

# SIMPLIFICANDO O USO DE MÓDULOS COM TECNOLOGIA ZIGBEE™ EM APLICAÇÕES DE COMUNICAÇÃO WIRELESS E NA LOCALIZAÇÃO DE DISPOSITIVOS MÓVEIS

Rogério Solda<sup>1</sup>; César Ortolani Marcondes de Castro<sup>1</sup>; Wânderson de Oliveira Assis<sup>2</sup>; Alessandra Dutra Coelho<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Aluno de Iniciação Científica da Escola de Engenharia Mauá (EEM-CEUN-IMT);

<sup>2</sup> Professor(a) da Escola de Engenharia Mauá (EEM-CEUN-IMT).

**Resumo.** *Este trabalho propõe o desenvolvimento de experimentos e procedimentos padronizados visando simplificar e agilizar projetos que empregam módulos com tecnologia ZigBee™ em aplicações de comunicação sem fio (wireless) e na localização de dispositivos móveis. Em aplicações de mapeamento e localização, pretende-se adicionalmente aplicar métodos para minimizar as interferências, as quais resultam numa imprecisão considerável nas medições, inviabilizando a maioria das aplicações. Para isto aplicou-se o método dos mínimos quadrados ponderados para estimar a curva característica do módulo quando utilizado como sensor e, a partir desta estimativa, obter valores mais precisos para as medições de distância.*

## Introdução

Nos últimos anos, diversos dispositivos de comunicação sem fio vêm sendo produzidos de forma a reduzir custos de implantação, por reduzir o cabeamento necessário, além de permitir a transferência de dados para dispositivos ou equipamentos móveis. Contudo, somente a partir do desenvolvimento de protocolos de comunicação seguros é que estas tecnologias passaram a ser utilizadas em aplicações industriais, bem como para controlar remotamente dispositivos industriais. Em aplicações como estas não se privilegia a elevada taxa de transferência de dados, mas sim uma latência baixa e um consumo de energia igualmente baixo, para preservar a vida útil das baterias (Santos et al., 2010). Diversas tecnologias podem ser utilizadas nestas aplicações industriais, porém poucas têm como grande aliada o baixo custo de implantação e o baixo consumo de energia como a tecnologia ZigBee™. Dispositivos *wireless* baseados em módulos com tecnologia ZigBee™ vêm sendo bastante utilizados em várias aplicações na indústria e também vêm sendo desenvolvidos na Mauá vários projetos e trabalhos de conclusão de curso utilizando esta tecnologia (Santos et al., 2010), (Macedo et al., 2009), (Gabriel et al., 2010), e em todos estes projetos os alunos tipicamente demoram muito tempo para entender como funcionam os módulos e como aplicar esta tecnologia, incluindo utilização dos softwares para programação, gravação do *firmware* apropriado para os módulos, utilização dos kits didáticos, etc.

Dentro deste contexto, um dos objetivos deste trabalho é criar um procedimento padrão, contendo instruções detalhadas, que possa ser utilizado por qualquer aluno que pretenda trabalhar com módulos com tecnologia ZigBee™ de forma a simplificar a sua utilização e agilizar os projetos. Adicionalmente pretende-se também utilizar o módulo ZigBee™ em aplicações de localização de dispositivos móveis, neste caso utilizando uma função específica que permite detectar a distância entre o módulo remoto em relação a outros módulos fixados em posições conhecidas na região de análise. Pretende-se aprimorar a utilização de módulos ZigBee™ em aplicações de mapeamento e localização de dispositivos móveis.

As medições de distância com módulos ZigBee™ são geralmente expressas em dBm (decibéis metro) com considerável grau de imprecisão e sujeitas a interferências eletromagnéticas o que inviabiliza a maioria das aplicações. Neste trabalho pretende-se desenvolver algoritmos para minimizar as imprecisões produzidas nas medições de forma a

realizar a detecção de distâncias entre um dispositivo móvel em relação a pontos referenciais fixos com melhor precisão. As metodologias que serão avaliadas neste trabalho são:

- Aplicação do método dos mínimos quadrados para minimizar os erros de medição;
- Aplicação do método dos mínimos quadrados ponderados para estimar a curva característica de distância (m) x medição de potência (dBm) em tempo real, e a partir desta estimativa, obter valores mais precisos para as medições de distância; o método dos mínimos quadrados é uma metodologia amplamente utilizada na teoria para determinação de parâmetros de sistemas ou determinação de funções matemáticas a partir de medições imprecisas (Patané, 2008), (Iserman, 1992), (Aguirre, 2004), (Assis et al., 2011).

