

# SENSOR INTEGRADO DE POSIÇÃO, VELOCIDADE E VIBRAÇÃO PARA MÁQUINAS ROTATIVAS

ALBERTO W. MASCARENHAS<sup>\*†</sup>, ANTÔNIO M. N. LIMA<sup>†</sup>, CURSINO B. JACOBINA<sup>†</sup>

*\*Centro Federal de Educação Tecnológica de Pernambuco*

*†Laboratório de Eletrônica Industrial e Acionamento de Máquinas, Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Campina Grande*

*Caixa Postal 10.105, 58.109-970 Campina Grande, PB, Brasil*

*E-mails: awillian@dee.ufcg.edu.br, amnlima@dee.ufcg.edu.br, jacobina@dee.ufcg.edu.br*

**Abstract**— This paper introduces a different approach for estimating electrical machine position, velocity and mechanical vibration. This system is based in a capacitive accelerometer integrated in a disc connected to the machine shaft. This proposed mechanical sensor is composed by an accelerometer and an on-board microprocessor which employs a RF transmitter for sending the mechanical information of machine for a motor-drive system. The proposed self-integrated sensor system is validated by experimental results.

**Keywords**—Multi-sensor integration, measuring system, mechanical vibration, position and speed

**Resumo**— Este artigo apresenta um sensor integrado baseado num acelerômetro capacitivo que tem as características de poder medir posição, velocidade e vibração do eixo de uma máquina girante. O sistema é microprocessador e conta com um transmissor de RF para enviar as informações para um módulo externo. Resultados experimentais são apresentados para demonstrar a viabilidade da solução proposta.

**Palavras-chave**— Sensor Integrado, Medição de Velocidade, Posição Angular e Vibração. Manutenção Preditiva.

## 1 Introdução

O estabelecimento de um diagnóstico das condições de funcionamento de uma máquina a partir de parâmetros medidos (vibrações, temperaturas, ruído, potência absorvida, entre outros), vem se tornando mais importante, à medida que aumentam as exigências quanto ao seu desempenho (velocidades de rotação mais elevadas, esforços dinâmicos mais importantes, etc.) e, ao mesmo tempo, almeja-se uma economia sempre maior de materiais de construção mecânica (Pyrhönen and Eskelinen, 1998).

Tal diagnóstico visa permitir a previsão de falhas ou funcionamento precário da máquina e, assim, contribuir decisivamente para a otimização de novos projetos e das atividades de manutenção. Uma máquina em funcionamento emite numerosos sinais sintomáticos de suas condições funcionais e o problema consiste em a partir destes sinais, estabelecer um diagnóstico.

Entre as informações fornecidas por uma máquina, as vibrações são de grande interesse, pois são diretamente ligadas aos movimentos da máquina, são localizáveis e se transmitem rapidamente. O método mais rudimentar de verificação do comportamento dinâmico de uma máquina consiste em medir o valor eficaz (RMS) do sinal proveniente de um transdutor. O nível obtido numa leitura é comparado a determinados padrões normalizados em função do tipo de máquina. As limitações das tentativas de normalização dos padrões vibratórios estão implicitamente ligadas ao tipo de máquinas envolvidas, condições de

parâmetros pesquisados, qualidade técnica dos instrumentos e, até mesmo avaliações subjetivas de técnicos com experiência de campo. Contudo, a análise dos sinais vibratórios vem apresentando uma evolução importante a partir da utilização da análise espectral através da “Transformada Rápida de Fourier” (FFT).

A medida da posição e velocidade de objetos que giram, tais como eixos, volantes e as engrenagens de uma máquina são extremamente importantes para o controle do processo ou mesmo para sincronização de outras partes do equipamento envolvido. Para obter esta informação normalmente é utilizado um sensor digital do tipo encoder rotativo porque necessita de um circuito de detecção simples (Kim and Sue, 1995).

O acoplamento de algum tipo de dispositivo mecânico à peça que se move para produzir pulso por rotação tem como principal limitação à resposta de frequência destes tipos de dispositivos.

O advento dos analisadores de espectro, a rápida evolução dos microprocessadores e os avanços realizados na tecnologia dos transdutores tornam mais rápida e precisa a análise, ao mesmo tempo em que diminuem os custos e facilitam sua utilização (Kha-ter, 1998).

