

DETECÇÃO DE VIBRAÇÕES COM SISTEMA MICROPROCESSADO INTERFACEANDO UM ACELERÔMETRO DE TRÊS EIXOS

Mario Mollo Neto, mariomollo@gmail.com

Universidade Paulista – UNIP - Rua Dr. Bacelar, 1212, 4º andar – Vila Clementino – São Paulo – SP – CEP: 04026-002

Jefferson Però Ormonde, jefferson.pero@hotmail.com

Centro Universitário Padre Anchieta Av. Dr. Adoniro Ladeira, 94 • Km 55,5 Via Anhanguera • Jundiaí • SP • CEP 13210-800

Valter Roberto Pinezi, vrpinezi@yahoo.com

Centro Universitário Padre Anchieta Av. Dr. Adoniro Ladeira, 94 • Km 55,5 Via Anhanguera • Jundiaí • SP • CEP 13210-800

Maurício José Bordon, bordon@mpc.com.br

Centro Universitário Padre Anchieta Av. Dr. Adoniro Ladeira, 94 • Km 55,5 Via Anhanguera • Jundiaí • SP • CEP 13210-800

Henrico Juliano Fonseca, Henrico.Fonseca@akzonobel.com

Centro Universitário Padre Anchieta Av. Dr. Adoniro Ladeira, 94 • Km 55,5 Via Anhanguera • Jundiaí • SP • CEP 13210-800

RESUMO. *Este artigo descreve o desenvolvimento de um protótipo, microprocessado, para a coleta de informações provenientes de vibrações mecânicas, por meio de um acelerômetro eletrônico com três eixos, causadas por sistemas movimentados por motores elétricos montados em suportes com mancais de rolamentos, enviando as informações em tempo real diretamente para uma Interface Homem Máquina composta por uma placa de aquisição de dados e um computador pessoal, possibilitando a análise de forma amigável dos sinais coletados no campo. O trabalho consistiu em uma revisão bibliográfica seguida da construção de um protótipo eletrônico e de um software supervisor para a coleta de dados em tempo real das vibrações. Os testes foram conduzidos por meio da monitoração de um conjunto composto por um motor elétrico, correias para transmissão da rotação e um conjunto de mancais intercambiáveis entre um com rolamento em perfeito estado de funcionamento e outro danificado para a comparação entre as leituras. O dispositivo desenvolvido foi instalado juntamente com um equipamento profissional para o mesmo fim e os resultados apontam para a possibilidade de utilização do mesmo com muito pequenas variações nas leituras e com grandes vantagens econômicas e a possibilidade de eliminação de dependência tecnológica.*

Palavras-chave: *Vibrações, Motores Elétricos, Acelerômetro, Manutenção Preditiva.*

1. INTRODUÇÃO

Esta pesquisa propõe a construção e desenvolvimento de um dispositivo composto por microcontrolador, conversores e sensores capazes de mensurar as vibrações e excitações provocadas por movimentos e oscilações em três eixos em mancais de máquinas rotativas industriais, e enviar as informações coletadas para um computador e modelar seus dados.

A constante busca das indústrias em reduzir o tempo de parada provocado pelas quebras em equipamentos e paradas em seu processo produtivo ocasionado por falta de manutenção preventiva e preditiva tem crescido constantemente. No atual ambiente onde a busca pela redução de custos de produção é mandatório para a sobrevivência das empresas de todos os ramos de atividades, a eficiência dos equipamentos é tratada com grande importância.

O protótipo proposto neste trabalho faz a aquisição de dados em tempo real das curvas características de vibração em máquinas rotativas, possibilitando ao usuário fazer leituras da vibração de um equipamento, permitindo a criação de um banco de dados para análise futura em diversos intervalos de tempo. Este fato facilita o acompanhamento do estado geral de funcionamento comparado a medições anteriores, no caso das leituras serem diferentes no mesmo equipamento e no mesmo ponto, é possível identificar uma anomalia que talvez seja imperceptível perceber somente com os cinco sentidos ou com os dispositivos de sinalização tradicionais.

Além da grande vantagem de fazer predições, o equipamento apresenta um custo final relativamente baixo, mesmo considerando as horas de desenvolvimento, do *hardware* em si, como do *software* supervisor e, o uso de poucos componentes eletrônicos, além da integração com microcomputadores do tipo PC's e *notebooks* que hoje são de fácil acesso na grande maioria dos estabelecimentos produtivos.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A noção de vibração começa com a ideia do equilíbrio. Um sistema está em equilíbrio quando a resultante de todas as forças atuantes sobre mesmo é nula. Qualquer sistema que esteja sob esta condição somente sairá dela quando alguma perturbação externa atuar sobre o mesmo. A oscilação irá ocorrer quando, após a perturbação atuar, o sistema apresentar a tendência a retornar à sua posição de equilíbrio (LARANJA, 2005).

Falhas em rolamentos podem ser previstas através da análise de vibrações, detectando-se componentes espectrais com frequências características dos defeitos e suas harmônicas e bandas laterais. O prognóstico da falha se baseia não só na intensidade dessas componentes, como também no padrão de distribuição de energia pelas diversas bandas espectrais, o que permite identificar o estágio de degradação do rolamento (SCHILTZ, 1990).

Segundo Taylor (1994) as frequências características de falha de rolamentos possuem uma peculiaridade especial: elas são não síncronas, isto é, não são múltiplas inteiras da velocidade de rotação do eixo. Isso pode permitir a sua identificação, mesmo quando não se conhece qual o rolamento instalado na máquina monitorada.

As quatro frequências básicas geradas por defeitos de rolamentos são relacionadas com o comportamento dinâmico de seus principais componentes, ou seja:

- Frequência de passagem de elementos rolantes por um ponto da Pista Interna (geralmente indicada por BPFI - *Ball Pass Frequency Inner Race*), associada a defeitos na pista interna.
- Frequência de passagem de elementos rolantes por um ponto da Pista Externa (geralmente indicada por BPFO - *Ball Pass Frequency Outer Race*), associada a defeitos na pista externa.
- Frequência de giro dos elementos (geralmente indicada por BSF - *Ball Spin Frequency*), associada a defeitos nos elementos rolantes (rolos ou esferas).
- Frequência de giro da gaiola ou do conjunto (trem) de elementos rolantes (geralmente indicada por FTF - *Fundamental Train Frequency*), associada a defeitos na gaiola e a defeitos em alguns dos elementos rolantes.