As metodologias aqui propostas podem também ser utilizadas em outras aplicações que envolvem medições de sinais de sensores com imprecisão, ruídos ou interferências, como por exemplo, em medições com acelerômetros e giroscópios em aeromodelos, helicópteros, VANT's e outros veículos aéreos onde estes sensores são utilizados para permitir o controle de voo.

## Material e Métodos

### Tecnologia ZigBee™

Para a transferência de dados sem fio entre os dispositivos, diversos padrões podem ser adotados, sendo os mais importantes *Wi-Fi*, *Bluetooth* e *ZigBee™*. Em termos comparativos, a tecnologia *ZigBee™* é comparável às redes *Wi-Fi* e *Bluetooth* e diferencia-se destas por desenvolver menor consumo, por um alcance reduzido (cerca de 10 metros) e as comunicações entre duas unidades pode ser repetida sucessivamente pelas unidades existentes na rede até atingir o destino final (Santos et al., 2010).

O protocolo *ZigBee™* define três tipos de dispositivos de acordo com as suas funcionalidades oferecidas e consumo de energia conforme apresentado na Figura 1: coordenador, roteador e dispositivo final (Santos et al., 2010).

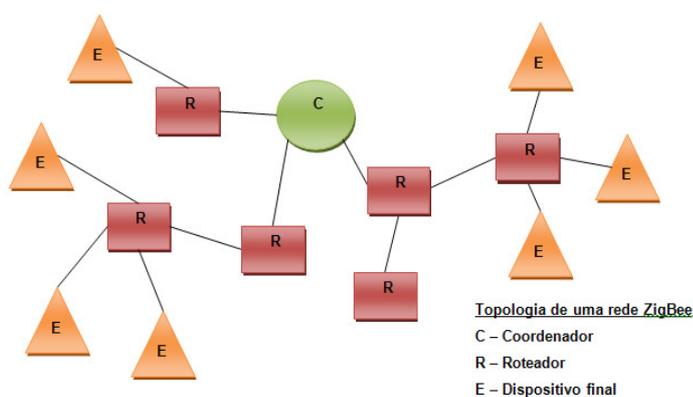


Figura 1 – Elementos em uma rede ZigBee™. Fonte: Santos et al., 2010.

O coordenador, ou *ZC (ZigBee Coordinator)*, é o único *FFD (full function device)* responsável pela formação de uma rede *ZigBee™* e pela construção de uma ponte sobre outras redes caso seja necessário, fato que lhe confere presença obrigatória em todas as redes. O coordenador estabelece um canal de operação e o número lógico para formar a rede. Uma vez estabelecidos esses parâmetros, o coordenador pode formar uma rede permitindo que roteadores e dispositivos finais se integrem a esta. Após a formação da rede, o coordenador funciona como roteador, podendo participar no redirecionamento de pacotes de dados a ser uma fonte ou destino de pacotes de dados. Após selecionar o endereço de rede (*PAN ID*), o coordenador permitirá que os roteadores e os dispositivos finais ingressem na rede. O coordenador tem que ser configurado para operar em modo ativo enviando e recebendo dados.

O roteador, também chamado de ZR (*ZigBee Router*), é um nó *FFD* que cria e/ou mantém as informações da rede e a utiliza para determinar a melhor rota para um pacote de dados. Os roteadores podem participar no redirecionamento de pacote de dados e devem se integrar à rede antes de permitir que outros roteadores e dispositivo finais se integrem a ele. O roteador tem que ser configurado para operar em modo ativo enviando e recebendo dados.

Um dispositivo final ou *ZEB (ZigBee End Device)* é classificado como *RFD (Reduced Function Device)* e deve sempre interagir com o seu nó pai (ou um roteador ou um coordenador) na rede para receber ou transmitir dados podendo ser uma fonte ou destino de dados, porém, não possuindo a capacidade de redirecionamento de informações. Pode-se trabalhar em modo adormecido (*sleep*) para obter uma economia significativa dando vida longa à bateria. Um dispositivo final não requer uma quantidade maior de memória podendo ser o elemento mais barato da rede (comparado ao coordenador e o roteador). O dispositivo final pode ser configurado para operar tanto em modo ativo quanto em modo *sleep* enviando e recebendo dados.

No desenvolvimento do projeto serão utilizados os seguintes dispositivos e *softwares*:

- *hardware*: módulos XBee, circuitos de comunicação e gravação para módulos XBee e sistema microcontrolado Arduino;
- *software* XCTU e IDE Arduino.

