

MONITORAMENTO DE VIBRAÇÕES EM MANCAIS COM ACELEROMETRO

Jefferson Però Ormonde

Centro Universitário Padre Anchieta
jefferson.pero@hotmail.com

Valter Roberto Pinezi

Centro Universitário Padre Anchieta
vrpinezi@yahoo.com.br

Mario Mollo Neto

Centro Universitário Padre Anchieta
mariomollo@gmail.com

RESUMO

Este artigo descreve o desenvolvimento de um protótipo, microprocessado e de tamanho reduzido, que proporciona a coleta de informações provenientes de vibrações mecânicas (eixos X, Y, Z) causadas por sistemas movimentados por motores elétricos baseados em suportes com mancais de rolamentos durante a realização de trabalho, enviando as informações em tempo real diretamente para uma Interface Homem Máquina (IHM). A interface é composta por uma placa de aquisição de dados e um computador pessoal, possibilitando a análise de forma fácil e amigável dos sinais coletados no campo. Através dessa pesquisa notamos a possibilidade de utilizar a eletrônica embarcada e as ferramentas de *software* substituindo análises empíricas, que às vezes podem não trazer um diagnóstico verdadeiro, fornecendo informações para tomada de decisão através de manutenção preditiva.

Palavras chaves: Vibrações; Motores Elétricos; Acelerômetro; Manutenção Preditiva.

ABSTRACT

This article describes the development of a small size microprocessor prototype, which provides a collection of information from mechanical vibrations (X, Y, Z) caused by systems moved by electric motors based on media roller bearings while performing work by sending the information in real time directly to a Human Machine Interface (HMI). The interface is made of a data acquisition card and a personal computer, enabling the analysis in an easy and friendly way of signals collected in the field. Through this study, we have noticed the possibility of using embedded electronics and software tools to replace empirical analyzes, which sometimes cannot bring a true diagnosis, providing a basis for decision-making, through predictive maintenance.

Keywords: *Vibrations; Electric Motors; Accelerometer; Predictive Maintenance.*

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. Esse protótipo focaliza a construção de um dispositivo capaz de captar grandezas como vibrações e seu devido comportamento, para identificar possíveis anomalias no funcionamento desses 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. Posteriormente, 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 é um computador portátil que incorpora um *software* gráfico que possibilita a amostragem da informação em tempo real para os usuários.

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 no presente 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. O que facilita o acompanhamento do estado geral de funcionamento comparado às medições anteriores, no caso das leituras serem diferentes no mesmo equipamento e no mesmo ponto, é possibilidade de identificar uma anomalia que talvez seja imperceptível aos os cinco sentidos ou aos dispositivos de sinalização tradicionais.

Os equipamentos comercializados para este fim possuem maior precisão, porém, com custo de aquisição muito maior, o que impede a instalação de mais unidades para monitoramento fixo em determinadas máquinas consideradas chave para a produção.

Além da grande vantagem de fazer previsões, o equipamento proposto apresenta componentes de fácil aquisição, baixo custo e 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. Isso permite a aplicação de várias unidades deste dispositivo no ambiente fabril, de forma a manter um monitoramento distribuído e, quando algum dos equipamentos monitorados apresente indicações de problemas, o mesmo poderá ser avaliado com a instalação de um único instrumento de precisão para uma melhor avaliação ou até que seja sanada a falha.

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Vibrações

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. Ao se conceder ao pêndulo um ângulo inicial pequeno o mesmo entrará em movimento tendendo a retornar à sua posição de equilíbrio inicial. Ao passar por ela o movimento não se interrompe porque a massa do pêndulo possui velocidade, portanto energia cinética. Enquanto esta energia permanecer presente no sistema o movimento oscilatório continuará. Se, entretanto, a energia inicial concedida for muito elevada, o pêndulo entrará em movimento rotativo. Situação semelhante ocorre com uma bola rolando dentro de uma superfície circular (LARANJA, 2005).

Segundo o mesmo autor, o movimento do pêndulo se produz na direção em que o mesmo é permitido. Em se tratando de um pêndulo simples o movimento é plano sendo necessária apenas uma única variável para descrevê-lo (o ângulo). Diz-se, então que ele possui um grau de liberdade ou mobilidade. Se fosse permitido ao mesmo girar em torno de um eixo vertical, o mesmo possuiria dois graus de liberdade.

O número de graus de liberdade de um sistema, como destaca o autor, é o número mínimo de coordenadas capazes de representar completamente o movimento do mesmo (estas coordenadas são chamadas coordenadas generalizadas).

Se um sistema possui pelo menos um grau de liberdade, os valores das variáveis que descrevem o estado do sistema (posição, velocidade, aceleração) devem ser especificados. Para isto é necessário que se escolha um sistema de coordenadas, a figura 1 ilustra os sistemas com um grau de liberdade e com dois graus de liberdade.

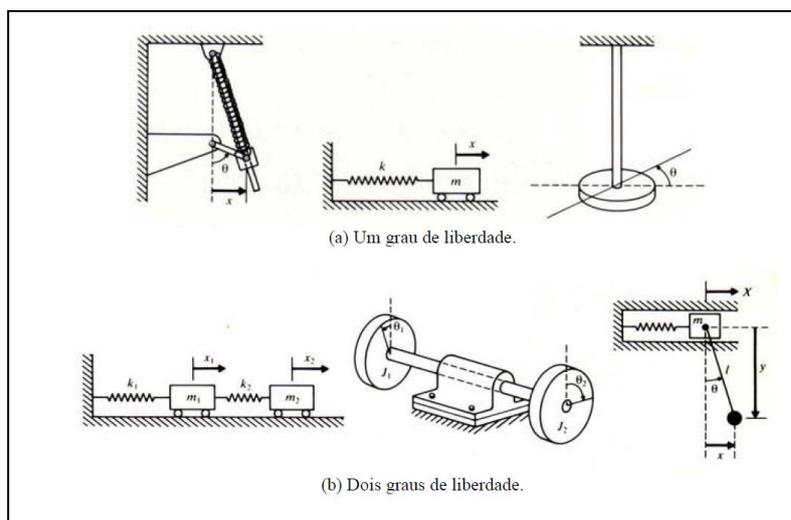


Figura 1. Sistema com um (a) grau de liberdade e (b) dois graus de liberdade. Fonte: (LARANJA, 2005).

Defeitos comuns em mancais de rolamentos.

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).

As causas mais comuns de defeitos em rolamentos são: seleção incorreta, sobrecarga, defeito de fabricação, desalinhamento, "jambragem", montagem incorreta, estocagem inadequada, lubrificação inadequada, excessiva ou insuficiente, falha de vedação e descargas elétricas através dos mancais (SCHILTZ, 1990).

Geralmente, os defeitos em rolamentos evoluem com certa lentidão e emitem sinais com bastante antecedência da falha final, que pode ocorrer por travamento ou ruptura dos componentes. Defeitos típicos que evoluem dessa forma são: escamamento, descascamento

(*peeling*), arranhadura, escorregamento, fratura, trincas, gaiola danificada, impressões, *pitting*, desgaste, corrosão por contato, esmagamento (falso brinel), deslizamento, superaquecimento, corrosão elétrica, oxidação elétrica, falha de instalação, alteração de coloração (PIERRI, 2004). A figura 2 demonstra um dos tipos de falhas que acontecem em rolamentos.



Figura 2 Escamamento. Fonte: (NSK BEARING DOCTOR, 2001).

Componente: Anel interno de rolamento de contato angular.

Sintoma: Escamamento ao longo da pista.

Causa: Desalinhamento na instalação.

Frequências Básicas Geradas por Defeitos de Rolamentos

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 BPGI do inglês *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 BPGO do inglês *Ball Pass Frequency Outer Race*), associada a defeitos na pista externa;
- frequência de giro dos elementos (geralmente indicada por BSG do inglês *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 do inglês *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. Isso 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).

Equações de frequências

Segundo Taylor, (1994), as frequências básicas de defeitos em rolamentos podem ser calculadas através das equações 1 A 4:

Rotação da Gaiola

Para pista externa estacionária, para pista interna estacionária:

$$FTF = \frac{S}{2} \left(1 \pm \frac{d}{D} \cos\phi \right) \quad (1)$$

Rotação do Elemento Rolante:

$$BSF = \frac{S}{2} * \frac{v}{d} \left[1 - \left(\frac{d}{v} * \cos\phi \right)^2 \right] \quad (2)$$

Passagem de Elementos pela Pista Externa:

$$BPFO = \frac{S * n}{2} \left(1 - \frac{d}{D} \cos\phi \right) \quad (3)$$

Passagem de Elementos pela Pista Interna:

$$BPF1 = \frac{S * n}{2} \left(1 + \frac{d}{D} \cos\phi \right) \quad (4)$$

Onde:

S = Si - Se

Se = frequência de rotação da pista externa

Si = frequência de rotação da pista interna

d = diâmetro dos elementos rolantes

D = diâmetro primitivo

n = nº de elementos rolantes

\emptyset = ângulo de contato

As frequências de defeitos dos rolamentos comerciais podem ser obtidas de varias fontes, como através de distribuidores dos fabricantes de rolamentos, bancos de dados disponíveis comercialmente, etc.

TÉCNICAS DOMÍNIO DO TEMPO

Pela praticidade no desenvolvimento do *software* supervisorio deste protótipo, foi a técnica adotada para a análise dos dados coletados nesta pesquisa, uma das abordagens de detecção e diagnóstico é analisar o 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 Favalaro (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 segundo Li *et al.*,(1991), 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. Tais parâmetros podem ser definidos para um sinal discreto e são formas tradicionais de se quantificar um sinal dinâmico (ALMEIDA e ALMEIDA, 2005).

O parâmetro Pico é o valor de zero a pico, ou seja, um valor medido de zero até o pico mais alto da onda (Equação 5).

$$Pico = \frac{1}{2}(\max[x(t)] - \min[x(t)]) \quad (5)$$

O valor Pico é útil na medida das respostas dos sistemas a choques mecânicos.

O parâmetro RMS é o valor eficaz ou o valor médio quadrático. Ele se relaciona diretamente com a energia do sinal, ou seja, com a capacidade destrutiva da vibração (Equação 6).

$$RMS = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [x(i) - \bar{x}]^2} \quad (6)$$

O fator de crista permite detectar falhas em rolamentos através de relações de amplitudes dos sinais de vibrações. É definido como a relação do valor do pico de vibração pelo valor de RMS medido dentro de uma banda de frequência (Equação 7).

$$\text{Fator de Crista} = \frac{\text{Pico}}{RMS} \quad (7)$$

O método de *Curtose* utiliza-se a análise estatística para detectar falhas em rolamentos através de um fator de *Curtose* designado por K. É baseado no sinal do domínio do tempo e usa-se o quarto momento central de um sinal (Equação 8).

$$\text{Curtose} = \frac{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [x(i) - \bar{x}]^4}{RMS^4} \quad (8)$$

Na prática observou-se que para $K=3$ é o caso para um rolamento sem defeito e quando o $K>3$ tem-se defeitos correspondentes aos sinais em forma de pulso de curta duração.

