



SISTEMA HÍBRIDO PARA DIAGNÓSTICO DE FALHAS EM MOTORES DE INDUÇÃO TRIFÁSICOS COM BASE NO MÉTODO VIBRACIONAL, CORRENTE DE ARMADURA E LÓGICA FUZZY

Amanda Guerra de Araújo Cruz

amanda.araujo@ifpb.edu.br

IFPB

Av. Primeiro de Maio 720, 58015-435, Paraíba, João Pessoa, Brazil

Abel Cavalcante Lima Filho

Francisco Antônio Belo

Jobson Francisco da Silva

abelima@gmail.com

belo@les.ufpb.br

jobsonfsilva@ig.com.br

UFPB

Cidade Universitária, 58051-900, Paraíba, João Pessoa, Brazil

Abstract. *O motor de indução trifásico está presente em praticamente todos os processos industriais e devido à sua importância, é fundamental uma correta manutenção preditiva, evitando perda de produção e acidentes em caso de falhas inesperadas. Este trabalho desenvolve um sistema híbrido que utiliza dados de sensores de vibração e corrente para detecção de falhas de maneira precoce, uma vez que cada técnica possui limitações e desvantagens quando utilizadas individualmente. Os sinais são processados no domínio da frequência, servindo como entradas em um sistema inteligente de lógica Fuzzy. A falha de desbalanceamento foi corretamente detectada e ensaios do motor com barras quebradas estão sendo realizados. O processamento dos sinais, bem como a classificação quanto à severidade através do sistema Fuzzy, são desenvolvidos através do programa Matlab®.*

Keywords: *Detecção de falhas, Lógica fuzzy, Motor de indução*

1 INTRODUÇÃO

A todo momento é exigido que os processos industriais sejam aprimorados e ofereçam uma maior produção e maior lucro, como consequência. Para isso o termo mais procurado é o de confiabilidade, uma vez que custos com manutenção estão entre os maiores no processo de fabricação.

Os motores de indução trifásicos estão extensivamente presentes em diversas aplicações industriais, de simples sistemas a situações com alto nível de importância, desta forma, sua parada ou até mesmo redução de eficiência, podem acarretar perdas financeiras, acidentes ou danos ao meio ambiente, fazendo com que a procura por sistemas de detecção de falhas seja crescente.

A análise de vibração e do espectro do sinal de corrente são técnicas bastante utilizadas para detecção de falhas em máquinas rotativas, entretanto apresentam limitações para certas aplicações, reduzindo sua eficácia. Portanto é apresentado um sistema que ao unir ambas as tecnologias, melhora a detecção de falhas em motores.

Segundo Kral et al (2003) a detecção de falhas de uma forma geral pode ser dividida em quatro etapas:

- Aquisição de sinais dos sensores (corrente, tensão, vibração, etc) e placa de aquisição de dados;
- Condicionamento de sinal (transformada de Fourier, Wavelet, elementos finitos, entre outros);
- Método utilizado para detecção e
- Avaliação da falha com relação à severidade.

Para um sistema de monitoramento que visa fornecer informações eficientes em tempo real, a análise de vibração necessita (Betta et al, 2002):

- Agilidade na detecção de falhas;
- Alta sensibilidade na identificação de falhas, escolhendo valores excelentes para amostragem, frequência, número de pontos, entre outros;
- Correta correlação entre a vibração e sua causa para que o software de diagnóstico possa entender sua severidade.

Alguns trabalhos foram realizados unindo dois ou mais métodos de detecção, entre eles, Chaudhury et al (2012) alcançou a identificação do desalinhamento através de um algoritmo que isola as características das falhas das causadas por outras condições de operação através da utilização simultânea do monitoramento da vibração radial e da corrente de fase, eliminando o impacto da oscilação de torque na carga e o alto ruído, inerente ao ambiente e aos dispositivos de chaveamento, mostrando a capacidade de sistemas de detecção de falhas que combinem dois métodos ou mais.

O presente trabalho teve como objetivo desenvolver um sistema híbrido para detecção de falhas em motores através da análise dos sinais de vibração e corrente da armadura, análise pela transformada de Fourier e classificação das falhas quanto à severidade pela lógica Fuzzy.