### Módulos XBee

Os módulos Xbee (Figura 2 (a)) são dispositivos com tecnologia ZigBee™ desenvolvidos pela empresa norte americana DIGI com o objetivo de simplificar aplicações utilizando RF. O alcance do produto final depende da potência de transmissão. Os módulos trabalham com transmissão e recepção de sinais com a vantagem de já possuírem toda pilha de comunicação com protocolo ZigBee™ em sua memória interna de forma que todas as funções de comunicação previstas pelo protocolo ficam acessíveis para uma customização final. Atualmente encontram-se disponíveis os seguintes modelos: Xbee™, XBee-Pro™ e Xbee 2.5™. Todos os modelos tem variação de conexão e antenas. Apenas os modelos Xbee™ e XBee-Pro™ conversam entre eles e os modelos Xbee 2.5™ só conversam com modelos Xbee 2.5™. Além destas versões, a MaxStream criou uma versão do módulo XBee de fácil aplicação a redes *Mesh*, sendo este o módulo XBee Série 2. Nesse trabalho foram utilizados módulos XBee-Pro™ Série 2.

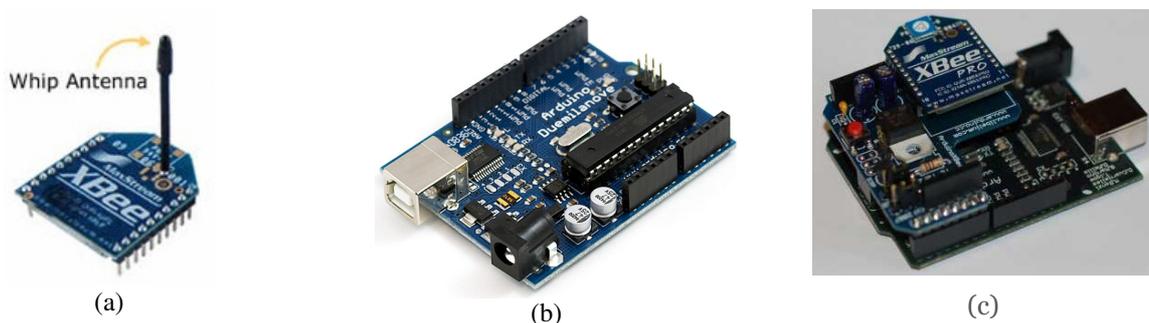


Figura 2 – Dispositivos utilizados no projeto. (a) Módulo XBee. Fonte: Messias et al., 2008. (b) Arduino, 2009. Fonte: Wikipédia, 2001. (c) Shield ZigBee™ para Arduino. Fonte: Wikipédia, 2011.

### Arduino e Shield XBee para Arduino

Arduino é uma plataforma de hardware livre, projetada com um microcontrolador Atmel AVR de placa única, com suporte de entrada/saída embutido e uma linguagem de programação padrão, essencialmente C/C++. Destina-se principalmente

para projetos em que não se tem disponibilidade a controladores mais sofisticados e de ferramentas mais complicadas, mas em que se pretende desenvolver ferramentas de baixo custo, flexíveis e de fácil utilização (Wikipédia, 2011). O controle é feito através de instruções programadas e utilizando hardware conectado diretamente ao computador.

Um dos modelos disponíveis é o Arduino 2009 (Figura 2 (b)) o qual utiliza processador ATmega168 (ATmega328 para a versão mais nova) com clock de 16 MHz, sendo energizado diretamente pela USB (*Universal Serial Bus*) do computador. Utiliza tensão de operação de 5V, alimentação recomendada de 7 a 12 V mas opera com tensões limites de 6 a 20 V. Apresenta 16 pinos para entradas e saídas digitais (I/O), com corrente de saída por pino de 40 mA. Seis destes I/O's podem ser utilizados como saída PWM (*Pulse Width Modulation*). Adicionalmente disponibiliza 6 entradas analógicas e fonte CC (corrente contínua) de saída de 3.3 V com capacidade de corrente de 50 mA, permitindo acionar dispositivos externos. Apresenta memória de dados SRAM (*Static Random Access Memory*) de 1 KB ou 2 KB (respectivamente para os módulos com ATmega168 ou ATmega328) e memória EEPROM (*Electrically Erasable Programmable Read Only Memory*) de 512 bytes ou 1 KB (respectivamente para os módulos com ATmega168 ou ATmega328). A memória de programa é do tipo Flash com capacidade de 16 KB ou 32 KB (respectivamente para os módulos com ATmega168 ou ATmega328), sendo que 2 KB são utilizados por *bootloader*. *Bootloader* é um aplicativo que permite a comunicação com o software no PC para realizar o processo de transferência de dados para gravação de novo programa.

Uma de suas grandes vantagens é em relação à disponibilidade de *shields* (escudos em inglês) que são placas de circuito impresso normalmente fixados no topo do aparelho, através de uma conexão alimentada por pinos-conectores. Alguns exemplos de módulos acopladores (*shields*) são: Ethernet, XBee, InputShield, TouchShield dentre outras. Por ser de plataforma livre, é possível criar-se o próprio “hardware Arduino” sem muitos problemas, já que na internet é possível encontrar diversos tutoriais extremamente completos e bastante didáticos.

