

Sistema de Sensoriamento de Máquinas via ZigBee

A.R. Hidalgo, L.P.B. de Oliveira, M.S. Silva

Departamento de Engenharia Elétrica

Universidade Federal de Sergipe – UFS

CEP 49.100-000, Aracaju-SE

E-mails: ahidalgo@ufs.br, lpedro@ufs.br, milthons@ufs.br

Abstract— This works present the development of one application using the ZigBee Protocol into the IEEE 802.15.4 standard to the vibration monitoring and analysis. The dates are collected using tri-axial vibration sensor installed in rotation and alternatives machines. A real-time monitoring system aims to allow the maintenance to be based on the equipment's actual conditions. Real-time monitoring brings additional benefits, such as: better equipment usage, better maintenance planning, reduction of emergency impediments due to failures, and equipment life time management improvements. The development system has software functionalities that assist in the fault diagnosis through the vibration analysis using Fourier Transformer of machines (motors and pumps) installed in Petroleum producers units.

Keywords — Vibration Monitoring, ZigBee protocol, Predictive Maintenance

Resumo— Neste trabalho é apresentado o desenvolvimento de uma aplicação utilizando o protocolo *ZigBee* sobre o padrão IEEE 802.15.4, para monitoramento e análise de vibração. Os dados são coletados usando um sensor de vibração tri-axial instalado em máquinas rotativas e alternativas. O monitoramento em tempo real traz benefícios adicionais tais como: o melhor uso do equipamento; um melhor planejamento da manutenção, redução dos impedimentos emergenciais por falhas e melhora do gerenciamento da vida útil dos equipamentos. O sistema desenvolvido possui software funcionalidades que auxiliam o diagnóstico de falhas através da análise vibratória usando a Transformada de Fourier das máquinas (motores e bombas) usados em instalações petrolíferas

Palavras-chave — monitoramento de vibração, protocolo ZigBee, manutenção preditiva

1 Introdução

O uso de redes sem fio (*wireless*) para transmissão de dados, aliado à disponibilidade de sensores de baixo custo com capacidade computacional, bem como o desenvolvimento de sistemas *wireless* de baixo consumo fizeram crescer o interesse de pesquisadores e empresas pelo desenvolvimento de uma grande variedade de aplicações, tais como: supervisão e gerenciamento de energia, monitoramento de variáveis analógicas (temperatura, umidade, pressão, vibração, etc.), detecção de incêndio ou incidentes, rastreamento de veículos, monitoramento ambiental, automação residencial, biotecnologia, monitoramento e controle industrial, segurança pública e de ambientes em geral, dentre outras aplicações.

De fato, já há algum tempo que se conhecem vários protocolos para suporte de comunicações sem fios, como o Bluetooth ou o Wi-Fi, mas só recentemente se começou a pensar num protocolo que respondesse às necessidades específicas de sensores e dispositivos de controle.

1.1 Protocolo ZigBee

Até então os diversos fabricantes de equipamentos para sensoriamento e controle, adotavam soluções próprias criando sérios problemas de interoperabilidade entre sistemas (Rua, 2006). Neste contexto surge o protocolo ZigBee que, em conjunto com a norma IEEE 802.15.4, pretende uniformizar as comunicações nas redes pessoais (PAN) e nas redes domésticas de última geração garantindo fiabilidade

e a segurança nas comunicações bem como a maximização do tempo de vida útil das baterias.

A figura 1 ilustra algumas possibilidades de aplicação dessa tecnologia.

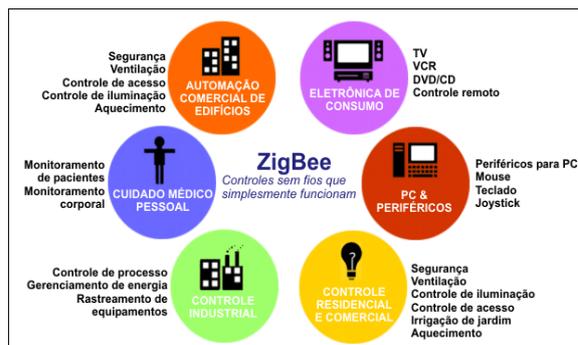


Figura 1 - Aplicações para ZigBee.

