

Ensinando os fundamentos de redes de sensores sem fio usando um sistema simples

(Teaching wireless sensor networks fundamentals using a simple system)

Luciana Vieira Piza, Aldo Ivan Céspedes Arce,
Adriano Rogério Bruno Tech, Ernane José Xavier Costa¹

Departamento de Ciências Básicas, Universidade de São Paulo, Pirassununga, SP, Brasil

Recebido em 16/8/2012; Aceito em 27/9/2012; Publicado em 18/3/2013

A monitoração eletrônica usando redes de sensores sem fio é uma área do conhecimento humano que vêm sendo investigada sob diversos aspectos tanto para averiguar seu funcionamento a priori quanto para avaliar suas aplicações futuras. Este artigo visa apresentar um projeto simples que permite explorar os conceitos físicos envolvidos na transmissão da informação via tecnologia sem fio.

Palavras-chave: eletromagnetismo, antenas, transdutores, instrumentação eletrônica.

The electronic monitoring using wireless sensor network is a human knowledge that has been investigated in order to improve their functional capabilities and incoming applications. This paper aim to present an educational system that able basic physics concept, concerned to the wireless sensor communications, to be more comprehensive.

Keywords: electromagnetism, antennas, transducers, electronic instrumentation.

1. Introdução

O uso da tecnologia sem fio em sistemas de medidas tornou-se na última década um diferencial na área de física experimental, principalmente no que diz respeito à instrumentação eletrônica [1]. Inerentes a esta tecnologia estão conceitos físicos importantes que dão suporte à tecnologia de transmissão sem fio desde os experimentos pioneiros nesta área [2].

Os conceitos de transmissão da informação à distância residem basicamente dentro da teoria eletromagnética, em especial na forma como as ondas irradiam através de antenas. Na prática a informação é transmitida entre uma antena emissora e uma antena receptora e todo o processo pode ser modelado usando-

se as equações de Maxwell, que explicam o comportamento da propagação de ondas eletromagnéticas. Outro conceito importante é o da codificação da informação em ondas eletromagnéticas. A Fig. 1 ilustra um processo de transmissão da informação. Nesta figura a informação a ser transmitida é gerada, codificada e a seguir transmitida usando-se uma antena. O codificador usa técnicas de modulação em frequência (FM) ou amplitude (AM) e gera uma tensão ou corrente variante no tempo, e os elétrons livres da antena são acelerados. A radiação, ou a onda eletromagnética produzida neste processo é consequência da aceleração desses elétrons. Considerando-se a antena uma fonte pontual a onda gerada propaga-se uniformemente em todas as direções.

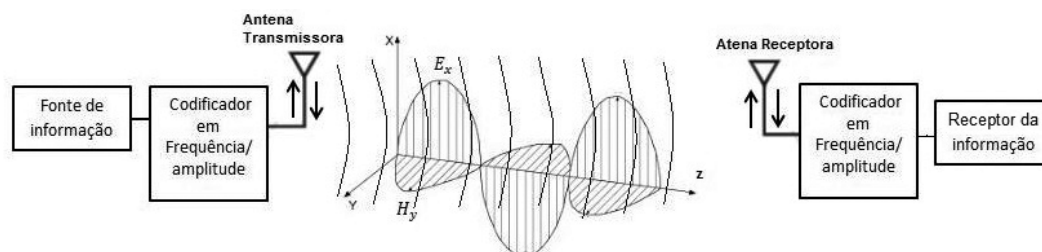


Figura 1 - Diagrama esquemático de um sistema de comunicação usando ondas eletromagnéticas.

¹E-mail: ernane@usp.br.

As equações de Maxwell permitem concluir que a velocidade de propagação da onda segue a relação

$$c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}} \text{ m/s}, \quad (1)$$

onde μ_0 = permeabilidade do espaço livre ($4\pi \times 10^{-7}$ H/m) e ϵ_0 = permissividade do espaço livre ($1/36\pi \times 10^{-9}$ F/m).