Em 1998, Pyrhönen e Eskelinen desenvolveram um sensor baseado em acelerômetro para medir torques.

Neste trabalho é descrito um sensor que utiliza acelerômetro três acelerômetros para determinar velocidade posição e vibração em eixo de máquinas girantes. O sensor desenvolvido pode ser classificado

como de baixo custo, inteligente (microcontrolado) e integrado (pequeno e multi-função).

## 2 Descrição do Sistema

### 2.1 Estrutura e Funcionamento do Sensor

O sistema é constituído de dois módulos: o primeiro fica fixado no eixo da máquina na qual se quer fazer a medição. Neste módulo estão os acelerômetros, um Microcontrolador (PIC 16F877), um Transceptor (BiM2 da Radiometrix); o segundo módulo é composto de um Transceptor (BiM2), circuito para condicionar o sinal e bateria. Este módulo é conectado diretamente na porta serial de um microcomputador. O sistema completo pode ser visto na figura 2.1

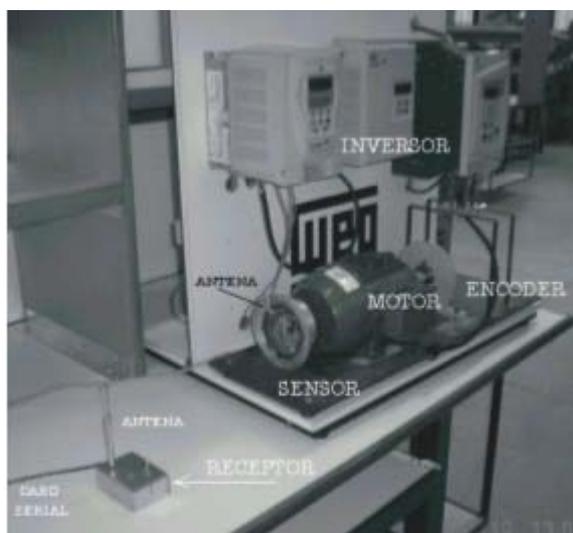


figura 2.1 – Vista dos dois módulos do sistema

O conjunto todo foi colocado dentro de um anel metálico que se encaixa no eixo. Na figura 2.2 é possível observar a posição dos componentes dentro do sensor.

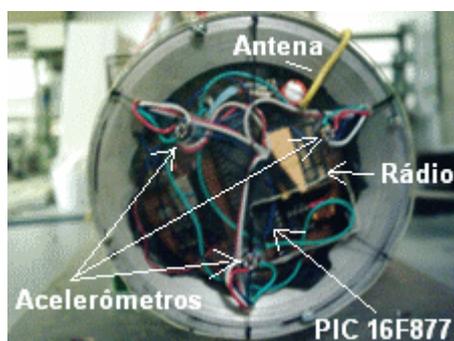


figura 2.2 – Vista frontal do sensor

#### 2.1 Os Acelerômetros.

Um acelerômetro é um transdutor que converte uma aceleração aplicada sobre ele em uma grandeza elétrica. Nos acelerômetros utilizados a aceleração é medida por meio de elementos capacitivos construídos na forma de diversas placas de silício móveis em

seu interior. Dentro do CI existe um circuito de controle que desempenha as funções de medição, calibração, filtragem e amplificação do sinal produzido pelo elemento sensor capacitivo. Com toda essa eletrônica integrada no acelerômetro, a interface com o microcontrolador é muito simples. No caso deste experimento ela foi direta.

#### 2.1.1 Equação da aceleração na saída dos Acelerômetros

As saídas dos acelerômetros são função da tensão de alimentação e do valor da aceleração medida, de acordo com equação 1.

$$V_{out} = \frac{V_s}{2} - K \cdot \left(\frac{V_s}{5}\right) \cdot a_i \quad (1)$$

onde:

$V_{out}$	Saída do sensor (volts)
$V_s$	Tensão de alimentação
$a_i$	Aceleração medida
$K$	Sensibilidades para $V_s = +5 V$ Para o ADXL202 $K = 300 \text{ mV/g}$

Embora no Sistema Internacional a aceleração seja medida em  $m/s^2$ , a saída da maioria dos acelerômetros são expressas em função da aceleração da gravidade (g) (IEEE Std 836-2001).