Fonte: www.rogercom.com.

ZigBee é um protocolo de comunicação aberto, baseado no padrão IEEE 802.15.4. Ele define uma camada de rede acima da camada 802.15.4 para sustentar capacidades avançadas de rede *mesh* (malha).

O padrão IEEE 802.15.4 define as camadas físicas e de acesso que permitem a operação em três bandas ISM (*Industrial, Scientific and Medical*), livres de licenciamento, nas frequências 2.4 GHz (utilização mundial), 915 MHz (só nos Estados Unidos) e 868 MHz (só na Europa). O número de canais e a taxa de transmissão dependem da faixa de operação:

- 868 - 868,8MHz: 1canal, 20 Kbps;
- 902 - 928MHz: 10 canais, 40 Kbps;
- 2400 - 2483,5MHz: 16 canais, 250 Kbps.

A especificação *ZigBee* define as camadas de rede e aplicação e ainda o serviço de segurança entre ambas. Estão especificados mecanismos de ligação e desconexão de um dispositivo à rede, a identificação e armazenamento numa tabela de dispositivos, a segurança e o encaminhamento das malhas e a identificação e manutenção do encaminhamento. Estão previstos três tipos de dispositivos lógicos: coordenador (*coordinator*), roteador (*router*) e dispositivos finais (*end devices*). O Coordenador (ZC) é o responsável por estabelecer o canal e PAN ID para dar início à rede. Ele permite que os *routers* e *end devices* se incluam nela, auxiliando no roteamento de dados escolhendo a melhor rota para a transmissão de uma informação, por exemplo. Assim, o coordenador nunca pode entrar em modo dormir (*sleep*). O Roteador (ZR) auxilia na transferência de dados, roteando informações. Ele deve se juntar à rede antes de receber ou encaminhar dados. Uma vez na rede permite a inclusão de outros roteadores e *end devices* à mesma. Também não poderá entrar no modo “dormir”. O *End Device* (ZED) é o ponto final de um designado caminho na rede *ZigBee*. Ele deve ser incluso nela antes de transmitir e receber dados; não permite a inclusão de outros dispositivos à rede; só é possível trocar informação com seu pai (roteador ou coordenador), ou seja, não dispõe de roteamento de dados. É o único dispositivo que pode entrar em modo dormir para economia de energia.

O alcance está ligado à potência do sinal dos equipamentos utilizados bem como a configuração do meio físico, podendo chegar a 1600m para uma comunicação sem perdas e sem obstáculos (datasheet da Digi International Inc. - MaxStream).

A organização das redes se dá através de alguns modelos básicos (Fig. 2) do IEEE 802.15.4: estrela, malha e árvore.

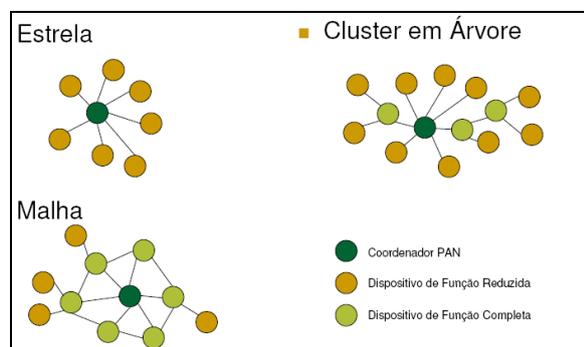


Figura 2 - Topologias das redes ZigBee.

Na topologia Estrela, uma das mais simples de ser implementada, a rede possui um coordenador responsável pelo gerenciamento da rede e os dispositivos finais (*end devices*).

Para a troca de informações entre eles, os dispositivos devem se utilizar do coordenador como num caminho único. O coordenador (FFD – Dispositivo de funcionalidade completa) deve ficar no centro da rede e os demais dispositivos, tanto roteadores quan-

to *end devices* (RFDs – Dispositivos de funcionalidade reduzida) são considerados escravos.

