



CONEM 2016
CONGRESSO NACIONAL DE
ENGENHARIA MECÂNICA

21-25
AGOSTO DE 2016
FORTALEZA - CEARÁ

SISTEMA HÍBRIDO PARA O DIAGNÓSTICO DE EXCENTRICIDADE DA CARGA ACOPLADA A UM MOTOR DE INDUÇÃO TRIFÁSICO UTILIZANDO LÓGICA FUZZY

Leonardo José Cavalcante Vasconcelos, leonardo_cavalcante2008@hotmail.com¹
Acarcio Gomes de Almeida Junior, acarciojunior@gmail.com¹
Élton Franklin Silva de Lima, elton.franklin.lima@gmail.com¹
Luís Gabriel da Silva, islug.luis@gmail.com¹
Alexander Patrick Chaves de Sena, alexander.sena@caruaru.ifpe.edu.br¹

¹ Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Pernambuco — IFPE. Estrada para o Alto do Moura Km 3.8, CEP 55040-120, Caruaru-PE, Brasil.

Resumo: Neste trabalho é proposto um sistema híbrido que utiliza dados coletados por sensores de corrente e emissão acústica para o diagnóstico de falhas incipientes em Motores de Indução Trifásicos (MIT), buscando-se uma solução alternativa e não invasiva a análise por sinais de vibrações. Os sinais de corrente e emissão acústica foram processados pela transformada de Fourier e wavelet, para serem utilizados como entradas de um sistema de inferência Fuzzy, permitindo o aumento da eficiência no diagnóstico do desbalanceamento da carga. Resultados experimentais foram obtidos por meio de ensaios do motor sem a carga acoplada, com a carga sem falha, e com a carga desbalanceada a partir da adição de massas de chumbo (10g, 20g, e 30g) em posições específicas fixadas ao longo do diâmetro de um disco de freio eletromagnético. O conjunto eletromecânico foi acionado direto da rede e por inversor de frequência em 60hz, 50hz, 40hz, 30hz e 20hz com objetivo de se estudar a sensibilidade dos métodos e sinais propostos. Para cada acionamento foram impostas as condições de carga nominal, em vazio, com 40% e 70% da carga. O sistema híbrido de diagnóstico apresentou um desempenho satisfatório para os acionamentos com 60Hz e 50Hz.

Palavras-chave: Análise de Falhas, Desbalanceamento, Motor de Indução, Lógica Fuzzy

1. INTRODUÇÃO

Os motores de indução são intrinsecamente confiáveis e requerem uma manutenção mínima. No entanto, como outros motores, eles eventualmente se deterioram e falham. Isso ocorre principalmente devido a uma combinação de ambiente, ciclo de trabalho, instalação e fatores relacionados à fabricação (Ahmed *et al.*, 2004). Geralmente há fatores econômicos relacionados aos processos em que os motores são utilizados, que fazem com que quaisquer paradas para reparo ou troca do motor avariado gerem prejuízos enormes, como é o caso em metalurgia, siderurgia e mineração (Oliveira, 2007). Neste contexto, muito foco tem-se dado às técnicas de manutenção que visam à predição de problemas e substituem com grande vigor a manutenção corretiva. Entretanto, isso demanda o desenvolvimento de métodos de manutenção cada vez mais avançados, que conjuguem aspectos como: possibilidade ou não de se realizar paradas na linha de produção para inspeção dos motores, custo da manutenção, acompanhamento histórico e antecipação de resultados (Oliveira, 2007).

Os motores elétricos são fabricados para uma grande variedade de aplicações, como: acionamento de bombas, compressores e manuseio de cargas. Os mecanismos industriais são geralmente acionados por motores elétricos que podem, com o uso, apresentar indícios de falhas, as quais são geralmente classificadas de acordo com a localização delas. As falhas mais comuns são: falhas no estator, no rotor e no rolamento. Estas falhas são mecânicas por natureza, entretanto apresentam uma variação de comportamento nas variáveis elétricas do motor e podem ocorrer devido a situações externas, como erros na produção e montagem ou devido ao funcionamento incorreto (Reis, 2010). A presença de qualquer tipo de falhas em uma máquina de indução, por exemplo, provoca mudanças de interação de fluxo

entre o estator e o rotor, resultando em mudanças na corrente do estator, nas tensões, no campo magnético, na vibração da máquina, na temperatura de operação, nos ruídos audíveis, dentre outras (Reis, 2010).

Durante as últimas décadas, algumas técnicas de análise de sinais foram desenvolvidas, normalmente no domínio do tempo ou da frequência, para o diagnóstico de falhas (Mesquita *et al.*, 2002). Os métodos no domínio da frequência e que normalmente são utilizados no monitoramento de máquinas rotativas incluem Análise Espectral, Análise Cepstral e Análise de Envelope. Para sinais estacionários, a análise espectral ou por meio da transformada de Fourier (FT) é extremamente útil. Entretanto, ela não é muito adequada para a análise de sinais cujo comportamento é de natureza não estacionária ou transiente. Para tratar estes sinais, várias técnicas de análise em tempo-frequência (Transformada de Gabor, Wigner-Ville, etc.) e tempo-escala (Transformada de Wavelet) foram desenvolvidas. A Transformada de Wavelet (WT) é uma ferramenta efetiva para o processamento de sinais estacionários e não estacionários, possibilitando fornecer informações contidas no sinal simultaneamente no domínio do tempo e frequência (Santiago e Pederiva, 2005).

Atualmente existem diversos métodos disponíveis específicos para detectar falhas em motores. Cada método possui particularidades, diferindo uns dos outros pelas quantidades e tipos de falhas que eles são capazes de detectar. Alguns destes métodos são: Monitoramento por análise de vibrações, emissão acústica, flutuações de velocidade, de temperatura, campo magnético, assinatura elétrica e emissão de radiofrequência. Dentre as técnicas de monitoramento citadas, o monitoramento da assinatura elétrica tem se destacado. A análise da assinatura elétrica constitui um conjunto de estratégias, das quais vale ressaltar: VSA (Voltage Signature Analysis), EPVA (Extended Park's Vector Approach), IPSA (Instantaneous Power Signature Analysis) e MCSA (Motor Current Signature Analysis) (Reis, 2010). As vantagens de monitorar o espectro de corrente estão relacionadas, primeiramente, ao fato de não ser necessário o acesso à máquina, pois sua medição pode ser realizada distante dela; segundo, os testes padrões no sinal de corrente são únicos para o circuito de falhas em rotores (Jesus, Nery e Sure, 2010).

Ahamed *et al.* (2010) apresentou uma técnica melhorada para detecção de desbalanceamento (excentricidade estática) em motores de indução por meio da análise da corrente de partida do motor. Como a assinatura de corrente (MCS) depende significativamente da condição da carga do motor de indução durante o estado estacionário, a detecção de falhas utilizando tal método, para a condição de ausência de carga ou carga leve, pela técnica da Transformada Rápida de Fourier (FFT), se torna difícil, sendo assim, esse trabalho teve como objetivo de suprir essa dificuldade pelo uso da Transformada de Wavelet Discreta (DWT) e a Transformada de Wavelet Contínua (CWT).