O Fator de Defeito é um parâmetro para a avaliação de defeitos em rolamentos através da evolução na diferença entre os picos e os valores RMS do sinal de vibração do rolamento (Equação 9).

$$\text{Fator de Defeito} = \text{Pico} - RMS \quad (9)$$

O valor Pico-a-Pico é o valor medido entre os extremos da onda (distância do maior pico negativo até o maior pico positivo), (Equação 10).

$$\text{Pico a Pico} = \{\max[x(t)] - \min[x(t)]\} \quad (10)$$

O valor pico a pico indica o trajeto total do elemento e é útil nas considerações de folgas e tensões dinâmicas geradas pela vibração. Onde x denota o valor médio do sinal de tempo discreto $x(t)$ com N pontos de dados.

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, conforme desenvolvido por Li *et al.* (1991). 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.

TÉCNICA DOMÍNIO DA FREQUÊNCIA

Na maior parte das medidas de vibração, é mais fácil trabalhar no domínio das frequências que no domínio do tempo (BREITENBACH, 1999).

Segundo o autor, 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.

TRANSFORMADA DE FOURIER

Transformada contínua

Sinais periódicos contínuos podem ser representados como uma série (a *série de Fourier*). Para existir a série de Fourier é necessário ao sinal satisfazer as seguintes condições:

- ser finito;
- possuir um número finito de descontinuidades;
- possuir um número finito de máximos e mínimos em um ciclo (SPIEGEL, 1971).

Segundo o Spiegel (1971), qualquer sinal periódico limitado pode ser representado pela série de Fourier. A vibração de uma estrutura, assumida como periódica no tempo e de período T, pode ser considerada que satisfaz essas condições, e, portanto escrita como a seguinte série infinita:

$$x(t) = a_{0/2} + \sum_{n=1}^{\infty} \left(a_n \cos \frac{n\pi x}{L} + b_n \sin \frac{n\pi x}{L} \right) \quad (11)$$

onde “ $a_{0/2}$ ” é o nível DC do sinal, e “ a_n ” e “ b_n ” podem ser obtidos a partir de $x(t)$, previamente conhecido, através das seguintes relações:

$$a_n = \frac{2}{T} \int_0^T x(t) \cos \left(\frac{2\pi n t}{T} \right) dt, \text{ para } n = 0, 1, \dots, \infty \quad (12)$$

$$b_n = \frac{2}{T} \int_0^T x(t) \sin \left(\frac{2\pi n t}{T} \right) dt, \text{ para } n = 0, 1, \dots, \infty \quad (13)$$

Os coeficientes “ a_n ” e “ b_n ” são chamados genericamente de coeficientes de Fourier (ou coeficientes espectrais) para a função $x(t)$, e a equação (14) é a **Série de Fourier**.

Considerando a fórmula de Euler e que a soma de uma senóide e uma cosenóide de mesma frequência pode ser escrita da seguinte maneira:

$$A \cos(\omega t) + B \sin(\omega t) = C \sin(\omega t + \varphi) \quad (14)$$

onde

$$C = \sqrt{A^2 + B^2} \text{ e } \varphi = \tan^{-1}(A/B) \quad (15)$$

Pode-se escrever a série de Fourier para sinais contínuos da seguinte forma:

$$x(t) = \sum_{n=1}^N C_n \exp(jn\omega_0 t) \quad (16)$$

onde

$$C_n = \frac{1}{T} \int_0^T x(t) \exp(-jn\omega_0 t) dt, \quad \omega_0 = \frac{1}{T} \text{ e } \omega_n = n\omega_0 \quad (17)$$

Para sinais não-periódicos (período infinito), a série de Fourier se transforma na *Transformada de Fourier*, definida como:

$$X(j\omega) = \int_0^{\infty} x(t) \exp(-j\omega t) dt \quad (18)$$

A equação acima pode ser obtida a partir das anteriores, considerando que o período do sinal tende a infinito. A Transformada de Fourier existe para as funções para as quais a integral acima converge, o que em geral é verdade para os sinais provenientes de vibrações (SPIEGEL, 1971).

Transformada discreta FFT

Os analisadores de Fourier modernos são baseados em microcomputadores digitais, sendo necessário, portanto, para a análise de vibrações mecânicas, que os sinais sejam convertidos de contínuos para discretos, através do processo de amostragem e digitalização. Nesse caso, há a necessidade da Transformada de Fourier Discreta (FFT), uma vez que os sinais foram convertidos. Assim, $x(t)$ passa a ser uma função discreta no tempo $x_k = x(k \Delta t)$ definida somente para um conjunto de N valores de ($t_k = k \Delta t$, $k = 1, N$), igualmente espaçados no tempo de Δt . A série de Fourier transforma-se então na seguinte série finita:

$$x(t_k) = a_0/2 + \sum_{n=1}^{N/2} \left(a_n \cos \frac{2\pi n t_k}{T} + b_n \sin \frac{2\pi n t_k}{T} \right) \quad k=1, N \quad (19)$$

De forma semelhante ao caso contínuo, pode-se definir a transformada discreta, a partir da série, como:

$$X_n = X(j\omega_n) = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} X_k e^{-j2\pi n k / N} \quad (20)$$

A transformada de Fourier é, portanto uma transformação do domínio de análise que possibilita uma visualização melhor das propriedades espectrais contidas no sinal de vibração.

SENSOR DE ACELERAÇÃO GRAVITACIONAL

O sensor de aceleração gravitacional denominado acelerômetro usado no protótipo é o circuito integrado MMA7361L $\pm 1.5g$, $\pm 6g$ *Three Axis Low-g Micromachined Accelerometer* da *Freescale*.

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.

O sensor MMA7361L figura 3 é um sensor capacitivo com processamento de sinal onde qualquer inclinação nos eixos faz com que a capacitância do sensor se altere, assim o conversor de capacitância para nível de tensão faz a conversão simultânea, além disso, os sensores são de baixo consumo de energia e são encapsulados no mesmo *chip* fechado hermeticamente.

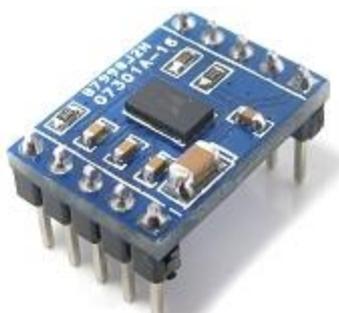


Figura 3 Acelerômetro em SMD acoplado na placa com capacitores de filtro. Fonte: (*FREESCALE*, 2008).

A célula gravitacional (*G-Cell*) é formada por materiais semicondutores (*polysilicon*), fixados em um ponto central de massa que se move entre as paredes internas do *chip*, a medição da distância entre esses materiais determina a aceleração da gravidade (mV/g), como o centro se move com a aceleração, o valor de capacitância também mudará, pois é dado pela equação 21 onde A é a área, ϵ é a constante dielétrica e d é a distância.

$$C = \frac{A \cdot \epsilon}{d} \quad (21)$$

Para esse protótipo adotamos o sensor MMA 7361L experimentalmente, devido a sua vasta aplicação, características adequadas para respostas às entradas e facilidade de aquisição no mercado. A figura 4 apresenta o diagrama de blocos do MMA761L, para melhor entendimento.

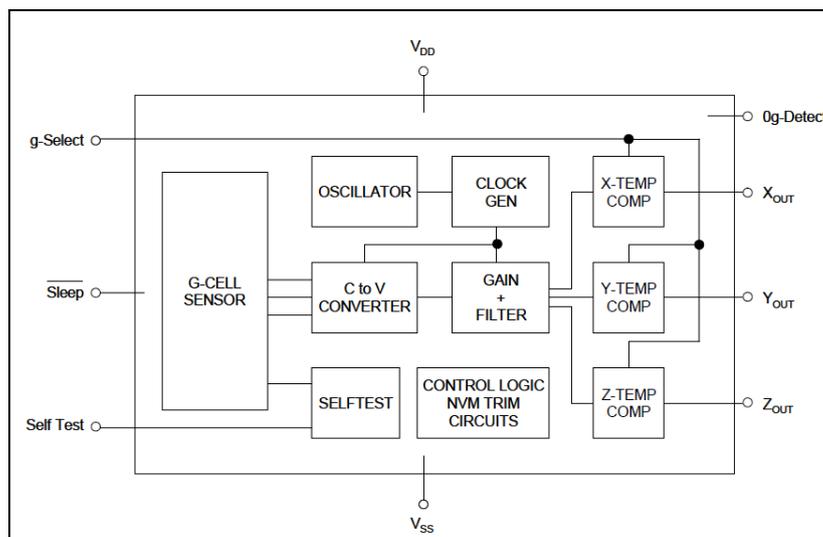


Figura 4 Diagrama de blocos do MMA7361L. Fonte: (FREESCALE, 2008).

MICROCONTROLADOR

Um Microcontrolador pode ser definido como: Um pequeno componente eletrônico, dotado de uma “inteligência programável”, utilizado nos controles de processos lógicos segundo (SOUZA, 1999). A base para o funcionamento e processamento do protótipo é um microcontrolador da família PIC18F, de fabricação da *MICROCHIP*, o modelo utilizado é o PIC18F4520, que possui 32 Kbytes para programação interna 1536 bytes de memória RAM (*Random Access Memory*) de dados, 13 canais configuráveis A/D de 10 bits de resolução e retenção de dados na memória *flash* que pode armazenar dados por até 40 anos.

Os Microcontroladores PIC18F possuem uma resolução de 10 bits para os canais analógicos sendo assim é necessário utilizar alguns registradores para controle dos *PORT's*, nessa versão usamos o controle ADCON1 que é responsável por dizer quais serão os pinos que irão ser canais analógicos. Para execução da conversão compara-se a tensão de entrada do canal A/D com a tensão de referencia V_{ref+} & V_{ref-} , considerando que a V_{ref+} é igual a 1023 e V_{ref-} é igual a 0.

O funcionamento do processo de conversão é baseado em um capacitor interno do microcontrolador de 25 pF, quando a leitura é iniciada, o capacitor desconecta e a tensão do capacitor mantém constante, esse capacitor mantém a tensão enquanto o processo de conversão é feito, e caso haja ruídos na conversão, o mesmo não será lido devido ao microcontrolador priorizar a tensão no capacitor.

O capacitor é ligado e durante o processo de conversão é desligado, o tempo mínimo para carga dos 5 V é de 1.4 μs com impedância até 2500 Ω , após conversão o capacitor é

desligado do circuito de entrada esse processo dura 100 ns o TAD (Tempo de Aquisição de Dados) é um o tempo que determina a frequência de trabalho do conversor A/D esse tempo depende da configuração dos registradores, após conversão o capacitor é desligado, após o término do processo o capacitor é ligado na entrada analógica. O registrador que configura o TAD é o ADCON2 que pode configurar para 0,7 μ s e 25 μ s.

