

Rede de Sensores para Monitoramento de Integridade Estrutural: Monitoramento On-line de Torres de Linha de Transmissão

1

***Abstract.** Structural health monitoring has become a very important technology in civil engineering and is highly dependent on advances in instrumentation, communications and microelectronics. This paper presents a system for monitoring towers of transmission lines (TL's) through a network of sensors. The objective of this work is to implement a program of on-line monitoring of TL's with evidence of excessive vibration, structural failure predict eminent and destruction of structural elements. This work discusses the developed embedded system and the project achievements.*

***Resumo.** Monitoramento de integridade estrutural tornou-se uma tecnologia muito importante na engenharia civil e é altamente dependente de avanços na instrumentação, comunicações e microeletrônica. Este trabalho apresenta um sistema de monitoramento para torres de linhas de transmissão (TL's), através de uma rede de sensores. O objetivo do presente trabalho é implementar de um programa de monitoramento on-line de TL's com indícios de vibração excessiva, prever falhas estruturais eminentes e destruição dos elementos estruturais. Este trabalho discute o sistema embarcado desenvolvido e as realizações do projeto.*

1. Introdução

Monitoramento de integridade estrutural (Structural health monitoring - SHM) [JIANG 2009] é um campo que tem como objetivo detectar danos em uma determinada estrutura. Os danos que esses métodos detectam vão desde o desenvolvimento de trincas por fadiga, degradação das ligações estruturais até desgastes de rolamentos. Este estudo explora uma técnica conhecida como vibração e deformação baseada no monitoramento de integridade estrutural [Ai-rong 2010]. Essa técnica tem se mostrado capaz de não só detectar a presença de danos na estrutura, mas também para indicar a proximidade do dano, a utilização dessa técnica é uma tentativa de detectar danos em sua fase inicial, analisando as deformações e as respostas de aceleração em vários pontos. Neste trabalho, essa tecnologia é aplicada às linhas de transmissão que transportam energia elétrica.

A manutenção de torres de linha de transmissão é um dos principais problemas enfrentados pelas concessionárias de energia elétrica, especialmente as torres que já apresentam sinais de envelhecimento devido ao longo período de operação. O propósito da manutenção de TL's é proporcionar segurança e um dos principais fatores considerados na análise de segurança de TL's é a ação causada pelo vento.

No Brasil, a maioria das torres não são monitoradas por meio de análise de aceleração. Este trabalho tem como objetivo tornar possível a implementação de um

programa de monitoramento on-line de torres com indícios de vibração excessiva, para previsão de falhas estruturais eminentes e a destruição dos elementos estruturais. Além da aceleração e deformação, também é de interesse monitorar a temperatura, velocidade e direção do vento, fornecendo uma análise mais completa dos fatores que afetam a estrutura das torres. O primeiro autor desenvolveu a maior parte deste trabalho, enquanto era um estudante de graduação na UFPA, onde está agora iniciando o seu curso de mestrado.

Este artigo está organizado da seguinte forma: A Seção 2 mostra a descrição geral do sistema. Em seguida, a Seção 3 mostra os sensores utilizados, na Seção 4 comenta-se sobre o condicionamento, conversão de sinais e o hardware desenvolvido. Posteriormente, na Seção 5 apresenta como é implementada a rede de sensores na TL's. A Seção 6 se refere a transmissão de dados e a Seção 7 apresenta as conclusões.

2. Descrição do Sistema

Este trabalho apresenta um sistema de monitoramento on-line para TL's, no qual é instalado uma rede de sensores [Zhan-feng 2006] sobre uma torre, para a aquisição das grandezas físicas em estudo. Cinco tipos de sensores são usados para monitorar: aceleração, deformação, temperatura, velocidade e direção do vento. Os sensores são instalados em pontos pré-definidos e cada um é conectado a um módulo de aquisição. Cada módulo de aquisição é composto por um circuito condicionador de sinal, um conversor analógico digital (A/D) e um microcontrolador, os módulos são divididos em três grupos, cada grupo é posicionado em locais específicos da torre. Estes módulos são interligados por um barramento de dois fios, a comunicação nesse barramento é determinada utilizando o protocolo CAN (Controller Area Network). A Figura 1 Mostra o diagrama do sistema proposto.