Hegde e Maruthi (2012) realizou uma investigação experimental para detectar falhas de excentricidade sob diferentes condições de falhas, utilizando sensores não-invasivos para monitorar sinais de corrente (Motor Current Signature Analysis - MCSA) e vibração (Micro-Electro-Mechanical Systems - MEMS) como meio de diagnóstico. A análise espectral foi realizada utilizando a Transformada Rápida de Fourier (FFT). O estudo também examinou e validou a utilidade da análise da assinatura de vibração utilizando o MEMS para detectar as falhas de excentricidade. O instrumento desenvolvido tem a vantagem de ser compacto, leve, flexível na medição de vibração, ou seja, pode trabalhar com dois ou três eixos, funciona com baixa carga de energia para operação e ainda tem um baixo custo.

2. METODOLOGIA DO TRABALHO

A bancada experimental é composta por Motor de Indução Assíncrono Trifásico (MIT) de 0,5 CV, tensão nominal de 220/380VCA - 60 Hz, 4 polos, 1.720 rpm. A carga é simulada por freio eletrodinâmico por correntes de Foucault, onde a força aplicada ao eixo do motor é controlada por meio de tensão de alimentação CC (potenciômetro), e esta mesma força mecânica é medida por um dinamômetro digital (célula de carga) acoplado ao sistema de freio e retransmite os sinais analógicos padronizados e proporcionais à força de frenagem e a velocidade do disco. O sistema é acionado por partida direta ou por meio de Inversor de frequência WEG® CFW-08.

As correntes são obtidas a partir de sensores lineares de efeito Hall Allegro ACS712ELC-30A com sensibilidade de 66mV/A, isolamento de tensão, baixa resistência no condutor de corrente e baixo offset. A saída de cada sensor de efeito hall será a imagem da corrente de cada fase, sendo utilizadas as entradas AI2, AI3 e AI4 da placa de aquisição referentes às leituras das correntes estatóricas respectivamente. O circuito integrado ACS712, consiste em um sensor de corrente linear totalmente integrado com isolamento de e baixa resistência no condutor de corrente. O dispositivo é formado por um sensor Hall linear de baixo offset com um condutor de cobre perto da superfície do chip. A corrente flui pelo condutor, gerando um campo que é sensoriado pelo CI Hall integrado. O funcionamento do sensor ocorre basicamente da seguinte forma: a corrente aplicada ao sensor gera um campo magnético que é captado pelo CI e por ser bidimensional quando não houver carga o sinal do sensor será equivalente a $V_{CC}/2$ (2,5V DC), quando a carga for mínima o sinal do sensor será equivalente a 0V DC e quando a carga for máxima o sinal do sensor será equivalente a 5V DC, isso possibilita fazer a leitura de uma corrente AC.

Para a análise acústica é utilizado um módulo de som KY-038, com tensão de operação entre 5V, com saída digital e analógica, sensibilidade ajustável via potenciômetro e possui um microfone condensador. Este tipo de microfone possui uma captação muito sensível e definida, que o torna ideal para a leitura do ruído emitido pelo motor.

Para o condicionamento dos sinais dos sensores de corrente e emissão acústica às especificações da placa de aquisição, foi necessário à amplificação utilizando amplificadores operacionais. Os circuitos utilizando o amplificador operacional LM358 proporcionaram uma amplificação de até 100 vezes o sinal de entrada.

Além disso, uma chave partida direta foi montada, para que além dos dados obtidos utilizando o inversor de frequência como forma de acionamento, também fosse possível obter resultados com o sinal diretamente da rede elétrica.

O conversor A/D utilizado é o módulo de aquisição de dados (DAQ), NI USB-6211e possui 16 bits de resolução e pode trabalhar com uma taxa de amostragem de até 250 ks/s (amostras por segundo). Esse módulo oferece 16 entradas analógicas; quatro linhas de entrada digital; quatro linhas de saída digital; níveis programáveis de aquisição por canal, com tensões variando de $\pm 0,2V$ até $\pm 10V$ e dois contadores ou timers. A partir dos sinais obtidos do conversor A/D são realizadas as análises de avarias por um algoritmo em LabView®.

Para obtenção dos resultados experimentais foi desenvolvido um algoritmo em Labview® para o armazenamento das amostras e outro para detecção das falhas aplicando a análise espectral combinada à decomposição de wavelet. Na Fig. 1 é apresentada a bancada de análise de falhas montada.

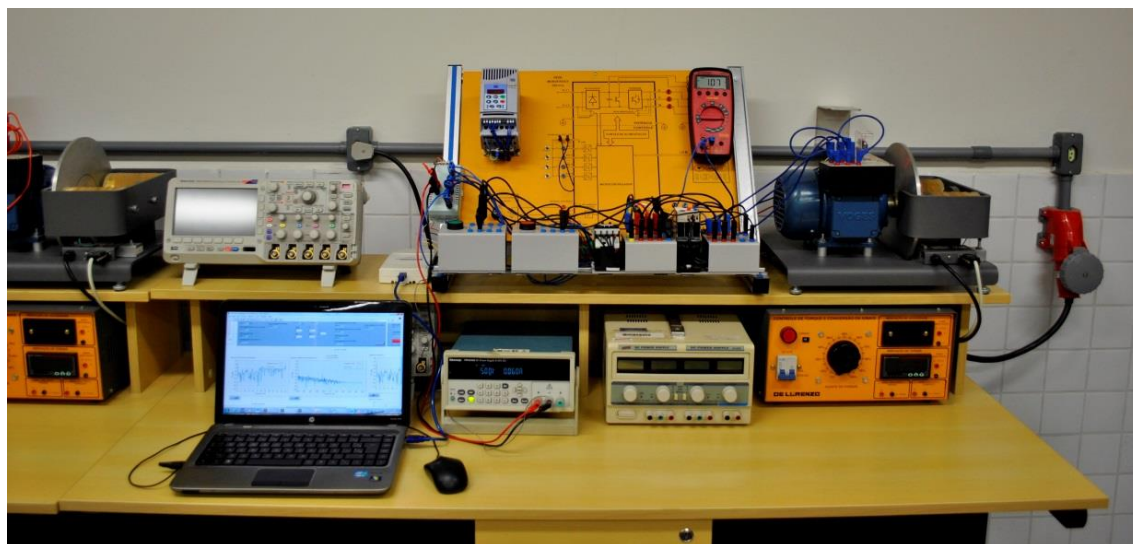


Figura 1. Bancada de análise de falhas montada.

Após aquisição dos sinais de corrente e emissão acústica (por meio da DAQ) o algoritmo de aquisição realiza o ajuste de offset. O nível de CC ocorre devido a uma sequência de offsets nas etapas de medição, condicionamento e aquisição dos sinais.

3. RESULTADOS DE DETECÇÃO E DISCUSSÕES

Foram obtidas três amostras (para cada condição) do motor sem o freio acoplado, com o freio na condição sem falha, e com o disco de freio desbalanceado a partir da adição de massas de chumbo (10g, 20g, e 30g) em posições específicas fixadas em dois rasgos usinados ao longo do diâmetro do disco. O banco de amostras foi obtido com acionamentos direto da rede e por inversor de frequência em 60hz, 50hz, 40hz, 30hz e 20hz. Para cada acionamento direto da rede foram impostas as condições de carga nominal, em vazio, com 70% e 40% da carga. Para os acionamentos com inversor foram impostas apenas as condições em vazio e com carga. Os resultados apontaram uma ressonância da estrutura no acionamento em 40Hz impossibilitando a obtenção de resultados. A Fig. 2 apresenta o desbalanceamento gradual ocasionado pela inserção de massas de chumbo no rasgo superior aberto por usinagem no disco de freio.