2 ENSAIOS EXPERIMENTAIS

Os ensaios para elaboração do sistema de detecção de falhas foram realizados na bancada de análise apresentada na Figura 1, composta por um motor de indução trifásico e como sistema aplicador de carga é utilizado um gerador de corrente contínua ligado a um circuito variador de tensão.

As aquisições foram feitas através da placa da National Instruments, NI USB-6211, com uma taxa de 30kHz. Os sensores de corrente são de efeito Hall e o sensor de vibração é instalado perpendicularmente ao eixo de rotação do motor.



Figura 1. Bancada Experimental

As aquisições de sinais sob a falha de desbalanceamento foram realizadas através da adição de uma massa no eixo do motor, começando com a situação do motor sem massa e chegando a 100g de acréscimo. Em seguida o motor foi acoplado e o processo repetido para diferentes simulações de carga. Os sinais foram adquiridos através da placa e de um programa de aquisição em Labview® para posteriormente serem analisados através da utilização da transformada de Fourier no programa Matlab®.



Figura 2. Ensaio de desbalanceamento com motor desacoplado

Os ensaios de barras quebradas foram realizados através de furos realizados ao longo das barras do rotor. O tamanho e a localização dos furos foram determinados através da análise de um diagrama do rotor enviado pelo fabricante. Foram adquiridos os sinais do motor bom, antes dos furos, com uma barra quebrada, três, cinco e por último sete barras foram quebradas, conforme apresentado na Fig. 3, sendo cada situação com 6 condições de carga (0Nm, 5Nm, 10Nm, 15Nm, 20Nm e 25Nm).



Figura 3. Rotor com uma, três, cinco e sete barras quebradas

2.1 Análise do Ensaio de Desbalanceamento

O desbalanceamento ou excentricidade do entreferro é caracterizado pela presença de desequilíbrios de massa em relação aos eixos de rotação, gerando uma força estacionária em relação ao rotor. Uma vez que o sinal no tempo é senoidal, cada ciclo tem a amplitude dependente da quantidade de desbalanceamento, assim a vibração predominante ocorre na frequência de rotação do rotor, com maiores amplitudes na direção radial (Baccarini, 2005).

A frequência de rotação mecânica é calculada através de:

$$f_m = \frac{60}{p} \quad (1)$$

Onde p é o número de pares de pólos do motor, que na bancada em questão é igual a 2, com uma alimentação de 60Hz, a frequência de rotação do motor fica em 30Hz.

Já para análise do sinal de corrente, a faixa a ser observada encontra-se no valor da frequência de alimentação (60Hz) e suas bandas laterais (30Hz e 90Hz), não sendo para o sistema utilizado, encontrada uma coerência entre o aumento do desbalanceamento e seu efeito no sinal de corrente, conforme apresentado na Fig.4, sendo utilizados apenas os resultados através do sinal de vibração.

Para sinais de vibração, o pico localizado em 30Hz apresentou comportamento crescente à medida que o desbalanceamento aumentava, para a situação do motor desacoplado conforme observado na Fig. 5, sendo utilizado como entrada do sistema Fuzzy para classificar quanto à severidade da falha.

Os sinais de vibração para o motor acoplado, com carga ou sem carga não se mostraram coerentes com o aumento do nível de desbalanceamento, tal condição pode ser causada pela

robustez da bancada experimental que reduz através do acoplamento os efeitos de eventuais desbalanceamentos no eixo.