É importante ressaltar que, ao contrário da maioria das frequências de vibração geradas por componentes mecânicos, essas frequências são verdadeiramente frequências de defeito, isto é, elas só estarão presentes nos espectros de vibração quando os rolamentos estiverem realmente defeituosos ou, pelo menos, quando seus componentes estiverem sujeitos a tensões e deformações excessivas que poderão induzir uma falha (TAYLOR, 1994).

No desenvolvimento do *software* supervisor deste protótipo, a técnica adotada para a análise dos dados coletados foi baseada em realizar o diagnóstico do sinal de vibração medido no domínio do tempo. Outras abordagens mais sofisticadas podem ser usadas, como as aplicadas por Dyer e Stewart, (1978); Swansson e Favaloro (1984); e por Alfredson e Mathew (1985), como o cálculo da tendência de parâmetros estatísticos em domínio de tempo. Podem-se definir vários parâmetros estatísticos como RMS, pico, fator de crista, Curtose como aplicado por Dyer e Stewart (1978); Lai (1990) e Khan (1991), fator de folga, fator de impulso, fator de forma e o fator de defeito segundo aplicação realizada por Garlipp (2001).

A técnica de se visualizar o sinal no tempo não é tão fácil, pois uma enorme quantidade de informação pode ser obtida desta maneira, como a presença de modulações, componentes de frequência do eixo, desbalanceamento do eixo, transitórios, componentes de frequência mais alta, frequências de defeitos e outros (ALMEIDA e ALMEIDA, 2005).

Podem ser usados parâmetros estatísticos em domínio de tempo e de tendência em uma tentativa de se detectar a presença de danos incipientes do rolamento. Os parâmetros estatísticos mais usados são o pico, RMS, fator de crista, fator de forma, fator de impulso, fator de defeito, pico a pico, fator de folga e Curtose. Estes parâmetros podem ser definidos para um sinal discreto e são formas tradicionais de se quantificar um sinal dinâmico (ALMEIDA e ALMEIDA, 2005).

Podem-se usar duas abordagens para estatística em domínio de tempo. A primeira é computar os parâmetros estatísticos para toda a faixa de frequência do sinal conforme digitalizado, e a segunda é decompor o sinal em faixas discretas de frequência e obter os parâmetros para cada faixa (DYER e STEWART, 1978).

Existe um grande número de estudos para investigar o uso destes parâmetros para detecção dos danos do rolamento e para cálculo de tendência, para determinar seu comportamento com o aumento dos danos do rolamento (DYER e STEWART, 1978; SWANSSON e FAVALORO, 1984; LAI, 1990; KHAN, 1991; KIRAL e KARAGULLE, 2006).

Outros parâmetros em domínio de tempo podem ser definidos tais como fator de folga, fator de impulso e fator de forma. Os fatores de Folga e de Impulso são os mais úteis. O fator de Folga é o mais sensível e geralmente robusto para detecção de fragmentação por fadiga incipiente.

Segundo os autores, o sinal no domínio da frequência ou espectro de frequência é um gráfico de amplitude da resposta de vibrações pela frequência e pode ser derivado utilizando-se a transformada rápida de *Fourier* (FFT) da forma de onda no tempo. O espectro de frequência fornece uma informação valiosa sobre a condição de uma máquina.

Desde que as forças de excitação sejam constantes ou variem de uma pequena quantidade, os níveis de vibrações medidos da máquina também permanecem constantes ou variam de uma pequena quantidade. Entretanto, a partir do momento que as máquinas começam a apresentar defeitos, seu nível de vibrações e, portanto, o formato do espectro de frequência muda. Através da comparação do espectro de frequência das máquinas danificadas com um espectro de frequência de referência correspondente a uma máquina sem danos, a natureza e a localização das falhas podem ser detectadas (NEPOMUCENO, 1989).

Ainda segundo Nepomuceno (1989), outra característica importante de um espectro é que cada elemento rotativo em uma máquina gera frequências identificáveis, onde se vê a relação entre os componentes de uma máquina e seu correspondente espectro de vibrações. Portanto, mudanças no espectro em uma determinada frequência podem ser associadas diretamente com o correspondente componente da máquina. Uma vez que mudanças no espectro são mais facilmente detectadas comparadas com mudanças nos níveis globais de vibrações, esta é uma característica que ajuda muito na detecção de defeito na prática.

Segundo Rueda *et al.* (2005), sensores são dispositivos que mudam seu comportamento sob a ação de uma grandeza física, podendo fornecer diretamente ou indiretamente um sinal que indica esta grandeza.

Um Microcontrolador pode ser definido como: Um pequeno componente eletrônico, dotado de uma “inteligência programável”, utilizado nos controles de processos lógicos (SOUZA, 1999).

3. MATERIAIS E MÉTODOS

A pesquisa baseou-se inicialmente na exploração bibliográfica de conteúdos relacionados à fundamentação sobre o fenômeno físico da vibração e para o desenvolvimento das funcionalidades do sistema embarcado proposto, que deram direcionamento inicial para a elaboração do projeto e consequentemente a constituição do protótipo, realizando o levantamento de componentes básicos, tecnologia a ser utilizada e funcionamento do sistema.

Este protótipo focaliza-se na construção de um dispositivo capaz de captar grandezas como vibrações e seu devido comportamento, para identificar possíveis anomalias no funcionamento destes componentes de transmissão de movimento. Segundo Lamin Filho (2003) a maioria das máquinas modernas opera a partir de motores elétricos, que com o uso contínuo podem desenvolver falhas e essas falhas podem causar paradas na máquina.