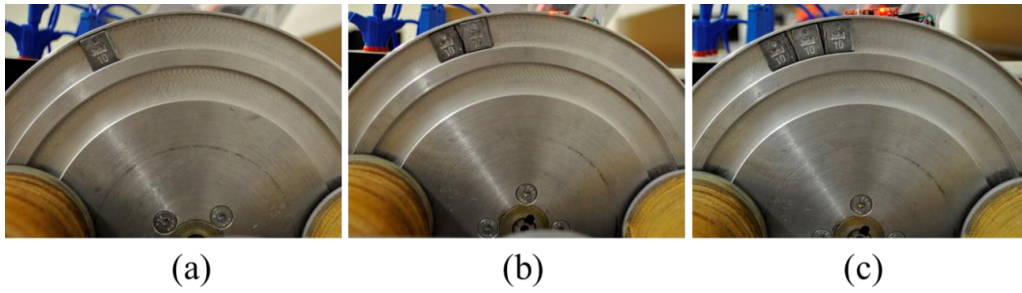


Figura 2. Desbalanceamento ocasionado no rasgo superior: a) 10 g, b) 20g e c) 30g.

A instrumentação proporcionou bons resultados na fase de detecção, onde no domínio da frequência, analisaram-se os sinais por meio de algoritmos de busca pelos picos de interesse que podem constituir um indicativo do desbalanceamento na análise espectral. A escala logarítmica (em geral dB) foi utilizada devido ao caráter exponencial de evolução apresentado pela maioria das avarias conhecidas. A expressão que descreve as componentes de frequência de interesse para detecção da avaria na corrente é dada pela Eq. (1).

$$f_{he} = f_{alim} \left[(Kr + n_d) \frac{1-s}{p/2} + n_w \right] \quad (1)$$

Onde f_{he} é a frequência das harmônicas relacionadas com a saliência; f_{alim} é a frequência fundamental da alimentação; κ é o número da harmônica ($K=0,1,2,\dots$); r é o número de ranhuras do rotor; p é o número de polos; s é o escorregamento; n_d é a ordem de excentricidade do rotor ($n_d = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$) e n_w é a ordem dos harmônicos do entreferro rotor ($n_w = \pm 1, \pm 3, \dots$). Para análise da excentricidade dinâmica calcula-se a frequência da harmônica da Eq. (1) considerando $K=0$, $n_d = \pm 1$ e $n_w = 1$.

A Fig. 3 apresenta a FFT da corrente i_s com o mecanismo sem avaria e com desbalanceamento de 30g (rasgo superior), no acionamento direto da rede e 40% da carga. É possível observar o aumento da banda lateral direita, diminuindo a diferença de amplitude entre esta banda e a frequência de alimentação, caracterizando a falha.

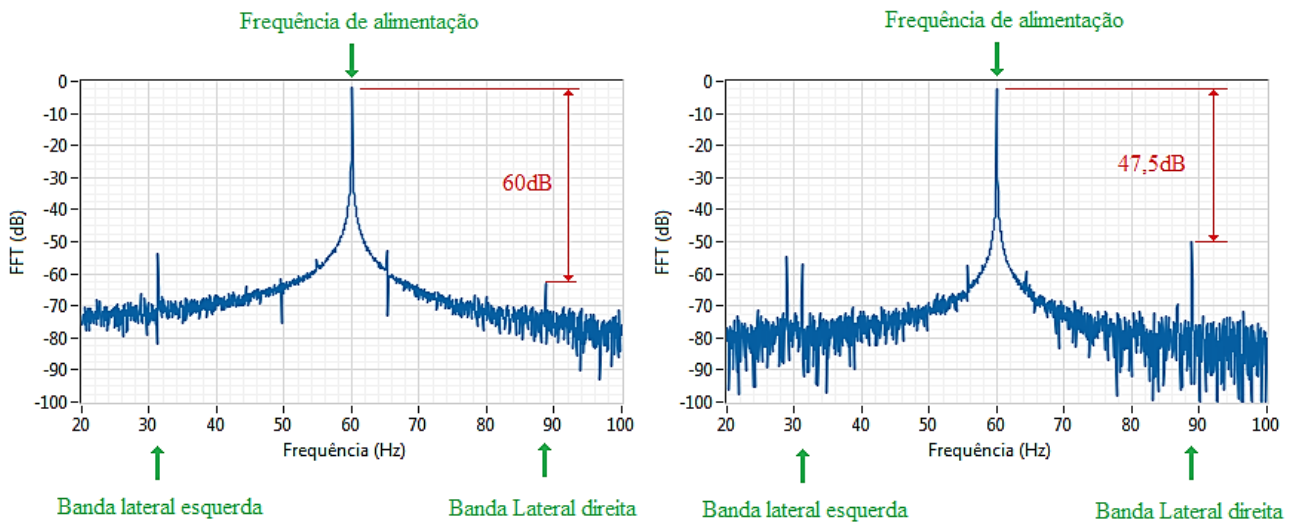


Figura 3. Resultado experimental com acionamento direto da rede e 40% da carga nominal no sinal de corrente i_s : (à esquerda) situação sem falha e (à direita) desbalanceamento de 30g.

No sinal de emissão acústica a falha é observada pelo aumento da magnitude da frequência de rotação do eixo motor. A Fig. 4 apresenta a FFT da emissão acústica com o mecanismo sem avaria e com desbalanceamento de 30g (rasgo superior), no acionamento direto da rede e 40% da carga.

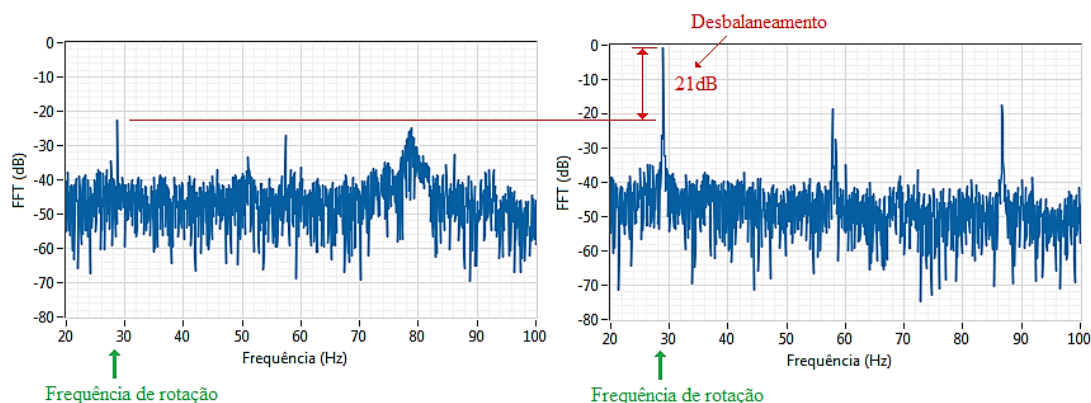


Figura 4. Resultado experimental com acionamento direto da rede e 40% da carga nominal no sinal de emissão acústica: (à esquerda) situação sem falha e (à direita) desbalanceamento de 30g.

A Tab. 1 apresenta as variações em relação à condição sem avaria no acionamento direto da rede (380V), nas magnitudes das frequências que caracterizam o desbalanceamento utilizando a análise espectral.