A comunicação entre módulos XBee e computadores ou entre módulos XBee e microcontroladores é tipicamente realizada utilizando kits didáticos. O kit didático utilizado nesse trabalho foi o *shield* de XBee para Arduino (Figura 2 (c)) que permite a comunicação direta entre o módulo ZigBee™ e um microcontrolador, no caso o Arduino 2009, o que facilita o desenvolvimento de aplicações práticas pois o Arduino se comunica diretamente com o XBee utilizando uma porta serial.

### Software XCTU

Para facilitar o desenvolvimento, a MaxStream disponibiliza um programa chamado XCTU. Este pode ser obtido gratuitamente na página do fabricante na internet. O programa XCTU é usado para configurar todos os parâmetros do módulo XBee de modo iterativo e simplificado. Pode-se usá-lo também para realizar atualizações de *firmware*. Para estas tarefas, é necessário conectar o módulo XBee na porta serial ou USB de qualquer computador (PC ou *notebook*).

Os módulos XBee™ já vêm de fábrica com configuração padrão para conversarem entre si. No entanto, é possível fazer uma série de modificações. Por exemplo, pode-se alterar a taxa de transferência, colocar senha, alterar canal de comunicação dentre outras configurações.

### IDE Arduino

A programação do Arduino pode ser realizada utilizando o Arduino IDE (*Integrated Development Environment*), um aplicativo em Java que permite desenvolver programas dedicados para aplicações com Arduino, fazer a compilação e gravação. Inclui editor de códigos e interface que permitir compilar e carregar programas para a placa com um único

clique. Tem uma biblioteca chamada *Wiring* que inclui vários aplicativos prontos os quais permitem criar com rapidez muitas operações de entrada e saída. Estes recursos facilitam o trabalho dos projetistas, mesmo amadores.

## Resultados e Discussão

Alguns dos estudos desenvolvidos foram a elaboração de procedimentos para configuração de módulos XBee utilizando software XCTU e diversos kits didáticos, a elaboração de um tutorial utilizando módulos XBee com Arduino, medições de distância utilizando módulos com tecnologia XBee e a aplicação do método dos mínimos quadrados e método dos mínimos quadrados ponderados para minimização de erros nas medições de forma a levantar a curva característica de potência em dBm x distância em m. Para medição de distância, utiliza-se o recurso chamado RSSI (*Receive Signal Strength Indicator*) que via protocolo AT retorna o valor de potência em dBm na forma de pulso PWM do último pacote recebido (pino 6 do módulo XBee). Aproveitando esse recurso a proposta de mapeamento sugerida é criar uma rede de módulos ZigBee™ com a topologia apresentada na Figura 3, realizando medias da largura de pulso associada a cada pacote recebido.

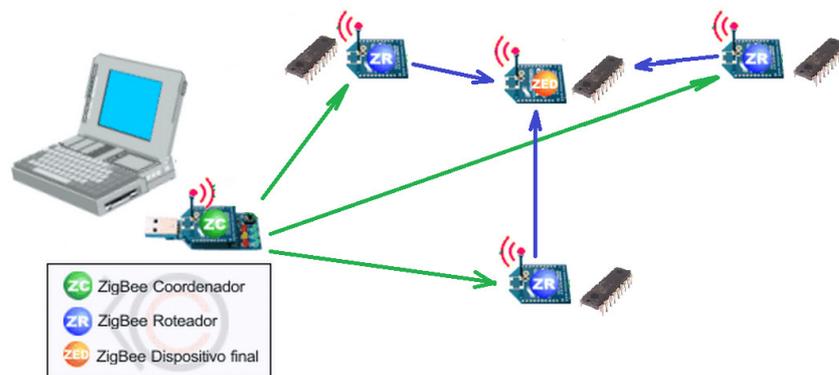


Figura 3 – Topologia rede ZigBee™. Fonte: Messias et al., 2008.

O dispositivo final (*end device*) será nosso módulo remoto a ser monitorado, as antenas (*routers*) serão responsáveis pela localização do dispositivo final e o coordenador será conectado a um computador pessoal que irá receber todas as informações vindas de antenas fixas com os valores de potência na forma de pulso PWM para localização do dispositivo final.