A antena é um elemento essencial na Fig. 1, pois é na antena que o fenômeno físico da radiação ocorre. Pode-se dizer que a antena é o dispositivo que assegura a transformação da energia eletromagnética gerada no sistema codificador em energia eletromagnética irradiada ou vice-versa. A antena esta relacionada com o conceito de dipolo e um modelo de antena ideal é o dipolo Hertziano que consiste de um pedaço de condutor retilíneo de pequena dimensão.

Apesar de não haver distinção conceitual na teoria eletromagnética, na prática, as antenas dependem da frequência da onda eletromagnética a ser transmitida e do ganho da antena. De uma forma geral, o ganho de uma antena está baseado na medida de quanto uma antena é melhor que a outra, ou seja, aquela que entrega mais potência ao meio ou maior quantidade de energia irradiada.

Para se definir o ganho de uma antena, basicamente adota-se uma antena como antena padrão, permitindo comparações entre antenas que trabalham em frequências diferentes. Utiliza-se uma fonte isotrópica para definir o ganho. Tal fonte apresenta ganho unitário de 0 dB por não apresentar direção preferencial de irradiação. Sendo assim, o ganho pode ser enunciado da forma

$$\text{Ganho} = \frac{\text{Irradiação máx. da antena em estudo}}{\text{Irradiação máx. de uma antena de referência com a mesma potência de emissão}} \quad (2)$$

Como na prática não existem fontes isotrópica, deve-se utilizar uma antena de referência ou um dipolo de referência. Desta forma, o ganho (G) está relacionado com a direção em que a antena irradia a máxima potência (fator de diretividade D) e por um fator de ajuste k , relacionado com a frequência natural do material do qual é feito a antena. Para uma antena ideal o fator k aproxima-se de 1 em altas frequências. Assim o ganho da antena pode ser escrito como

$$G = kD. \quad (3)$$

Desta forma o fator k representa todas as limitações que fazem o ganho ser menor que a diretividade D . Na prática o ganho está diretamente relacionado com outras grandezas envolvidas no processo como: eficiência de irradiação, casamento e perdas ôhmicas e é medido em decibéis.

Uma forma de caracterizar a antena é relacionar seu ganho e a perda na potência do sinal transmitido em espaço livre, ou seja, quando não existem fenômenos de absorção refração e reflexão. A propagação de ondas, neste espaço livre, ocorre em linha reta, e a atenuação que ocorre é somente geométrica, pois a energia irradiada espalha-se em frente esféricas conforme ilustrado na Fig. 2 e ao se percorrer uma distância r , a potência do transmissor (W_t) ficará espalhada sobre a superfície da esfera ($4\pi r^2$). A potência da onda em P (Watt/m²) dependerá da distancia radial r conforme a Eq. (4)

$$P = \frac{W_t}{4\pi r^2} \text{ Watt/m}^2 \quad (4)$$

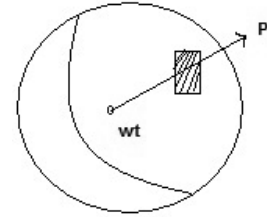


Figura 2 - Propagação da energia irradiada no espaço livre.

Na prática essa potência não é irradiada da mesma forma em todas as direções, sendo assim, a área atingida não é a área total da esfera já que a antena transmissora concentra sua radiação numa direção preferida, conseqüentemente a potência nessa zona será maior.

O ganho G_t que proporciona a antena transmissora é definido pela relação entre a potência resultante da antena dirigida e a potência de uma antena não direcional, e pode-se ter a relação

$$P = \frac{G_t W_t}{4\pi r^2}. \quad (5)$$

Considerando uma antena receptora com potência W_r e área de captação de A_r , a potência recebida será

$$W_r = P A_r = \frac{G_t W_t A_r}{4\pi r^2} \quad (6)$$

que é a equação que representa a relação entre as potências das antenas receptoras e transmissoras em se tratando de propagação em espaço livre.