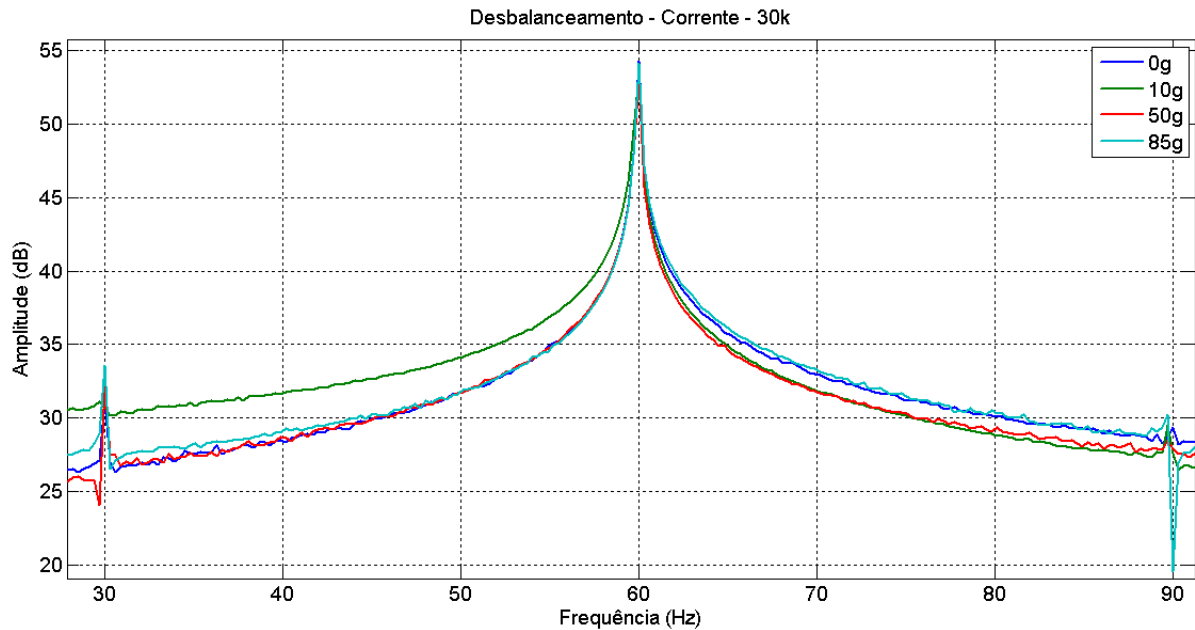


Figura 4. Espectro do sinal de corrente para falha de desbalanceamento com 0g, 10g, 50g e 85g

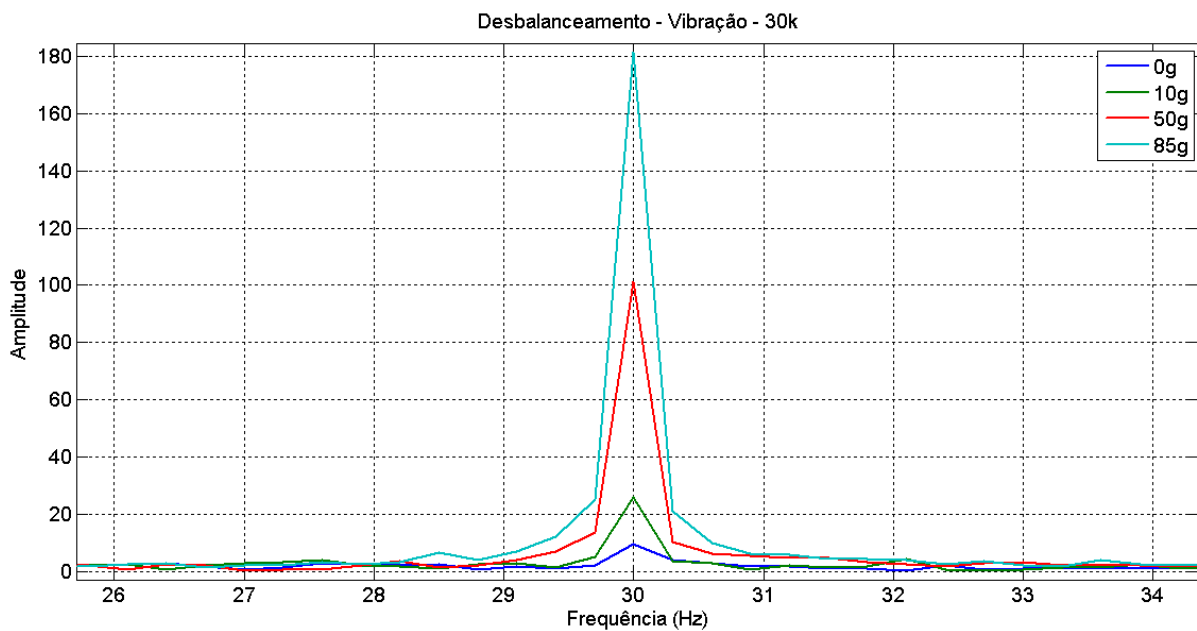


Figura 5. Espectro do sinal de vibração para falha de desbalanceamento com 0g, 10g, 50g e 85g