#### 2.1.2 Equação da aceleração total

A aceleração total é igual à soma da aceleração centrípeta mais aceleração gravitacional local mais a aceleração tangencial.

$$\vec{a} = \vec{a}_c + \vec{a}_g + \vec{a}_t \quad (2)$$

Idealmente, a aceleração centrípeta ( $a_c$ ) é expressa por (Resnick, R. H, 1979):

$$a_c = \omega^2 R \quad (3)$$

onde:

$\omega$	velocidade angular (rad/s)
$R$	distância entre o centro e o acelerômetro

Quando o eixo do acelerômetro está perpendicular ao raio do raio, a aceleração centrípeta é igual a zero. É possível compensar o efeito da aceleração tangencial, sabendo que num instante  $t$ , o valor da aceleração tangencial é o mesmo em todos três acelerômetros.

A aceleração da gravidade dependendo da posição e pode variar de  $+1g$  a  $-1g$ . Se adotarmos a direção vertical e o sentido de cima para baixo como referência, a aceleração da gravidade poderá ser calculada da seguinte forma:

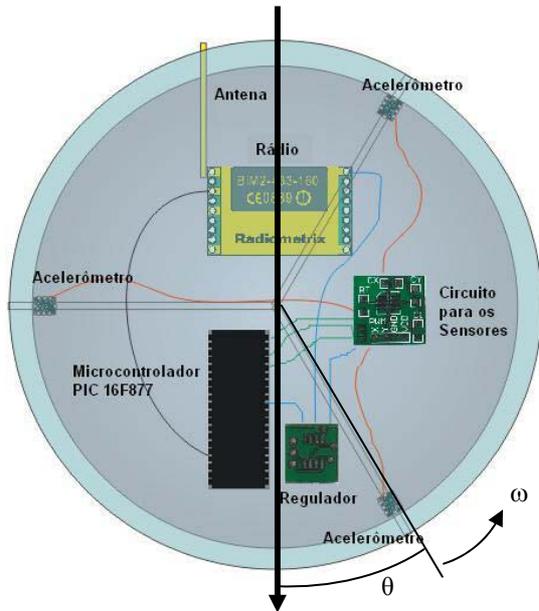


figura 2.3 – Sistema de referência adotado.

$$a_g = a_{gA} + a_{gB} + a_{gC} \quad (4)$$

onde:

$$a_{gA} = \cos(\theta) \quad (5)$$

$$a_{gA} = \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \quad (6)$$

$$a_{gA} = \cos\left(\theta + \frac{4\pi}{3}\right) \quad (7)$$

onde  $\theta = \int_0^t \omega \, d\tau$

Na figura 3.4 estão plotados os sinais de saída dos sensores quando colocados a 120° um dos outros. Como o microcontrolador tem um AD de 10 bits e o zero do acelerômetro é igual a 2,5 V, os valores de nível DC é de 512. Esta diferença é devido à falta de alinhamento com o raio do sensor que torna o acelerômetro sensível à aceleração centrípeta.

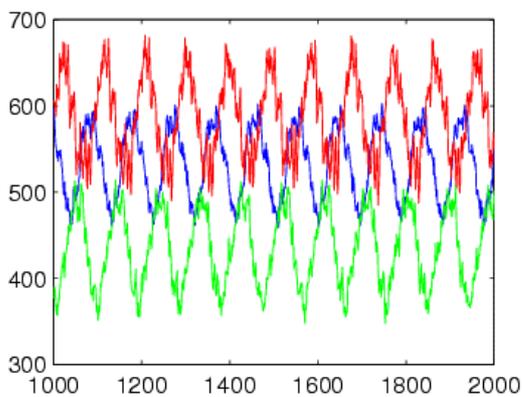


figura 24 – Sistema de referência adotado.

## 2.2. O microcontrolador

O papel do microcontrolador no projeto é fazer a conversão analógica digital, codificar os valores obtidos em duas palavras de 8 bits e enviá-los na forma serial para o rádio transmissor. Foi utilizado um PIC 16F877 (Microship), mas poderia ser qualquer outro que tivesse AD e trabalhasse a uma frequência acima de 10 MHz.

Três pinos foram configurados como entrada para o AD e um outro pino foi configurado para saída serial. O programa que roda microcontrolador está representado pelo fluxograma na figura 2.4. Basicamente o PIC ajusta o canal, faz a leitura da aceleração, codifica e envia para o rádio. Isto é feito para cada canal dentro de um laço infinito. O tempo para executar todos os comandos do laço é de 700 µs.