FONTES DE ALIMENTAÇÃO

Para alimentação do Microcontrolador PIC18F4520 e também do CI MAX232 são necessários tensão de 5 Volts DC.

O PIC18F consome cerca de 200 mA em seu consumo máximo, e o CI MAX232 consome cerca de 10 mA. Sendo assim como base para esse projeto optamos pelo uso do CI LM7805 que é um regulador de voltagem de 3 pinos, para fornecer 5 V DC/1A para alimentação do PIC e também do MAX 232.

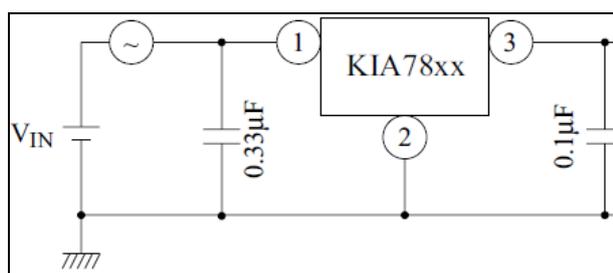


Figura 5 Fonte com saída de 5 V DC. Fonte: (KEC SEMICONDUCTOR, 2010).

Para o Acelerômetro, utilizamos o CI LM317 que também é um regulador de voltagem de 3 pinos, onde foi dimensionado por divisor de tensão de forma a fornecer 3.3 V DC que irá alimentar o Acelerômetro MMA7361 onde o consumo médio é da ordem de 600 μ A.

Com o uso do CI LM317 da *National*, podemos construir uma fonte regulável entre 3 e 40 Volts com limites de até 3,4 A de corrente, através da equação da figura 6 podemos trabalhar com diversos valores saída de tensão. Para esse projeto utilizamos um resistor de referencia de 480 Ω e como R2 um *trimpot* de 1,2K, ajustando a resistência até chegar a +/- 780 Ω tendo V out de 3,3 Volts.

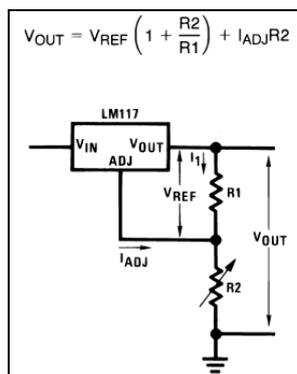


Figura 6 Fonte regulável com uso do LM317. Fonte: (NATIONAL SEMICONDUTOR, 2004).

Na concepção das fontes internas, consideramos as diversas flutuações que podem acontecer na operação do circuito, sendo assim utilizamos para efeito de cálculo o fator de *ripple*. Como a alimentação do microcontrolador deve estar entre 4,2 Volts e 5,5 Volts para uma frequência de trabalho de 40Hz, optamos por manter o *ripple* o menor possível, esse filtro de rejeição de *ripple* possui efeitos até a faixa de 120 Hz. Sendo assim pela equação 22:

$$Vr(rms) = \frac{Vr.(p-p)}{2.\sqrt{3}} = \frac{Idc}{4.\sqrt{3}.f.C} \frac{Vdc}{Vm} \quad (22)$$

Obtivemos para o circuito um valor menor que 0,5%, esse cálculo de *ripple* foi aplicado para ambas as fontes.

COMUNICAÇÃO SERIAL

O CI MAX232 foi adotado para esse protótipo devido a sua versatilidade, baixo custo e alta funcionalidade (TEXAS INSTRUMENTS, 1989).

Este CI é um conversor de tensão de nível TTL para RS232, ele é composto por um circuito interno formado por capacitores que geram tensões de -15 a +15 Volts a partir de uma fonte de 5 V DC, sua função é conectar o microcontrolador a porta serial do PC através dos pinos de RX e TX.

Segundo a *Texas Instruments* (1989), a comunicação serial é o tipo de comunicação onde a mensagem é convertida em pacotes de *bits* e enviados por um canal, um a um em sequencia, cada *bit* é a representação da parte de uma mensagem e quando recebidos pelo receptor, são reordenados. O LSB (*Less Significant Bit*) é o primeiro *bit*, o protocolo RS232. O controle do *clock* é feito pelo transmissor e receptor por se tratar de um protocolo assíncrono. Quando existe controle por *hardware* o protocolo usa os sinais de controle RTS

(*ready to send*) e o CTS (*clear to send*) para controle de fluxo. Para iniciar um envio o transmissor ativa o pino RTS e o receptor prepara o pino CTS após receber a confirmação de que o CTS do transmissor esta ativo estabelece a transmissão. Cada *byte* possui *bits* de *start* e *stop*, sendo o *bit* 1 *start* e o último *bit* o de *stop*.

No caso desse protótipo utilizamos o principio de comunicação assíncrona com controle por *software*, onde utilizamos a taxa de 9600 *bps* (*Bits* por segundo) no Microcontrolador e também no receptor.

É enviado um *bit* de *start*, em seguida aguarda-se um tempo e envia-se o conjunto de 8 *bits* e mais o *bit* de *stop*, com mesmo intervalo de tempo.

O receptor por sua vez percebe a borda de descida (de nível lógico 1 para nível lógico 0) recebe os 8 *bits* e aguarda o *bit* de *stop*, como tem a velocidade de transmissão conhecida, ele efetua a leitura.

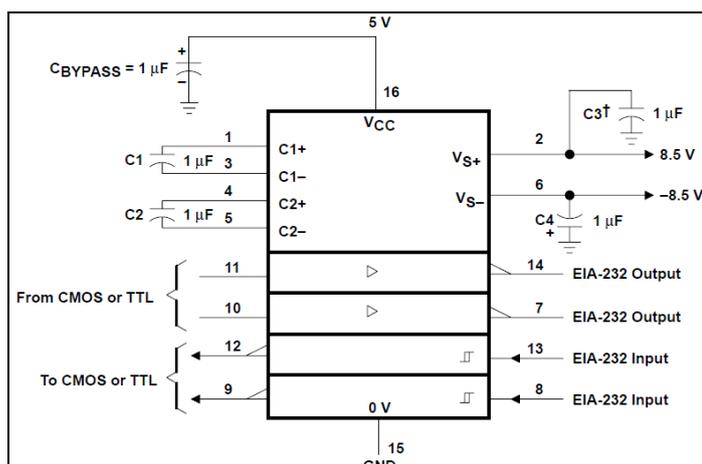


Figura 7 Esquema de pinos do CI MAX232. Fonte: (Texas, 2002).

Na RS232, o nível lógico 1 representa uma tensão de -30 V e o nível lógico 0 representa uma tensão de +30 V, para o protocolo é considerado nível de transição as tensões de -3 V e + 3 V ou seja o sinal será indefinido.

Ocorre a transição de sinal por *bit*, entretanto a taxa de transferência e a *bit rate* são idênticas essas taxas são mensuradas por transição elétrica por segundo.

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, conseqüentemente, a constituição do protótipo, realizando o levantamento de componentes básicos, tecnologia a ser utilizada e funcionamento do sistema.

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.

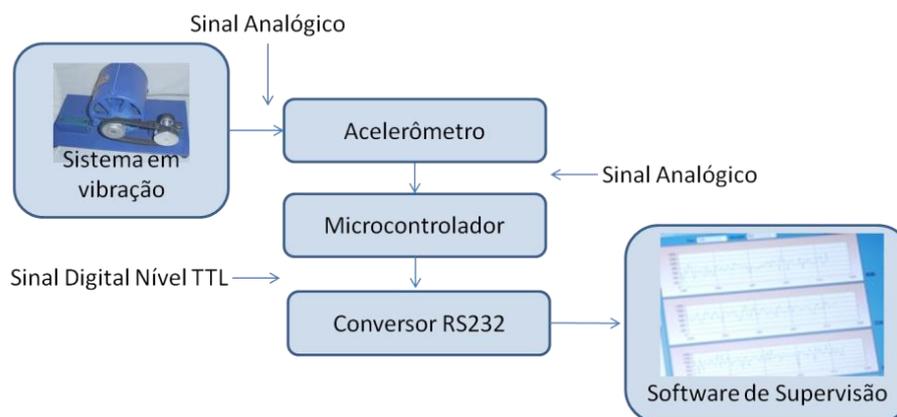


Figura 8. Diagrama de blocos do protótipo. Fonte: (Construído pelos autores.)

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 *bits*. 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.

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.

Nessa 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).

Primeiramente, verificamos o ruído térmico presente no protótipo, para essa medição deixamos o conjunto de testes (motor e mancal) completamente desligados e notamos que o nível de ruído presente é irrelevante, para a faixa de frequência que desejamos verificar, pois os gráficos exibidos na tela demonstram pouca oscilação, que é basicamente influencia do ruído térmico proveniente do chaveamento interno dos componentes e capacitâncias do circuito.

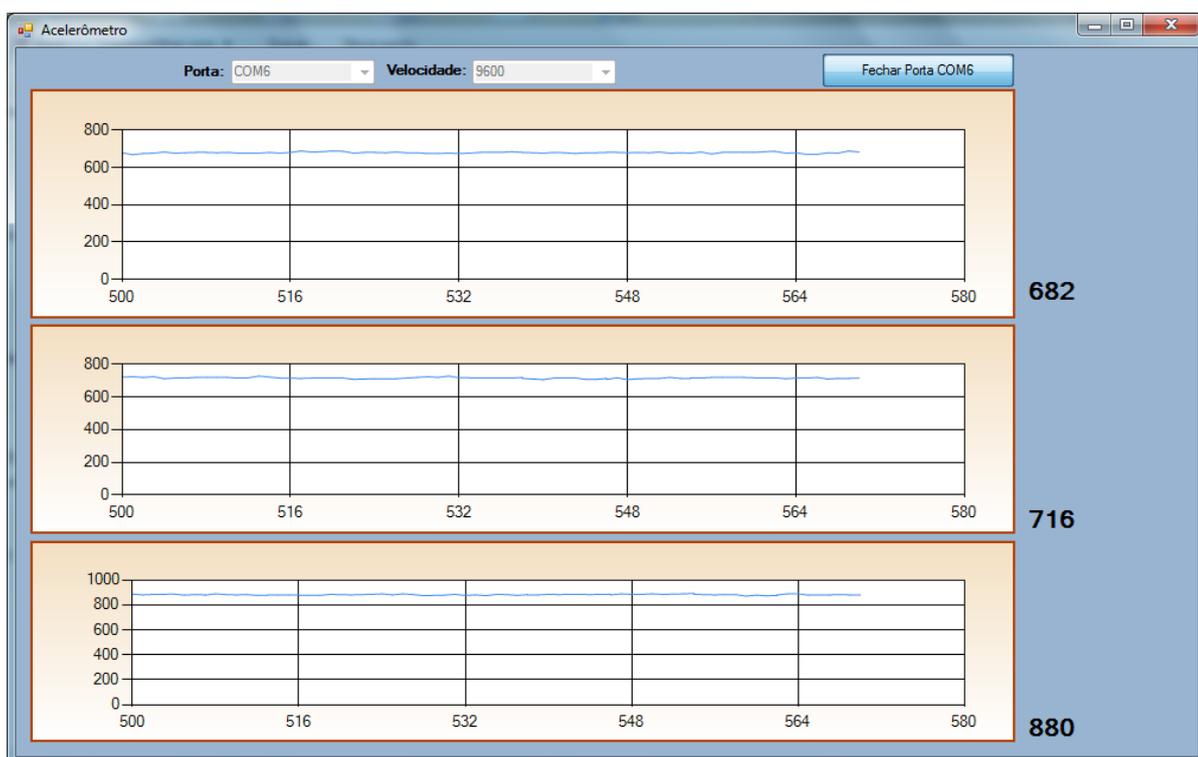


Figura 9. Ruído térmico gerado pelo sistema. Fonte: Fonte: (Autores.)

