

Um sistema inteligente para análise de condição de máquinas rotativas baseado em indicadores de vibração

Thiago R. Felicio Marilza A. Lemos Marcio A. Marques Alexandre S. Simões

Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho" - Instituto de Ciência e Tecnologia – Campus de Sorocaba - UNESP/ICTS
{frthiago, marilza, marciomq, assimoes}@sorocaba.unesp.br

Resumo. Este trabalho apresenta o desenvolvimento de um sistema inteligente para diagnóstico do estado de máquinas rotativas baseado em análise de seus sinais de vibração. Baseado em estudos na literatura e identificação do conhecimento especialista do domínio, a arquitetura do sistema inteligente foi estruturada em quatro módulos: a interface com usuário, um subsistema de diagnóstico clássico e dois subsistemas *fuzzy*. A interface com o usuário permite duas formas diferentes para entrada de um sinal de vibração hipotético ou real: entrada manual das características das componentes de um sinal de vibração ou por meio de um arquivo contendo a gravação do sinal de vibração. O subsistema de diagnóstico clássico busca, no sinal de vibração de entrada, por componentes que indiquem algum tipo de falha. O escopo de falhas do sistema abrange desbalanceamento, desalinhamento, defeitos de rolamentos ou a combinação entre eles. Os subsistemas *fuzzy* permitem apresentar um refinamento no diagnóstico, uma vez que os modelos *fuzzy* baseiam-se na norma ISO 10.816, adaptados às situações do mundo real, fazendo com que o sistema responda sobre a severidade do nível da falha. As simulações realizadas no sistema apresentaram resultados compatíveis com as respostas que seriam obtidas por técnicos especialistas sem uso do sistema.

Palavras-chave: análise de vibração, máquinas rotativas, manutenção preditiva, lógica *fuzzy*.

1 Introdução

As máquinas rotativas fazem parte das estruturas de uma diversidade de equipamentos presentes nos processos contemporâneos da indústria. O número de equipamentos presentes e o risco da ocorrência de defeitos são proporcionais à complexidade do processo, que por sua vez, tem aumentado para atender altas demandas na quantidade e na qualidade do produto. O tempo de inatividade das máquinas devido a falhas inesperadas se tornou um grande problema nas instalações modernas de produção, nas quais estão previstos o funcionamento contínuo por horas prolongadas. Por esta razão, nos últimos anos houve um considerável crescimento pela procura de métodos que minimizam os riscos de paradas inesperadas nas plantas industriais. O monitoramento dos níveis de vibração de uma máquina permite determinar em quais

condições ela se encontra e o gerenciamento de suas paradas para manutenção. Embora seja comum a operação de máquinas rotativas com pequenos níveis de vibrações, estas são indesejadas e podem ocasionar problemas que exigem manutenção imediata, em médio ou em longo prazo [4]. Em um ambiente industrial existem diversas fontes de vibração além das que estão presentes nas máquinas rotativas. A presença de vibração gera desgaste excessivo, formação de trincas, afrouxamento de parafusos, falhas estruturais e mecânicas, manutenção frequente e dispendiosa de máquinas. Além disso, a exposição de seres humanos próximos a equipamentos com níveis de vibração em excesso pode resultar em riscos de problemas auditivos, e inclusive de serem atingidos pelo desprendimento de peças da máquina, numa eventual quebra. Os custos envolvidos para eliminar a vibração podem ser altos, por isso a procura de soluções que visam quantidades aceitáveis de vibração com um custo razoável é recomendada [13]. Por esta razão, existe uma demanda crescente por técnicas capazes de utilizar os dados coletados por sensores de forma eficiente e diagnosticar defeitos em máquinas industriais. Nesse sentido, a manutenção preditiva oferece vantagens sobre a manutenção preventiva e corretiva. A manutenção preditiva visa prever ou detectar problemas em seu início, os quais no futuro venham a causar paradas indesejadas no processo. Para que isto se torne possível, é necessário monitorar estas máquinas para encontrar e acompanhar a evolução das intensidades das vibrações nas frequências que as origina. O diagnóstico de falhas consiste em uma análise dos dados obtidos no monitoramento, que pode ser feita por um técnico especialista ou através de um sistema baseado em conhecimento.

2 Vibração e Defeitos em Máquinas Rotativas

Movimentos que se repetem após um intervalo de tempo são denominados vibração ou oscilação [13]. Considerando uma máquina rotativa excitada por uma força senoidal, a vibração pode ser representada pela equação 1 em sua fase estacionária,

$$x_i = A_i * \text{sen}(2\pi f_i t + \phi_i) \quad (1)$$

A figura 1 representa a vibração mais simples possível que ocorre em uma máquina. Em uma situação real, a vibração apresenta formas muito mais complexas, podendo conter ruídos advindos do ambiente industrial, como mostra a figura 2, além de apresentar muito mais componentes de oscilação que são resultantes dos componentes girantes presentes na máquina, como ilustra a figura 3.