Na topologia Malha, a rede pode se ajustar automaticamente, tanto na sua inicialização quanto na entrada e saída de dispositivos na Rede. A auto-organização da rede garante uma otimização no tráfego de dados. Com diferentes caminhos possíveis para a comunicação entre os nós esta configuração permite alcance de uma grande área geográfica (Pinheiro, 2006).

Na configuração Árvore (*tree*), a rede possui uma hierarquia consideravelmente maior. O coordenador se caracteriza como nó mestre, trocando informações com outros nós (de roteadores) e *End Device*. Assim, o roteador também pode ser responsável pela inclusão de dispositivos finais, permitindo que dispositivos fora da região de cobertura do coordenador troquem informações com ele.

1.2 Análise Vibratória

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 (Pyrhönen and Eskelinen, 1998). A análise da vibração consiste em identificar características do sinal vibratório que possam ser utilizadas para o diagnóstico de um sistema. A análise direta dos dados de vibração no tempo não é útil nesse diagnóstico, sendo necessário que ele seja processado adequadamente para que as suas características sejam identificadas. A ferramenta mais utilizada é a resposta em frequência (Evaldo Khater, 1999), conseguida através da transformada de Fourier, que mostra as frequências em que a energia vibratória se concentra.

O sinal obtido da vibração de máquinas girantes ou alternativas pode ser apresentado em forma de aceleração, velocidade ou deslocamento. As medições em uma máquina são feitas em pontos como carcaça, eixo de rotação ou conexões, sendo estas posições (Fig. 3) chamadas de vertical, horizontal ou axial.

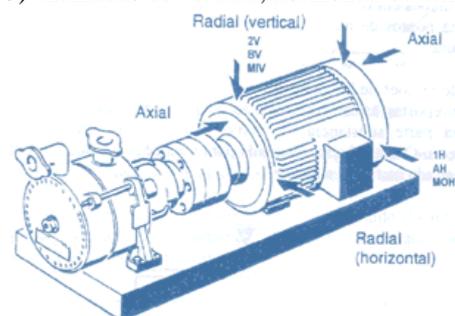


Figura 3 - Posições padrões para medição da vibração.

A Fig. 4 mostra um registro no tempo de uma medição realizada em um rotor vertical. O sinal tem características de difícil interpretação. O espectro em frequência mostrado na Fig. 5, entretanto, apresenta uma clara predominância de uma determinada fre-

qüência em relação às demais. Isto pode ser utilizado para identificar a causa da vibração, por exemplo, a velocidade de rotação do rotor é igual à frequência predominante.

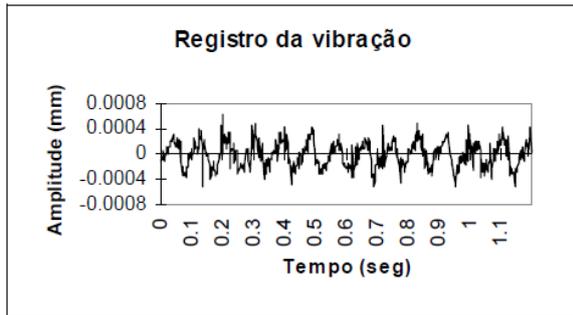


Figura 4 - Deslocamento da vibração.

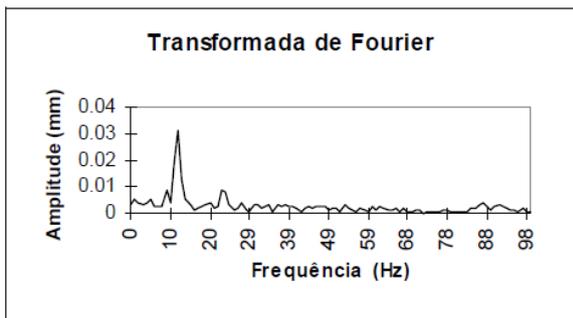


Figura 5 - Transformada do sinal de deslocamento.