Posteriormente, realizamos 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 que recebeu a análise estatística e, onde foi possível fazer as devidas análises de cada mancal analisado.

FASE 1 – CONSTRUÇÃO E PROJETO DO PROTÓTIPO

Circuito eletrônico Projetado

A figura 10 apresenta o diagrama eletrônico projetado para o protótipo da pesquisa e a figura 11 exibe o protótipo construído em placa padrão perfurada:

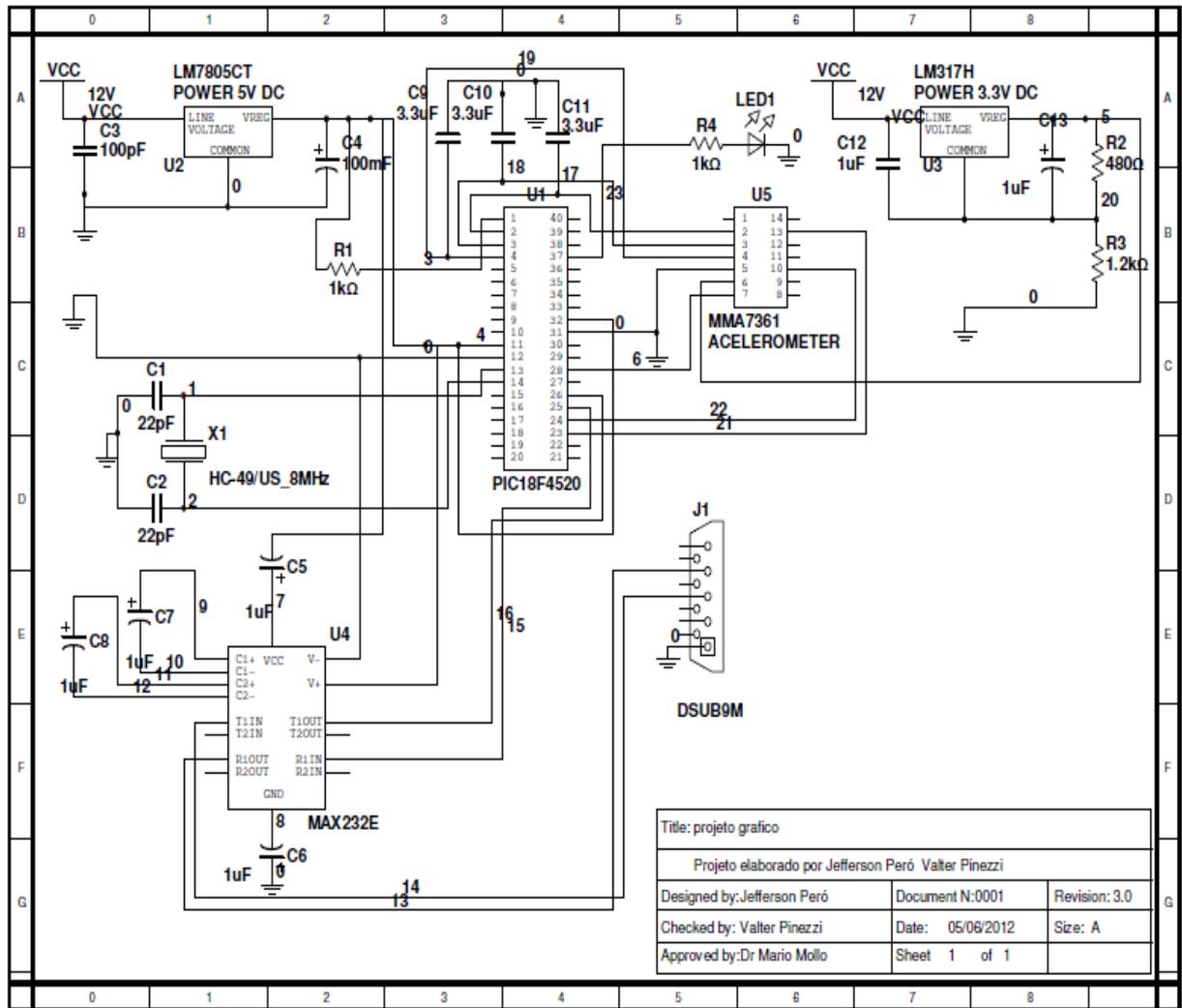


Figura 10. Circuito eletrônico projetado com hardware do protótipo para testes de validação da pesquisa.
Fonte: (Construída pelos autores.)

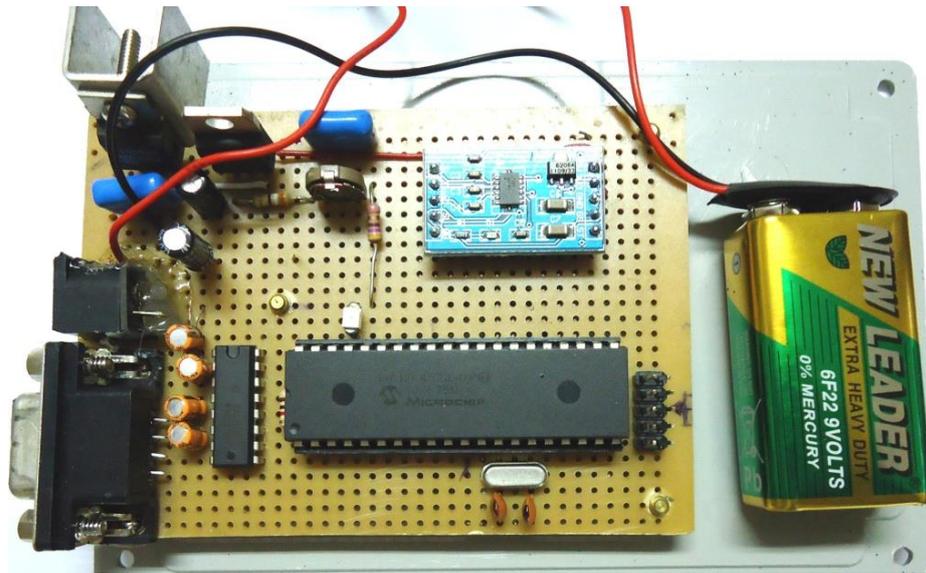


Figura 11. Foto do protótipo montado em placa perfurada. Fonte: (Construída pelos autores.)

Programação Do *Firmware* Do Microcontrolador

Na criação do *firmware* do microcontrolador, utilizamos a ferramenta *MicroC Pro for PIC*, baseando-se na linguagem de programação em C para Microcontroladores.

Como as leituras executadas pelo acelerômetro são sinais analógicos de nível de tensão em relação ao tempo, optamos por usar o PIC18F4520 que possui internamente recursos de conversão A/D e uma resolução de até 10 bits para conversão, possibilitando uma resposta mais precisa em relação à leitura realizada. A figura 12 demonstra em forma de fluxograma todo funcionamento do *firmware* do Microcontrolador.

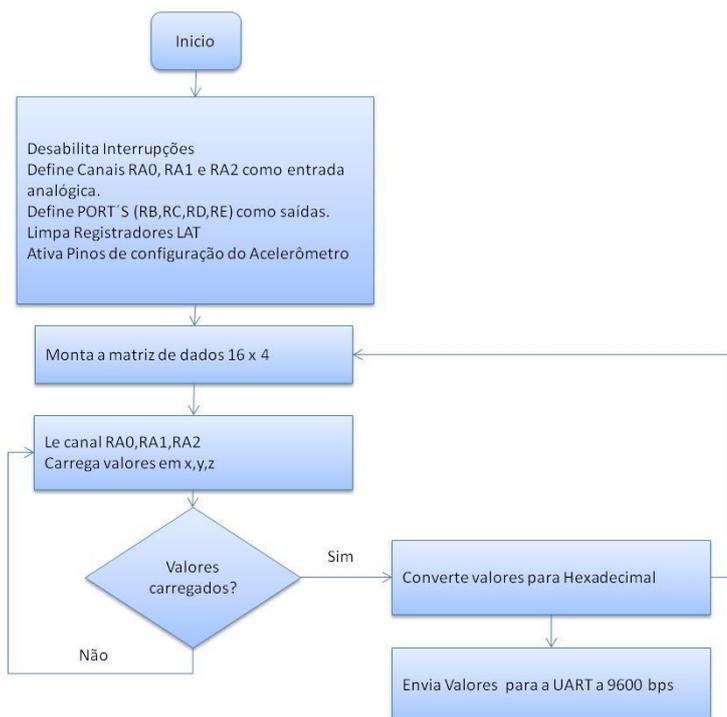


Figura 12. Fluxograma de funcionamento do *firmware*. Fonte: Fonte: (Autores.)

Nesse *Firmware*, utilizamos para o ADCON1 as seguintes características:

- Seleção de “*Clock*” do conversor: divisão da frequência externa por 4;
- Formato do resultado: justificado a direita;
- TAD (Tempo de aquisição): 6 TAD;
- Canal utilizado: canal AN0, AN1, AN2.
- Interrupção da conversão A/D: desligada;
- Tensão de referência: interna baseada nos valores de Vdd e Vss.

Em seguida, usamos a função “*Adc_read(canal)*” para salvar os valores de conversão AD de cada canal, como a resolução é de 10 *bits* devemos utilizar uma variável do tipo inteiro “*int*” para armazenar o valor do canal A/D.

Quando o acelerômetro está no ponto de “0” gravidade, ou seja, quando está posicionado em algum dos ângulos em relação a gravidade, ele apresenta diferentes níveis de tensão. Como o acelerômetro pode detectar acelerações nos 3 eixo diferentes (x, y, z), isso determina os níveis de tensão para cada ângulo de inclinação é necessário possuir uma referencia para o ponto de zero aceleração, sendo assim no *software* supervisorío tratamos todas as variáveis.

