Analysis, Current Analysis, Flux Analysis.*