### Minimização de Erros em Medições de Distância

**O Método dos Mínimos Quadrados.** As medições de distâncias com os módulos ZigBee™ apresentam imprecisões muito grandes e consideráveis erros nas medições de distâncias além de comportamento não linear dado pela equação (Hayt et al., 2008):

$$P_d = P_0 - 10 \times n \times \log_{10}(f) - 10 \times n \times \log_{10}(d) + 30 \times n - 32,44 \quad (1)$$

onde:  $f$  é a frequência de operação dos módulos ZigBee™ (2,4 GHz);  $n$  é o fator de correção para a atenuação do sinal transmitido; para cada ambiente existe um valor pré-determinado para  $n$ , sendo que em área aberta  $n = 2.0$ ;  $P_0$  é a intensidade do sinal do módulo remoto, em dBm; este valor pode ser obtido medindo o valor em dBm disponível no pino RSSI do módulo ZigBee™ a distância zero da antena;  $P_d$  é a intensidade do sinal do módulo remoto a uma distância  $d$  da antena; este valor pode ser medido em dBm no pino RSSI com a variação da

distância  $d$  em relação à antena. Contudo as medições sofrem consideráveis interferências dependendo do ambiente em que o sistema está inserido. A Figura 4 (a) representa dados reais obtidos através das medições para variações nas distâncias, onde se observa a grande variabilidade resultante da imprecisão do módulo ZigBee™.

Os dados foram investigados aplicando a metodologia do método dos mínimos quadrados. Para isso utilizou-se uma aproximação para a equação (1) a qual foi reescrita como:

$$P_d = a + b \log_{10}(d) \quad (2)$$

onde:  $a = P_0 - 10 \times n \times \log_{10}(f) + 30 \times n - 32,44$ ;  $b = -10 \times n$ . Observa-se que o termo  $a$  não depende da distância  $d$  enquanto o termo  $b$  claramente depende desse parâmetro. Reescrevendo a equação (2) novamente:

$$P_d = \begin{bmatrix} b & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \log_{10}(d) \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \log_{10}(d) & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} b \\ a \end{bmatrix} = D\hat{W} \quad (3)$$

A estratégia a ser adotada consiste em medir valores de  $P_d$  e  $D$  e utilizar o método dos mínimos quadrados para estimar  $\hat{W}$  por meio da equação (4).

$$\hat{W} = (D^T D)^{-1} D^{-1} P_d \quad (4)$$

Os valores obtidos pela aplicação do algoritmo foram:  $a = 4069,684$  e  $b = -680,978$ . Utilizando esses valores foi traçada a curva estimada da Figura 4 (b) onde os valores das distâncias foram calculadas a partir da equação (2), mas assumindo valores medidos em  $P_d$  para calcular as distâncias.

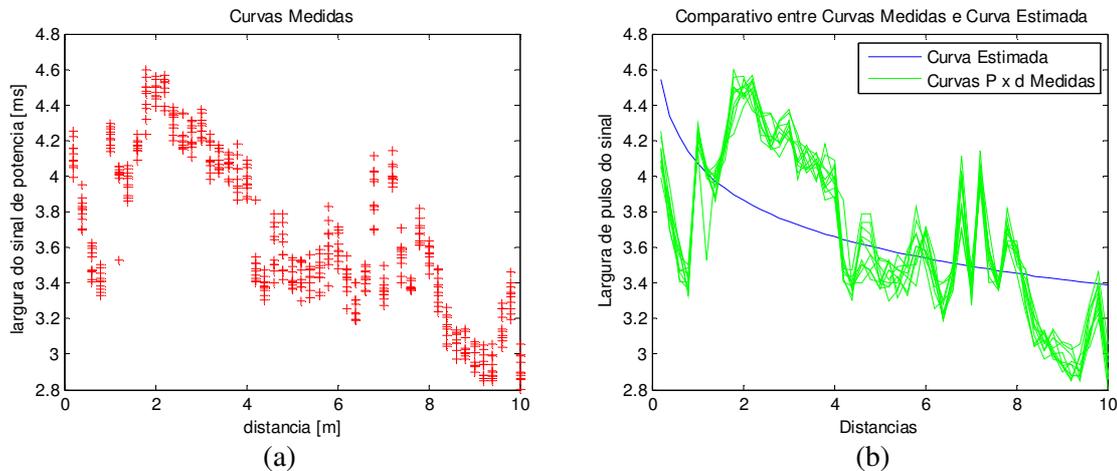


Figura 4 – (a) Medições da largura de pulso obtidas em função da variação da distância entre os módulos fixo e móvel. - (b) Comparativo entre medições, curva característica e curva estimada pelo algoritmo do método dos mínimos quadrados.