O ganho e a área de uma antena podem ser relacionados pela equação

$$\frac{W_r}{W_t} = \frac{G_t A_r}{4\pi r^2}, \quad (7)$$

onde λ é o comprimento de onda. Assim a Eq. (7) pode ser reescrita como

$$\frac{W_t}{W_r} = \frac{A_t A_r}{r^2 \lambda^2}, \quad (8)$$

ou

$$\frac{W_t}{W_r} = \frac{G_t G_r \lambda^2}{4\pi r^2}. \quad (9)$$

O termo perda em espaço livre ou path loss (PL), refere-se à perda de espalhamento do sinal radiado entre a antena emissora e a antena receptora. Desta forma, a partir da Eq. (9) obtém-se o PL na Eq. (10)

$$PL = \frac{G_t G_r \lambda^2}{4\pi r^2}. \quad (10)$$

Equipamentos simples construídos com emissores e transmissores acoplados a um sistema de medidas podem auxiliar na compreensão básica de alguns princípios da comunicação sem fio. Do ponto de vista da arte da medida, as redes de sensores sem fio são projetadas de tal forma que permitam medir grandezas físicas à distância ou em condições bem específicas do ambiente, como exemplo, a temperatura de um alimento durante sua produção [3] usando ondas eletromagnéticas.

Uma rede de sensores wireless (WSN – Wireless Sensor Network) é uma rede de pequenos nós computacionais com sensores de grandezas físicas e dispositivos de transmissões telemétricos devidamente acoplados [4].

Basicamente, uma WSN é composta de um micro controlador, um sistema de transmissão e recepção usando rádio frequência, uma fonte de alimentação e um ou mais sensores [5] e um protocolo de comunicação. Um protocolo de comunicação estabelece um padrão de como as informações serão codificadas e transmitidas pelo sistema.

A Fig. 3 ilustra um modelo genérico de um nó WSN. Nesta figura o sinal do sensor é amostrado por um conversor Analógico-Digital (A/D) que por sua vez está conectado na unidade de controle. Na mesma unidade de controle podem-se interligar outros dispositivos como uma memória EEPROM (memória que pode armazenar dados de forma dinâmica apagando e gravando sem

a necessidade de parar o funcionamento do circuito) e sensores com saída digital. A interligação entre os dispositivos digitais é realizada por uma linha de conexão ou barramento denominado de barramento I2C ou protocolo I2C. O protocolo I2C foi desenvolvido pela Philips na década de 80 para comunicar dispositivos em um mesmo circuito impresso daí o nome I2C. O protocolo estabelece o uso de dois barramentos o SDA (Serial Data Line) por onde os dados são transmitidos e o SCL (Serial Clock Line) que fornece a sincronização da comunicação.

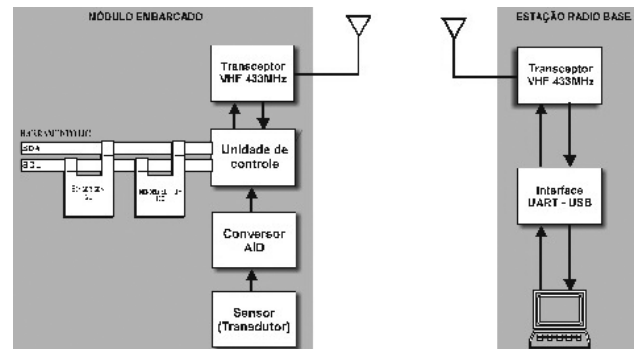


Figura 3 - Diagrama típico de um nó de uma rede de sensores wireless.

A tecnologia de redes sem fios é capaz de realizar a interligação de pequenas unidades de comunicações de dados em áreas muito limitadas. Seu princípio de funcionamento é comparável às redes wi-fi e bluetooth e diferencia-se por um menor consumo, por um alcance reduzido (cerca de 10 m) e as comunicações entre duas unidades poder ser repetida sucessivamente pelas unidades existentes na rede até atingir o destino final. Na Fig. 4 é possível visualizar as arquiteturas possíveis dos nós de uma rede sem fio com tecnologia ZigBee.