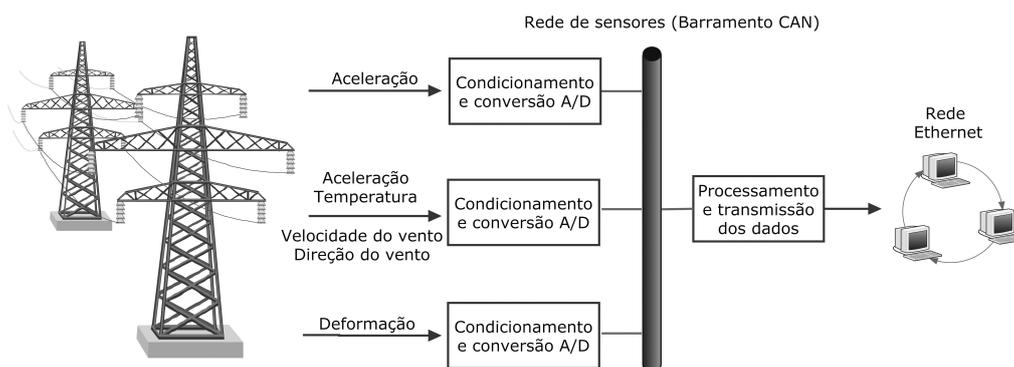


Figure 1. Descrição Geral do Sistema

Nesse sistema, o fluxo de dados capturados pelos módulos de aquisição é direcionado para um módulo diferenciado, denominado de módulo coordenador, responsável pelo processamento e transmissão dos dados para uma rede ethernet. Um computador remoto conectado a mesma rede do módulo coordenador, comunica-se via socket com o mesmo e recebe todos os dados captados pelos sensores.

As seções 3-6 descrevem os elementos que compõem o sistema de monitoramento.

3. Sensores

Como mencionado, os sensores utilizados são sensores de aceleração (Acelerômetro), deformação (Extensômetro), temperatura (Sensor de Temperatura), velocidade e direção do vento (Anemômetro). Fundamentado em estudos prévios, realizados pelo Núcleo de Instrumentação e Computação Aplicada à Engenharia - NICAE, é definido o posicionamento e algumas características no condicionamento de sinais dos sensores. Esses estudos indicam que as torres não devem ter aceleração com frequência superior a taxa de 10 Hz, as acelerações são mais intensas na parte de mais alta de uma torre, em dias normais é esperada uma aceleração média das torres na ordem de 0.06 g e as deformações devem ser mais intensas na base da torre. Levando estas informações em conta os sensores são posicionados da seguinte forma:

- Três acelerômetros [Jinkwon 2007] na parte central da torre, com taxa de amostragem de 20 Hz.
- Dois acelerômetros na parte mais alta da torre com taxa amostragem de 20 Hz.
- Quatro extensômetros na base da torre com 20 Hz.
- Um sensor de temperatura na parte central da torres com uma amostra por minuto(apm).
- Um anemômetro na parte central da torres, com o sensor de velocidade do vento a 1 aps e o de direção do vento a 1 apm.

Obs: A distribuição dos sensores de aceleração mostrada na figura 2 também permite analisar pequenas rotações da torre.

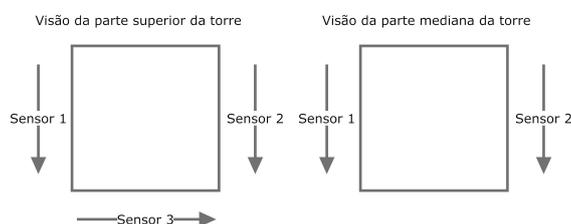


Figure 2. Posicionamento dos acelerômetros na parte mais alta da torre

As subseções a seguir descrevem brevemente cada sensor.