Os resultados da Figura 4 (b) mostram que, fazendo uma análise ponto a ponto observa-se que, para medições de largura de pulso do sinal PWM (que depende da potência em dBm), os valores que seriam produzidos em  $d$  apresentariam erros consideráveis em relação aos valores medidos. Isso pode ser facilmente justificado pelo fato de termos assumido parâmetros  $a$  e  $b$  constantes. Nota-se a dependência de  $a$  e  $b$  em relação ao parâmetro  $n$ , o fator de correção para atenuação, o qual é altamente impreciso e variável e dependente da distância e dos obstáculos nesse percurso. Portanto a incerteza em relação à interferência eletromagnética resulta em valores imprecisos na curva estimada. Adicionalmente, em aplicações onde se utilizam sensores para medir variáveis analógicas, tipicamente deseja-se determinar a relação de proporcionalidade do sensor em tempo real, ou seja, o sistema precisa

minimizar os erros nas medições imediatamente. Nestes casos, o cálculo dos parâmetros utilizando o método dos mínimos quadrados com o objetivo de minimizar os erros nas medições não pode ser realizado posteriormente após grande número de medições, pois tipicamente os valores medidos são utilizados em sistemas de controle que precisam responder com relativa velocidade e precisão. Esses dois aspectos justificam a aplicação de um algoritmo para determinar a curva característica com parâmetros  $a$  e  $b$  variáveis e calculados em cada medição.

**O Método dos Mínimos Quadrados Ponderados** consiste num algoritmo iterativo, incluindo filtro de Kalman para produzir estimativas dos valores reais das grandezas predizendo um valor, estimando a incerteza do valor predito e calculando uma média ponderada entre o valor predito e o valor medido (Iserman, 1992), (Aguirre, 2004). Suas principais características são a utilização de valores iniciais para os parâmetros e a determinação dos erros *on-line* para recalculer os parâmetros do sistema, por exemplo, a relação de proporcionalidade que produz a curva característica de um sensor.

Para obter a convergência, utiliza-se uma matriz de ganho (ganho de Kalman) que é ajustada automaticamente no algoritmo para produzir a minimização dos erros. Adicionalmente o algoritmo permite realizar uma ponderação entre os valores dos parâmetros calculados anteriormente e aqueles calculados na amostragem atual. Isto é realizado pelo projetista ajustando os parâmetros  $\gamma$  (fator de esquecimento) e a variável auxiliar  $\alpha$ , onde  $\gamma = 1 - \alpha$ .

Na estimação de parâmetros baseada no método dos mínimos quadrados ponderados é necessário fornecer uma capacidade de aplicação de diferentes pesos dependendo das observações, ou seja, os pesos são diferentes para cada medição. Pelo ajuste do fator de esquecimento pode-se dar maior importância (maior grau de ponderação) às últimas medições, já que estas contêm informação mais atualizada e devem produzir maior influência na estimação. Isto é imposto na prática ajustando  $0.9 < \gamma \leq 1$ . Por outro lado, se as medições apresentam considerável incerteza, deve-se dar maior importância aos valores iniciais e obtidos anteriormente, onde os erros já foram minimizados. A estrutura do algoritmo de estimação é apresentada a seguir.

### Montagem do Algoritmo

**1** – Escolha uma matriz de ponderação diagonal  $P(k)$ , conhecida como matriz de covariância, de ordem  $m \times m$ , onde  $m$  é o número de variáveis da representação matemática do sistema cujos parâmetros devem ser estimados. A matriz de covariância reflete o grau de incerteza no conhecimento dos parâmetros estimados. Portanto, se há algum conhecimento a respeito dos valores esperados na estimação, utiliza-se uma matriz  $P(k)$  diagonal com parâmetros ajustados em valores de baixa magnitude. Contudo, se os parâmetros a serem estimados são completamente desconhecidos, a matriz de covariância deve apresentar termos com elevados valores na diagonal principal. Assim, o método permitirá calcular a cada amostra medida os valores correspondentes de  $a(k)$  e  $b(k)$  que compõem o vetor de estimação de parâmetros, onde esses parâmetros estão descritos nas equações:

$$P_d(k) = a(k) + b(k) \log_{10}(d(k)) \quad (5)$$

$$P_d(k) = \begin{bmatrix} b(k) & a(k) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \log_{10}(d(k)) \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \log_{10}(d(k)) & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} b(k) \\ a(k) \end{bmatrix} = D(k) \hat{W}(k) \quad (6)$$

**2** – Ajustar um fator de esquecimento  $\gamma$  e variável auxiliar  $\alpha$  tal que:

$$0 < \gamma \leq 1 \quad \alpha = 1 - \gamma$$

**3** – Medir os valores referentes à saída e formar o vetor  $P_d(k)$ . Paralelamente medir as distâncias obtendo o vetor  $D(k)$ .

4 – Assumir valores iniciais para  $\hat{W}(k+1)$  e  $\hat{W}(k)$ . Se possível adote valores próximos àqueles esperados, por exemplo, escolhendo um ponto de operação conhecido. Repita as operações listadas de 5 a 9 para cada passo de forma a determinar os parâmetros  $W(k)$  para cada amostra  $k$ .