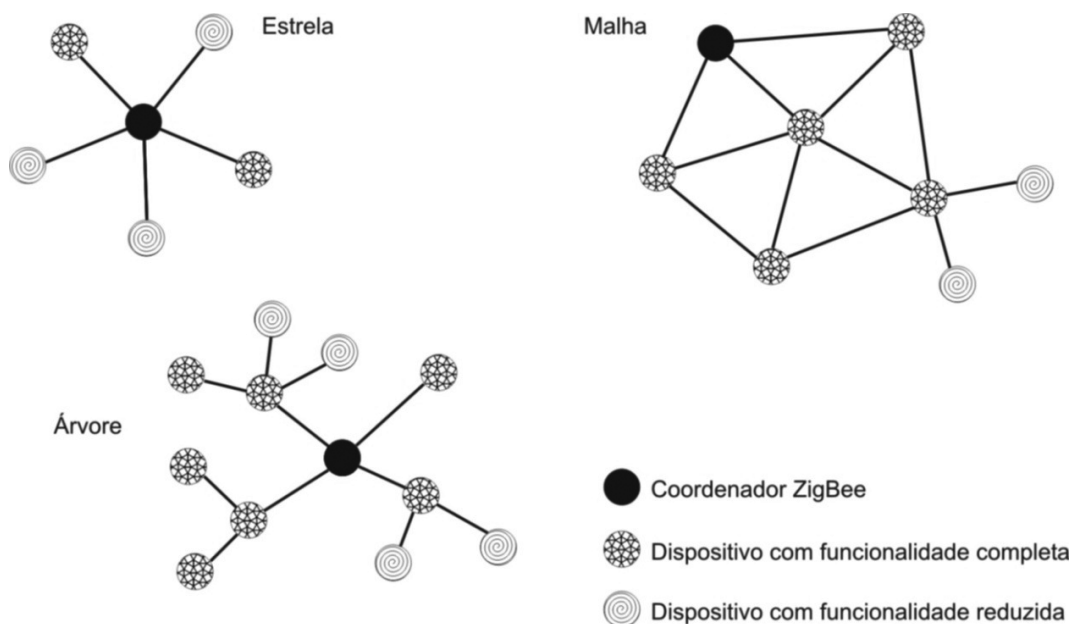


Figura 4 - Arquiteturas de rede de sensores sem fio usando o protocolo ZigBee.

Desta forma, alguns pontos da rede podem funcionar como retransmissores de informação. O sistema desenvolvido neste artigo usa o protocolo FBSN, proposto por [6], onde uma rede de sensores permite a coleta remota de dados, permitindo assim, a fixação por parte dos alunos dos conceitos de transmissão da informação sem fio.

2. Materiais e métodos

2.1. Desenvolvimento do módulo sensor

Para que o conceito de transmissor e receptor fique claro ao aluno que esta usando a tecnologia foi projetado um módulo sensor, onde suas funcionalidades ficam bem caracterizada fisicamente.

Sendo assim, o módulo sensor foi projetado para que se evidencie o sistema de transmissão da medida realizada e o dispositivo sensor responsável pela medida propriamente dita.

Operacionalmente, o sistema consta de duas etapas: uma de controle do sensor de temperatura e outra de armazenamento e transmissão dos dados. Os dados coletados são armazenados e periodicamente transmitidos. O módulo sensor opera com uma bateria tipo "button" CR2032 e as dimensões da placa de circuito impresso são de 25 mm x 45 mm. Incluindo o invólucro, o módulo 2 tem 15 mm de altura, 30 mm de largura e 50mm de comprimento. A Fig. 5 mostra um diagrama esquemático do módulo 2.

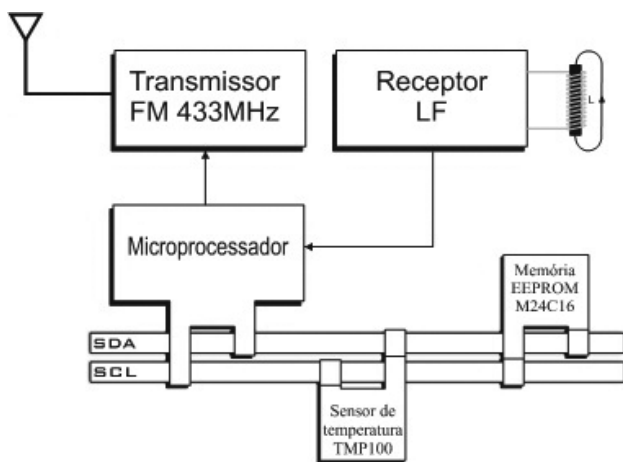


Figura 5 - Diagrama esquemático do módulo sensor.