É proposto o desenvolvimento de uma placa de aquisição que contém um sensor medidor de aceleração gravitacional, que converte a força da gravidade em um dado ponto em capacitância, em seguida para um conversor de capacitância para nível de tensão possibilitando que essa informação posteriormente seja processada por um microcontrolador, em seguida a informação é convertida de nível TTL (*Transistor Transistor Logic*) para uma porta de comunicação serial RS232 onde, o dispositivo que processa e trata esses dados para um formato amigável num computador portátil que incorpora um software gráfico que possibilita a amostragem da informação em tempo real para os usuários.

Esse sistema conta com um sensor de aceleração gravitacional, um microcontrolador, uma fonte de alimentação, um sistema de comunicação serial e um *software* para aquisição de dados no computador (Fig. 1).

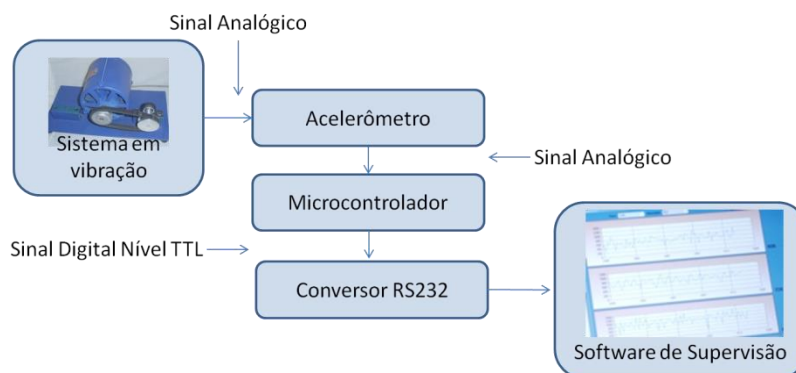


Figura 1. Diagrama de blocos do protótipo.

O projeto tem como base um sensor de aceleração gravitacional de 3 eixos, que converte a aceleração da gravidade em capacitância e em seguida em nível de tensão, que por sua vez é lido por um *chip* (microcontrolador). O dispositivo processa os sinais referentes aos 3 eixos (X, Y, Z), faz a filtragem referentes a ruídos e os amplifica dobrando os valores lidos, por meio de varredura em alta velocidade aproximadamente 100ms (milissegundos), convertendo em valores de 0 a 1023 que é equivalente a resolução do canal analógico de 10 . Esses valores são enviados na ordem X, Y, Z convertidos para base alfanumérica e enviados para o conversor serial *chip* MAX232 que faz a conversão do nível de tensão TTL (*Transistor to Transistor Logic*) para o padrão serial RS232 que é enviado para o microcomputador onde temos o *software* de leitura que promove a aquisição de dados escrito em linguagem C# que faz a exibição de 3 gráficos de tensão x tempo referente aos eixos X, Y, Z. Na criação do *firmware* do microcontrolador, utilizamos a ferramenta *MicroC Pro for PIC*, baseando se na linguagem de programação em C para Microcontroladores.

Ao mesmo tempo em que o *software* faz a aquisição dos dados através do protocolo serial RS232, ele armazena as leituras em um arquivo extensão -txt, que pode ser aberto e tratado por *softwares* de modelagem de dados e estatística assim como o *Microsoft Excel*. O protótipo foi montado em placa perfurada para devidos testes e construção.

Após a elaboração e confecção do protótipo foram realizados diversos testes e ajustes, com a finalidade de aumentar a precisão das medições e a eliminação de ruído térmico. Para verificação das funcionalidades deste protótipo foram feitas três leituras comparativas e em seguida suas respectivas análises. Primeiramente verificou-se o ruído térmico presente no protótipo, para essa medição deixamos o conjunto de testes (motor e mancal) completamente desligados e notou-se que o nível de ruído presente é irrelevante, para a faixa de frequência que desejou-se verificar, pois os gráficos exibidos na tela demonstram pouca oscilação, que é basicamente a influencia do ruído térmico proveniente do chaveamento interno dos componentes e capacitâncias do circuito (Fig. 2).

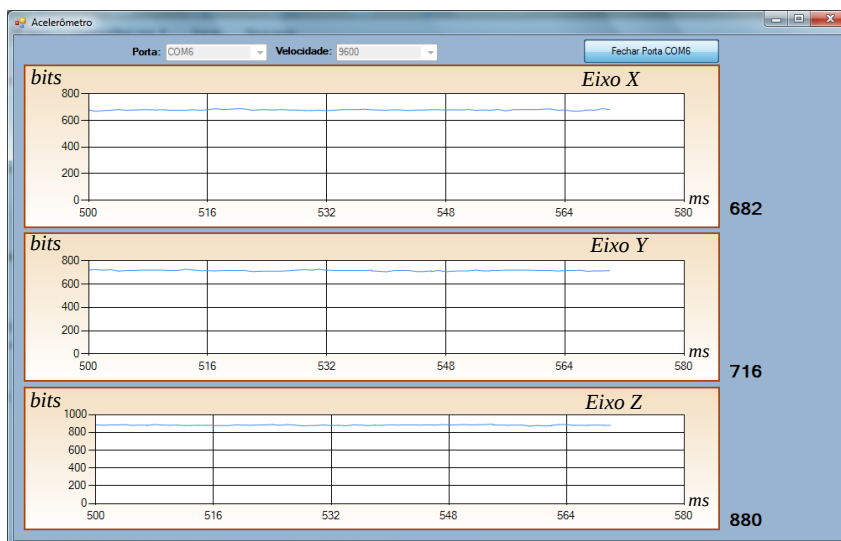


Figura 2. Ruído térmico gerado pelo sistema.

Em seguida foi feita a leitura de dois mancais em diferentes estados de conservação, sendo um novo e o outro já com metade da sua vida útil, onde visualmente não é possível perceber seu real estado de operação.

As leituras realizadas foram trabalhadas no *software Microsoft Excel* onde se realizou a análise estatística e, onde foi possível fazer as devidas análises de cada mancal analisado.