5 – Atualizar:  $\hat{W}(k)$ :  $\hat{W}(k) = \hat{W}(k+1)$ .

6 – Calcular o ganho de Kalman do sistema através de:

$$K(k) = \frac{P(k)}{\gamma} D(k) \left( \frac{1}{\alpha} + D^T(k) \frac{P(k)}{\gamma} D(k) \right)$$

7 – Estimar o novo valor de  $\hat{W}(k+1)$ , a partir de valores  $D(k)$  e  $Y(k)$  coletados:

$$\hat{W}(k+1) = \hat{W}(k) + K(k) \left( Y(k) - D^T(k) \hat{W}(k) \right)$$

8 – Calcular a nova matriz de ponderação por:

$$P(k) = \frac{1}{\gamma} \left( 1 - K(k) D^T(k) \right) P(k)$$

9 – Atualizar:

$$Y(k) = Y(k+1); U(k) = U(k+1); D(k) = U(k+1)$$

Como resultados, foram obtidos os parâmetros  $a(k)$  e  $b(k)$  estimados como mostrado na Figura 5 (a). Utilizando os parâmetros estimados foi obtida a curva característica da Figura 5 (b), que ilustra a eficiência na estimação desses parâmetros, pois, comparando com os resultados medidos (pontos) observa-se que a estimação aparentemente minimiza os erros de medição. Considerando que na aplicação as distâncias devem ser determinadas a partir das medições da largura de pulso associada a potencia do sinal recebido pretende-se avaliar a precisão da metodologia desenvolvida para determinar essas distâncias. Foram considerados os valores médios de medidas em ms com o objetivo de determinar as respectivas distâncias associadas.

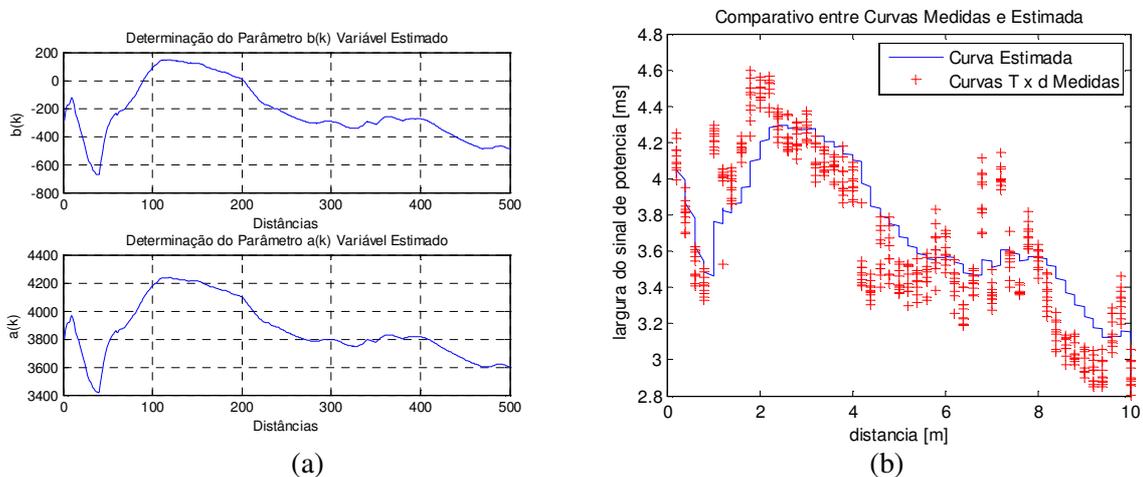


Figura 5 – Método dos Mínimos Quadrados Ponderados. (a) Parâmetros estimados  $a(k)$  e  $b(k)$ . (b) Comparativo entre valores  $P_{xd}$  medidos e curva estimada com parâmetros  $a(k)$  e  $b(k)$  variáveis.

Para realizar essa análise observou-se que na curva estimada da Figura 5 (b), um mesmo valor de ms pode estar associado a diferentes distâncias. Considerando que independente da velocidade de movimentação do veículo, em uma pequena variação na distância é possível fazer várias medições e mesmo considerando que há várias imprecisões na medição, não podemos considerar resultados que apresentem, após a estimação da distância, variações de distância consideravelmente altas para um pequeno intervalo de tempo. Com essas considerações desenvolveu-se um algoritmo baseado em vizinhança no qual a

variação na distância entre duas amostras consecutivas não pode exceder 0,4 m. A Figura 6 apresenta em gráfico de barras os resultados reais medidos e os obtidos pelo algoritmo de detecção na vizinhança baseado na estimação de parâmetros pelo método dos mínimos quadrados ponderados. Para analisar os resultados considere a movimentação de um veículo percorrendo linearmente uma trajetória com distâncias de 0,2 a 10 m em relação à posição original (barras da Série 2 nos gráficos). As barras da Série 1 ilustram as distâncias detectadas pelo algoritmo. Observa-se que embora existam erros na estimação esses erros podem ser considerados relativamente reduzidos se comparado com aqueles que seriam produzidos caso utilizássemos valores obtidos diretamente da equação (1) ou mesmo utilizando o algoritmo do método dos mínimos quadrados. A precisão pode ser muito maior se considerarmos grande número de medições ao longo do tempo, distâncias pequenas entre os pontos de medição para cada amostra.