2.2 Análise do Ensaio de Barras Quebradas

Segundo Thomson e Fenger (2001), quebras e trincas em barras podem ser causadas por esforços: térmicos (sobrecarga), magnético (vibração, excentricidade), residual (problemas na

fabricação), dinâmico (forças centrífugas, conjugado da carga), ambiental (contaminação química ou pela umidade) e mecânico (fadiga).

Indicadores de barras quebradas são vibração excessiva, ruídos e faíscamento durante a partida do motor, sendo características presentes também em outros tipos de falhas, dificultando uma correta detecção. Esta é realizada através do monitoramento do espectro de frequência de vibração e de corrente em busca de anormalidades, uma vez que o espectro do motor em condição normal é diferente do espectro com barras quebradas.

A análise do efeito de barras quebradas no espectro do sinal de vibração ainda não foi realizada.

Foram utilizados os sinais de corrente através da técnica de análise da assinatura espectral (MCSA), onde a localização das frequências da falha de barras quebradas no espectro é definida por:

$$f_{banda} = (1 \pm 2ks)f_l \quad (2)$$

Sendo $k=1, 2, 3, \dots, n$; n é um inteiro maior que zero; f_l é a frequência de linha (60Hz), s é o escorregamento do motor.

Primeiramente se faz necessário encontrar o valor do escorregamento, que no sistema em questão, se utilizou do espectro do sinal de vibração, para que não seja necessária a instalação de um medidor de rotação mecânica do motor, visto que alguns motores não possuem tanta acessibilidade ou são lacrados.

Segundo Mertens Junior (2008) o valor do escorregamento pode ser encontrado através da seguinte equação:

$$s = \frac{f_2 - f_{m2}}{f_2} \quad (3)$$

Onde:

- f_2 é a frequência resultante da interação estator rotor, sendo duas vezes a frequência de alimentação do motor ($2*f_l=120\text{Hz}$);
- f_{m2} é o segundo harmônico da frequência de rotação mecânica do motor, valor próximo a frequência f_2 .

Na figura a seguir é apresentado um exemplo da localização da frequência f_{m2} utilizada no cálculo do escorregamento através do espectro do sinal de vibração para a situação de 1, 5 e 7 barras quebradas com carga de 15Nm.