3.1. Sensor de Aceleração:

A aceleração é medida em pontos específicos da torre com o uso de acelerômetros Wilcoxon, modelo 793L. Cada acelerômetro possui saída de 500 mV/g e é excitado por uma fonte de corrente (2-10 mA) com alimentação de $(18 - 30)V_{DC}$.

3.2. Sensor de Deformação:

A deformação em pontos pré-definidos da torre é medida com o extensômetro. O sensor extensômetro possui como saída uma resistência variável de 120 Ω , com deformação da ordem de 0.0001 m/m. A compressão da torre é detectada pelo aumento da resistência, enquanto que a dilatação é detectada pela diminuição da resistência.

3.3. Sensor de temperatura:

Para monitoramento da temperatura da torre é utilizado o sensor de temperatura da National Semiconductor, modelo LM35DZ/NOPB. O sensor LM35 é de grande precisão e possui saída 10 mV/ $^{\circ}C$, a sua escala total de temperatura varia de $-55^{\circ}C$ a $+150^{\circ}C$.

3.4. Sensor de velocidade e direção do vento:

Para o monitoramento da velocidade e direção do vento, é utilizado o anemômetro Wind Sensor, modelo 034b. O sensor de velocidade gera dois pulsos em sua saída a cada ciclo completado pelo catavento, a velocidade é obtida via software através da fórmula $V = 0.799f + 0.29$, onde f é a frequência dos pulsos. A direção do vento é representada por um potenciômetro de 10 k Ω , o sensor varia a resistência conforme o posicionamento de uma palheta. O posicionamento angular é obtido via software através da fórmula: $p = V \times 0.142$, onde V é a tensão proporcionada pelo circuito de condicionamento.

4. Condicionamento e Conversão de Sinais

Os sinais elétricos gerados pelos sensores devem ser otimizados para a escala de entrada do conversor A/D. Para isso, utiliza-se vários métodos, ou também chamados de condicionadores de sinal. Por exemplo, o circuito de condicionamento de um acelerômetro é projetado de acordo com as características de excitação. Além disso, o sinal é condicionado para permitir observar a aceleração em dois sentidos, o circuito de condicionamento é mostrado no circuito na figura 3.

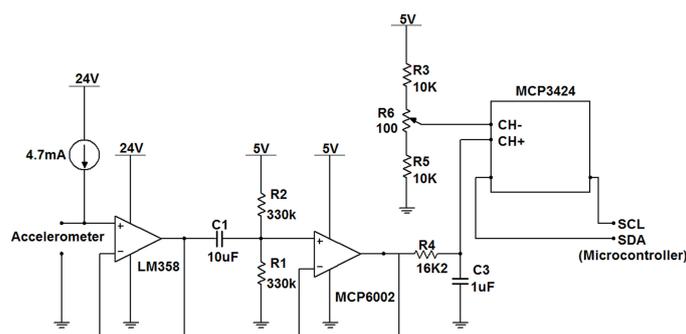


Figure 3. Circuito de condicionamento para um acelerômetro

Para os acelerômetros em particular, é desejado uma resolução de aproximadamente 0,0001 g, com frequência máxima de 10Hz. Então, para executar corretamente a conversão A/D, pelo menos 14 bits por amostra são necessários. Devido a essa necessidade, foi utilizado o conversor A/D MCP3424 da Microchip, que tem 14-bit de conversão com uma taxa de conversão de 60Hz. Este conversor A/D é capaz de atender as exigências da resolução e sistema de amostragem, incluindo os requisitos dos sensores de deformação. Os dados convertidos pelo MCP3424 são enviados para um microcontrolador através de uma interface de comunicação I2C.

O condicionamento de sinais provenientes do medidor de deformação é realizado, conectando o sensor em uma ponte de wheatstone, na configuração apresentada na figura 4 o circuito para condicionamento do extensômetro é denominado de 1/4 de ponte [Choi 2008]. Com a ponte em equilíbrio (este procedimento é realizado com o auxílio de um potenciômetro) o sinal de tensão se deve apenas a variação de resistência do sensor de deformação. Neste circuito uma grande deformação na torre provoca uma pequena variação na resistência, com isso é necessário aplicar um alto ganho no sinal de saída diferencial [Júnior 2010] da ponte na ordem de 560V/V. O monitoramento ocorre de modo a detectar dilatações ou compressões.