Tabela 1. Variações das frequências de desbalanceamento com acionamentos direto da rede.

		Acionamento direto da rede							
		Disco superior				Disco inferior			
Carga	Condição	Corrente		Emissão Acústica		Corrente		Emissão Acústica	
		Média	Desvio	Média	Desvio	Média	Desvio	Média	Desvio
Vazio	10g	13,50	3,46	16,40	5,97	11,60	4,17	13,60	2,26
	20g	15,20	5,77	23,00	2,93	17,50	1,64	19,80	4,10
	30g	19,20	2,99	23,70	3,64	18,60	6,25	23,50	2,70
40%	10g	2,70	6,44	12,00	5,91	0,80	4,65	9,20	4,52
	20g	10,99	1,69	18,00	2,48	8,50	2,56	13,20	2,34
	30g	13,80	4,30	21,70	4,50	12,10	6,10	20,30	5,51
70%	10g	7,80	4,79	11,80	2,97	1,80	3,02	10,00	1,44
	20g	8,40	2,64	20,80	4,97	5,00	6,16	17,10	3,68
	30g	12,20	6,29	25,50	2,57	10,10	3,75	22,60	5,43
Nominal	10g	4,00	3,11	11,70	6,05	8,80	2,90	6,10	2,66
	20g	7,90	6,35	17,70	1,58	7,00	5,60	14,50	3,31
	30g	14,80	3,87	19,40	4,04	14,50	3,35	19,40	5,38

A Fig. 5 apresenta as magnitudes das frequências específicas observadas na análise espectral, observando o aumento do desbalanceamento e da carga imposta, nos sinais de corrente e emissão acústica, para o acionamento direto da rede.

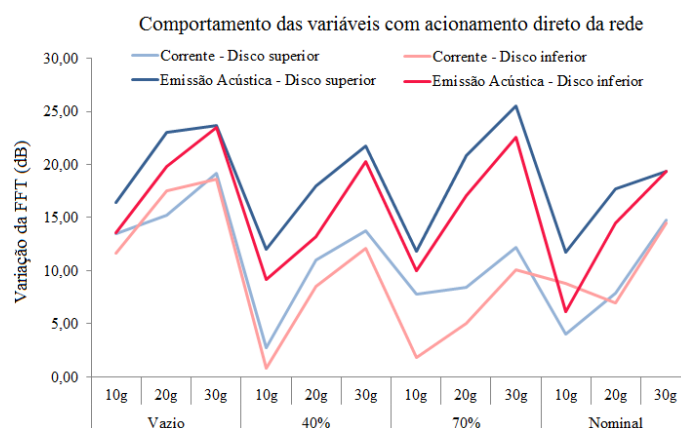


Figura 5. Síntese dos ensaios com o acionamento direto da rede.

Como previamente estabelecido na literatura, o aumento da carga proporciona uma diminuição da sensibilidade da análise espectral (principalmente nos sinais de corrente) devido ao efeito de amortecimento, ocasionando uma menor variação da magnitude entre as condições de falha para a mesma carga. Ambos os sinais (corrente e emissão acústica)

apresentaram um aumento gradativo da magnitude da FFT com baixas dispersões, quando analisada a combinação de carga e desbalanceamento, tornando o método promissor para o acionamento direto da rede.

A Tab. 2 apresenta as variações em relação à condição sem avaria nos acionamentos com o inversor de frequência, nas magnitudes das frequências que caracterizam o desbalanceamento utilizando a análise espectral.

Tabela 2. Variações das frequências de desbalanceamento com acionamentos por inversor de frequência.

		Acionamento com inversor em 60Hz							
		Disco superior				Disco inferior			
		Corrente		Emissão Acústica		Corrente		Emissão Acústica	
Carga	Condição	Média	Desvio	Média	Desvio	Média	Desvio	Média	Desvio
Vazio	10g	6,60	2,56	0,50	4,84	4,50	3,88	5,70	3,79
	20g	10,80	3,18	1,60	5,39	5,30	1,90	11,60	6,33
	30g	11,40	5,18	5,30	2,97	10,80	2,36	15,90	3,28
Carga	10g	7,90	2,17	3,70	7,06	0,60	3,84	0,10	7,71
	20g	12,10	3,95	3,90	3,50	1,40	1,61	6,20	2,02
	30g	15,10	2,60	3,90	7,14	2,60	2,93	8,40	5,15
		Acionamento com inversor em 50Hz							
		Disco superior				Disco inferior			
		Corrente		Emissão Acústica		Corrente		Emissão Acústica	
Carga	Condição	Média	Desvio	Média	Desvio	Média	Desvio	Média	Desvio
Vazio	10g	4,90	9,24	6,00	2,73	0,40	4,64	12,70	3,20
	20g	8,80	5,63	9,40	6,97	0,50	11,06	18,40	4,73
	30g	9,10	4,35	5,60	7,76	8,40	5,48	21,50	2,32
Carga	10g	3,00	8,40	4,40	4,27	0,50	11,18	8,00	2,88
	20g	7,80	5,03	7,90	10,18	1,80	6,81	15,50	4,68
	30g	8,00	8,87	11,80	5,04	1,80	0,00	19,20	5,43
		Acionamento com inversor em 30Hz							
		Disco superior				Disco inferior			
		Corrente		Emissão Acústica		Corrente		Emissão Acústica	
Carga	Condição	Média	Desvio	Média	Desvio	Média	Desvio	Média	Desvio
Vazio	10g	1,90	5,66	-0,40	12,45	2,90	5,44	-0,80	15,86
	20g	7,40	13,47	2,90	13,87	4,70	9,08	4,30	10,46
	30g	6,10	6,67	-0,10	7,64	7,10	4,71	-1,60	17,48
Carga	10g	3,30	13,62	1,30	18,20	0,70	11,07	-9,60	9,06
	20g	1,40	8,29	1,50	9,01	-0,10	2,90	-3,80	21,31
	30g	5,40	6,41	3,80	18,39	0,50	7,40	2,20	5,58
		Acionamento com inversor em 20Hz							
		Disco superior				Disco inferior			
		Corrente		Emissão Acústica		Corrente		Emissão Acústica	
Carga	Condição	Média	Desvio	Média	Desvio	Média	Desvio	Média	Desvio
Vazio	10g	10,00	10,69	0,00	2,09	2,30	8,09	1,20	3,36
	20g	12,90	7,06	0,00	3,79	10,00	4,19	-1,40	1,74
	30g	13,50	11,79	0,00	2,50	11,50	9,87	-4,60	3,75
Carga	10g	-1,00	6,11	0,00	4,18	0,10	2,58	-0,40	0,98
	20g	0,10	14,37	0,00	2,17	1,70	6,59	0,20	2,50
	30g	-0,80	3,76	-0,30	5,10	0,50	9,62	0,20	2,79

Previsivelmente, com a diminuição da rotação do motor o efeito do desbalanceamento foi diminuindo ocasionando a impossibilidade da detecção (tanto na corrente, quanto na emissão acústica) nos acionamentos com 30Hz e 20Hz. Para os acionamentos com 60Hz e 50Hz foi possível a distinção dos níveis de severidade do desbalanceamento, contudo, com menor sensibilidade devido as características do inversor (acionamento com 220V).