Utilizamos o a sensibilidade de 200 mV/g do sensor MMA7361L, que é configurada via *firmware* deixando o pino em “0” que está ligado ao PORTC.RC5 do PIC18F, a função *Sleep* do sensor também foi desativada colocando o pino 7 em nível “1”, através do PORTD.RD5 do PIC18F.

Para monitoramento do programa utilizamos um LED (*Light Emissor Diode*) que está ligado diretamente ao pino PORTB.RB4, durante a execução do programa esse pino é colocado em nível “1”.

Com a aquisição dos dados em cada canal A/D, as leituras são armazenadas em variáveis auxiliares do tipo “*unsigned int*” Inteiro.

Os dados são enviados transportados para as variáveis X, Y, Z e em seguida o programa faz a chamada da função “*void EnviaDados*” e envia cada variável, que em seguida são armazenadas na matriz do tipo “*unsigned char*” que por último são enviadas para a função UART.

Os pinos RC7 e RC6 são os pinos de RX, TX que comunicam se diretamente com o CI MAX232 estabelecendo a comunicação serial e conversão, respectivamente, no caso utilizou-se uma taxa de transferência de “*baud rate*” de 9600 *bps* com o uso da função “*UART1_init*” do compilador.

FASE 2 PROGRAMAÇÃO DO SOFTWARE SUPERVISÓRIO PARA WORKSTATION

Programação do *software* visual

Na fase 2, foi testado o funcionamento do *software* através de um recurso do compilador *MicroC Pro For PIC*, que se chama “*UART Terminal*”, esse recurso permitiu estabelecer uma comunicação pela porta serial através de uma porta COM.

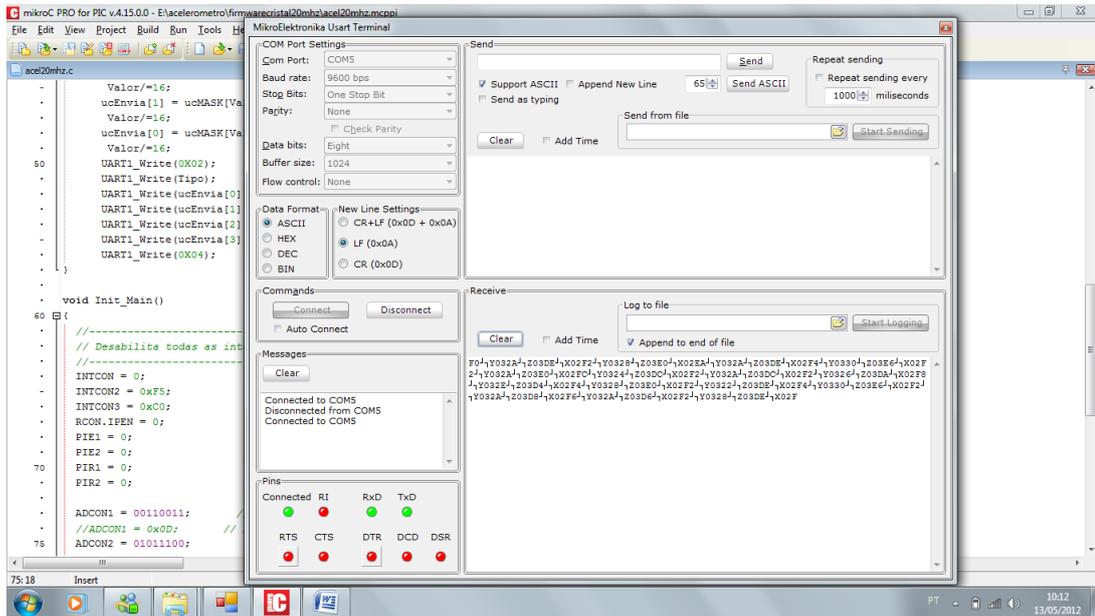


Figura 13 Recurso do *MicroC Pro for PIC UART Terminal*. Fonte: (Autores.)

Na figura 13, pode-se observar os dados recebidos pelo *UART Terminal* através da porta serial do PC, na sequência [x, y, z], demonstrando assim o funcionamento do protótipo, que ao modificar sua inclinação, altera cada valor das variáveis de acordo com os níveis de tensão convertidos de A/D.

Desenvolvimento do *Software* Supervisor em C#

Com o objetivo maior de garantir amplas funcionalidades para o projeto e melhor *interface* visual, fomos auxiliados pelo Sr. Leandro Tubini Bezerra, graduado em Sistemas de Informação do Centro Universitário Padre Anchieta de Jundiaí, que colaborou na presente pesquisa com o suporte e desenvolvimento do *software* de supervisão e coleta de dados, com o uso da ferramenta *Visual C# Sharp*.

Detalhes de funcionamento

Nessa seção são apresentados alguns diagramas UML 2.0, que descrevem as características, requisitos e funcionamento do “*software*” para monitoramento de vibrações chamado de SMV (Software de Monitoramento de Vibrações). Os diagramas UML utilizados são: diagrama de casos de uso, diagrama de sequência.

Na figura 14, pode ser visto o diagrama de caso de uso do protótipo de sistema de monitoramento de vibrações de através de acelerômetro.

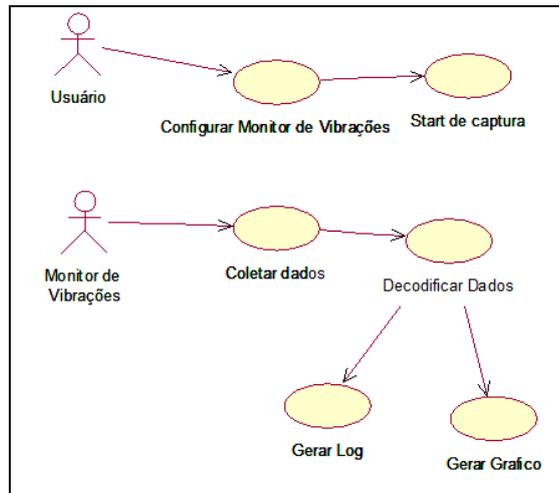


Figura 14 Diagramas Use case de funcionamento. Fonte: Fonte: (Autores.)

Onde se seguem as seguintes etapas:

- Usuário configura monitor de vibrações (Porta COM & *baud Rate*);
- Usuário iniciar capturas do modulo de vibração;
- Recebe os dados do Monitor de Vibrações e armazena em um *buffer*;
- Decodificação lê os dados recebidos e envia dados para gerar gráfico e gravar no arquivo de *log*;
- Recebe o dado e desenha o ponto no gráfico;
- Verifica se já possui o arquivo de *log* senão cria o arquivo;
- Grava as informações no *log*.

Após o *start* de captura, o sistema abre a porta de comunicação serial já configurada pelo Usuário e começa a realizar a captura de dados armazenando em um *buffer*. A decodificação lê os dados do *buffer*, decodifica e tratando os dados, deixando os dados no formato *EixoValor* como por exemplo (“XFFF”,”Y000”,”Z1F1”), o valor é sempre capturado em hexadecimal, para criação do gráfico e geração do *log*, os dados são convertidos valores para inteiros.

Na geração de *log* é criado um arquivo com no nome do formato “*data_hora.txt*” no caminho “*c:\log*” com o formato texto, o formato do arquivo é (Valor X, Valor Y, Valor Z, Tempo, Data, Hora), onde os valores XYZ são os valores dos ângulos capturados do monitor de vibrações, Tempo representa o numero da captura recebida, e a data e hora do recebimento da informação, a tabulação é feita pelo caractere “,”.

A figura 15 demonstra os recursos visuais do *software* de monitoramento em tempo real, que apresenta as variações em relação ao tempo dos eixos X, Y, Z em tempo real.

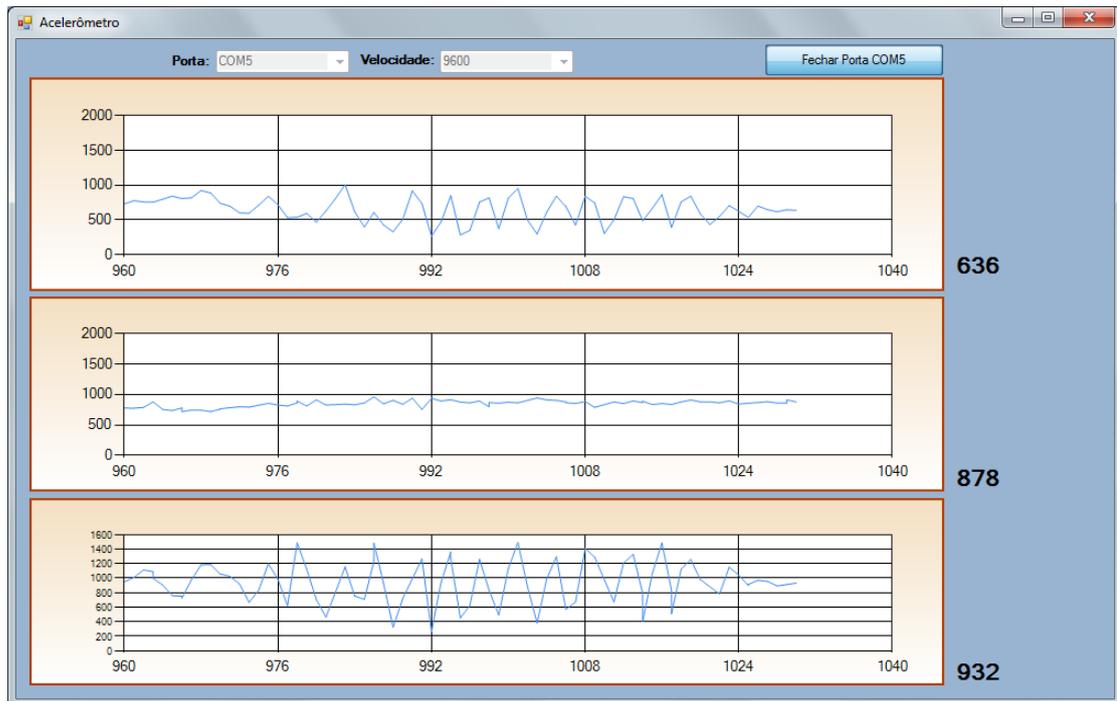


Figura 15 Tela do sistema de monitoramento de vibrações e três eixos. Fonte: Fonte: (Autores.)

A figura 16 demonstra os registros do *software* de monitoramento em arquivo de “log”.