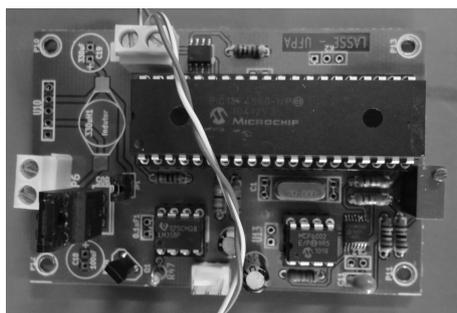


Figure 6. Placa de aquisição para o sensor de aceleração

pela leitura do valor digitalizado no conversor A/D e pelo interfaceamento no barramento CAN.

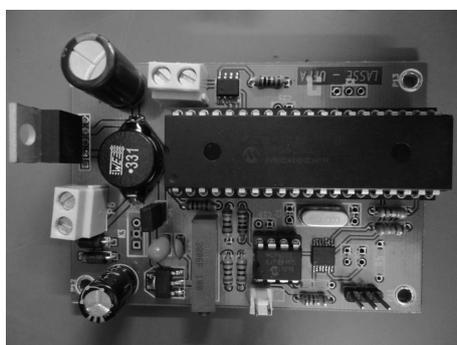


Figure 7. Placa de aquisição para o sensor de deformação

Para a aquisição de dados de um sensor de temperatura, velocidade e direção do vento na figura. 8, tem-se uma placa com um regulador de tensão para 5V, circuitos de condicionamento para temperatura, velocidade e direção do vento e um microcontrolador PIC18F4580, responsável pela conversão A/D e pelo interfaceamento no barramento CAN.

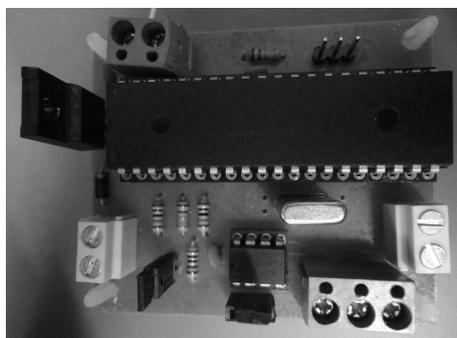


Figure 8. Placa para os sensores de temperatura, velocidade e direção do vento

Na Figura 9 tem-se a placa do módulo coordenador, com um regulador de tensão para 5 V, circuito de interfaceamento com o barramento CAN, Microcontrolador