O tipo de sinal visto na figura 3 é de fundamental importância para a análise das condições de uma máquina, porém este tipo de sinal não possibilita determinar a contribuição de cada uma das componentes harmônicas que estão presentes. Uma maneira de solucionar esta situação é transformar o sinal que está no domínio do tempo para o domínio da frequência.

Uma ferramenta matemática que realiza esta transformação é a transformada rápida de Fourier (FFT) proposta por J.W.Cooley (IBM) e J.W.Tukey (Bell Labs) em 1965. Trata-se de um método engenhoso e altamente eficiente de reagrupar os cálculos dos coeficientes de uma DFT (*Discrete Fourier Transform*). A ideia do algoritmo é repre-

sentar uma DFT de tamanho arbitrário $N = N_1 \cdot N_2$ em termos de DFTs menores e de tamanhos N_1 e N_2 , procedendo recursivamente (Equação 2).

$$X(k) = \sum_{n=0}^{N-1} x[n](e^{-j2\pi/N})^{kn} = \sum_{n=0}^{N-1} x[n]W_N^{kn} \quad (2)$$

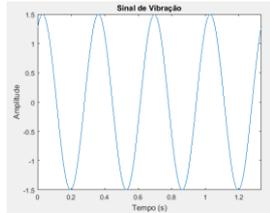


Fig. 1. Sinal senoidal

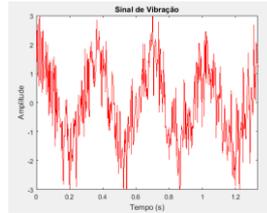


Fig. 2. Sinal com ruído

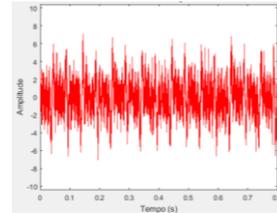


Fig. 3. Sinal de vibração real

O algoritmo de Cooley-Tukey divide a sequência $x[n]$ em duas sequências: uma com os coeficientes de índice par e outra de índice ímpar. Como a quebra em duas sequências, o algoritmo é conhecido também como Radix-2. Algoritmos no qual a sequência é decomposta sucessivamente em sequências menores são chamados de algoritmos de decimação no tempo [12]. A figura 4 demonstra o espectro de frequência do sinal apresentado na figura 3, passando do domínio do tempo para o domínio da frequência, ou seja, aplicando a Transformada Discreta de Fourier (DFT).

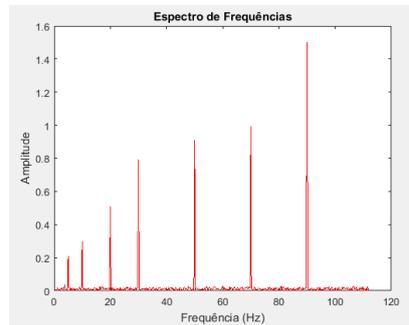


Fig. 4. Espectro de frequências do sinal da figura 3.

Na análise de vibração de máquinas, o espectro é de grande importância, pois permite que as frequências e suas amplitudes sejam associadas para efetuar os diagnósticos das causas da vibração. O espectro de frequências é uma ferramenta matemática amplamente usada em aplicações industriais e científicas, por matemáticos, engenheiros e cientistas de diversas áreas [1]. A partir da ferramenta definida através da equação 2 é possível estabelecer em quais frequências e intensidades cada componente se apresenta no sinal de vibração (figura 4), e por conseguinte, ainda torna possível a obtenção do nível global de vibração que a máquina apresenta, dado através da equação 3.

$$NG = \sqrt{\sum_{i=1}^n A_i^2} = \sqrt{A_1^2 + A_2^2 + A_3^2 + \dots + A_n^2} \quad (3)$$

A ISO dispõe de uma norma que trata da avaliação da vibração de máquinas rotativas por meio da medição em partes fixas, ou seja, não rotativas. Trata-se da norma ISO-10.816, que se aplica a máquinas rotativas operando com rotações entre 120 e 15.000 RPM. Essa norma divide as máquinas em classes de acordo com sua dimensão e potência e adota níveis admissíveis e prejudiciais de vibração para cada grupo. Os critérios de avaliação referem-se a testes de monitoramento e aceitação operacional estabelecidos principalmente no que diz respeito a assegurar um funcionamento confiável em longo prazo do equipamento [9]. São elas:

Classe I: Motores individuais acoplados a máquinas individuais operando em condições normais. (Máquinas de produção até 15 kW são típicos exemplos desta).

Classe II: Máquinas de médio porte (motores elétricos de 15 a 75 kW) sem fundações especiais ou máquinas de até 300 kW em fundações especiais.

Classe III: Movimentadores primários grandes e outras máquinas com grandes massas rotativas e fundações pesadas que são relativamente rígidas em relação à direção da medição de vibração.