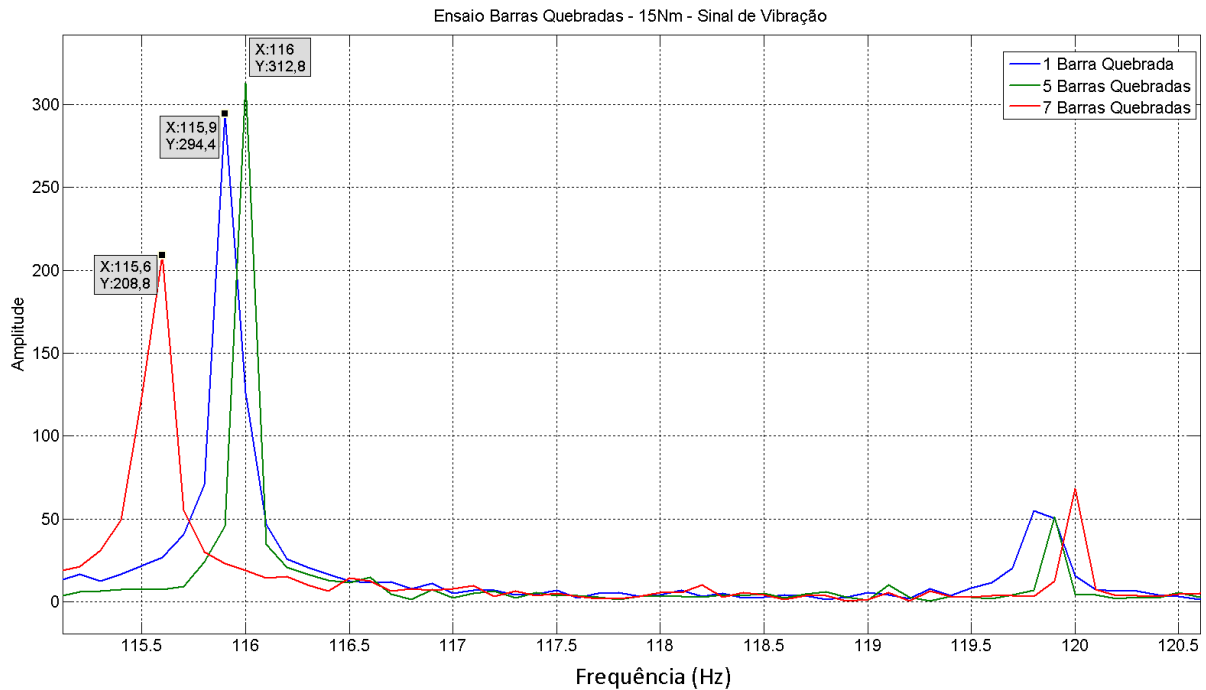


Figura 6. Espectro de vibração para localização da f_{m2} utilizada no cálculo do escorregamento

A tabela a seguir apresenta para cada condição de falha, os valores de f_{m2} , do escorregamento calculado através da Eq.3 e da localização no espectro de corrente das três primeiras bandas laterais esquerdas e direitas teóricas, para uma carga no valor de 15Nm.

Tabela 1. Informações do ensaio de barras quebradas com carga de 15Nm

	$f_{m2}(\text{dB})$	s	BE-1 (Hz)	BD-1 (Hz)	BE-2 (Hz)	BD-2 (Hz)	BE-3 (Hz)	BD-3 (Hz)
1BQ	115,9	0,03417	55,9	64,1	51,8	68,2	47,7	72,3
3BQ	115,5	0,03750	55,5	64,5	51	69	46,5	73,5
5BQ	116	0,03333	56	64	52	68	48	72
7BQ	115,6	0,03667	55,6	64,4	51,2	68,8	46,8	73,2

Na Fig. 7 é apresentado o valor real onde foram encontradas cada banda lateral, sendo possível observar que os valores estiveram muito próximos dos valores calculados, tendo variações possivelmente causadas durante os ensaios, como a dificuldade de se impor um valor consistente de carga em todos os ensaios através do variador de tensão.