O sensor de temperatura TMP100 fabricado pela Texas Instruments, é um integrado com 1,5 mm de largura por 3 mm de comprimento (Fig. 6), que opera na faixa de temperatura de -55 °C a 125 °C. A comunicação entre este dispositivo e a eletrônica que o controla é feita através de um protocolo de comunicação denominado I2C. Com uma resolução programável de

9 a 12 bits (0.5 °C a 0.0625 °C), encapsulamento reduzido e baixo custo, é amplamente utilizado em instrumentação. O TMP100 pode ser operado através de endereços binários o que facilita a manipulação por parte do aluno que está trabalhando com o dispositivo.

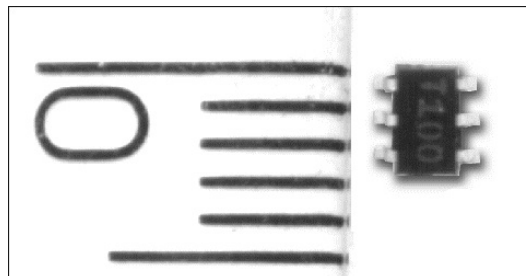


Figura 6 - Ilustração do elemento sensor TMP100.

O acesso ao dispositivo é feito através de um endereço de 8 bits, sendo que 3 bits deste endereço são configurados fisicamente através dos pinos ADD0 e ADD1 do integrado e o oitavo bit define o tipo de acesso a ser efetuado (R/W "0" para escrita "1" para leitura). A Fig. 7 mostra a tabela de configuração dos bits e um diagrama esquemático do TMP100.

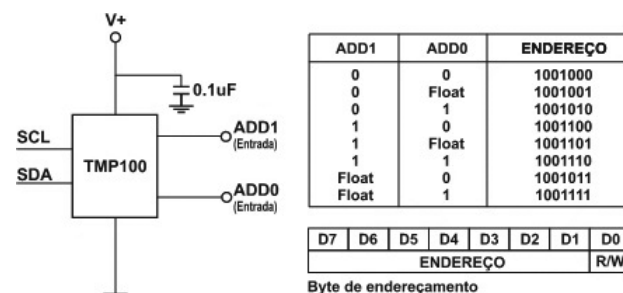


Figura 7 - Diagrama esquemático do TMP100 mostrando os endereços de configuração.

O sensor TMP100 é automaticamente calibrado durante a sua fabricação nas diversas faixas de resolução de temperatura. Se nenhuma configuração for feita, o sensor TMP100 opera com a resolução padrão de 9 bits, mas pode ser programado para trabalhar com até 12 bits de precisão, sendo que, nesta configuração a resolução da temperatura será de 0.0625 °C. A placa de circuito impresso do módulo montado é mostrado na Fig. 8.

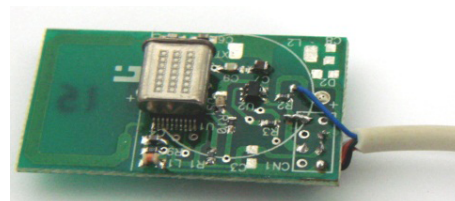


Figura 8 - Placa de circuito impresso do módulo 2 sensor.