A aplicação do cálculo da energia de sinal de detalhes wavelet proporcionou uma melhor visualização e menores desvios para os sinais de emissão acústica (quando comparado com os resultados da análise espectral). A sensibilidade da energia wavelet nos sinais de corrente foi baixa, apresentando variações muito pequenas entre os níveis de desbalanceamento. A DWT, com base na décima segunda Daubechies (db12) foi utilizada a fim de decompor os sinais de emissão acústica e corrente do motor em 15 níveis. As magnitudes da energia dos detalhes wavelet de interesse foram observadas acompanhando a severidade do desbalanceamento e analisadas estatisticamente pelo desvio padrão das três amostras estudadas.

A Fig. 6 apresenta as magnitudes da energia wavelet normalizadas observando o aumento do desbalanceamento e da carga imposta, nos sinais de emissão acústica, para o acionamento direto da rede. Na figura é possível observar com clareza o aumento de energia no detalhe dez (detalhe que caracteriza a avaria na emissão acústica), de forma gradativa a severidade do desbalanceamento. Nos acionamentos abaixo de 50Hz foram considerados os níveis de energia do detalhe onze.

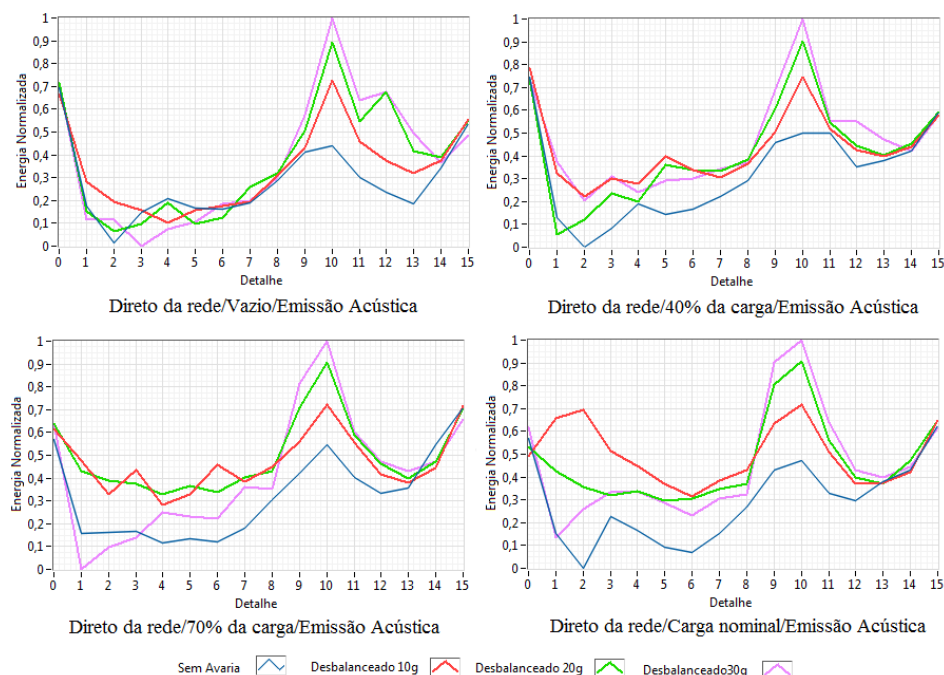


Figura 6. Energia dos detalhes wavelet para o acionamento direto da rede nos sinais de emissão acústica.

A Tab. 3 apresenta as variações na energia dos detalhes wavelet que caracterizam o desbalanceamento, em relação à condição sem avaria no acionamento direto da rede (380V).

Tabela 3. Variações da energia dos detalhes wavelet para os acionamentos diretos da rede.

Carga	Condição	Acionamento direto da rede							
		Disco superior				Disco inferior			
		Corrente		Emissão Acústica		Corrente		Emissão Acústica	
		Média	Desvio	Média	Desvio	Média	Desvio	Média	Desvio
Vazio	10g	0,067	0,68	0,285	0,45	0,002	0,63	0,185	0,42
	20g	0,229	1,23	0,455	0,82	0,010	1,49	0,393	1,14
	30g	0,236	0,81	0,560	0,54	0,011	0,39	0,558	1,75
40%	10g	0,130	1,36	0,247	0,90	0,013	0,99	0,180	1,25
	20g	0,186	0,70	0,403	0,47	0,015	1,47	0,341	1,65
	30g	0,204	1,65	0,501	1,10	0,024	0,72	0,490	0,53
70%	10g	0,113	0,43	0,172	0,29	0,000	0,89	0,122	1,40
	20g	0,119	1,10	0,361	0,74	0,001	1,45	0,313	0,02
	30g	0,292	1,63	0,452	1,09	0,062	0,57	0,442	1,50
Nominal	10g	0,008	0,80	0,247	0,53	0,001	1,03	0,165	0,80
	20g	0,517	0,99	0,435	0,66	0,003	0,68	0,357	0,42
	30g	0,612	1,61	0,527	1,08	0,022	1,14	0,488	0,49

Devido às fortes variações nos valores de energia entre as diferentes condições impostas, houve a necessidade de harmonização de escala por meio da normalização dos valores. O método utilizado consistiu na normalização linear dos dados entre [0, 1] por meio dos valores de máximo e mínimo.

A Tab. 4 apresenta as variações na energia dos detalhes wavelet que caracterizam o desbalanceamento, em relação à condição sem avaria nos acionamentos com inversor de frequência. É possível observar que a diminuição da rotação provoca a perda de sensibilidade das variáveis (fato esperado devido à diminuição da velocidade tangencial que influencia na força imposta pelas massas de desbalanceamento), de forma que ambos os métodos de análise foram pouco confiáveis para os acionamentos abaixo de 50Hz (principal conclusão). As condições de carga diminuem a sensibilidade geral dos resultados. De forma semelhante, é observado que nos ensaios com as massas de desbalanceamento fixadas no rasgo superior do disco, a sensibilidade dos métodos foi maior se comparada aos ensaios com as massas no rasgo inferior (fato esperado devido à diminuição do raio de atuação das forças impostas pelas massas).

A Tab. 5 apresenta em síntese o desempenho da análise espectral e wavelet aplicadas aos sinais propostos.

Tabela 4. Variações da energia dos detalhes wavelet para os acionamentos com inversor de frequência.