Classe IV: Movimentadores primários grandes e outras máquinas com grandes massas rotativas e fundações pesadas que são frouxas em relação à direção da medição de vibração (Turbo geradores e turbinas a gás maiores que 10 MW).

A norma permite ainda classificar uma máquina de determinada classe por meio de seu nível de vibração, estabelecendo quatro faixas: A–Equipamento novo ou em perfeitas condições de operação, B–Equipamento em boas condições de operação, C–Equipamento em condições de operação permissíveis, porém em nível de alerta para manutenção e D–Equipamento em condições de operação não permissíveis com níveis de vibração ultrapassam o limite permitido [3]. A tabela 1 apresenta os níveis de severidade de vibração e a classificação conforme a norma.

Tabela 1. Níveis de severidade da vibração

Níveis de Severidade Vibração [mm/s]		Classe I	Classe II	Classe III	Classe IV
Velocidade - Pico	Velocidade - RMS				
0.396	0.28	A	A	A	A
0.636	0.45				
1.004	0.71				
1.584	1.12	B	B	B	A
2.456	1.8				
3.960	2.8	C	C	B	B
6.634	4.5				
10.041	7.1	D	D	C	C
15.839	11.2				
25.456	18				
39.598	28	D	D	D	D
63.640	45				

Considerando uma máquina rotativa em operação, nela existe o movimento de rotação no eixo central e também existem movimentos de translação na direção radial. Esses movimentos são produzidos por forças internas não equilibradas, como o desbalanceamento ou desalinhamento, por exemplo. No estudo para o diagnóstico de condição de máquinas, um sinal de vibração obtido a partir de um ponto fixo da máquina pode ser associado à frequência de rotação da mesma. As harmônicas são o produto de um fator n pela frequência de rotação [11]. A seguir são apresentadas as equações para a determinação das frequências de falhas de rolamentos. Onde f é a frequência de rotação e n é o número de elementos rolantes. As demais dimensões são mostradas na figura 5 [14].

$$\text{BPFO} = \frac{n}{2} f \left(1 - \frac{DE}{DP} \cos \beta \right) \quad (4)$$

$$\text{BPFI} = \frac{n}{2} f \left(1 + \frac{DE}{DP} \cos \beta \right) \quad (5)$$

$$\text{BSF} = \frac{DP}{DE} f \left[1 - \left(\frac{DE}{DP} \cos \beta \right)^2 \right] \quad (6)$$

$$\text{FTF} = \frac{1}{2} f \left(1 - \frac{DE}{DP} \cos \beta \right) \quad (7)$$

$$DP = \frac{D1 + D2}{2} \quad (8)$$



Fig. 5. Dimensões utilizadas para a determinação das frequências de falha de rolamentos

O método *fuzzy* utilizado neste trabalho consiste em obter um refinamento do diagnóstico, indicando o início e a evolução de um estado de normalidade (faixas A e B da tabela 1, por exemplo) para um estado alerta (faixa C, por exemplo), ou do estado de alerta para o estado prejudicial (faixa D). Este modelo foi implementado por meio de um sistema inteligente baseado em conjuntos e subconjuntos *fuzzy*. Estes são expressos por meio das faixas de valores e classificações fornecidas pela norma ISO para comporem as variáveis de entrada e saída do sistema.

O raciocínio *fuzzy* é baseado em regras de inferência do tipo Se-Então, como no caso da lógica clássica, mas ao invés de conjuntos *crisp* são utilizados conjuntos *fuzzy* como antecedentes e consequentes das regras. Uma regra de inferência simples e direta pode ser escrita como,

Se x é A, então y é B, onde A e B são conjuntos fuzzy.

Se o número de regras é grande, torna-se mais conveniente empregar uma abordagem de relações *fuzzy*, escolha adotada para o domínio neste trabalho. Uma regra de inferência pode ter mais de uma proposição. Por exemplo, uma regra de inferência com duas proposições assumiria a forma,

Se x é A, e y é B, então z é C,

Um exemplo genérico no domínio de falhas em máquinas rotativas pode ser:

Se (Classe é I) e (Falha é Pequena) então (Condição é Normal)

A partir da definição dos conjuntos *fuzzy*, das variáveis linguísticas e das regras de inferência *fuzzy* é possível modelar um sistema linguisticamente.

3 Materiais e Métodos

Este trabalho descreve o desenvolvimento de um Sistema Inteligente de Diagnóstico de Falhas de Vibração (SIDFV) baseado em conhecimentos especialistas que se encontram na literatura e nas classificações definidas pela norma ISO 10.816. A partir

de estudos de fontes obtidas na literatura sobre falhas em máquinas rotativas, um conjunto bem conhecido de causas e efeitos que envolvem estas falhas foi selecionado para implementar um modelo computacional a ser usado pelo sistema SIDFV (Tabela 2). Esse conhecimento especialista é baseado nas frequências de falhas e nas formas em que as falhas se apresentam nas máquinas [1][7][11].