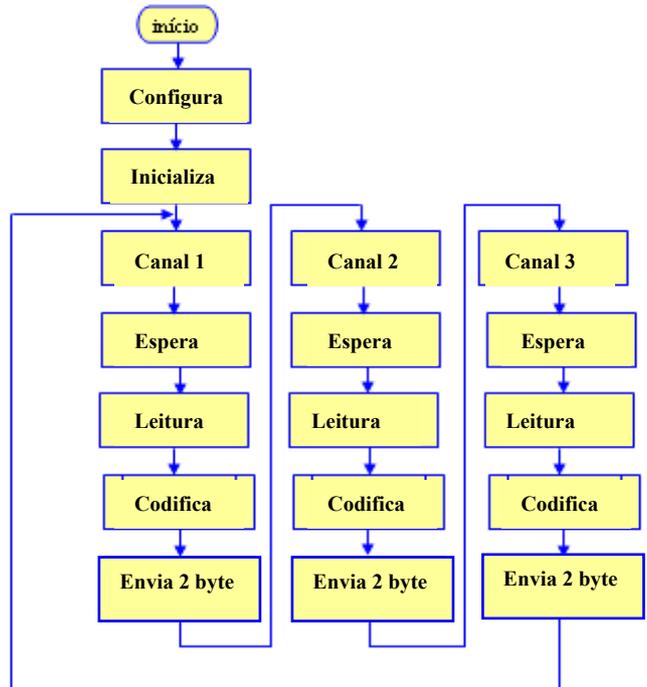


figura 2.5 – Rotina de leitura dos AD, codificação e envio da informação

Após fazer a leitura do valor no AD o PIC codifica-o da seguinte forma: o valor que sai do AD é dividido em duas partes de 5 bits que são posicionados nos bits menos significativos de dois bytes como pode ser observado na figura 2.5. Os 3 bits mais significativos que sobram em cada byte são utilizados para indicar se o dado é a parte alta ou baixa do valor lido (bit A) e o canal que foi feita a leitura (bits B e C).

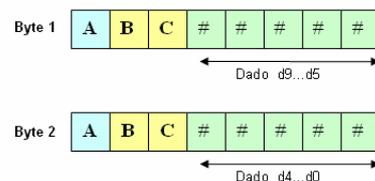


figura 2.6 – Codificação dos bytes para transmissão

### 2.3 Sub-sistema de comunicação via rádio

O sub-sistema de comunicação é composto de dois rádios bidirecionais com alcance de até 200m. O módulo de rádio opera na frequência de 433.92MHz a uma taxa de transmissão de 160Kbps e o protocolo utilizado foi o RS232.

Na figura estão desenhados os blocos dos sub-sistemas de transmissão e recepção. Os blocos foram desenhados fora de escalara para facilitar a observação.

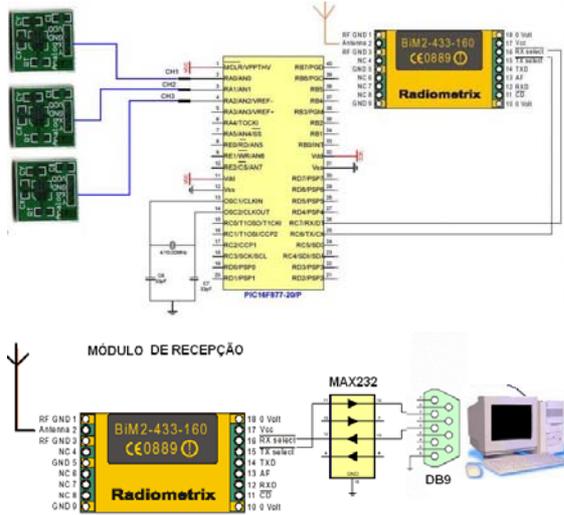


figura 2.6 – Sub-sistemas de transmissão e recepção

Foi desenvolvido um programa para configuração e comunicação com o sensor. No momento da aquisição o computador ficava em modo de espera e a cada dado novo gerava-se uma interrupção e o computador guardava este ponto para mostrar através de gráficos e guardar em arquivo no disco rígido. Neste trabalho o microcontrolador envia os dados numa taxa de 115.2Kbps sem bit de paridade. A qualidade da transmissão foi verificada através da transmissão de sinais conhecidos.