2.2. Desenvolvimento do módulo receptor

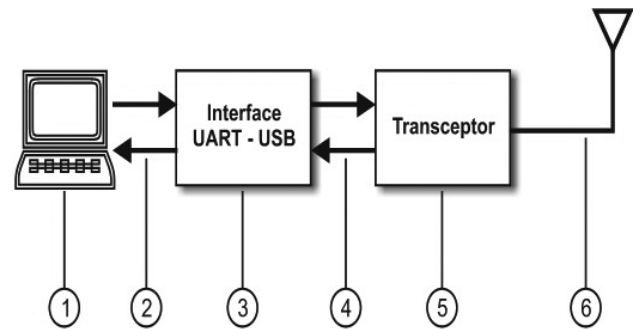
Este módulo é responsável pelo controle do tráfego de informações entre o módulo sensor e o sistema computacional, responsável por receber e armazenar dos os dados. O sistema consta de um microprocessador interligado com um transceptor. A Fig. 9 ilustra o módulo 1.

No computador, um programa computacional de coleta foi desenvolvido usando a ferramenta Borland C++ Builder que gerencia os dados recebidos do módulo 2, para que o aluno possa avaliar os dados através de gráficos e planilhas. O “front-end” do programa de computador é mostrado na Fig. 10

2.3. Medição de potência radiada e teste dos sensores

Os sensores foram testados por alunos em uma área experimental do Laboratório de Física Aplicada e Computacional– LAFAC/FZEA/USP. Foram realizados dois experimentos: um de resposta do sensor com dados coletados telemetricamente e um experimento para medir a potência radiada.

No experimento de resposta do sensor, os alunos montaram um experimento no qual o sensor de temperatura sem fio foi inserido dentro de um pequeno recipiente de vidro, imerso no gelo. O sistema foi isolado do meio externo usando um recipiente hermético.



- 1.- Microcomputador, Notebook, HandHeld, Datalogger ou Palmtop com S.O. Windows, Windows CE ou Linux
- 2.- Barramento USB 2.0
- 3.- Interface de conversão (protocolo serial Rs232 para USB2.0)
- 4.- Comunicação serial assíncrona Rs232
- 5.- Transceptor FM VHF 433MHz com saída e entrada digitais
- 6.- Antena Loop, Helicoidal ou Wip

Figura 9 - Diagrama esquemático do módulo 1 - Estação Rádio Base.

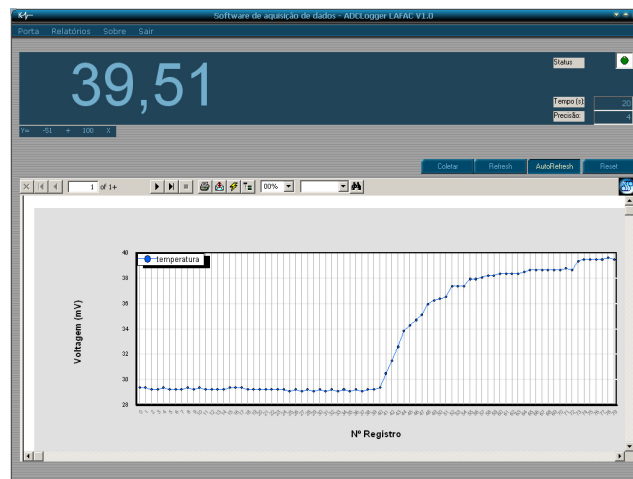


Figura 10 - “Front-end” do programa de coleta.

Foi utilizado um sensor de referência em conjunto com o sensor a ser avaliado para validação dos dados coletados pelo dispositivo desenvolvido. Esperou-se a temperatura no interior do jarro estabilizar e em seguida o sensor foi retirado e submetido à temperatura ambiente. A adaptação do sensor às novas condições de temperatura foi registrada através do software de coleta de dados. Finalmente, construiu-se um gráfico que permite avaliar a curva de resposta destes sensores.

No experimento para medir a potência radiada foi utilizado um analisador de espectro. O analisador de espectro foi ajustado inicialmente para uma faixa larga de frequência (100 Hz a 4.6 GHz), para que uma varredura

panorâmica fosse realizada a fim de checar a existência de outras componentes de frequência que possam existir e influenciar no momento das medições e que poderiam interferir nos valores a serem observados. A seguir o analisador de espectro foi ajustado na frequência principal do transmissor do sensor (433 MHz).