Tabela 2. Defeitos mais recorrentes em máquinas rotativas

Defeito	Frequência de falha*	Formas
Desbalanceamento	1x	Direção radial
Desalinhamento	1x, 2x, ocasionalmente 3x	Forma angular: direção axial Forma paralela: direção radial
Pista externa do rolamento	Equação 4	FTF e harmônicos ou bandas laterais sobre BPFO ou BPFI
Pista interna do rolamento	Equação 5	Harmônicos de BPFI com bandas laterais
Esfera do rolamento	Equação 6	Bandas em BPFO ou BPFI
Gaiola do rolamento	Equação 7	FTF e harmônicos ou bandas laterais sobre BPFO ou BPFI

* onde 1x, 2x e 3x são múltiplos da frequência de rotação do eixo da máquina

A figura 6 apresenta os principais elementos envolvidos na solução do problema proposto. Supondo um hardware para sensoriamento e aquisição de sinais de vibração, acoplado na máquina em operação, a máquina em operação excita um sensor através de vibrações mecânicas e este sensor as converte em forma de sinais elétricos que serão interpretados pelo hardware para compor o sinal no formato digital. Este sinal é entrada para o sistema SIDFV, o qual determina o estado geral da máquina e a intensidade de uma possível falha de vibração.

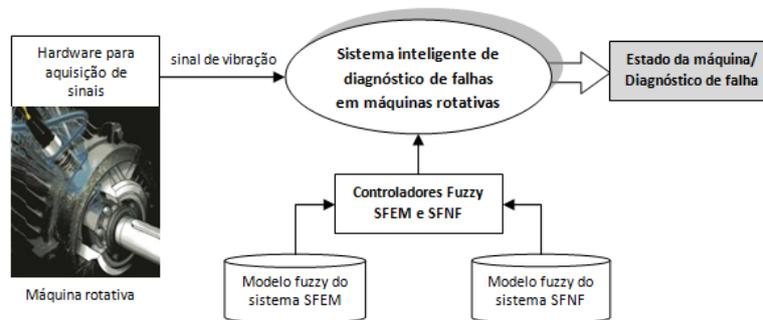


Fig. 6. Arquitetura do Sistema SIDFV

A partir do conhecimento especialista do domínio foram construídos modelos *fuzzy* que habilitam o sistema SIDFV informar ao usuário sobre o estado de vibração da máquina rotativa e o nível de severidade da falha, caso esta exista.

Este artigo não contempla a implementação do hardware para aquisição do sinal de vibração. Assim, foram adotadas duas formas de obtenção de sinal de vibração para testes do sistema: (i) entrada do sinal de vibração via usuário, (ii) a partir de um arquivo wav. A composição do sinal foi baseada no princípio da Série de *Fourier*, na qual todo sinal que se repete após um intervalo de tempo, pode ser decomposto pela soma de diversas componentes harmônicas senoidais e cossenoidais [2].

A primeira resposta que o sistema SIDFV fornece ao usuário diz respeito ao nível de vibração global da máquina (*overall vibration value*) [10], baseada na norma ISO 10.816. Uma segunda resposta do sistema diz respeito à existência de componentes de vibração nas frequências de falhas. Ela é obtida por meio da busca de três tipos de falhas no sinal de vibração de entrada: desalinhamento, desbalanceamento e falha de rolamento. O módulo do sistema que fornece essas respostas foi implementado com técnicas de programação convencionais.

O sistema SIDFV fornece ainda a possibilidade de o usuário solicitar um diagnóstico mais preciso sobre a intensidade da falha encontrada. Os estados que podem ser identificados são: aceitável, nível de alerta ou prejudicial. Na figura 6, o módulo responsável por esse processamento é o Subsistema *Fuzzy* para detecção do Nível de Falha (SFNF). A figura 7 apresenta a interface com o usuário, onde este informa os dados para a composição do sinal de vibração, fornece também a velocidade de operação da máquina, os parâmetros do rolamento e seleciona a classe da máquina. Ao pressionar o botão EXECUTAR, o processo de diagnóstico é disparado.

A partir desse ponto é disparada uma sequência de processos, os quais podem ser vistos no fluxograma da figura 8: gráficos são plotados para o usuário na tela, o módulo clássico calcula e mostra o nível global de vibração e aponta, no quadro de diagnóstico, se existe a presença de alguma falha.