Os resultados para validação foram obtidos através de ensaios com a montagem de uma bancada de teste utilizando um motor elétrico marca *Kolbach* de 500W de 4 pólos acionando uma polia de diâmetro igual a do motor, portanto, girando a uma velocidade de 1700 rpm. O motor foi alimentado em 220VCA monofásico, acionando dois mancais tipo P 203(H) com rolamentos UC 203. Executou-se também uma medição com um medidor de vibrações de uso industriais para um comparativo, da marca *Megabras* modelo VIB 1400. Os procedimentos de testes e medições foram realizados com o motor, sobre uma base de mármore nivelada e em temperatura ambiente de 25 (°C).

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A Fig. 3a apresenta o protótipo construído em uma placa padrão perfurada e a Fig. 3b apresenta o correspondente esquema elétrico para a construção:

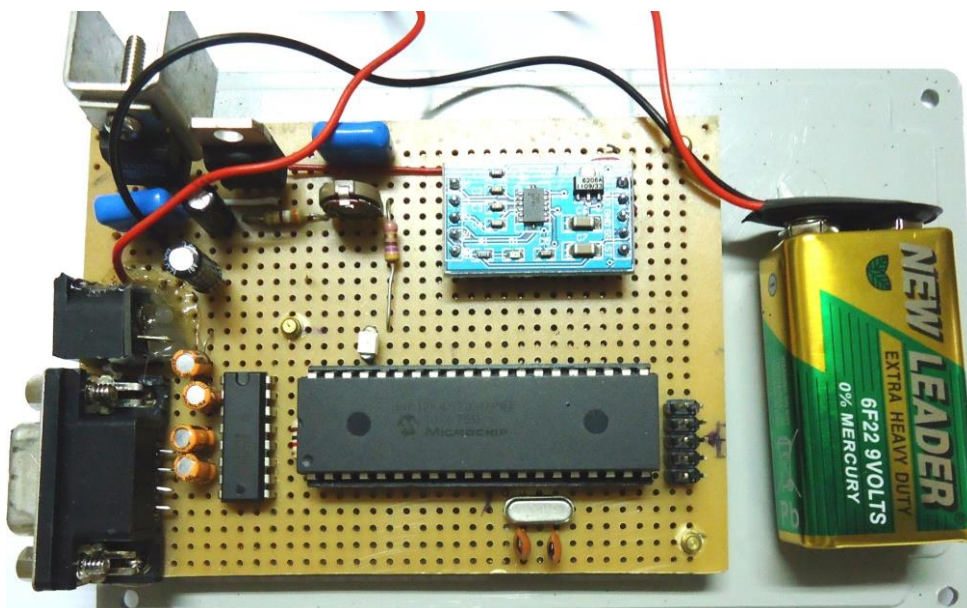


Figura 3a. Foto do protótipo montado em placa perfurada.

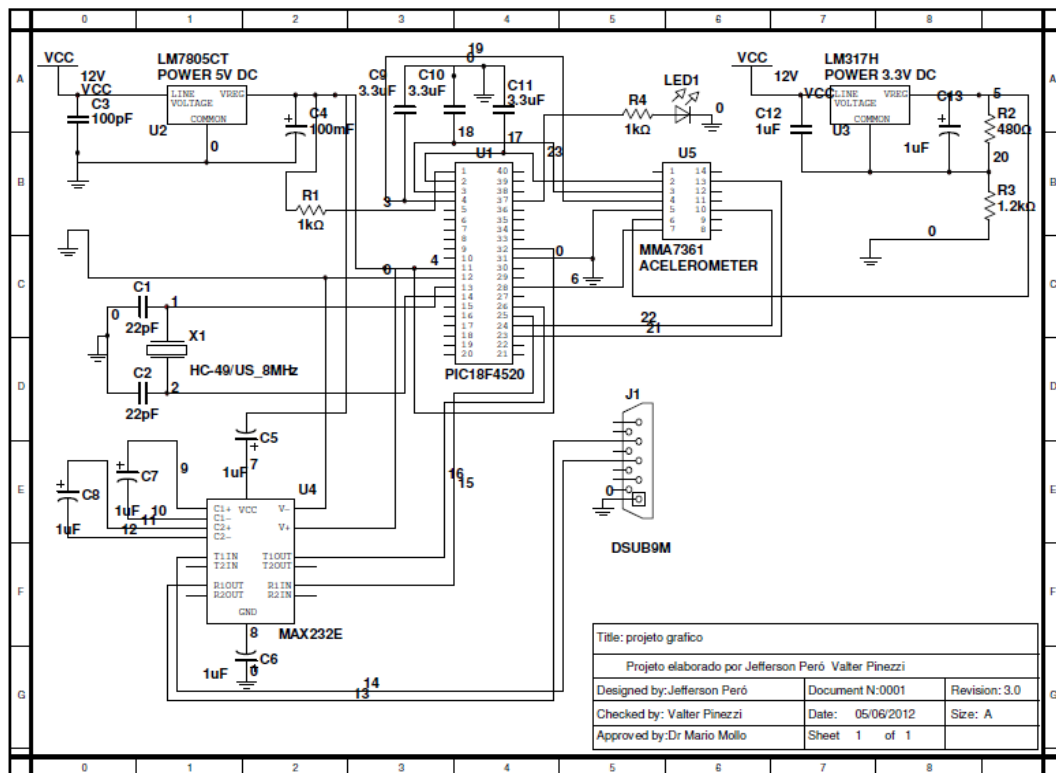


Figura 3b. Esquema eletrônico do projeto do protótipo proposto.

Nesta atual configuração o protótipo é capaz de realizar 20 leituras por segundo, ou seja, onde se levar em consideração que são coletadas 3 leituras instantâneas X, Y, Z, temos essa quantidade triplicada (30 leituras por segundo e 1800 leituras por minuto).

A Fig. 4 demonstra os recursos visuais do *software* de monitoramento em tempo real, que apresenta as variações em relação ao tempo dos eixos X, Y, Z.

A Fig. 5 demonstra os registros do *software* de monitoramento em arquivo de “log”.