Os locais de medição dentro da área experimental foram demarcados, obtendo-se para cada ponto a sua distância da antena emissora. A antena do analisador foi mantida a uma distância adequada de qualquer estrutura metálica.

O sensor foi posicionado, e as medidas foram tomadas nas distâncias de 69 cm (3 vezes o tamanho da

antena), 138 cm (6 vezes o tamanho da antena) e 230 cm (10 vezes o tamanho da antena). Em todos os casos as medições foram feitas com a antena do analisador de espectro tanto na perpendicular quanto em paralelo em relação à antena emissora (polarização vertical e horizontal). Foram realizadas várias repetições em dias diferentes. A Tabela 1 mostra a média dos dados obtidos para cada distância. Para efeito de comparação os alunos implementaram no Matlab um algoritmo para calcular teoricamente perdas em espaço livre da potência em função da distância, na frequência de 433Mhz usada pelo transmissor do módulo sensor.

Tabela 1 - Cálculo da potência radiada em função da distância.

Distância (km)	69×10^{-5}	138×10^{-5}	230×10^{-5}
Potência experimental (dB)	-52 ± 2	-57 ± 1	-62 ± 2
Potência calculada (dB)	-22	-28	-32

O termo perda em espaço livre ou path loss (PL),

refere-se à perda de espalhamento do sinal radiado entre o transmissor do módulo sensor e a antena receptora do analisador de espectro. OPL representa a atenuação do sinal medida em decibéis e foi calculado usando a Eq. (10). Considerando os ganhos das antenas unitários e reescrevendo a Eq. (10), usando uma notação logarítmica, a função que calcula o PL foi escrita, com

$$PL = -32.44 - 20 * \log(\text{distância}) - 20 * \log(\text{frequência}). \quad (11)$$

3. Resultados e Discussão

3.1. Teste do sistema telemétrico realizado pelos alunos

As Figs. 11 e 12 mostram a tela do programa desenvolvido para adquirir os dados e gerar a curva de resposta dos sensores, respectivamente, obtidos telemetricamente através do módulo sensor que ficou inserido em uma jarra hermética

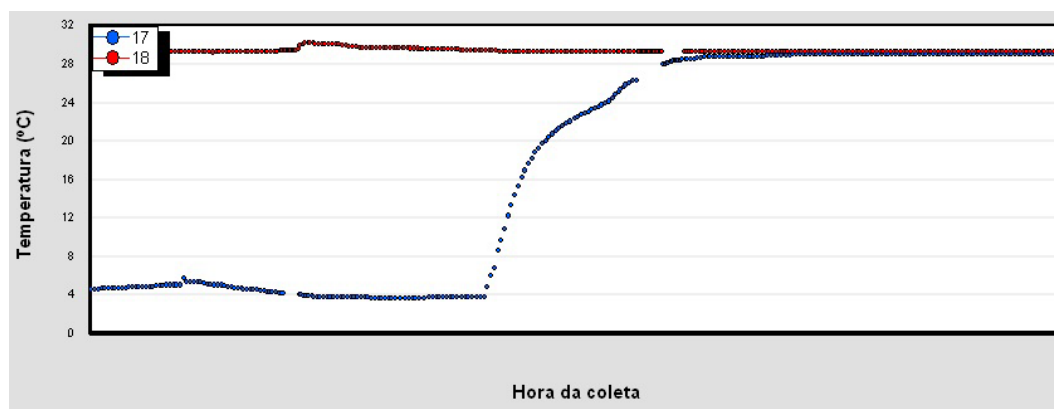


Figura 11 - Tela do programa mostrando a curva de resposta dos sensores 17 dentro e fora do jarro e do sensor 18 que monitorava a temperatura ambiente.