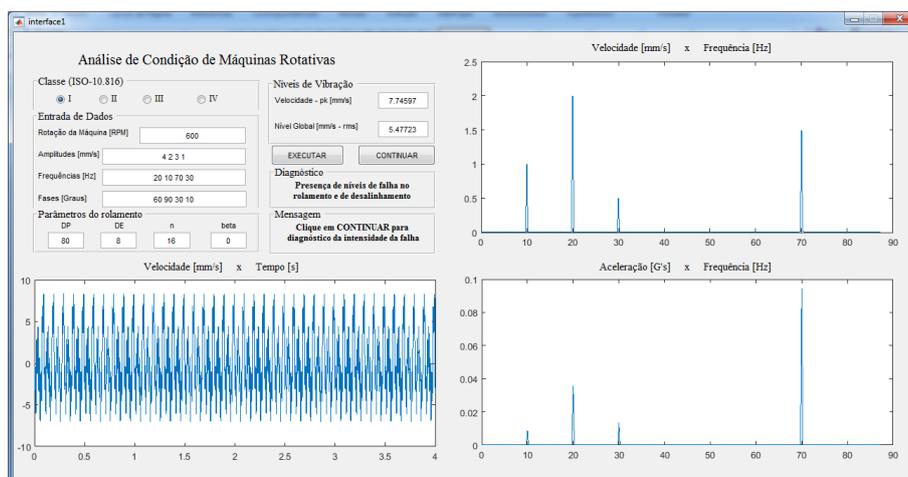


Fig. 7. Interface com o usuário

Nesta etapa, é também disparado o sistema *fuzzy* SFEM que apresenta a tela *Rule Viewer* do Matlab, onde o usuário pode visualizar com exatidão a classificação do estado da máquina em análise, baseada na norma ISO 10.816: A (1 - máquina nova), B (2 - estado bom), C (3 - alerta) ou D (4 - não admissível) e o quão próximo ou distante o estado da máquina se encontra em relação aos demais estados. Finalmente, o usuário pode disparar, por meio do botão CONTINUAR, a análise realizada pelo sistema *fuzzy* SFNF, obtendo o nível de severidade da falha, anteriormente apontada pelo módulo clássico do sistema.

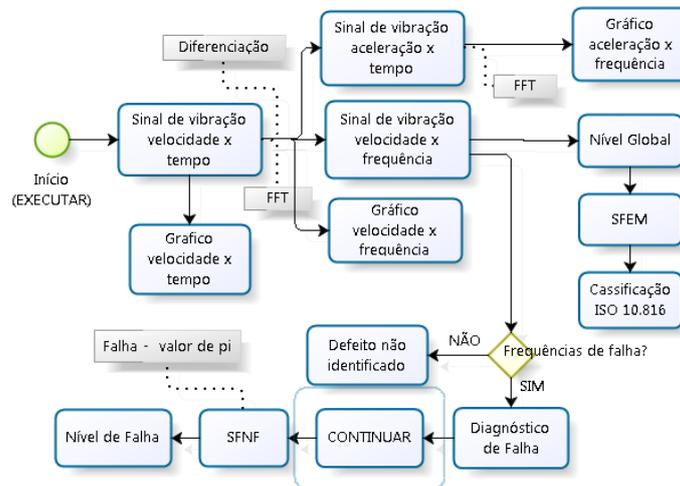


Fig. 8. Fluxograma do SIDFV

3.1 Modelagem dos Subsistemas *Fuzzy* SFEM e SFNF

Conforme figura 9, SFEM foi modelado definindo-se variáveis que representam o nível global da máquina, de acordo com sua classificação (I, II, III ou IV), estabelecidos na norma ISO 10.816. Este modelo retorna o estado da máquina em quatro estados (A, B, C ou D), subordinados ao valor global da vibração da máquina.

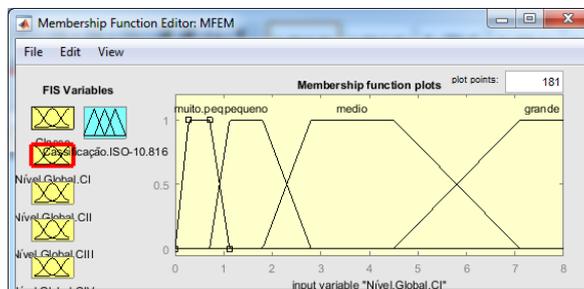


Fig. 9. – Funções de pertinência contidas na variável Nível.Global.CI de SFEM

Abaixo, têm-se quatro das dezesseis regras de produção que compõem a base de conhecimento do sistema:

1. Se (Classe é I) e (Nível.Global.CI é muito.pequeno) então (Classificação.ISO-10.816 é A)
2. Se (Classe é I) e (Nível.Global.CI é pequeno) então (Classificação.ISO-10.816 é B)
3. Se (Classe é I) e (Nível.Global.CI é médio) então (Classificação.ISO-10.816 é C)
4. Se (Classe é I) e (Nível.Global.CI é grande) então (Classificação.ISO-10.816 é D)

SFNF caracteriza o nível do defeito em três estados, Normal ($1 \leq \text{normal} < 2$), Alerta ($2 \leq \text{alerta} < 3$) e Prejudicial ($3 \leq \text{prejudicial} < 4$). No nível normal a falha é pequena e aceitável, não há necessidade de parada para manutenção. No nível de alerta a falha apresenta uma intensidade considerável, sendo necessária uma programação de parada para manutenção. No nível prejudicial, a falha apresenta uma intensidade elevada, onde a necessidade de uma parada para manutenção é urgente. Os valores utili-

zados para gerar as funções de pertinências de SFNF foram determinados por meio dos valores de pico para níveis de severidade de vibração, informados na ISO-10.816. Abaixo, têm-se três das doze regras de produção definidas no sistema:

1. Se (Classe é I) e (Falha.CI é Pequena) então (Condição.Defeito é Normal)
2. Se (Classe é I) e (Falha.CI é Média) então (Condição.Defeito é Alerta)
3. Se (Classe é I) e (Falha.CI é Grande) então (Condição.Defeito é Prejudicial)

4 Resultados e Discussões

Simulações de falhas de desalinhamento, desbalanceamento e de rolamento foram realizadas para verificar o comportamento do sistema SIDFV. Uma vez que a literatura é escassa no registro de sinais de vibração reais de máquinas rotativas foram selecionados casos de estudo de uma ferramenta disponível no mercado, o software *Machinery Health Manager* [6], que conta com um banco de exemplos de sinais de vibração com componentes de falhas diversas. As próximas seções descrevem duas simulações em detalhes, além de resultados tabelados de outras dez simulações.

4.1 Simulação de Falha de Desalinhamento

Nesta simulação foram utilizados os seguintes dados de entrada: Classe II, Rotação 1200 RPM, Vetor de amplitudes $A = [12; 15; 6; 4]$, Vetor de frequências $f = [20; 40; 35; 100]$ e Vetor de fases $p = [0; 90; 60; 20]$. Com a máquina operando em uma rotação de 1200 RPM, tem-se que a frequência fundamental da máquina é de 20 Hz. As figuras 10 e 11 são apresentadas na interface para o usuário. A figura 10 apresenta o sinal de vibração no domínio do tempo e a figura 11 apresenta o espectro do sinal com as frequências e as amplitudes das componentes do sinal de vibração, tornando possível a identificação de falhas.

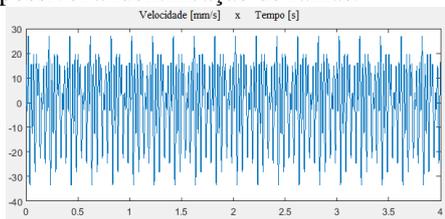


Fig. 10. Gráfico (velocidade x tempo)

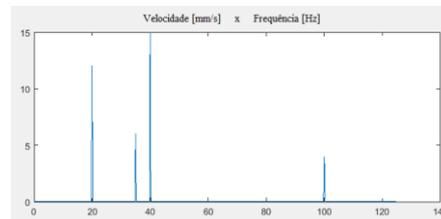


Fig. 11. Espectro (velocidade x frequência).

O espectro de frequências mostra que a máquina apresenta um sinal de vibração com uma componente de 1x a frequência fundamental, 20 Hz e amplitude 12 mm/s e outra de 2x, frequência 40 Hz e amplitude 15 mm/s. O sistema conclui, então, o diagnóstico de desalinhamento, uma vez que esse tipo de falha é caracterizado pela presença dessas componentes, conforme [1][7][11]. A figura 12 apresenta a resposta de SFEM, com a classificação da máquina no estado D, uma condição prejudicial estabelecida pela ISO, concluída com base no grau de severidade do nível global de vibração.

Com o disparo do botão CONTINUAR, o subsistema SFNF informa a condição da falha: 2,42. Uma vez que SFNF caracteriza o nível do defeito em três estados: $1 \leq$ normal < 2 , $2 \leq$ alerta < 3 e $3 \leq$ prejudicial < 4 , a condição do desalinhamento da máquina é de alerta, em um nível que se encaminha para uma condição prejudicial.

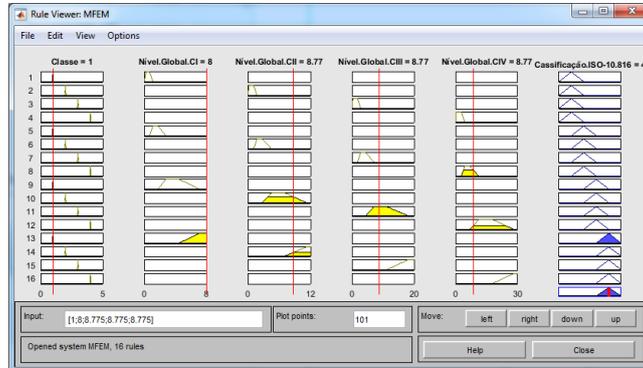


Fig. 12. Resposta de SFEM para a severidade do nível global de vibração.