## 3 Resultados Experimentais

Os testes realizados forma separados em três grupos: o sensor como sensor de velocidade; como sensor de posição e como sensor de vibração. A seguir são descritos os testes realizados e os resultados obtidos.

### 3.1 Os acelerômetros como sensor de velocidade

O objetivo de colocar os sensores igualmente espaçados de 120° e transformar as saídas deles em um sistema trifásico. Com isso a determinação da posição e velocidade passa a ser um problema de determinação de fase e frequência que pode ser resolvido com um PLL (Naidu, Mascarenhas and Fernandes, 2004).

### 3.1.1 Algoritmo de determinação da velocidade.

As tensões de saída dos sensores são convertidas sistema de coordenadas  $0\alpha\beta$  usando a equação (8).

$$\begin{bmatrix} v_{s_0} \\ v_{s_\alpha} \\ v_{s_\beta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{6}} & \frac{1}{\sqrt{6}} & \frac{1}{\sqrt{6}} \\ 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{s_a} \\ v_{s_b} \\ v_{s_c} \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$v_{s_\alpha} = v_p \cos(\theta + \phi_p) + v_n \cos(\theta + \phi_n) \quad (9)$$

$$v_{s_\beta} = v_p \sin(\theta + \phi_p) - v_n \sin(\theta + \phi_n) \quad (10)$$

onde  $\phi_p$  e  $\phi_n$  são as fases iniciais de  $v_p$  e  $v_n$  e  $\theta$  é a fase do sinal.. As equações (9) e (10) (figura 3.1) podem ser reescritas na forma:

$$v_{s_\alpha} = v_{p_\alpha} + v_{n_\alpha} \quad (11)$$

$$v_{s_\beta} = v_{p_\beta} - v_{n_\beta} \quad (12)$$

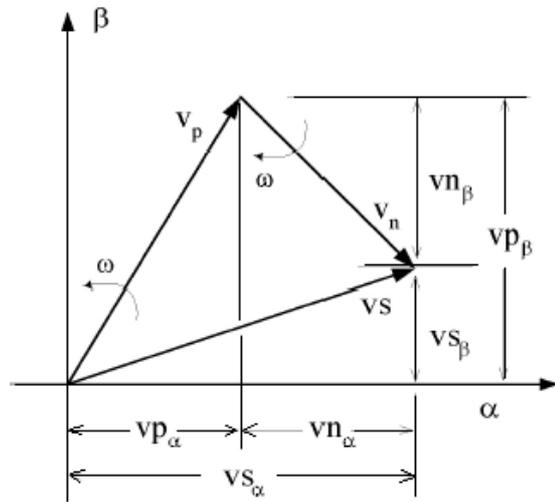


figura 3.1 – Seqüência positiva no referencial  $0\alpha\beta$

Derivando (9) e (11) em relação a  $\theta$ ,

$$-\frac{d}{d\theta} v_{s_\alpha} = v_{p_\beta} + v_{n_\beta} \quad (12)$$

$$\frac{d}{d\theta} v_{s_\beta} = v_{p_\alpha} - v_{n_\alpha} \quad (13)$$

Rearranjando as equações (11)-(13)

$$vp_a = 0.5 \left\{ vs_\alpha + \frac{d}{d\theta} vs_\beta \right\} \quad (14)$$

$$vn_\alpha = vs_\alpha - vp_\alpha \quad (15)$$

$$vp_\beta = 0.5 \left\{ vs_\beta + \frac{d}{d\theta} vs_\alpha \right\} \quad (16)$$

$$vn_\beta = vp_\beta - vs_\alpha \quad (17)$$

As derivadas das equações (14) e (16) são aproximadas por

$$\frac{d}{d\theta} vs_\alpha = \frac{vs_\alpha(t) - vs_\alpha(t - \Delta t)}{\omega \Delta t} \quad (18)$$

$$\frac{d}{d\theta} vs_\beta = \frac{vs_\beta(t) - vs_\beta(t - \Delta t)}{\omega \Delta t} \quad (19)$$

O PLL constituído de três estágios, onde no primeiro é feita a estimação das componentes de seqüência positiva e negativa (equações 14-17). No segundo um controlador proporcional integral é utilizado para rastrear a fase e a velocidade angular da seqüência positiva. No terceiro estágio é essencialmente um compensador avanço-atraso com boas propriedades de filtragem. Neste estágio o parâmetro velocidade vezes o período de amostragem é filtrado e entregue ao primeiro estágio [6].