		Acionamento com inversor em 60Hz							
		Disco superior				Disco inferior			
Carga	Condição	Corrente		Emissão Acústica		Corrente		Emissão Acústica	
		Média	Desvio	Média	Desvio	Média	Desvio	Média	Desvio
Vazio	10g	0,192	0,12	0,07	1,20	0,003	0,71	0,059	0,19
	20g	0,180	0,06	0,38	0,80	0,019	0,47	0,167	0,22
	30g	0,195	0,07	1,00	0,99	0,024	0,78	0,271	0,12
Carga	10g	0,080	0,12	0,06	0,75	0,022	0,41	0,056	0,28
	20g	0,184	0,05	0,28	1,87	0,034	0,95	0,162	0,14
	30g	0,187	0,09	0,67	0,00	0,064	0,25	0,255	0,29
		Acionamento com inversor em 50Hz							
		Disco superior				Disco inferior			
Carga	Condição	Corrente		Emissão Acústica		Corrente		Emissão Acústica	
		Média	Desvio	Média	Desvio	Média	Desvio	Média	Desvio
Vazio	10g	0,540	0,28	0,112	0,38	0,024	0,74	0,046	0,79
	20g	0,989	1,39	0,441	0,57	0,031	1,73	0,160	0,98
	30g	0,999	0,93	0,995	0,28	0,248	0,45	0,244	1,60
Carga	10g	0,300	1,15	0,124	0,33	0,024	1,16	0,242	0,63
	20g	0,392	0,87	0,456	0,53	0,016	1,71	0,361	1,14
	30g	0,395	2,17	0,782	0,66	0,241	0,84	0,455	0,75
		Acionamento com inversor em 30Hz							
		Disco superior				Disco inferior			
Carga	Condição	Corrente		Emissão Acústica		Corrente		Emissão Acústica	
		Média	Desvio	Média	Desvio	Média	Desvio	Média	Desvio
Vazio	10g	0,151	0,73	0,582	0,86	0,007	0,65	0,009	0,25
	20g	0,994	0,38	0,914	0,56	0,004	0,43	0,025	0,89
	30g	0,889	0,89	0,980	0,94	0,003	0,72	0,057	0,82
Carga	10g	0,085	0,23	0,001	0,49	0,001	0,37	0,009	0,93
	20g	0,674	0,59	0,043	1,15	0,001	0,87	0,011	0,78
	30g	0,817	0,00	0,151	0,30	0,002	0,23	0,000	0,94
		Acionamento com inversor em 20Hz							
		Disco superior				Disco inferior			
Carga	Condição	Corrente		Emissão Acústica		Corrente		Emissão Acústica	
		Média	Desvio	Média	Desvio	Média	Desvio	Média	Desvio
Vazio	10g	0,101	0,33	0,000	0,94	0,001	0,01	0,020	0,05
	20g	0,874	0,17	0,638	0,49	0,001	0,03	0,023	0,02
	30g	0,919	0,40	0,005	1,14	0,002	0,00	0,002	0,06
Carga	10g	0,138	0,10	0,090	0,30	0,001	0,03	0,001	0,01
	20g	0,528	0,27	0,997	0,76	0,001	0,02	0,001	0,04
	30g	0,694	0,39	0,090	1,12	0,002	0,01	0,002	0,05

Tabela 5. Síntese do desempenho da análise espectral e wavelet aplicadas aos sinais propostos.

		DESEMPENHO DA ANÁLISE ESPECTRAL																			
		Rede				Inversor em 60Hz				Inversor em 50Hz				Inversor em 30Hz				Inversor em 20Hz			
		Superior		Inferior		Superior		Inferior		Superior		Inferior		Superior		Inferior		Superior		Inferior	
Carga	Condição	CE	EA	CE	EA	CE	EA	CE	EA	CE	EA	CE	EA	CE	EA	CE	EA	CE	EA	CE	EA
Vazio	10g	O	O	O	O	O	B	B	O	O	B	B	O	B	P	R	P	R	P	R	P
	20g	O	O	O	O	O	B	B	O	O	B	B	O	B	P	R	P	R	P	R	P
	30g	O	O	O	O	O	B	B	O	O	B	B	O	B	P	R	P	R	P	R	P
40%	10g	O	B	O	O	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
	20g	O	O	O	O	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
	30g	O	O	O	O	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
70%	10g	O	O	O	O	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
	20g	O	O	O	O	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
	30g	O	O	O	O	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Nominal	10g	O	O	O	O	O	B	B	O	O	B	B	O	B	R	P	P	P	P	P	P
	20g	O	O	O	O	O	B	B	O	O	B	B	O	B	R	P	P	P	P	P	P
	30g	O	O	O	O	O	B	B	O	O	B	B	O	B	R	P	P	P	P	P	P
		DESEMPENHO DA ANÁLISE WAVELET																			
		Rede				Inversor em 60Hz				Inversor em 50Hz				Inversor em 30Hz				Inversor em 20Hz			
		Superior		Inferior		Superior		Inferior		Superior		Inferior		Superior		Inferior		Superior		Inferior	
Carga	Condição	CE	EA	CE	EA	CE	EA	CE	EA	CE	EA	CE	EA	CE	EA	CE	EA	CE	EA	CE	EA
Vazio	10g	B	O	R	B	B	O	R	B	O	O	R	B	B	B	P	P	B	R	P	P
	20g	B	O	R	B	B	O	R	B	O	O	R	B	B	B	P	P	B	R	P	P
	30g	B	O	R	B	B	O	R	B	O	O	R	B	B	B	P	P	B	R	P	P
40%	10g	B	O	R	B	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
	20g	B	O	R	B	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
	30g	B	O	R	B	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
70%	10g	B	O	R	B	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
	20g	B	O	R	B	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
	30g	B	O	R	B	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Nominal	10g	B	O	R	B	B	O	R	B	R	O	R	R	B	R	P	P	R	R	P	P
	20g	B	O	R	B	B	O	R	B	R	O	R	R	B	R	P	P	R	R	P	P
	30g	B	O	R	B	B	O	R	B	R	O	R	R	B	R	P	P	R	R	P	P

Legenda: O = Ótimo; B = Bom; R = Regular; P = Pêssimo e X = Não houveram amostras. CE = Corrente Elétrica e EA = Emissão Acústica.

Na Tab. 5 é possível observar que a análise espectral só apresentou resultados considerados satisfatórios com as massas fixadas no rasgo superior nos acionamentos com 60Hz (rede e inversor), 50Hz e 30Hz; na análise wavelet da corrente apenas os acionamentos com 60Hz; na análise wavelet da emissão acústica todos os resultados foram considerados satisfatórios. Com as massas fixadas no rasgo inferior a análise espectral só foi considerada satisfatória nos acionamentos com 60Hz (rede e inversor) e 50Hz; na análise wavelet da emissão acústica os resultados foram considerados satisfatórios nos acionamentos com 60Hz (rede e inversor) e 50Hz.

4. DIAGNÓSTICO FUZZY

A interpretação da condição de funcionamento de um determinado equipamento pode ser baseada em uma análise qualitativa, de interpretação heurística. O modo heurístico representa uma grande solução quando os parâmetros a serem considerados são incertos, desconhecidos, variantes no tempo ou quando o espaço de busca é grande. Neste sentido, esse método é similar ao experimental de se construir uma tabela de entradas e saídas, onde para cada linha da tabela, haverá uma relação entre estas variáveis (Marçal, 2000), de forma que, ao invés de expressões numéricas, será possível a utilização de variáveis linguísticas para descrever tal relação.

Os seguintes parâmetros foram utilizados para o sistema de inferência: Operador and (Zadeh), operador then (mínimo), operador de agregação (máximo) e método de defuzzificação (método de centro de área).

O diagnóstico Fuzzy foi montado apenas para os desbalanceamentos ocasionados no rasgo superior do disco, nas condições do motor em vazio e com carga e para os acionamentos com 60Hz (rede e inversor) e 50Hz, onde os resultados da detecção se apresentaram de forma confiável. Para o acionamento direto da rede e motor em vazio foi utilizada uma base de regras utilizando quatro entradas: AEERV (Análise espectral da corrente no acionamento direto da rede em vazio), AEERV (Análise espectral da emissão acústica no acionamento direto da rede em vazio), AWCERV (Análise wavelet da corrente no acionamento direto da rede em vazio) e AWCERV (Análise wavelet da emissão acústica no acionamento direto da rede em vazio). Entradas nomeadas de forma semelhante foram utilizadas para o acionamento com carga, bem como para os acionamentos com inversor em 50Hz e 60Hz.