Resultados de outros casos executados no sistema se encontram na tabela 3. Para essas simulações foram tomados cinco sinais de vibração de uma mesma máquina da classe II e potência 50 HP em épocas diferentes. Considerando-se a classificação da norma ISO em faixas de A a D, observa-se que nos casos 1 e 2 que o estado geral da máquina foi classificado como "ótimo" (faixa A, nível de severidade=1), SFNF indica nível "normal" (valor=1) para severidade de falhas específicas de desbalanceamento. No caso 3, o estado geral da máquina foi classificado como "bom" (faixa B, nível de severidade=2,09) e SFNF indica nível "normal" (valor=1). No caso 4, o estado geral da máquina foi classificado como "nível de alerta para manutenção" (faixa C, nível de severidade=3,85) e SFNF indica nível de "alerta" (valor=2,14). No caso 5, o estado geral da máquina foi classificado como "nível prejudicial" na faixa D (nível de severidade=4,0) e SFNF indica nível de "alerta" (valor=2,0).

Tabela 3. Simulações de casos com falhas de desbalanceamento

Diagnósticos em SIDFV			
Caso	Diagnóstico Inicial	SFEM	SFNF
1	Presença de níveis de desbalanceamento	1	1
2	Presença de níveis de desbalanceamento	1	1
3	Presença de níveis de desbalanceamento	2,09	1
4	Presença de níveis de desbalanceamento	3,85	2,14
5	Presença de níveis de desbalanceamento	4	2

Algumas observações podem ser feitas:

- Desde o Caso-1, o sistema aponta a presença de componentes harmônicas de desbalanceamento no sinal de vibração, inicialmente em amplitude abaixo da caracterização da falha. Nos casos seguintes observa-se que a vibração aumenta até o nível de alerta.
- Note-se aqui que o cálculo do estado geral da máquina leva em conta não apenas componentes que indicam falhas de desbalanceamento, portanto, um valor alto indicado por SFEM, não estará relacionado com falhas de desbalanceamento quando SFNF resultar valor baixo.
- Nas simulações realizadas no Matlab é possível visualizar o valor exato resultante da desfuzificação. Numa implementação completa do sistema a resposta poderá ser aprimorada para o usuário, levando em conta termos linguísticos como "quase alerta", "alerta", "pouco prejudicial", "muito prejudicial", que podem ser incluí-

dos no modelo *fuzzy* do sistema SFNF. O mesmo poderá ser feito no sistema SFEM com relação a respostas ao usuário que indiquem o quão próximo ou distante uma classificação está em relação à anterior e posterior.

Observa-se que em diagnóstico de falhas de vibração, o uso da lógica *fuzzy* permite a obtenção de uma indicação qualitativa do estado da máquina dentro do universo e ao mesmo tempo, aponta uma medida quantitativa que permite acompanhar a evolução da variável avaliada [11]. Em aplicações de sistemas monitoramento de vibração de máquinas rotativas, é importante que seja feito preliminarmente um estudo sobre a influência de vibrações externas que possam vir a causar interferências sobre o diagnóstico de falhas. Quando um equipamento se encontra parafusado diretamente a um piso ou fundação rígida em ambiente industrial, a fundação ficará sujeita a uma carga harmônica resultante do desbalanceamento da máquina aliado à carga estática devido ao seu peso. Ambientes muito comprometidos como na mineração, por exemplo, podem ser utilizados recursos que minimizem as interferências externas, como a instalação de amortecedores na base dos equipamentos, entre outras técnicas [13].

4.2 Simulação de Falhas de Rolamento e Desalinhamento

Nesta simulação foi utilizado um arquivo de amostra de áudio (wav), carregado pela interface do sistema SIDFV. A velocidade de rotação da máquina, informada pelo usuário, foi de 18.000 RPM, Classe da Máquina: IV. Como resultado, o sistema apontou a presença de duas falhas: rolamento e desalinhamento. Acusou ainda pelo subsistema SFEM que o estado global de vibração da máquina é de 2.92, uma condição de "quase alerta", correspondendo a um estado intermediário entre B e C da norma ISO 10.816. Na sequência, o subsistema SFNF considera a falha de maior amplitude para realizar o diagnóstico da severidade da falha, neste caso a falha de rolamento. SFNF resultou em 1,0, classificando a severidade da falha de rolamento no nível normal ($1 \leq \text{normal} < 2$). Resultados de outros casos executados no sistema encontram-se na tabela 4. Para essas simulações foram tomados cinco sinais de vibração de uma mesma máquina da classe I e potência 20 HP, em épocas distintas. As observações sobre a tabela 3 são válidas também para estas simulações, ressaltando-se que SFNF indica o nível de severidade do tipo de falha de maior amplitude.