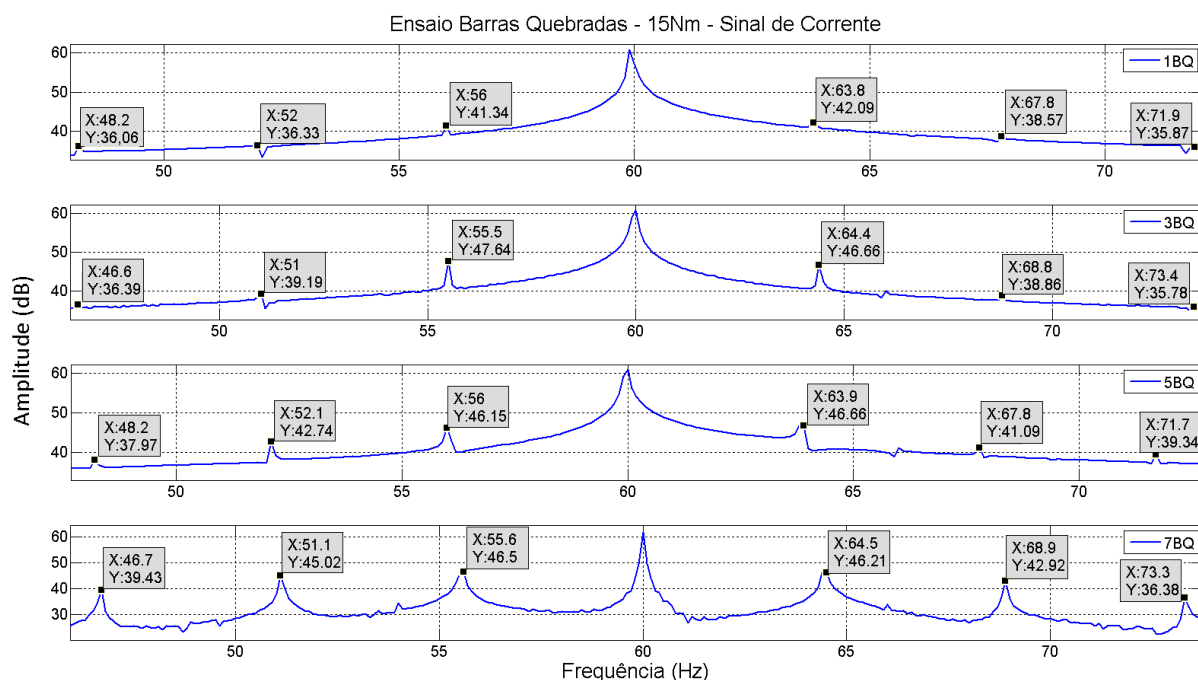


Figura 7. Bandas laterais da falha de barras quebradas para carga de 15Nm

3 SISTEMA DE LÓGICA FUZZY

3.1 Definições

A lógica Fuzzy permite avaliar uma premissa com um grau de verdade que vai de 0 a 1, podendo torna-la parcialmente verdadeira ou falsa, diferente da lógica clássica que só admite extremos: “totalmente verdadeiro” ou “totalmente falso”. Tal modelo permite que seja aplicado em várias áreas de controle e de tomada de decisões, dando a habilidade de raciocinar de forma semelhante ao ser humano (Malange, 2010).

O sistema de lógica Fuzzy pode ser representado através de diagrama de blocos, conforme apresentado na Fig. 8.

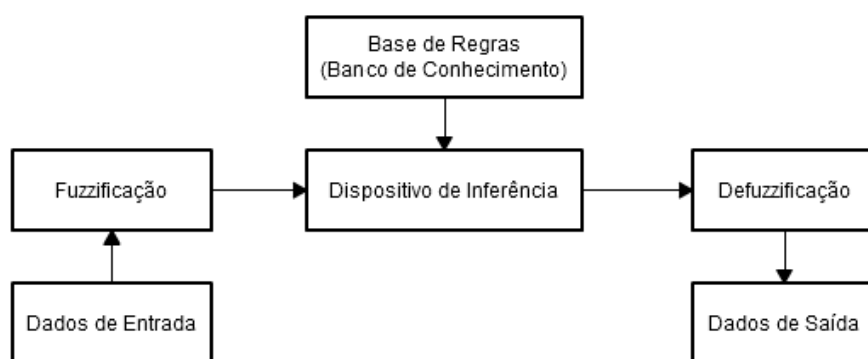


Figura 8. Diagrama de blocos do sistema especialista via lógica nebulosa (Carneiro, 2003)

A etapa de fuzzificação transforma o dado ou variável de entrada em grau de pertinência de acordo com a função de pertinência utilizada. Tal função pode assumir diferentes formas geométricas (triangular, trapezoidal, gaussiana, entre outras), associando um peso a cada valor de entrada processada e posteriormente representando graficamente a magnitude da participação de cada uma, a mais utilizada é a triangular.

Para tratar computacionalmente o conjunto de regras que representam o conhecimento de um especialista, tem-se o dispositivo de inferência.

A base de regras é um conjunto de regras linguísticas que tem a função de alcançar um objetivo atrelado a um fato. Utilizando uma descrição informal elaborada pelo ser humano (especialista) é dado início ao desenvolvimento das regras de inferência, onde cada uma é uma condição com uma ou mais cláusulas, no formato: “SE” x é isto “ENTÃO” y é aquilo (Carneiro, 2003).

Como resultado da inferência tem-se a defuzzificação, onde é obtido um valor numérico da variável de saída através de métodos como média dos máximos, centro de gravidade, entre outros.