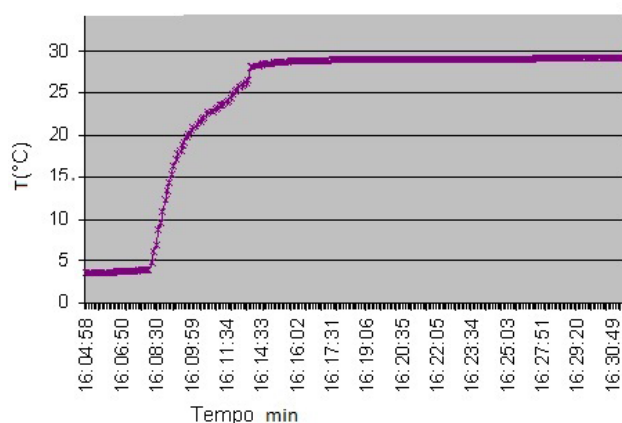


Figura 12 - Gráfico construído pelos alunos mostrando a curva de resposta dos sensores com os dados obtidos do programa.

Neste experimento simples, conduzido pelos alunos

fica claro a eficiência do sistema desenvolvido para o ensino de conceitos de medição telemétrica. O software permite uma percepção intuitiva dos dados, os quais são recebidos através de uma comunicação sem fio.

Nesta mesma linha de raciocínio, o sistema também permite vislumbrar outros conceitos importantes relativo ao objeto em estudo, ou seja, aspectos ligados a transmissão da informação por meio de ondas eletromagnéticas.

Assim, a partir do experimento proposto os conceitos da teoria da comunicação digital sem fio podem ser explorados e trabalhados pelos professores ou monitores, pois os alunos terão percebido e observado na prática a grande aplicabilidade do sistema telemétrico através da coleta de dados sem fio

3.2. Experimentos de medição da potência radiada realizado pelos alunos

A Tabela 1 anteriormente citada mostra os dados coletados em relação a potência radiada em função da distância. Nesta tabela o aluno pode verificar e comparar os valores obtidos experimentalmente e compará-los com os valores teóricos, calculados para a frequência de 433 MHz.

Desta forma, pode-se explorar os conceitos de potência de transmissão e relacioná-los com alguns conceitos básicos sobre teoria de antenas. Por exemplo, a discrepância entre os valores teóricos e os valores experimentais obtidos pelos alunos leva à discussão, de que tal discrepância pode ser oriunda de diversos fatores, mas, pode-se inferir que o principal argumento para a divergência absoluta entre o valor medido e o calculado reside no fato de ter-se usado o ganho das antenas como unitário, no caso teórico.

Com respeito ao efeito da distância na potência, mesmo considerando as variações relativas, nota-se que nas distâncias testadas existe uma pequena variação, conforme observado nos valores teóricos. Experimentos mais sofisticados podem ser realizados inclusive para avaliar os efeitos da antena na transmissão da informação construindo-se, por exemplo, os gráficos de radiação horizontal e vertical da antena e explorar conceitos relativos ao tipo de transmissão da antena.

4. Conclusão

O sistema desenvolvido neste artigo não traz nenhuma inovação no que diz respeito à tecnologia sem fio, propriamente dita. No entanto, em relação a forma como foi projetado, permite trabalhar didaticamente os conceitos básicos da medição telemétrica.

Referências

- [1] H. Eren, *Wireless Sensors and Instruments: Networks, Design and Applications*. (CRC Press, Boca Raton, 2006), 1st ed.
- [2] F.L. Leonardo, R.D. Martins e C. Fiolhais, *Revista Brasileira de Ensino de Física* **31**, 2 (2009).
- [3] R.G. Yudanto, D. Burdese, M. Mulassamo and L. Reyneri, *Research in Microelectronics and Electronics* **3**, 237 (2008).
- [4] R. Min, M. Bhardwaj, S. Cho, N. Ickes, E. Shih, A. Sinha, A. Wang and A. Chandrakasan, *IEEE Wireless Communications* **9**, 28 (2002).
- [5] G. Asada, I. Bhatti, T.H. Lin, S. Natkunathanan, F. Newberg, R. Rofougaran, A. Sipsos, S. Valoff, G.J. Potte and W.J. Kaiser, *Proc. of SPIE* **3673**, 11 (2000).
- [6] A.C.S. Silva, A.C. Arce, S. Souto and E.J.X. Costa, *Computers and Electronics in Agriculture* **49**, 246 (2005).