Tabela 4. Simulações de casos com falhas de rolamento e desalinhamento

Caso	Diagnósticos de SIDFV		
	Diagnóstico Inicial	SFEM	SFNF
1	Presença de níveis de falha de rolamento e desalinhamento	2,00	1
2	Presença de níveis de falha de rolamento e desalinhamento	2,42	1
3	Presença de níveis de falha de rolamento e desalinhamento	2,62	1
4	Presença de níveis de falha de rolamento e desalinhamento	3,21	1,44
5	Presença de níveis de falha de rolamento e desalinhamento	4,00	1

5 Conclusões

Este artigo apresentou um sistema de diagnóstico de falhas de vibrações para máquinas rotativas baseado em lógica *fuzzy* denominado SIDFV, onde o diagnóstico é apresentado em três níveis de especificação. Essa divisão foi importante para o sistema garantir tanto diagnóstico preditivo quanto preventivo. O sistema foi testado com um conjunto de casos da literatura, especificamente com dados de entrada que continha evidências de falhas de desbalanceamento, rolamento e desalinhamento, aborda-

dos pelo escopo do sistema. Nos dez casos submetidos ao sistema, cinco responderam com diagnóstico de falhas de desbalanceamento e cinco apontaram falhas de rolamento e desalinhamento. O sistema pode ser facilmente expandido para identificar e classificar novos tipos de falhas, uma vez que a abordagem do projeto é baseada em modelo onde o conhecimento do domínio está explicitamente modelado e separado do módulo de controle.

6 Referências

1. ALMEIDA, M. T.; Almeida, F. R. V. Análise de Vibrações I – Medida e Diagnósticos. Apostila do Curso de Análise de Vibrações da FUPAI, Itajubá – MG, 2013.
2. BACCARINI, L. M. R., Detecção e diagnóstico de falhas em motores de indução. 2005. 207 f. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Minas Gerais, MG, 2005.
3. DORTI, M., Verificando medições de vibrações em motores assíncronos trifásicos Siemens. Siemens, 2014. Disponível em: <<http://w3.siemens.com.br/drives/br/pt/cf/conversores-bt/sinamicsv/sinamics-v20/documentacao/faq/Documentos/Motores%20-%20Medi%C3%A7%C3%A3o%20de%20Vibra%C3%A7%C3%A3o.pdf>> Acesso em: 16 Abr. 2016.
4. DOU, J; YANG, J; LIU, J; ZHAO, Y. A rule-based intelligent method for fault diagnosis of rotating machinery, 2012. In Elsevier Journal. 2012. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950705112001578>>. Acesso em: 16 Abr. 2016.
5. EmersonProcess. Folha de Dados Overview do CSI 2140. Disponível em: <http://www2.emersonprocess.com/siteadmincenter/PM%20Asset%20Optimization%20Documents/ProductDataSheets/2140_ds_OverviewPort.pdf>. Acesso em: 15 Mai. 2016.
6. EmersonProcess. AMS Suite: Machinery Health™ Manager v5.51. Emerson Process Management. White Paper, 2012. Disponível em: <http://www2.emersonprocess.com/siteadmincenter/PM%20Asset%20Optimization%20Documents/ProductWhitePapers/amsmm_wp_v551.pdf> Acesso em: 09 Jun. 2016.
7. FERREIRA, J. S. F., Diagnóstico de máquinas elétricas pela análise de vibração. 2012. 138 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Eletrônica e Sistemas Elétricos de Energia) – Instituto Superior de Engenharia do Porto. 2012.
8. IBRAHIM, A. M., *Fuzzy Logic for Embedded Systems Applications*, Elsevier Science (USA), 2004. ISO 10816-1/ISO. Abstract to ISO 10816-1. ISO, 1995. Disponível em: <http://www.iso.org/iso/catalogue_detail.htm?csnumber=18866> Acesso em: 16 Abr. 2016.
9. ISO 10816-1/ISO. Abstract to ISO 10816-1. ISO, 1995. Disponível em: <http://www.iso.org/iso/catalogue_detail.htm?csnumber=18866> Acesso em: 16 Abr. 2016.
10. ISO 10816-8/ISO. Mechanical vibration — Evaluation of machine vibration by measurements on non-rotating parts. ISO, 2014. Disponível em: <<https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:10816:-8:ed-1:v1:en>> Acesso em: 16 Abr. 2016.
11. MARÇAL, R. F. Um método para detectar falhas incipientes em máquinas rotativas baseado em análise de vibrações e lógica *fuzzy*. 2000. 124 f. Tese (Doutorado em Engenharia Metalúrgica, de Minas e dos Materiais) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, RS, 2000.
12. MELLO, C. A., Processamento Digital de Sinais. Centro de Informática da Universidade Federal de Pernambuco, 2015. Disponível em < <http://www.cin.ufpe.br/~cabm/pds/PDS.pdf> >. Acesso em: 17 Mar. 2016.
13. RAO, S. Vibrações mecânicas. 4. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall do Brasil, 2008.
14. VASCONCELOS, N., RIBERA, M. P., Técnicas de análise de defeitos em rolamentos. 2011. Disponível em: http://paginapessoal.utfpr.edu.br/jmario/manutencao.mecana/artigos/tecnicas_de_analise_de_defeito_em_rolamentos.pdf/at_download/file. Acesso 16 Abr. 2016.