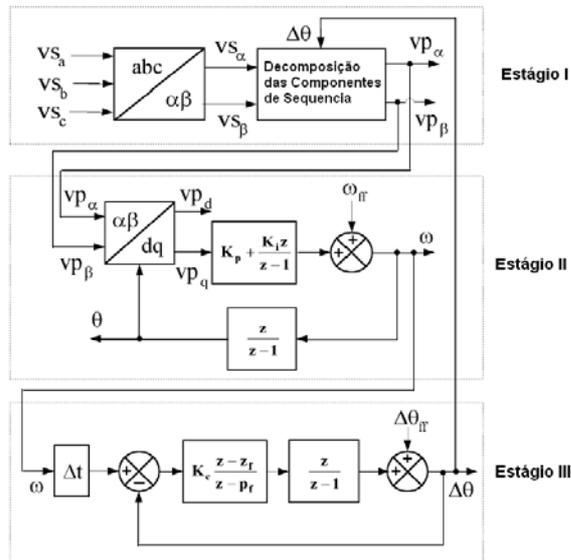


figura 3.2 – Modelo discreto do PLL utilizado.

A resposta do sensor pode ser ajustada variando os parâmetros do controlador. O sinal mostrado na figura 3.3 é a saída filtrada do estágio 2 (figura 3.2) Foi utilizado um filtro passa baixa com frequência de corte de 5 Hz.

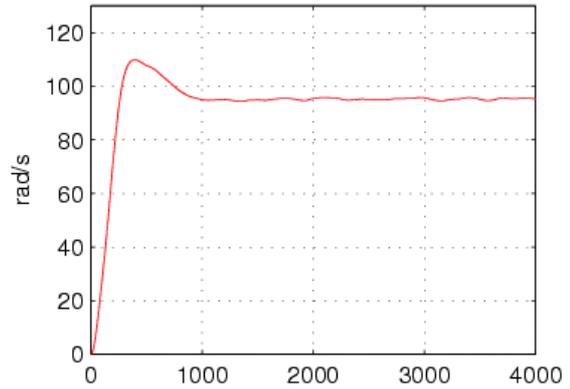


figura 3.3 – Resposta do sensor - 900 rpm

### 3.2 Os acelerômetros como sensor de posição

A fase obtida com o PLL é a posição do sensor em relação a vertical. Na figura 3.4a podem ser observadas as saídas do encoder com sinal azul tracejado e em vermelho em linha sólida a saída do sensor.

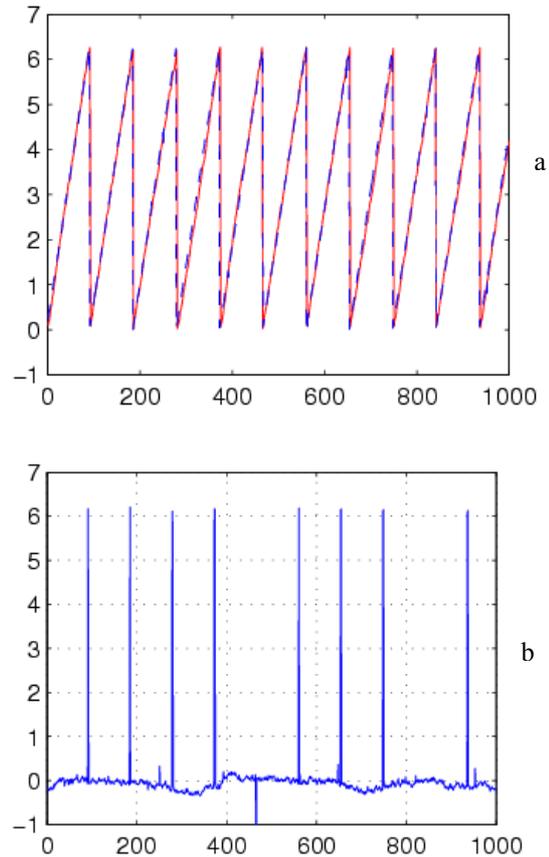


figura 3.4 – a - Gráfico de posição dado pelo encoder e pelo sensor - 900 rpm. (b) - erro de posição entre o encoder e o sensor proposto

O sinal foi deslocado para uma melhor comparação, já que o zero do encoder depende da montagem e que, no neste caso, não coincidia com o zero do sensor.