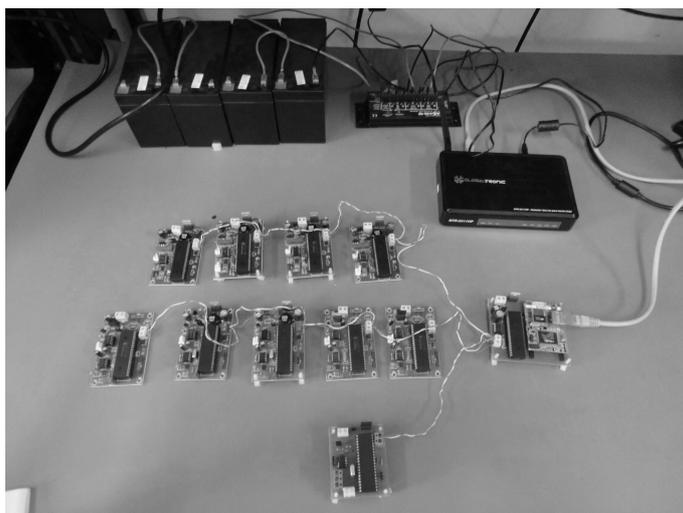


Figure 10. Módulos de aquisição e coordenador ligados ao Barramento CAN

O módulo coordenador atuará no barramento CAN, enviado com frequência 20Hz (de acordo com os requisitos de taxa de amostragem do sistema) pacotes via broadcast aos módulos conectados ao barramento, esses pacotes iniciam o processo de conversão A/D em todos os módulos. Em seguida, o módulo recebe os dados amostrados em todos os módulos de aquisição, com exceção do nó referente aos sensores de temperatura, velocidade e direção do vento, pois são amostrados com taxas diferentes. Desse modo, todas as amostras dos sensores de aceleração e deformação são obtidas de modo simultâneo. Ao receber uma amostra de cada sensor de aceleração e deformação, o módulo coordenador concatena todos os dados em um único pacote e envia por meio de uma comunicação serial para o RCM2200.

Firmwares são obviamente necessários em cada microcontrolador [Pereira 2010] de acordo com a função do mesmo no barramento. A Figura 11 descreve o fluxograma do firmware dos módulos no sistema.

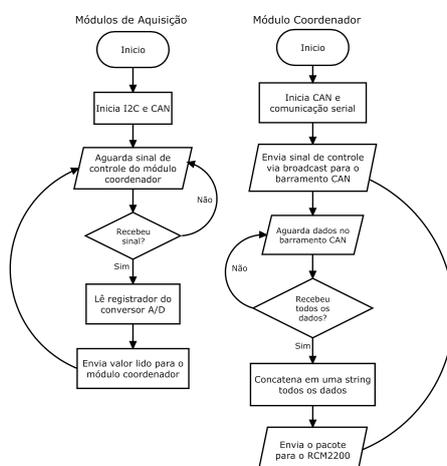


Figure 11. Firmware dos módulos

6. Transmissão dos Dados

Neste sistema se deseja transmitir os dados de uma torre para uma estação de tratamento e análise de dados, localizada a 3 km de distância e sem visada direta, para a transmissão é utilizada uma rede ethernet [Tanenbaum 2010], estando disponível na torre por meio de uma infra-estrutura wireless, a mesma permitirá ao módulo coordenador acessar uma rede ethernet. A infra-estrutura é constituída por equipamentos wireless disponíveis no mercado para servirem como pontos de acesso (AP) e como roteador. Como não há visada direta entre a estação de tratamento e as torres, foi escolhido uma caixa d'água do Campus como ponto intermediário entre a estação de tratamento e uma TL's, como mostra a Figura 12. A configuração da rede é realizada da seguinte forma:

- Na estação de tratamento deve ser instalado um roteador conectado a uma rede, com uma antena direcional, com alto ganho de potência;
- Na caixa d'água deve ser instalado um roteador configurado como ponte, com uma antena omni-direcional;
- Na torre deve ser instalado um roteador configurado como ponte e uma antena direcional, este último, fornece acesso a uma rede da estação de tratamento ao RCM2200, com o uso de um cabo de ethernet;

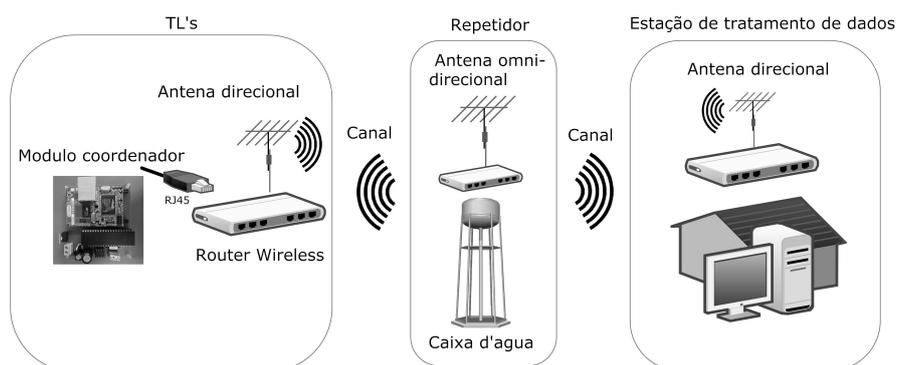


Figure 12. Diagrama do sistema de transmissão de dados

O módulo coordenador acessa a rede ethernet através do componente eletrônico RabbitCore RCM2200, que é um microcontrolador com memória flash, SRAM, entradas e saídas digitais, interface de comunicação serial Padrão RS232 e uma interface Ethernet 10 Base-T de 10/100Mbps.