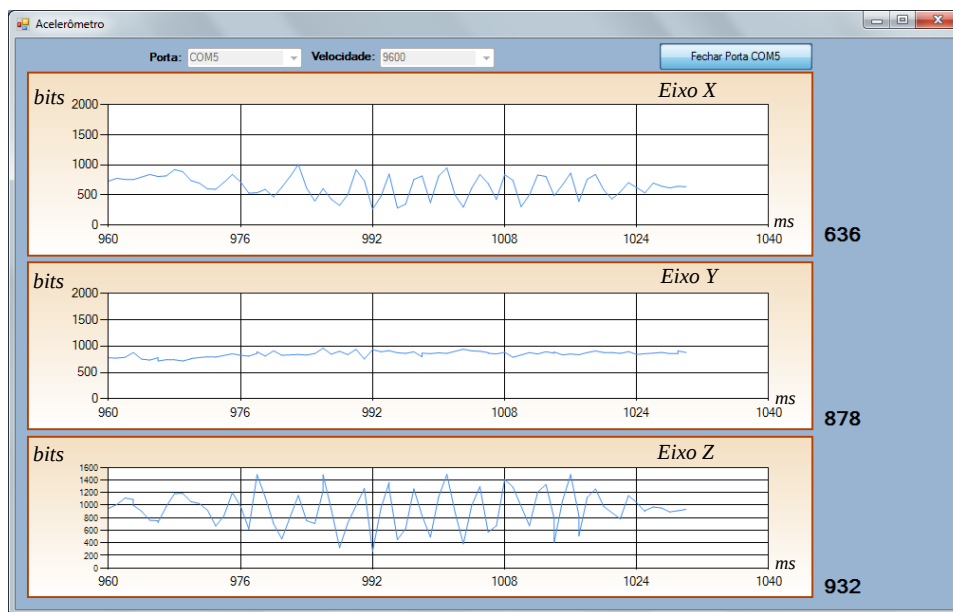


Figura 4. Tela do sistema de monitoramento de vibrações e três eixos.

Valor X	Valor Y	Valor Z	Tempo	Data	Hora
740,796	970,1	13/5/2012	10:15:18	135	
738,790	964,3	13/5/2012	10:15:18	235	
742,792	968,4	13/5/2012	10:15:18	235	
736,796	970,5	13/5/2012	10:15:18	235	
740,792	976,6	13/5/2012	10:15:18	245	
740,798	964,7	13/5/2012	10:15:18	245	
742,786	974,8	13/5/2012	10:15:18	245	
740,796	966,9	13/5/2012	10:15:18	245	
738,788	968,10	13/5/2012	10:15:18	245	
734,790	968,11	13/5/2012	10:15:18	255	
742,794	968,12	13/5/2012	10:15:18	255	
744,796	970,13	13/5/2012	10:15:18	255	
738,792	976,14	13/5/2012	10:15:18	255	
736,788	964,15	13/5/2012	10:15:18	255	
742,794	974,16	13/5/2012	10:15:18	265	
738,796	970,18	13/5/2012	10:15:18	675	
738,798	974,19	13/5/2012	10:15:18	675	
740,790	964,20	13/5/2012	10:15:18	685	
738,794	966,21	13/5/2012	10:15:18	685	
738,796	974,22	13/5/2012	10:15:18	685	
734,784	968,23	13/5/2012	10:15:18	685	
742,790	968,24	13/5/2012	10:15:18	685	
738,796	970,25	13/5/2012	10:15:18	685	
738,792	968,26	13/5/2012	10:15:18	695	
734,794	966,27	13/5/2012	10:15:18	695	
738,800	974,28	13/5/2012	10:15:18	695	
734,786	964,29	13/5/2012	10:15:18	695	
742,788	972,30	13/5/2012	10:15:18	695	
740,800	974,31	13/5/2012	10:15:18	705	
742,794	976,32	13/5/2012	10:15:18	705	
750,792	974,33	13/5/2012	10:15:18	705	
740,800	974,34	13/5/2012	10:15:18	705	
738,796	966,36	13/5/2012	10:15:18	825	

Figura 5. Conteúdo de um arquivo com Log da captura.

A seguir, nas Fig. 6, 7 e 8, temos os dados das análises efetuadas nos testes de bancada.

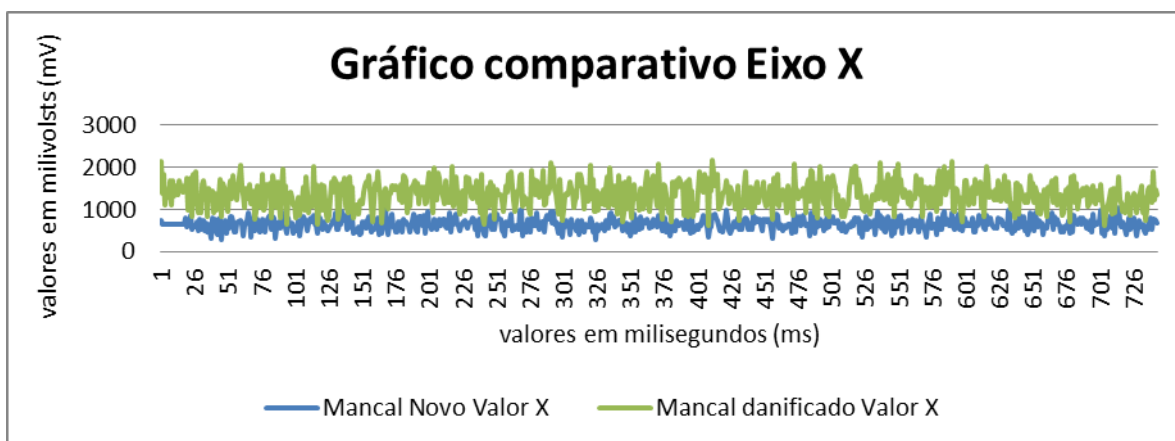


Figura 6. Gráfico comparativo Eixo X.