### 3.3 Os acelerômetros como sensor de vibração

O adxl202 é bastante sensível para detectar as vibrações no eixo girante. Se calcularmos a FFT (figura 3.5 e 3.6) do sinal podemos observar as várias componentes de frequência que representam as vibrações no eixo. O estudo destas vibrações foge ao escopo deste trabalho, mas o sensor pode vir a ser uma ferramenta muito importante na manutenção preditiva baseada em sinais de vibração de eixos girantes.

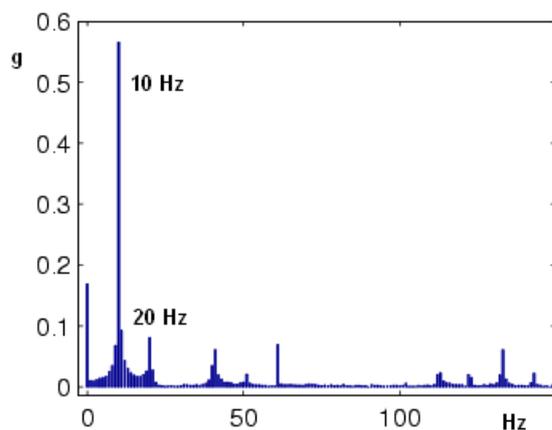


Figura 3.5 Espectro do sinal - 600 rpm.

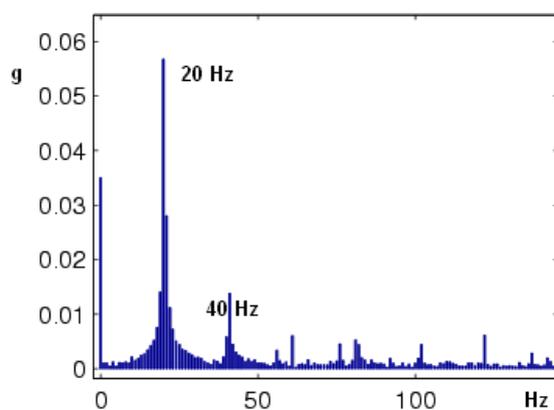


Figura 3.6 Espectro do sinal - 1200 rpm.

## 4 Conclusão

Este trabalho mostrou, que é possível integrar num sensor as funções de detecção de vibrações, velocidade e posição.

O sensor foi montado de forma a fornecer três sinais de tensão defasados de 120° e então através de um algoritmo PLL pode-se determinar a posição e a velocidade. Vários testes foram realizados e os resultados estão mostrados neste trabalho.

Como o sensor é composto de acelerômetros o sinal pôde, ainda, ser utilizado na determinação do espectro de frequência do rotor.

## Agradecimentos

Os autores agradecem ao CNPq, CAPES, aos membros do Laboratório de Eletrônica Industrial e Acionamentos de Máquinas (LEIAM) pelo suporte concedido para realização deste trabalho.

## Referências Bibliográficas

- [1] IEEE Std 836-2001, IEEE Recommended Practice for Precision Centrifuge Testing Of Linear Accelerometers, *IEEE Aerospace and Electronics Systems Society*, November-2001.
- [2] Khater, E., Controle Ativo de vibração torcional em máquinas rotativas. V Simpósio Brasileiro de Redes Neurais, p. 195-198, dezembro 1998.
- [3] Resnick, R. H., D. Física. 3 ed. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, 1979. 1V, pp 62-63.
- [4] Pyrhönen, O. Eskelinen, P. Advanced Measurement of Rotor Vibration in Electric Drives. IEE AES – Systems Magazine, May 1998
- [5] Kim, H. C., J. e Sue, S. Accurate Position Control for AC Servo Motor using Novel Speed Estimator. IEEE, 1995, p. 627-632
- [6] Naidu, S. R., Mascarenhas, A. W., Fernandes, D. A. A software phase-locked loop for unbalanced and distorted utility conditions. International Conference on Power System Technology. Nov 2004, (no prelo).