A comunicação entre o módulo coordenador e um computador remoto, conectado na mesma rede, é feita por meio de uma comunicação socket. Nesta comunicação socket, para que os dados fiquem disponíveis independente de um computador, o módulo coordenador é definido como servidor e o computador remoto é definido como cliente. A rede é configurada de tal modo, que apenas determinados computadores possam acessar o servidor socket, evitando que qualquer computador conectado na mesma rede do módulo coordenador tenha acesso aos dados, a comunicação socket ocorre conforme o fluxograma na figura. 13. No computador remoto é feito um software para a comunicação socket implementado em linguagem JAVA [Harvey M. Deitel 2010], este também é responsável pelo armazenamento dos dados em arquivos de texto ou mesmo em um banco de dados do tipo mysql.

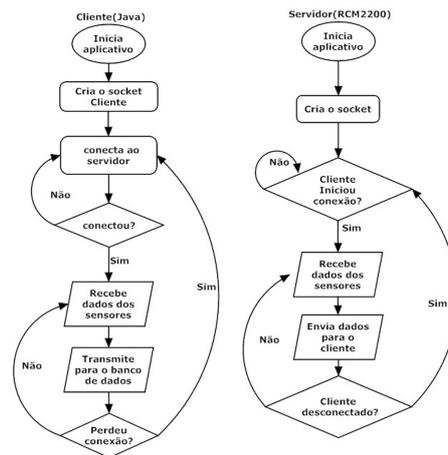


Figure 13. Comunicação socket entre servidor e o cliente

7. Conclusões

Este trabalho descreveu um sistema embarcado desenvolvido para SHM. O sistema de monitoramento é utilizado em torres de linha de transmissão. Ele usa circuitos de condicionamento para a prestação de uma resolução adequada dos sinais nas entradas dos sensores e leva em conta alguns estudos realizados sobre TL's. A vantagem desse sistema é a boa adequação do mesmo para o monitoramento de torres de distribuição de energia, uma vez que a forte interferência eletro-magnética em uma torre de distribuição, pode causar vários danos tanto aos circuitos, quanto ao tráfego de dados. O sistema em questão prioriza tanto a proteção dos circuitos quanto a segurança no fluxo dados, essa segurança é garantida pela adoção do protocolo CAN e pela utilização de equipamentos com imunidade a interferência eletro-magnética. Em resumo, os circuitos desenvolvidos resultam um sistema confiável, o que vem gerando resultados consistentes.

References

- Ai-rong, L. (2010). Model structure health monitoring. *2010 IEEE International Conference on*, pages 734–737.
- Choi, H. (2008). Structural health monitoring system based on strain gauge enabled wireless sensor nodes. *INSS 2008. 5th International Conference on*, pages 211–214.
- Harvey M. Deitel, P. J. D. (2010). *Java How to Program*. 2005, 6 edition.
- JIANG, X. (2009). Wireless sensor networks in structural health monitoring based on zigbee technology. *ASID 2009. 3rd International Conference on*, pages 449–452.
- Jinkwon, Y. L. (2007). Implementation of accelerometer sensor module and fall detection monitoring system based on wireless sensor network. *EMBS 2007. 29th Annual International Conference of the IEEE*, pages 2315–2318.
- Júnior, A. P. (2010). *Operational Amplifiers and Active Filters*. 2003, 6 edition.
- Pereira, F. (2010). *PIC Microcontrollers: Programming in C*. 2003, 1 edition.
- Tanenbaum, A. S. (2010). *Structured Computer Organization*. 2001, 4 edition.
- Zhan-feng, G. (2006). Network sensor and its application in structure health monitoring system. *ICICIC '06. First International Conference on*, pages 68–71.