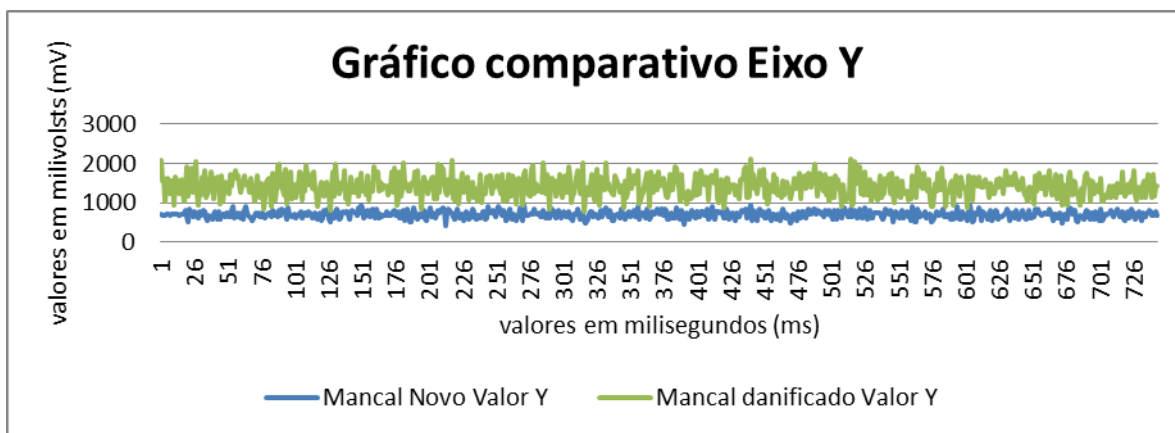


Figura 7. Gráfico comparativo Eixo Y.

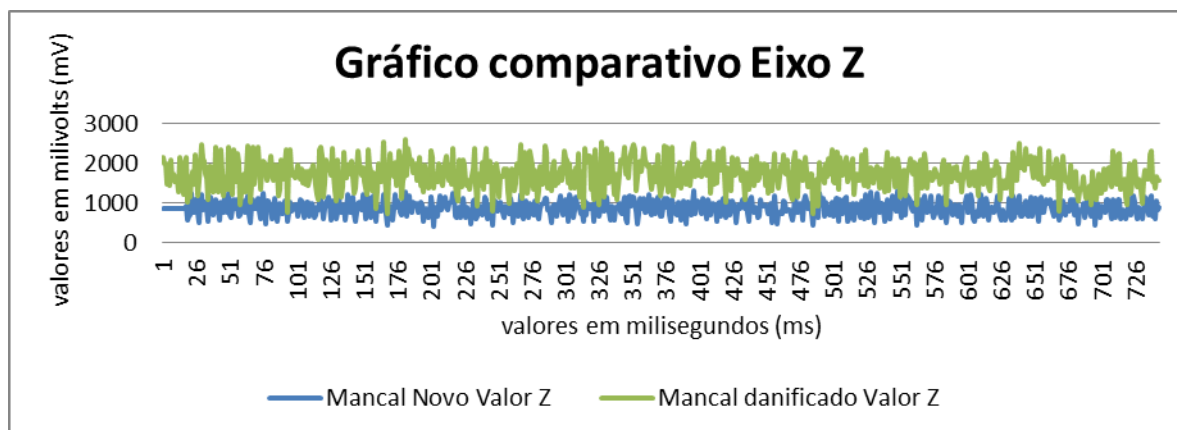


Figura 8. Gráfico comparativo Eixo Z.

Após terem sido efetuadas medições nos eixos vertical, horizontal e axial, utilizou-se como ferramenta de modelagem de dados o programa *Microsoft EXCEL* criando um módulo de análise de dados com o uso de estatística descritiva, onde, foi calculada a média quadrática (RMS) (Fig. 9), o fator de crista (Fig. 10).

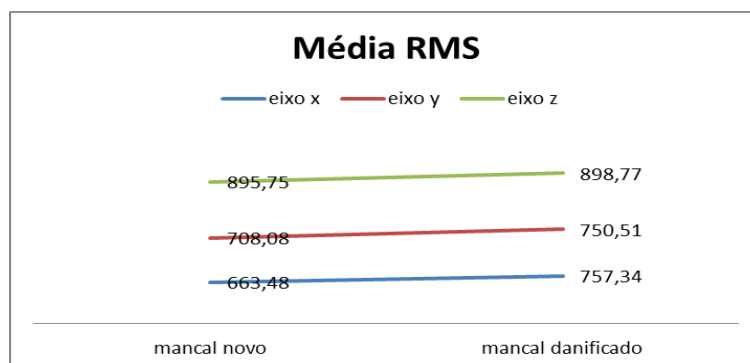


Figura 9. Gráfico da média RMS dos mancais.

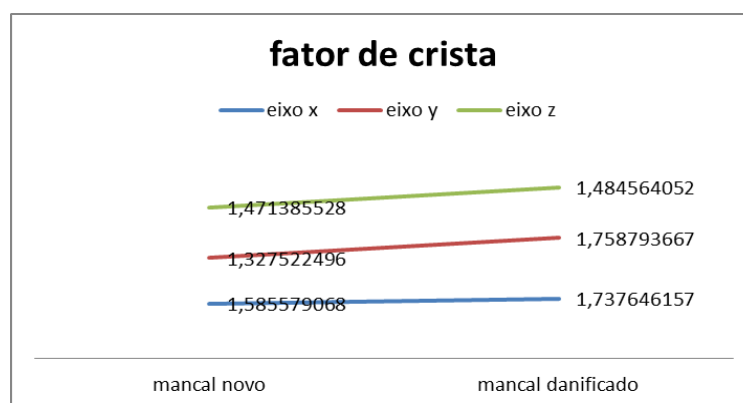


Figura 10. Fator de crista dos mancais.

Notoriamente o mancal danificado teve uma elevação do valor RMS, que permite estimar o conteúdo de energia do sinal vibratório, ele é usado para estimar a severidade de vibração proveniente da estrutura de uma máquina ou de fatores externos, sendo mais usado que a média (MITCHELL, 1993). Na Fig. 11, vemos o gráfico de desvio padrão entre os mancais e na Fig. 12 o gráfico do valor de Curtose obtido.