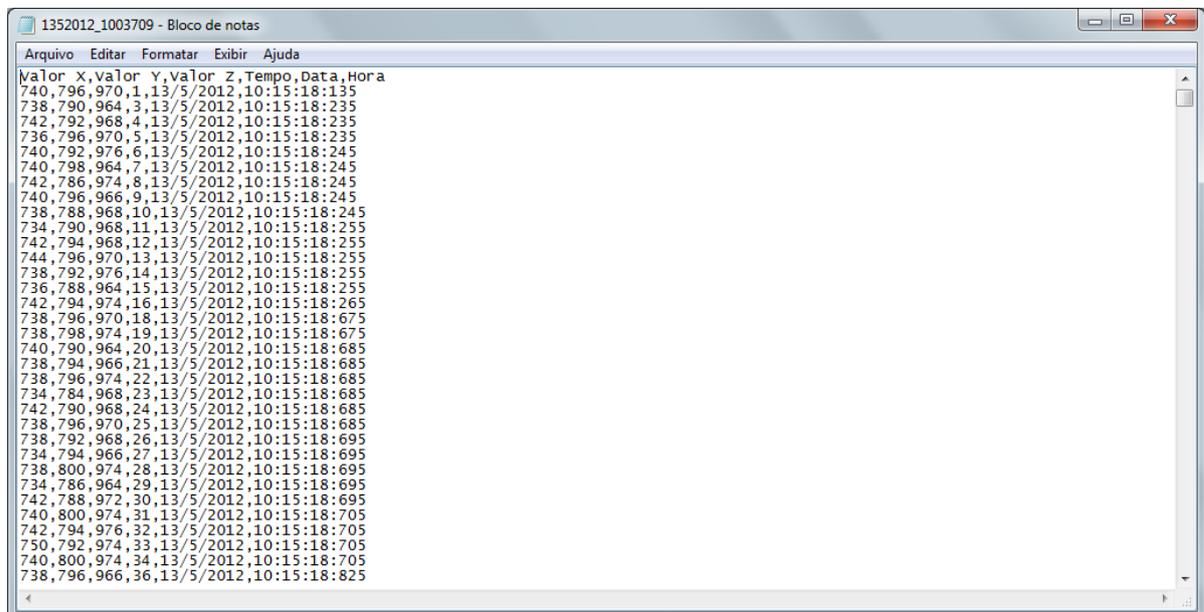
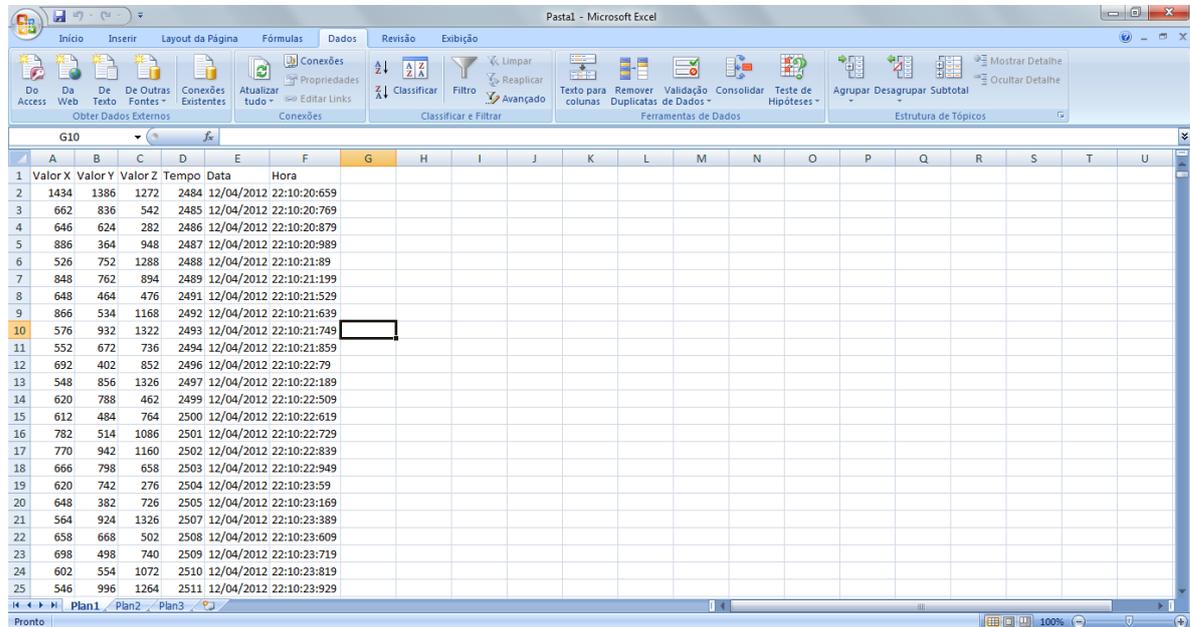


Figura 16 Conteúdo de um arquivo com Log da captura. Fonte: Fonte: (Autores.)

A figura 17 demonstra a tela da modelagem dos dados extraídos do *software* de monitoramento, que são tratados pelo *Microsoft Excel*, importados dos arquivos de “log”, podendo assim ser analisados através de análises estatísticas e gráficas, possibilitando assim a

geração de relatórios completos comparativos para determinar futuras ações ou simplesmente o monitoramento.



	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U
1	Valor X	Valor Y	Valor Z	Tempo	Data	Hora															
2	1434	1386	1272	2484	12/04/2012	22:10:20:659															
3	662	836	542	2485	12/04/2012	22:10:20:769															
4	646	624	282	2486	12/04/2012	22:10:20:879															
5	886	964	948	2487	12/04/2012	22:10:20:989															
6	526	752	1288	2488	12/04/2012	22:10:21:89															
7	848	762	894	2489	12/04/2012	22:10:21:199															
8	648	464	476	2491	12/04/2012	22:10:21:529															
9	866	534	1168	2492	12/04/2012	22:10:21:639															
10	576	932	1322	2493	12/04/2012	22:10:21:749															
11	552	672	736	2494	12/04/2012	22:10:21:859															
12	692	402	852	2496	12/04/2012	22:10:22:79															
13	548	856	1326	2497	12/04/2012	22:10:22:189															
14	620	788	462	2499	12/04/2012	22:10:22:509															
15	612	484	764	2500	12/04/2012	22:10:22:619															
16	782	514	1086	2501	12/04/2012	22:10:22:729															
17	770	942	1160	2502	12/04/2012	22:10:22:839															
18	666	798	658	2503	12/04/2012	22:10:22:949															
19	620	742	276	2504	12/04/2012	22:10:23:59															
20	648	382	726	2505	12/04/2012	22:10:23:169															
21	564	924	1326	2507	12/04/2012	22:10:23:389															
22	658	668	502	2508	12/04/2012	22:10:23:609															
23	698	498	740	2509	12/04/2012	22:10:23:719															
24	602	554	1072	2510	12/04/2012	22:10:23:819															
25	546	996	1264	2511	12/04/2012	22:10:23:929															

Figura 17 Extração dos arquivos em Excel. Fonte: Fonte: (Autores.)

TESTES E VALIDAÇÃO

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 *Megadras* modelo VIB 1400.

Na figura 18, é possível observar a bancada de testes com os medidores instalados durante os ensaios aplicados (Protótipo construído pelos autores e também o medidor industrial).

Com o motor desligado, sobre uma base de mármore nivelada e em temperatura ambiente de 25 (°C), executamos a leitura do protótipo com a finalidade de ajustar o *set point*, descartando o ruído térmico presente no circuito.



Figura 18 Bancada de testes. Fonte: Fonte: (Autores.)

A figura 19 mostra o gráfico de *set point* do protótipo, demonstrando a presença de ruído em cada um dos eixos, depois de descartado (filtrado) o ruído via *set point* seguimos com a análise e, as coleta de dados foram feitas conforme apontado na tabela 1.

Tabela 1 Itens Mensurados e tempos.

<i>Dado Mensurado</i>	<i>Temperatura Ambiente (C°)</i>	<i>Tempo Amostragem (s)</i>
Set Point	25	28
Mancal bom	25	60
Mancal Danificado	25	60

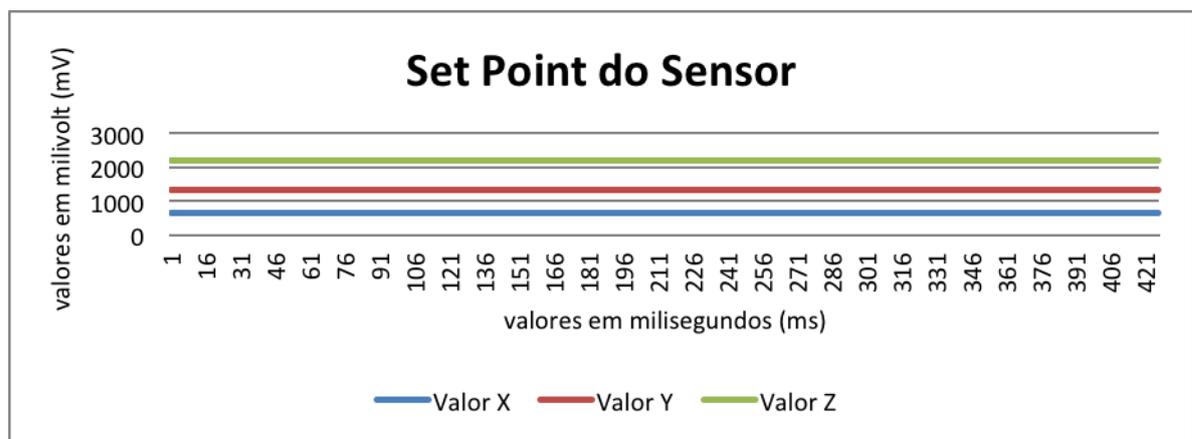


Figura 19 Set point do sensor. Fonte: Fonte: (Autores.)

Após serem coletados os dados do mancal bom, foi repetido o procedimento de coleta de dados do mancal com rolamento danificado, mantendo as mesmas regulagens de tensão da correia e demais condições do ambiente.

A seguir, nas figuras 20, 21 e 22, temos os dados das análises efetuadas nos testes de bancada.