3.2 Aplicação da Lógica Fuzzy no Sistema

De forma geral, o sistema Fuzzy permite a avaliação das entradas, que de acordo com regras pré-estabelecidas, fornece conclusões sobre o estado do motor, dentre os vários métodos de inferência, o Mamdani é o mais utilizado e foi o escolhido para este trabalho.

Através dos valores de pico do sinal de vibração na frequência de 30Hz, para todos os ensaios de desbalanceamento realizados, de 0 a 100g, sendo 4 aquisições para cada situação, foi criada a variável linguística de entrada “picovibração” e os valores foram separados em 4 funções de pertinência trapezoidais: MuitoBaixo, Baixo, Alto, MuitoAlto, bem como a variável de saída “condiçãomotor” foi dividida em: Bom, FalhaInicial, FalhaModerada e FalhaAvancada, conforme apresentado no toolbox Fuzzy do programa Matlab®, nas figuras abaixo.

As escolhas dos valores para cada função de pertinência, bem como o formato geométrico utilizado, representam o conhecimento do especialista acerca do motor em questão, onde é conhecido o comportamento e quais valores de desbalanceamento são admissíveis ou comprometem o funcionamento de todo o conjunto. Tais escolhas devem ser adaptadas para cada motor ou sistema em particular.

Na Fig.9 é possível perceber que o valor considerado muito baixo, onde representa o funcionamento nominal do motor é bem pequeno em relação às demais situações de falhas, sendo fácil a detecção de uma falha desde o seu início até uma condição que exija ação imediata.

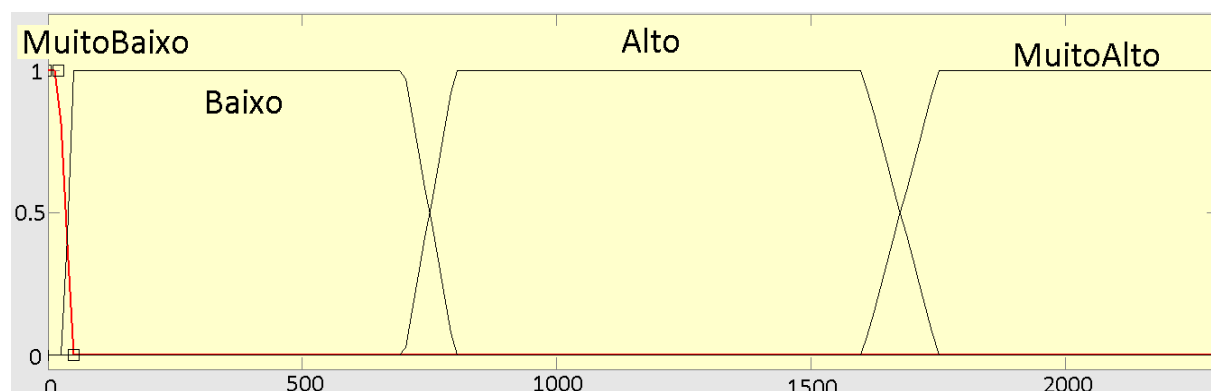


Figura 9. Variável Linguística de entrada “picovibração”

De acordo com os valores de entrada o sistema fuzzy fornece um valor de 0 a 1 que classifica a condição do motor conforme as funções de pertinência mostradas na Fig.10.