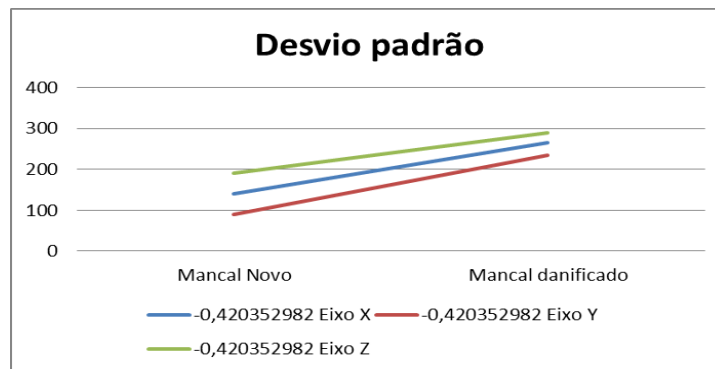


Figura 11. Desvio padrão dos mancais.

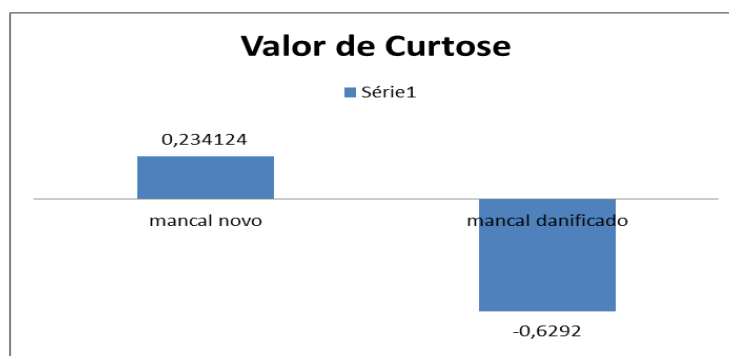


Figura 12. Valor de curtose entre mancais.

Na *prática* pode se observar que o valor de Curtose tende a diminuir quando existe uma deterioração do mancal analisado.

Foram também convertidas as unidades de força G (obtidas do sensor do acelerômetro) para mm/s baseado no fato que como o centro do sensor de força G se move com a aceleração, o valor de sua capacitância também muda, com magnitude dada pela Eq. (1) onde C é a aceleração da gravidade, A é a área do sensor, ε é a constante dielétrica e d é a distância do deslocamento do sensor.

$$C = \frac{A \cdot \varepsilon}{d} \quad (1)$$

O funcionamento do processo de conversão foi baseado na utilização de um capacitor interno do microcontrolador de 25 pF que tem a sua capacitância também modificada pelo efeito da modificação da capacitância do sensor por conta da aceleração calculado pela Eq. (1) e, quando a leitura é iniciada, o capacitor se desconecta e a tensão se mantém constante, esse capacitor mantém a tensão enquanto o processo de conversão é feito.

O capacitor durante o processo de conversão é ligado, o tempo mínimo para carga dos 5 V é de 1.4 μ s com impedância até 2500 Ω e, após conversão o capacitor é desligado do circuito de entrada. Esse processo dura 100 ns. Após o término do processo o capacitor é ligado na entrada analógica do microcontrolador para que se realize a leitura da tensão correspondente em *bits*.

Este procedimento foi realizado para que fosse possível exibir, no *display* do protótipo os valores compatíveis com a norma citada, e não em *bits*, como faz o equipamento profissional e para que a efetiva comparação fosse possível.

Para a geração deste gráfico utilizou-se na construção do *firmware* do protótipo um fator de escala para atribuir um valor que condiz com a norma ISO 2372-1974(10816) e, utilizou-se o fator escala de 1:20 que corrigiu matematicamente no Excel os valores obtidos pelo protótipo. Isto foi feito para ter-se uma comparação com o medidor industrial em questão.

Construiu-se um gráfico do comparativo dos medidores, valor global RMS (Fig. 13) que foi feito entre o protótipo construído e o medidor industrial que mostra que as diferenças obtidas das medições.

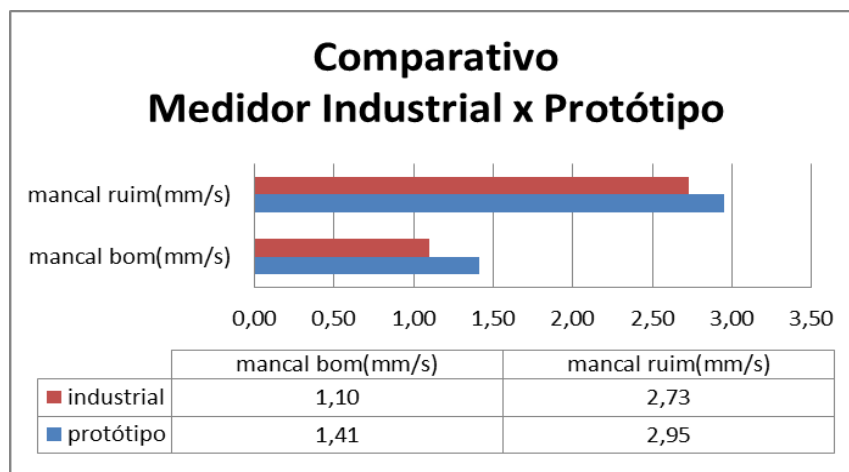


Figura 13. Gráfico comparativo entre os medidores de vibrações.

5. CONCLUSÃO

Observou-se que o grande desafio da análise de vibração em mancais de rolamento de máquinas rotativas industriais está em saber o que procurar e, o diagnóstico correto, está relacionado à capacidade de medir e correlacionar os resultados com mecanismos de falha conhecidos.

Nesta pesquisa foi feita uma revisão dos desenvolvimentos ocorridos nas últimas décadas, sobre diagnósticos de defeitos em rolamentos através da análise de vibrações.