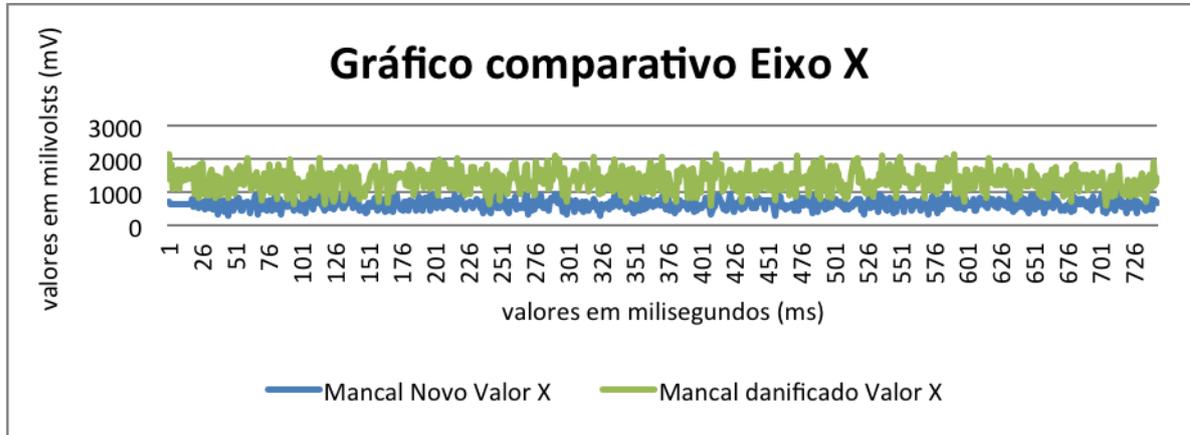


Figura 20. Gráfico comparativo Eixo X. Fonte: Fonte: (Autores.)

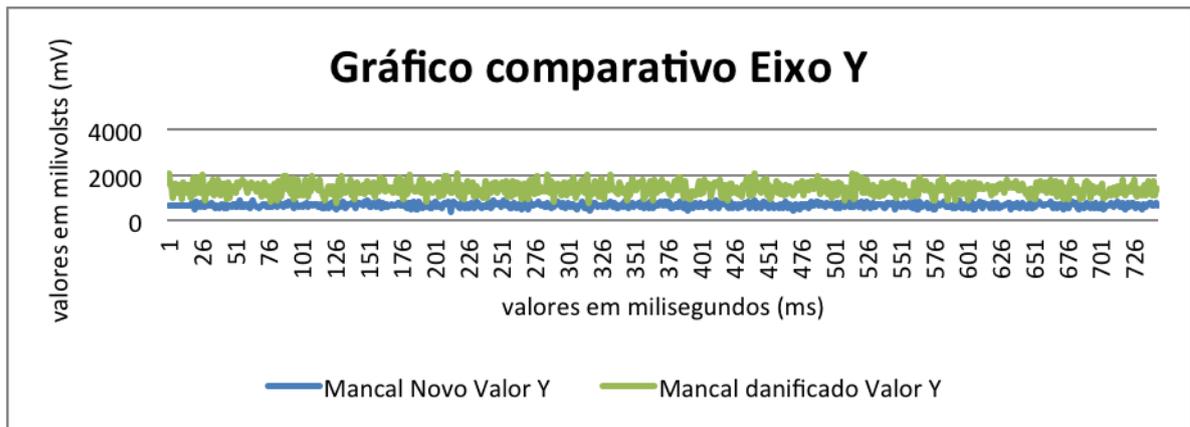


Figura 21. Gráfico comparativo eixo Y: Fonte: Fonte: (Autores.)

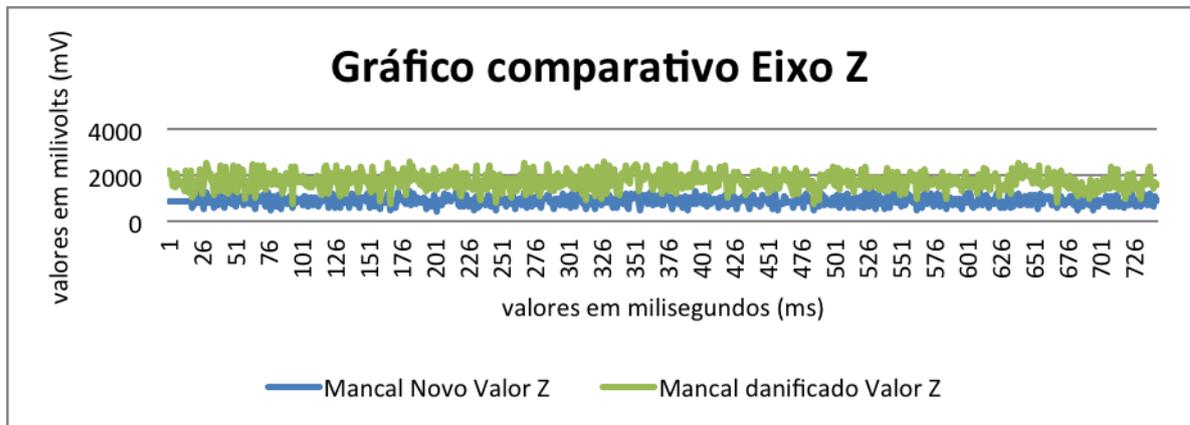


Figura 22. Gráfico comparativo eixo Z: Fonte: Fonte: (Autores.)

Após terem sido efetuadas medições nos eixos vertical, horizontal e axial, utilizamos 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) (Figura 23), o fator de crista (Figura 24), e construíram-se os gráficos de desvio padrão (Figura 25) e Curtose (Figura 26) em gráficos para melhor visualização.

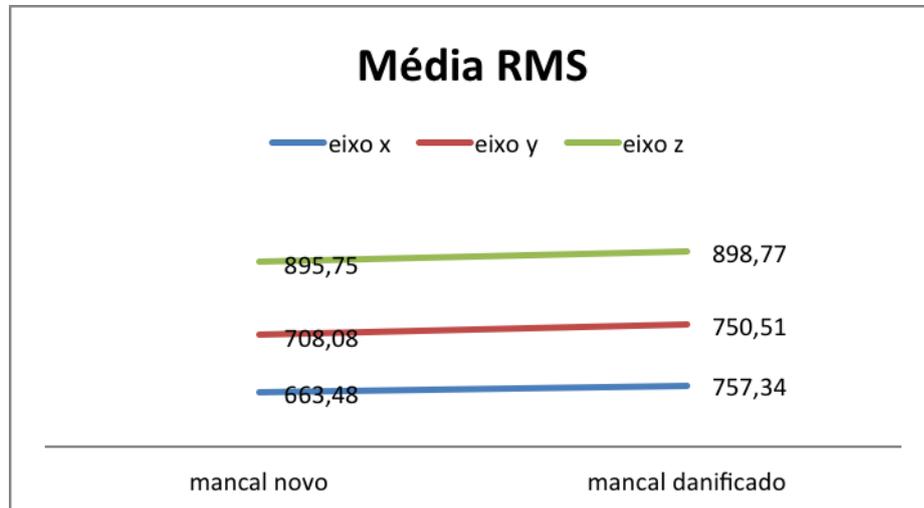


Figura 23. Gráfico da média RMS dos mancais. Fonte: Fonte: (Autores.)

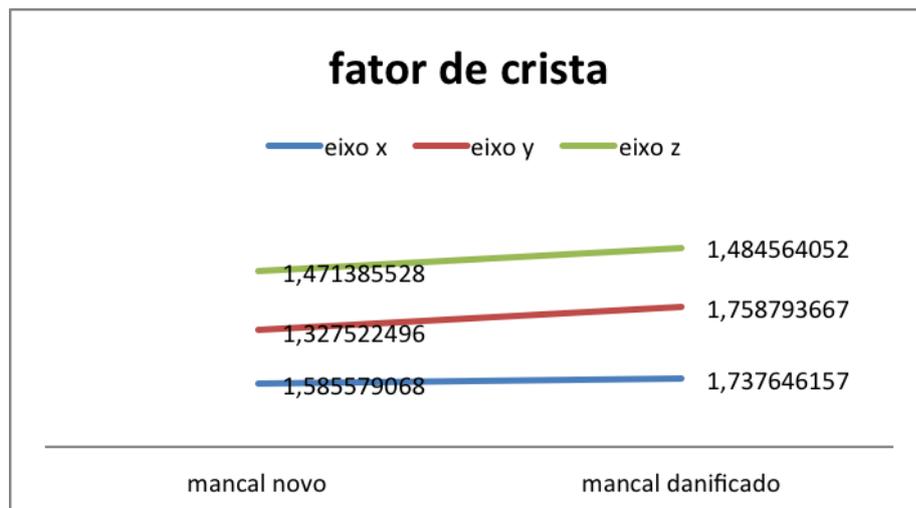


Figura 24. Fator de crista dos mancais. Fonte: Fonte: (Autores.)

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).

Além da evolução desse dado estatístico a medição de temperatura efetuada pela termografia permitiu destacar a anomalia nos rolamentos dos mancais indicadas pela diferença de temperatura.

Abaixo, na Figura 25, vemos o gráfico de desvio padrão entre os mancais e na Figura 26 o gráfico do valor de Curtose obtido.

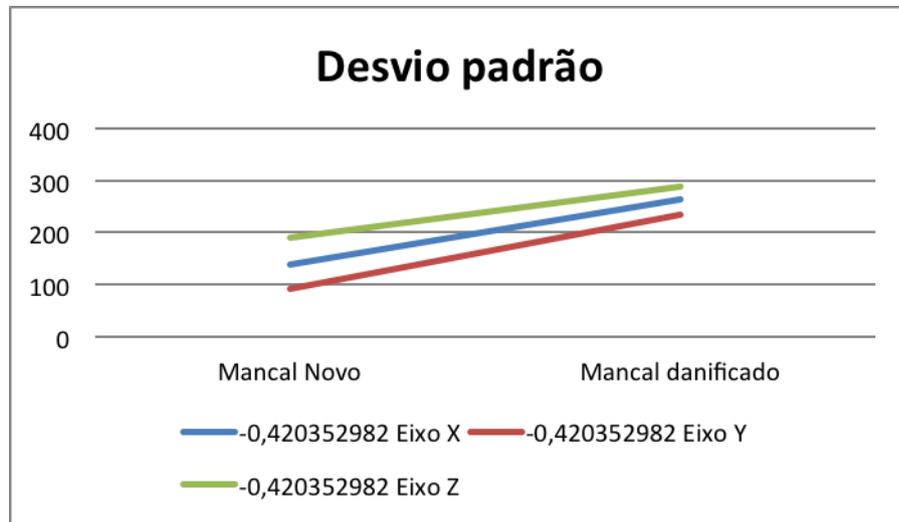


Figura 25. Desvio padrão dos mancais. Fonte: Fonte: (Autores.)