Uma das possíveis aplicações está no diagnóstico de problemas em máquinas rotativas e alternativas. Uma vez detectado um nível vibratório alto, o principal problema é identificar a origem da vibração. Isto normalmente é feito utilizando-se um processo de eliminação de causas. A maior amplitude de vibração está normalmente próxima à parte da máquina onde se localiza o problema. Se um estudo inicial nas medições revela que amplitudes dominantes ocorrem em uma determinada frequência, é provável que o problema esteja ocorrendo na região da máquina em que algum elemento opera com esta determinada frequência e as amplitudes medidas são maiores. A análise da vibração é o processo em que são identificadas as causas da vibração através da medição adequada dos níveis vibratórios.

2 Descrição do Sistema

O sistema é composto por dois módulos (Figura 6). O primeiro fica sobre a máquina, no local onde se deseja fazer as medições e o segundo deve ser conectado a um computador com entrada USB disponível.

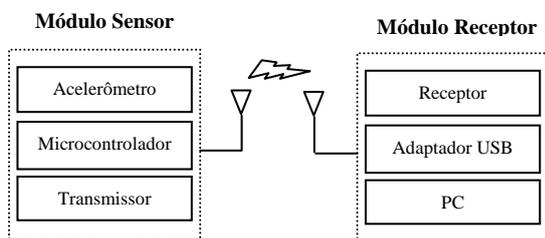


Figura 6 – Diagrama de blocos do sistema proposto.

2.1 Módulo sensor

Neste módulo (Figura 6) estão o microcontrolador (clone do arduino ATmega168), o acelerômetro triaxial (ADXL 330), o transceptor xBeePro da Digi e a bateria.

O conjunto contendo o sensor é acoplado à parte da máquina que se deseja medir, por meio de ímãs de neodímio, para garantir maior firmeza e que não surjam vibrações espúrias.

2.1.1 O acelerômetro

O acelerômetro é um transdutor que produz em sua saída uma tensão proporcional à aceleração a que ele está submetido. Nos acelerômetros utilizados a aceleração é medida por meio de elementos capacitivos construídos na forma de diversas placas de silício móveis em seu interior (Mascarenhas, 2004). Dentro do circuito integrado existe um circuito de controle que desempenha as funções de medição, calibração, filtragem e amplificação do sinal produzido pelo elemento sensor capacitivo.

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

$$V_s = \frac{V_e}{2} - K \left(\frac{V_e}{3} \right) g \tag{1}$$

onde:

- V_s Saída do sensor (Volts)
- V_e Tensão de alimentação
- g Aceleração medida
- K Sensibilidades para $V_e = +3 V$
Para o ADXL330 $K = 300 \text{ mV/g}$

No Sistema Internacional a aceleração é medida em m/s^2 , mas a saída da maioria dos acelerômetros é expressa em função da aceleração da gravidade (g) (IEEE Std 836-2001). Diversas são as possibilidades de saída do acelerômetro, frente às orientações com força gravitacional (Figura 7).

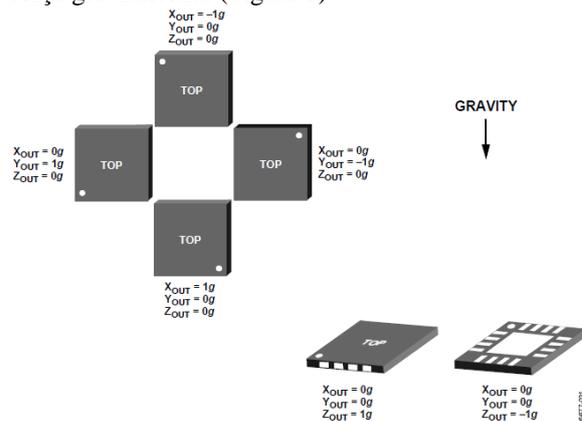


Figura 7 - Saída do acelerômetro versus gravidade. Fonte: Datasheet do ADXL330 da Analog Devices.