A Fig. 7 apresenta as bases de regras utilizadas para o acionamento direto da rede com motor em vazio e com carga. A Fig. 8 apresenta as funções de pertinência das variáveis de entrada AEERV, AEERV, AWCERV e AWCERV utilizadas para os acionamentos com motor em vazio, bem como as variáveis AECRC, AEERC, AWCRC e AWCRC utilizadas para os acionamentos com carga no motor. Os termos linguísticos utilizados para as variáveis foram: SACRV (sinal de corrente sem avaria com acionamento da rede e motor em vazio), D10CRV (sinal de corrente com desbalanceamento de 10g e acionamento da rede com moto em vazio), D20CRV (sinal de corrente com desbalanceamento de 20g e acionamento da rede com moto em vazio), D30CRV (sinal de corrente com desbalanceamento de 30g e acionamento da rede com moto em vazio), SAERV (sinal de emissão acústica sem avaria com acionamento da rede e motor em vazio), D10ERV (sinal de emissão acústica com desbalanceamento de 10g e acionamento da rede com motor em vazio), D20ERV (sinal de emissão acústica com desbalanceamento de 20g e acionamento da rede com motor em vazio), D30ERV (sinal de emissão acústica com desbalanceamento de 30g e acionamento da rede com motor em vazio). Seguindo uma nomenclatura semelhante foram definidas as funções de pertinência das variáveis de entrada dos demais acionamentos.

Foram utilizadas, portanto, seis bases de regras com quatro variáveis de entrada: direto da rede e motor em vazio, direto da rede e motor com carga, inversor em 60Hz e motor em vazio, inversor em 60Hz e motor com carga, inversor em 50Hz e motor em vazio e inversor em 50Hz e motor com carga. Cada uma dessas bases foram implementadas em programas diferentes devido às limitações do Fuzzy Logic Toolkit do Labview®.

Legenda: IN = Inconsistente; SA = Sem Avaria; D10 = Desbalanceamento de 10g; D20 = Desbalanceamento de 20g e D30 = Desbalanceamento de 30g.

		AEERV						
		SAERV	D10ERV	D20ERV	D30ERV			
AEERV	SACRV	SA	IN	IN	IN	SACRV	AWCRV	
	D10CRV	IN	D10	IN	IN	D10CRV		
	D20CRV	IN	IN	D20	IN	D20CRV		
	D30CRV	IN	IN	IN	D30	D30CRV		
		SAERV	D10ERV	D20ERV	D30ERV			
AWERV								
(a)								

		AEERC						
		SAERC	D10ERC	D20ERC	D30ERC			
AEERC	SACRC	SA	IN	IN	IN	SACRC	AWCRC	
	D10CRC	IN	D10	IN	IN	D10CRC		
	D20CRC	IN	IN	D20	IN	D20CRC		
	D30CRC	IN	IN	IN	D30	D30CRC		
		SAERC	D10ERC	D20ERC	D30ERC			
AWERC								
(b)								

Figura 7. Base de regras para o diagnóstico com acionamento direto da rede: a) com motor em vazio e b) motor com carga.

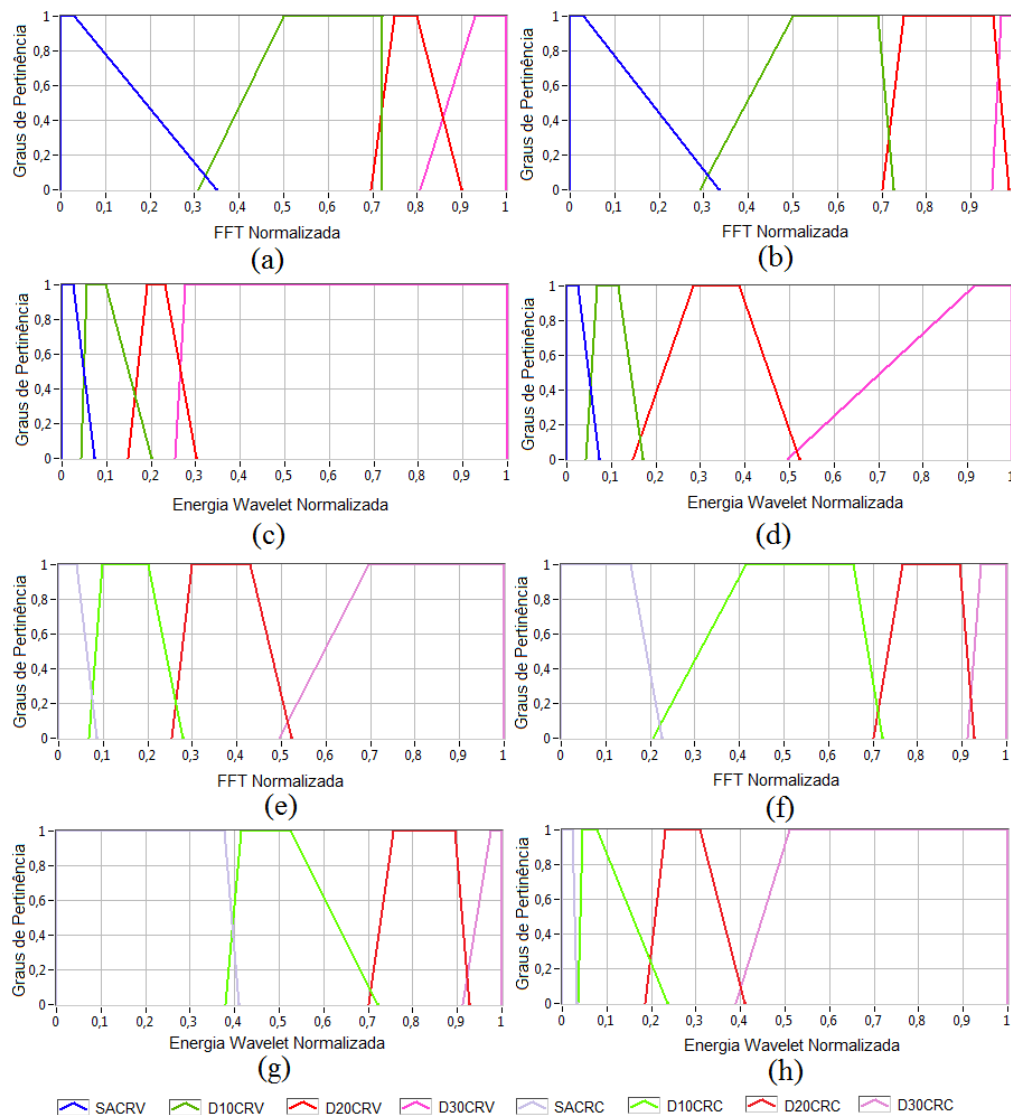


Figura 8. Funções de pertinência para o acionamento direto da rede e seus respectivos termos linguísticos: a) entrada AEERV, b) entrada AEERV, c) entrada AWCRV, d) entrada AWERV, e) entrada AECRC, f) entrada AEERC, g) entrada AWCRC e entrada AWERC.

Para as funções de pertinência das saídas foram adotados os termos linguísticos: IN (Inconsistente), SA (Sem Avaria), D10 (Desbalanceamento com 10g), D20 (Desbalanceamento com 20g), D30 (Desbalanceamento com 30g). A Fig. 9 apresenta as funções de pertinência da variável de saída, com seus respectivos termos linguísticos.