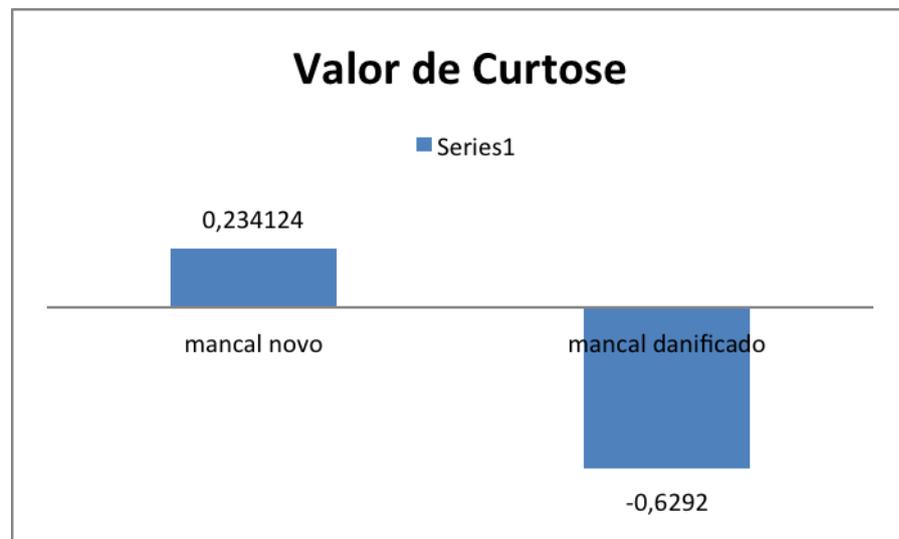


Figura 26. Valor de Curtose entre mancais. Fonte: Fonte: (Autores.)

Na prática, podemos observar que o valor de Curtose tende a diminuir quando existe uma deterioração do mancal analisado.

O gráfico do comparativo (figura 27) foi feito entre nosso protótipo e o medidor industrial que mostra que as diferenças obtidas das medições. Para a geração desse gráfico, utilizamos na construção do *firmware* um fator de escala para atribuir um valor que condiz com a norma ISO 2372-1974(10816) e, utilizamos um fator escala de 1:20 corrigido

matematicamente no *Excel* para os valores obtidos pelo protótipo para termos uma comparação com o medidor industrial em questão, também convertendo de G para mm/s.

Abaixo na Figura 27, temos o gráfico comparativo dos medidores, valor global RMS.

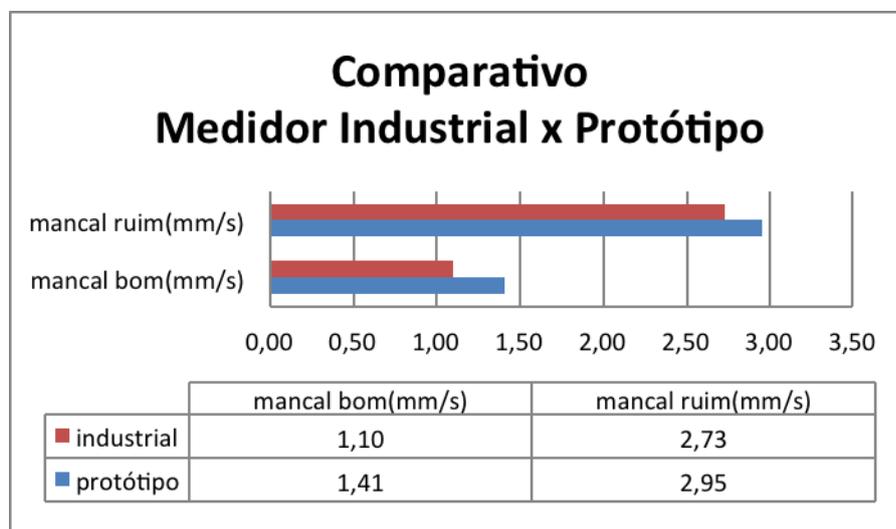


Figura 27. Gráfico comparativo entre os medidores de vibrações. Fonte: (Autores.)

Vale ressaltar que os limites admissíveis nesta norma são apenas recomendações iniciais de alarme, ela não define o modo normal de vibrar de um equipamento específico. As limitações de vibração variam de equipamento para equipamento, devendo ser tomada com base em seu histórico de análise.

RESULTADOS E CONCLUSÕES

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. Nessa 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. É perceptível que esses 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.

Nosso intuito de analisar 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, permitindo a aplicação de equipamentos de menor precisão, porém de menor custo e, quando da detecção da possível falha, a equipe de manutenção da empresa poderá lançar mão da instalação de um equipamento comercial mais preciso para a melhor avaliação do problema.

Esse procedimento permite que a empresa monitore um número muito maior de equipamentos de suas linhas de produção sem grandes investimentos, utilizando um único equipamento profissional de maior custo para a tomada de decisão final sobre os procedimentos de manutenção corretiva ou preditiva a serem realizados.

A técnica empregada (domínio do tempo) mostrou-se bastante eficiente na detecção de falhas incipientes por meio do protótipo, 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 a leitura de forma mais precisa, de acordo com a frequência fundamental, que no caso de motores elétricos são em torno de 1 kHz. Em nosso caso, estamos coletando menos de 1% desta frequência (10 Hz), podendo nos levar a uma limitação para interpretações mais detalhadas, devido a limitações de *hardware*.

É importante lembrar que quanto maior for o tempo de leitura e aquisição de dados maior será a precisão do relatório.

Concluimos ainda que o protótipo desenvolvido pode ser melhorado através 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 temos a convicção que chegamos ao que foi proposto desde o início.

Comparando as medições realizadas com o protótipo proposto, entre o mancal bom x mancal ruim, observamos uma diferença graficamente visível, nas devidas respostas em

relação ao tempo. Após os devidos tratamentos matemáticos na mineração de dados no Microsoft Excell®, foi possível ampliar as informações para chegarmos à conclusão do funcionamento deste protótipo.

O uso da ferramenta industrial de precisão teve somente o objetivo de comparar se de fato havia uma discrepância entre os valores coletados pelo protótipo, confirmando assim o funcionamento do mesmo.

Vale lembrar que a análise de vibrações é uma área de conhecimento onde são levadas várias variáveis para se chegar a uma conclusão, assim neste protótipo nos limitamos somente buscar um meio mais acessível, para facilitar o acesso à ferramentas de manutenção preditiva, que pode trazer inúmeros benefícios a indústria e ao meio ambiente, conseqüentemente.

Dessa forma, conclui-se finalmente que o protótipo desenvolvido apresenta uma solução interessante, que permite à empresa ter acesso a um monitoramento de várias máquinas simultaneamente, ou que os *team leaders* possam ter acesso a qualquer momento desse dispositivo para avaliação inicial sobre as condições de funcionamento das máquinas sob sua responsabilidade e de seus subordinados, e o uso do equipamento profissional, mais sensível e de maior custo fica reservado para avaliações mais específicas e a disputa pelo seu uso pode cair de maneira substancial.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao Centro Universitário Padre Anchieta, ao Sr. Leandro Tubini Bezerra pelas contribuições em programação em C#, ao Prof. Esp. Fernando Simplício pelo material de apoio em microcontroladores PIC. E a todos aqueles que divulgam o conhecimento, contribuindo de certa forma para a sociedade e para a preservação do meio ambiente.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ACELERÔMETRO. MMA 7361, 2011. Disponível em :

<http://www.geeetech.com/DOCUMENTS/sensors/MMA7361/MMA7361_datasheet.zip>

Acesso em 28 de Set. 2011.

ALFREDSON, R.J.; MATHEW, J. 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, July 1985a.

ALMEIDA, F.V.R.; ALMEIDA, M.T. Statistical analysis of vibration signal for condition monitoring of defects in rolling element bearings. 18th International Congress of Mechanical Engineering - COBEM, Ouro Preto, 2005.

PIC18F4520, DOWNLOADS, 2007. Disponível em:

<ww1.microchip.com/downloads/en/devicedoc/39564c.pdf> Acesso em 14 de Out. 2011.

DE SOUZA, D.; Desbravando o PIC - Ampliado e Atualizado para PIC 16F628A, 1ª Edição, Editora Érica, 1999.

DYER, D.; STEWART, R.M. 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, April 1978.

GARLIPP, F. Manual do usuário da 01dB-Stell. 2001.

INTERNATION STANDARDS ORGANIZATION. Mechanical vibration of machine with operation speeds from 10 to 200 rev/s – ISO 2372-1994:General guidelines, ISO, 1995.

KHAN, A.F. Condition monitoring of rolling element bearings: A comparative study of vibration based techniques. Ph.D. Thesis, University of Nottingham, May 1991.

KIRAL, Z.; KARAGULLE, H. Vibration Analysis of Rolling Element Bearings With Various Defects Under The Action of an Unbalanced Force. Mechanical Systems and Signal Processing, November. 2006.

LAI, M.S. Detection of Developing Bearing Failures by Means of Vibration Analysis. Ph. D. Thesis, University of Windsor, Ontario, Canada, 1990.

LAMIM FILHO, Paulo C. M., 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), 2003.

LARANJA, Prof. Dr. Rafael A.C. Mecânica Vibratória. 2005. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Rio Grande do Sul. 2005.

LM 317, DS, 2000. Disponível em:

<www.national.com/ds/LM/LM117.pdf> Acesso em 05 de Out. 2011.

LM 7805, PT, 2005. Disponível em:

<www.datasheetcatalog.net/pt/datasheets_pdf/7/8/0/5/7805> Acesso em 15 de Dez. 2011.

MAX232.DATASHEETS, 2002. Disponível em:

<http://www.datasheetcatalog.com/datasheets_pdf/M/A/X/2/MAX232.shtml> Acesso em 05 de Out. 2011.

MICROC; Arquivo de ajuda do software MicroC PRO for pic V4.15.00.

MIKROELEKTRONIKA , 2012.

MITCHELL, J. S. Machinery Analysis and Monitoring, PennWell Publishing Company, Tulsa, Oklahoma. 1993

NEPOMUCENO, Lauro X. Técnicas de Manutenção Preditiva, São Paulo, Editora Edgar Blucher, 1989.

NSK, Bearing Doctor, Diagnóstico Rápido de Ocorrências em Rolamentos, 2001, disponível em: <[:// www.nsk.com.br/pdf/Bearing_Doctor.pdf](http://www.nsk.com.br/pdf/Bearing_Doctor.pdf)>. Acesso em Abril de 2012.

PIERRI, Eng. Remo Alberto, CUNHA, Eng. Paulo Mario Rodrigues da, “Manutenção Preditiva por Análise de Vibrações, Aditeq – março de 2004.



RUEDA, T.C., SANTOS, L.M.S., RABELO, G.F. Controle Automático do Nível de Poeira Baseado em Microcontrolador. UFLA - Universidade Federal de Lavras, 2005. Disponível em: <<http://www.dcc.ufla.br/infocomp/artigos/v5.1/art08.pdf>> Acesso em 10/08/20010.

SCHILTZ, Richard L., Forcing Frequency Identification of Rolling Element Bearings, Volume 24, No.5, May, 1990.

SPIEGEL, M. R., Análise de Fourier. Coleção Schaum - Editora McGraw-Hill do Brasil, 1971.

SWANSSON, N.S.; FAVALORO, S.C. Applications of Vibration Analysis to the Condition Monitoring of Rolling Element Bearings. Aeronautical Research Laboratory, Propulsion Report 163, January 1984.

TAYLOR, J. I. The Vibration Analysis Handbook. Flórida: Vibration Consultants, 1994.