2.1.2 O microcontrolador

O papel do microcontrolador no projeto é o de fazer a conversão analógica para digital, codificar os valores obtidos em uma palavra de 8 bits e enviá-los pela porta serial para o transmissor zigBee. Para esta fim foi utilizado um clone do arduino (ATMega168), mas poderia ser qualquer outro que tivesse conversor analógico/digital (ADC) e tivesse saída serial. A fórmula para conversão da tensão em um nível quantizado pelo ADC é dada pela equação 2.

$$N_{ADC} = (2^n - 1) \left[\frac{V_{in} + V_{ref-}}{V_{ref+} - V_{ref-}} \right] \quad (2)$$

onde:

N_{ADC}	Número resultante da conversão
V_{in}	Tensão de entrada do ADC
V_{ref+} e V_{ref-}	Tensões de referência (3V e 0V)
n	Número de bits do ADC

Basicamente o microcontrolador faz a leitura da aceleração, codifica-a e a envia para o rádio. Isto é feito para cada canal dentro de um laço infinito. O tempo para executar a conversão de cada eixo do acelerômetro é de 100µs.

Três pinos foram configurados como entrada para o ADC. O trecho do programa que roda no microcontrolador e que faz a leitura do acelerômetro é apresentado a seguir.

```
Serial.begin(19200);
int xpin = 4; // eixo x do acelerometro
int ypin = 5; // eixo y do acelerometro
int zpin = 6; // eixo z do acelerometro
void loop()
{
  Serial.print(analogRead(xpin));
  Serial.print(" ");
  Serial.print(analogRead(ypin));
  Serial.print(" ");
  Serial.print(analogRead(zpin));
  Serial.println();
}
```

2.1.3 O sistema de transmissão

O sistema de comunicação é composto de dois rádios zigBee bidirecionais com alcance de até 1600m. O transmissor opera na frequência de 2,4GHz a uma taxa de transmissão de 240Kbps.

O transmissor foi configurado com o software XCTU da Digi para permitir a comunicação entre os módulos sensor e receptor.

Neste trabalho o transmissor envia os dados numa taxa de 19,2 Kbps sem bit de paridade. A qualidade da transmissão foi verificada através da transmissão de sinais conhecidos.

2.2 Módulo receptor

Este módulo é composto pelo rádio (Figura 8a), conversor RS232-USB (Figura 8), programa de coleta e programa de análise no PC.

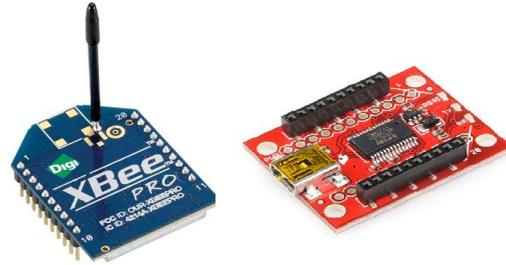


Figura 8 - a) módulo xBee; b) adaptador USB.

2.2.1 O programa de coleta

Para fazer a interface com o módulo sensor, foi desenvolvido um programa de coleta dos dados do acelerômetro triaxial (Figura 9).

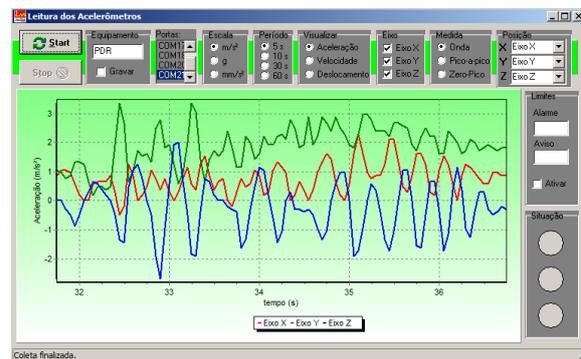


Figura 9 - Programa de coleta de dados do acelerômetro.