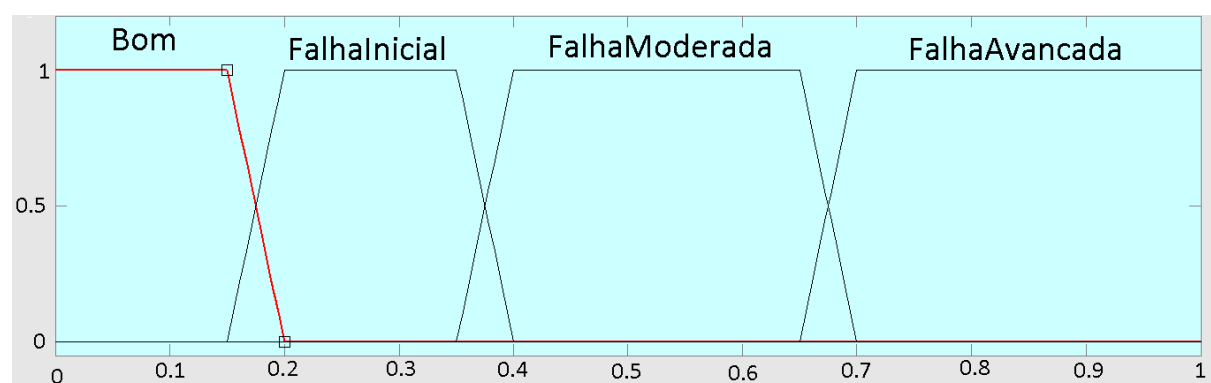


Figura 10. Variável Linguística de saída “condicaomotor”

Através dos testes iniciais realizados o sistema fuzzy foi capaz de identificar corretamente a falha de desbalanceamento e classificar quanto à severidade da falha, nos níveis configurados para a condição do motor. Mais testes estão sendo realizados e o sistema também será capaz de identificar e classificar a falha de barras quebradas.

4 CONCLUSÕES

Diante da análise preliminar dos dados para a falha de desbalanceamento foi encontrada uma situação que não contribui para a utilização dos sinais de corrente e da situação de motor acoplado para a detecção do desbalanceamento. Tal situação pode ser causada devido à robustez do sistema de acoplamento do motor que reduz os efeitos deste tipo de falha, levando a uma aplicação do sistema de detecção à motores que trabalham desacoplados, com por exemplo, com hélices montadas no eixo, responsáveis por ventilação ou exaustão, pois a carga é o próprio ar.

Para o motor desacoplado, os sinais de vibração foram muito coerentes e serviram de entrada para o sistema de lógica Fuzzy que detecta e classifica a falha quanto à sua severidade, através de parâmetros que representam o conhecimento de um especialista.

Para a falha de barras quebradas o sinal de corrente apresentou corretamente o efeito de sua progressão e o sinal de vibração ainda será analisado para que possa integrar o sistema de lógica fuzzy.

Uma vez que o sistema conta com a utilização de sinais de vibração e corrente, ele identificará tanto falhas mecânicas quanto elétricas de maneira mais eficaz, contribuindo para o bom funcionamento do motor analisado, ao unir vantagens de cada método sensor envolvido.

REFERÊNCIAS

Baccarini, L. M. R., 2005. *Detecção e Diagnóstico de Falhas em Motores de Indução*. Tese de doutorado, Universidade Federal de Minas Gerais.

Betta, G., Liguori, C., Paolilo, A., Pietrosanto, A., 2002. A DSP-Based FFT-Analyzer for the Fault Diagnosis of Rotating Machine Based on Vibration Analysis, *IEEE Trans. On Instrumentation and Measurement*, v.51, n.6, pp. 1316-1322.

Carneiro, A. L. G., 2003. *Desenvolvimento de Sistema de Monitoração e Diagnóstico aplicado a Válvulas Moto-Operadas utilizadas em Centrais Nucleares*. Tese de Doutorado, IPEN-USP.

Chaudhury, S. B., 2012. Experimental Study of Induction Motor Misalignment and its Online Detection Through Data Fusion. *IET Electric Power Applications*.

Kral, C., et al., 2003. A comparison of Rotor Fault Detection Techniques with Respect to the Assessment of Fault Severity. *Diagnostics for Electric Machines, Power Electronics and Drives, SDEMPED*, pp. 265-270.

Malange, F. C. V., 2010. *Rede Neuro-Fuzzy-Wavelet para Detecção e Classificação de Anomalias de Tensão em Sistemas Elétricos de Potência*. Tese de Doutorado, UNESP.

Mertens J., A., 2008. *Uma Abordagem sobre Detecção de Barras Quebradas em Motores de Indução*, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Paraná.

Thomson, W. T. e Fenger, M., 2001. Current Signature Analysis to Detect Induction Motor Faults. *Industry applications magazine, IEEE*, pp. 26-34.