A vibração dos mancais de rolamento foi investigada olhando-se para a ciência fundamental, incluindo a resposta dinâmica do mancal aos danos, efeitos do percurso de transmissão, ruído externo e vibração, medição da vibração e outros. Tem-se percebido que estes fatores desempenham o papel mais significativo na detecção, diagnóstico e prognóstico de danos em mancais.

Foram também discutidos alguns parâmetros estatísticos em domínio de tempo. Uma imensa quantidade de informações pode ser colhida a partir da vibração medida externa às máquinas rotativas.

O intuito nesta pesquisa foi o de demonstrar que, através de um custo relativamente baixo a partir da montagem de um circuito com acelerômetro e microcontrolador, é possível o desenvolvimento de um aparelho que possa auxiliar a manutenção preditiva de diversas máquinas. A técnica empregada (domínio do tempo) mostrou-se bastante eficiente na detecção de falhas incipientes, mesmo quando o sinal encontra-se contaminado com ruído.

Para alguns casos onde as frequências a serem lidas sejam mais altas, existe uma limitação, no caso a quantidade de amostras, o que pode ser um fator que impede de a leitura de forma mais precisa, de acordo com a frequência fundamental, que no caso de motores elétricos são em torno de 1 kHz.

No caso específico desta pesquisa, estaremos coletando menos de 1% desta frequência (10 Hz), podendo haver, por isso, uma limitação para interpretações mais detalhadas, devido a limitações do *hardware* adotado. É importante lembrar que quanto maior for o tempo de leitura e aquisição de dados maior será a precisão do relatório obtido.

Conclui-se ainda que o protótipo desenvolvido possa ser melhorado através da inserção de filtros demoduladores, análises mais profundas em relação a diversas ferramentas matemáticas aplicadas a técnicas de domínio de frequência e tempo, e mesmo em diversos aspectos relacionados a *software* e *hardware*, mas tem-se a convicção que chegou-se ao que foi proposto nos objetivos do trabalho.

Observou-se que o uso do protótipo desenvolvido, em comparação com o dispositivo industrial usado como referência, teve um resultado final aceitável, assim, permitindo concluir que, com baixo custo, é possível gerar dispositivos funcionais e compatíveis com os industriais disponíveis no mercado.

O valor de aquisição de um medidor industrial é próximo a US\$ 725.00 (setecentos e vinte e cinco dólares americanos).

O custo para a construção do protótipo estudado esteve próximo a \$ 73.00 (setenta e três dólares americanos), considerando apenas os materiais sem custo de mão de obra para a confecção do circuito e *software*.

Comparando com o custo do aparelho industrial este valor equivale aproximadamente a dez por cento do valor comercial.

6. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Centro Universitário Padre Anchieta de Jundiá, pelo suporte da infraestrutura ao desenvolvimento da pesquisa.

7. REFERÊNCIAS

- ALFREDSON, R.J.; MATHEW, J. 1985. "Frequency domain methods for monitoring the condition of rolling element bearings". Mechanical Engineering Transactions, Vol. ME10, No. 2, The Institution of Engineers, Australia, pp 108-112.
- ALMEIDA, F.V.R.; ALMEIDA, M.T. 2005. "Statistical analysis of vibration signal for condition monitoring of defects in rolling element bearings". 18th International Congress of Mechanical Engineering - COBEM, Ouro Preto.
- DYER, D.; STEWART, R.M. 1978. "Detection of rolling element bearing damage by statistical vibration analysis". Transactions of the American Society of Mechanical Engineers, Journal of Mechanical Design, Vol. 100, pp 229-235.
- GARLIPP, F. 2001. "Manual do usuário da 01dB-Stell".
- INTERNATION STANDARDS ORGANIZATION.1995. "Mechanical vibration of machine with operation speeds from 10 to 200". rev/s – ISO 2372-1994: General guidelines, ISO.
- KHAN, A.F. 1991. "Condition monitoring of rolling element bearings: A comparative study of vibration based techniques". Ph.D. Thesis, University of Nottingham.
- KIRAL, Z.; KARAGULLE, H. 2006. "Vibration Analysis of Rolling Element Bearings With Various Defects Under The Action of an Unbalanced Force". Mechanical Systems and Signal Processing.
- LAI, M.S. 1990. "Detection of Developing Bearing Failures by Means of Vibration Analysis". Ph.D. Thesis, University of Windsor, Ontario.
- LAMIM FILHO, Paulo C. M., 2003. "Acompanhamento Preditivo de Motores de Indução Trifásicos através da Análise de Fluxo Magnético", Campinas: Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 105 p. Dissertação (Mestrado).
- LARANJA, Prof. Dr. Rafael A.C. 2005. ".Mecânica Vibratória". Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Rio Grande do Sul.
- MITCHELL, J. S. 1993. "Machinery Analysis and Monitoring", PennWell Publishing Company, Tulsa, Oklahoma. 1993
- NEPOMUCENO, Lauro X. 1989. "Técnicas de Manutenção Preditiva", São Paulo, Editora Edgar Blucher.
- RUEDA, T.C., SANTOS, L.M.S., RABELO, G.F. 2005. "Controle Automático do Nível de Poeira Baseado em Microcontrolador". UFLA - Universidade Federal de Lavras, Disponível em: <<http://www.dcc.ufla.br/infocomp/artigos/v5.1/art08.pdf>> Acesso em 10/08/20010.
- SCHILTZ, Richard L., 1990. "Forcing Frequency Identification of Rolling Element Bearings", Volume 24, No.5.
- SOUZA, D.; 1999. "Desbravando o PIC - Ampliado e Atualizado para PIC 16F628A", 1ª Edição, Editora Érica.
- SWANSSON, N.S.; FAVALORO, S.C. 1984. "Applications of Vibration Analysis to the Condition Monitoring of Rolling Element Bearings". Aeronautical Research Laboratory, Propulsion Report 163.
- TAYLOR, J. I. 1994. "The Vibration Analysis Handbook". Flórida: Vibration Consultants.

8. NOTA DE RESPONSABILIDADE

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo deste artigo.