O programa roda em ambiente Windows e efetua a calibração (Freescale Semiconductor, 2007), antes do início da coleta propriamente dita. Nesta etapa são coletados 20 pontos de dados, feita a média aritmética dos mesmos e em seguida calcula-se o “zero” de cada eixo do acelerômetro, conforme as equações 3 e 4.

$$cal = g_{avg} \left(\frac{V_e}{N_{ADC,max}} \right) - 1,8 \quad (3)$$

$$g_x = \left(g_{med} \left(\frac{V_e}{N_{ADC,max}} \right) - 1,8 + cal \right) * \frac{1}{K} \quad (4)$$

As modalidades de visualização permitidas incluem a própria aceleração, a velocidade das vibrações e o deslocamento, estes últimos conseguidos efetuando-se a integração dos dados do sensor. Também se pode selecionar entre visualizar a onda completa, apenas os valores de pico ou ainda os valores pico a pico da mesma.

Níveis de aviso e alarme, fornecidos pelo usuário, permitem que uma indicação visual e sonora seja ativada para cada uma das possibilidades, indicando com a cor vermelha que o nível de alarme foi atingido.

do, amarelo para o nível de aviso ou verde para a normalidade.

2.2.1 O programa de análise

Após a coleta dos dados (leitura das acelerações em três eixos), estes podem ser analisados *off-line*. O programa (Figura 10) permite a visualização dos arquivos contendo os registros de vibração dos três eixos nas diversas formas que foram descritas para o programa de coleta, além de permitir a visualização das principais frequências contidas no sinal por meio da transformada de Fourier, bem como pelas transformadas *wavelets*, permitindo-se determinar o instante de ocorrência da falha.

O programa, desenvolvido em linguagem C++ possibilita a visualização de séries históricas de dados, permitindo acompanhar a evolução da deterioração do equipamento sob avaliação e, assim, auxiliar na manutenção preditiva e corretiva dos mesmos.

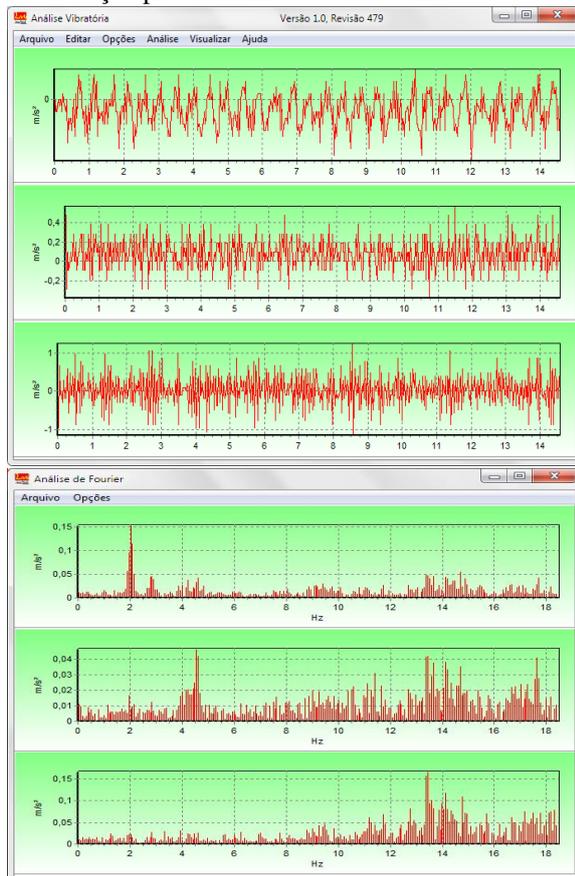


Figura 10 - Programa de análise dos dados do acelerômetro.

3 Testes

O sistema desenvolvido foi testado numa fábrica de fertilizantes, e, para tanto, teve que ser acomodado em um invólucro à prova de explosão (IP-6). Duas versões foram desenvolvidas: uma com sensor junto ao sistema de transmissão e outra com o sensor em separado. Em ambos os casos o sensor é fixado ao equipamento sob análise por meio de ímãs.

Para efetuar os testes em laboratório, utilizou-se um motor de ¼ de cv, 3φ, 220V, 1720rpm, com um disco

de alumínio acoplado ao seu eixo (Fig. 11). Ao disco de alumínio podem-se adicionar pesos padronizados, com parafusos, em sua extremidade e, assim, promover pulsos (vibrações) de intensidades controladas quando do giro do motor, permitindo a calibração do sistema.