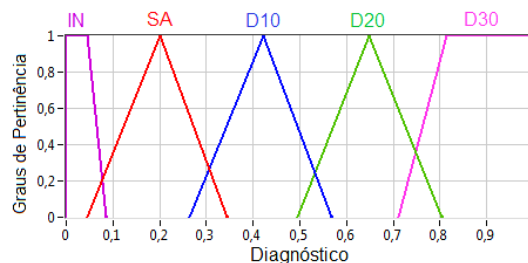


Figura 9. Funções de pertinência da saída e seus respectivos termos linguísticos.

5. CONCLUSÃO

Neste trabalho foi apresentado um sistema híbrido que utiliza dados coletados por sensores de corrente e emissão acústica para diagnosticar a severidade da excentricidade ocasionada pela inserção gradual de massas de desbalanceamento em um disco de freio acoplado a um motor de indução. Na fase de detecção estudou-se a sensibilidade dos sinais de corrente e emissão acústica a partir de uma variedade de ensaios alterando-se a posição das

massas no raio do disco, a quantidade de massa inserida (10g, 20g e 30g), a carga imposta ao motor e a velocidade do disco (60Hz, 50Hz, 40Hz, 30Hz e 20Hz), concluindo-se que para o conjunto eletromecânico utilizado, a diminuição da rotação provocou a perda de sensibilidade das variáveis e métodos de análise nos acionamentos abaixo de 50Hz. A análise espectral se apresentou de forma satisfatória (boa visualização e repetibilidade) nos acionamentos direto da rede e por inversor de frequência em 60Hz e 50Hz. A análise wavelet proporcionou uma melhor confiabilidade (comparada à análise espectral) na verificação dos sinais de emissão acústica, contudo baixa sensibilidade nos sinais de corrente e nos desbalanceamentos provocados no rasgo inferior. Em geral, a emissão acústica apresentou melhores visualizações do desbalanceamento quando comparada a corrente. Neste sentido, o diagnóstico Fuzzy foi montado para os desbalanceamentos ocasionados no rasgo superior do disco, nas condições do motor em vazio e com carga e para os acionamentos com 60Hz e 50Hz, onde os resultados da detecção se apresentaram de forma satisfatória. O sistema fuzzy apresentou um comportamento coerente da severidade do desbalanceamento possibilitando um diagnóstico confiável.

Os resultados produzidos nesta pesquisa podem ser considerados satisfatórios, contudo, sugerem algumas melhorias para trabalhos futuros, tais como: utilização da transformada wavelet packet para melhor caracterizar a energia dos detalhes de interesse, aperfeiçoamento da relação entre a taxa de amostragem e os efeitos da avaria, maior número de amostras para cada condição estudada e montagem de um algoritmo único para as bases de regras Fuzzy.

6. REFERÊNCIAS

- Ahmed, I. et al., 2004. “A Baseline Study for On-Line Condition Monitoring of Induction Machines”. Australasian Universities Power Engineering Conference (AUPEC 2004). 26-29 September 2004, Brisbane, Australia.
- Ahamed, S.K. et al., 2010. “Novel Diagnosis Technique of Mass Unbalance in Rotor of Induction Motor by the Analysis of Motor Starting Current at No Load Through Wavelet Transform”. 6th International Conference on Electrical and Computer Engineering, pp. 474 – 477.
- Jesus, K.M.S.; Nery, R.T. e Sure, N.S., 2010. “Desenvolvimento de uma Ferramenta Virtual para Diagnóstico de Defeitos em Máquinas Rotativas: Aplicação em uma Bancada Didática”. In: VI Congresso Nacional de Engenharia Mecânica, 2010.
- Hegde, V. e Maruthi, G. S., 2012. “Experimental Investigation on Detection of Air Gap Eccentricity in Induction Motors by Current and Vibration Signature Analysis Using Non-Invasive Sensors”. International Conference on Advances in Energy Engineering 2011, vol. 14, pp. 1047 – 1052.
- Mesquita, A.L.A. et al., 2002. “Detecção de Falhas em Rolamentos Usando Transformada Tempo-Frequência - Comparação com Análise de Envelope”. In: First South-American Congress on Computational Mechanics – MECOM 2002, Santa Fé - Paraná, Argentina. vol. XXI, pp. 1938-1954.
- Oliveira, T. M., 2007. “Manutenção Preditiva de Motores de Corrente Contínua com Ênfase Em MCSA – Motor Current Signature Analysis”. Dissertação de mestrado em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, MG, Brasil.
- Reis, A.J.S., 2010. “Reconhecimento de Padrões de Falhas em Motores Trifásicos Utilizando Redes Neurais”. Dissertação de mestrado em Engenharia Elétrica. Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Natal, RN, Brasil.
- Santiago, D.F.A. e Pederiva, R., 2005. “Feature Extraction and Fault Detection of Rootating Machinery Based on Wavelet Packet Transform”. In: XI Diname - International Symposium on Dynamic Problems of Mechanics, 2005, Ouro Preto - Minas Gerais. Proceedings of the International Symposium on Dynamic Problems of Mechanics. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Engenharia e Ciências Mecânicas - ABCM, 2005, pp. 1-10.
- Marçal, R.F.M. “Um Método para Detectar Falhas Incipientes em Máquinas Rotativas Baseado em Análise de Vibrações e Lógica Fuzzy”. Tese de Doutorado em Engenharia Metalúrgica, de Minas e dos Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2000.

7. RESPONSABILIDADE AUTURAL

“Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo deste trabalho”.

HYBRID SYSTEM FOR DIAGNOSIS OF ECCENTRICITY OF LOAD COUPLED TO A THREE-PHASE INDUCTION MOTOR USING FUZZY LOGIC

Leonardo José Cavalcante Vasconcelos, leonardo_cavalcante2008@hotmail.com¹
Acarcio Gomes de Almeida Junior, acarciojunior@gmail.com¹

Élton Franklin Silva de Lima, elton.franklin.lima@gmail.com¹

Luís Gabriel da Silva, islug.luis@gmail.com¹

Alexander Patrick Chaves de Sena, alexander.sena@caruaru.ifpe.edu.br¹

¹ Federal Institute of Education, Science and Technology Pernambuco – IPE. Estrada para o Alto do Moura Km 3.8, CEP 55040-120, Caruaru, Pernambuco, Brazil.

Abstract. *In this paper we proposed a hybrid system that uses data collected by current sensors and acoustic emission for the diagnosis of incipient faults in Three-Phase Induction Motors (TIM), seeking an alternative, non-invasive solution to analysis vibration signals. The current signals and acoustic emission were processed by the Fourier transform and wavelet to be used as inputs of a fuzzy inference system enabling increased efficiency in the diagnosis of load unbalance. Experimental results have been obtained through engine testing without the load coupled with the load without failure, and with the unbalanced load from the addition of lead bodies (10g, 20g and 30g) at specific positions established along the diameter an electromagnetic brake disc. The electromechanical assembly was directly triggered by the network and inverter frequency 60hz, 50hz, 40hz, 30Hz and 20Hz in order to study the sensitivity of the proposed methods and signals. For each drive were rated load imposed on the conditions, under vacuum, with 40% and 70% load. The hybrid diagnostic system showed satisfactory performance for drives with 60Hz and 50Hz.*

Keywords: *Failure Analysis, Unbalance, Induction Motor, Fuzzy Logic*