Figura 11 – Teste em laboratório – Com sensor embutido (esquerda) e com sensor separado (direita).

Durante as medições no campo, o sistema conseguiu capturar dados a uma distância de aproximadamente 300m, em um parque de máquinas e com outros obstáculos como paredes e colunas de concreto.

As medições obtidas nos testes foram comparadas com sistemas comerciais de medição de vibração, porém todas apresentavam diferenças de valores, devido ao processamento efetuado sobre os dados, como por exemplo, o período de amostragem de 10s para atualização da visualização dos dados coletados. Na figura 12 apresentamos os dados dos 3 (três) eixos do acelerômetro, capturados do motor utilizado em laboratório.

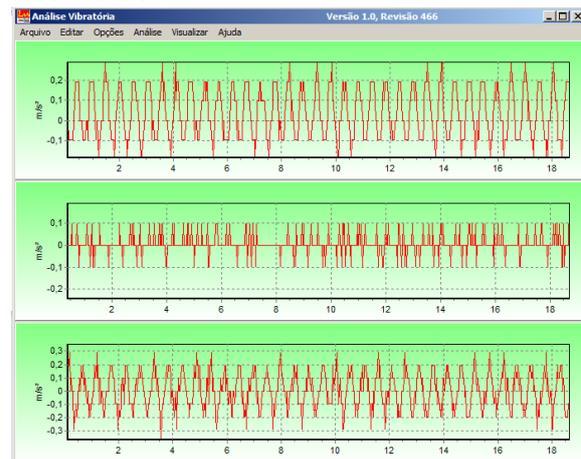


Figura 12 - Dados coletados do motor em laboratório.

4 Conclusão

O sistema mostrou-se robusto frente às interferências eletromagnéticas (demais máquinas e transformadores da fábrica), bem como intempéries (temperaturas elevadas, presença de gases) advindas do ambiente em que foi testado. Além de eliminar a necessidade de o operador ir a campo fazer medidas com um instrumento portátil de medição de vibração, o sistema permitiu agilizar o diagnóstico e a intervenção no caso de uma manutenção corretiva por meio de alarme visual e sonoro, reduzindo assim, o tempo de parada da planta aumentando sua eficiência.

O sistema desenvolvido é de baixo custo, podendo ser aplicado com diversos tipos de sensores e em diversas aplicações.

A análise dos dados coletados está sendo aprimorada para se ter um resultado comparável aos sistemas comerciais de análise de vibrações.

Agradecimentos

À empresa Wellcom pelo aporte financeiro e à fábrica de fertilizantes nitrogenados de Sergipe – FAFEN-SE que viabilizou os testes em diversas condições e pontos de coleta tanto em máquinas rotativas quanto alternativas.

Referências Bibliográficas

- Freescale Semiconductor. (2007). Implementing Positioning Algorithms Using Accelerometers. Application Note AN3397.
- KHATER, E. (1999). Diagnóstico de Falhas em Máquinas Rotativas através da Análise da Vibração Torcional. In: I EMAN/FUNREI (I Encontro de Manutenção da Funrei), São João del Rei - MG. I EMAN/FUNREI (ANAIS EM CD), v. I. p. 15-22.
- Mascarenhas, A. W. ; LIMA, Antônio M. N.; JACOBINA, Cursino B. (2004). Sensor Integrado de Posição, Velocidade e Vibração para Máquinas Rotativas. In: CBA 2004 - XV Congresso Brasileiro de Automática, Gramado.
- Pinheiro, J. M. S. (2006). ZigBee em Home Area Network. Projeto de Redes. Biografias.
- Pyrhönen, O. Eskelinen, P. (1998). Advanced Measurement of Rotor Vibration in Electric Drives. IEE AES – Systems Magazine, May.
- Rua, D; Martins, N; Reis, P; Souza, J. P. (2006). Interface USB para recolha de dados de sensores remotos utilizando ZigBee e IEEE 802.15.4. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Portugal.