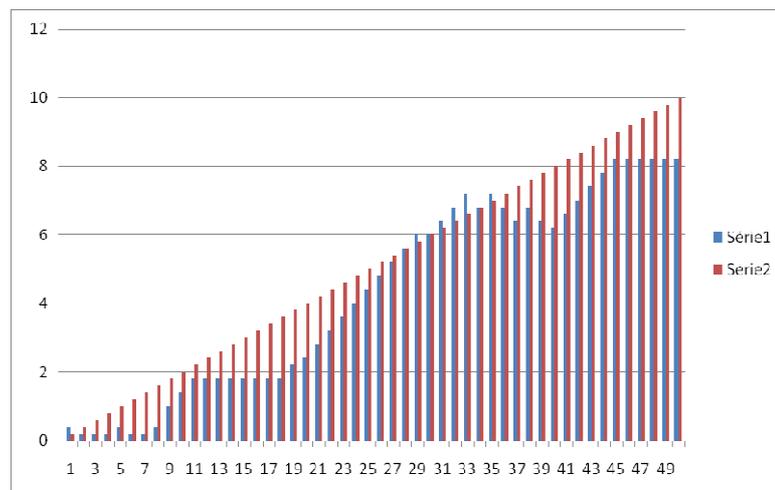


Figura 6 – Distâncias medidas e calculadas pelo algoritmo de detecção na vizinhança e utilizando parâmetros estimados pelo método dos mínimos quadrados ponderados

## Conclusões

O trabalho apresentou o desenvolvimento de experimentos e procedimentos padronizados visando simplificar e agilizar projetos que empregam módulos com tecnologia ZigBee™ em aplicações de comunicação sem fio (*wireless*) e a aplicação de metodologias para minimização de erros produzidos por interferências e ruídos em sinais medidos por sensores. A abordagem baseada no método dos mínimos quadrados e no método dos mínimos quadrados ponderados é descrita e aplicada na obtenção de curvas características de módulos XBee, com enfoque principalmente na aplicação de módulos com tecnologia ZigBee™ na medição da distância entre o sensor e pontos referenciais fixos (antenas).

A determinação da distância utilizando o método dos mínimos quadrados não apresentou resultados satisfatórios, pois os parâmetros do sistema apresentam variações consideráveis dependendo das características do ambiente em que o dispositivo está sendo utilizado. Fatores como presença de obstáculos e interferências eletromagnéticas influenciam nas medições resultando em um modelo com parâmetros variáveis, que não podem ser estimados pelo método dos mínimos quadrados convencional.

A metodologia baseada no método dos mínimos quadrados ponderados, incluindo algoritmo de detecção de vizinhança apresentou-se como uma estratégia interessante para minimizar as interferências nas medições de distância em aplicações utilizando módulos XBee, pois considera a minimização de erros e a estimação de parâmetros para cada amostra coletada, resultando num algoritmo eficiente que permite determinar distâncias com relativa precisão.

Um método baseado em observador de estados e Filtro de Kalman foi também investigado com o objetivo de minimizar ruídos aditivos presentes em sinais medidos por um sensor hipotético. As abordagens mostram resultados de simulação promissores o que viabiliza sua utilização em algoritmos e ferramentas computacionais visando a efetiva aplicação de módulos com tecnologia ZigBee™ em aplicações de medição de distância. Contudo os resultados obtidos ainda precisam ser melhor analisados e revisados e esses serão apresentados em trabalhos posteriores.

É importante destacar que as metodologias descritas podem também ser utilizadas em diversas outras aplicações de instrumentação e controle, onde o objetivo é minimizar interferências e ruídos em sinais medidos por sensores, bem como deduzir, com relativa precisão, a curva característica destes dispositivos.

## Referências Bibliográficas

- Aguirre, L.A.; (2004) *Introdução à Identificação de Sistemas*, Editora UFMG, 2<sup>nd</sup> Ed., Belo Horizonte, MG.
- Assis, W.O.; Castro, C.O.M.; Coelho, A.D. (2011) *Uma Abordagem Simplificada para a Utilização do Método dos Mínimos Quadrados em Aplicações de Identificação de Parâmetros de Sistemas*, 15<sup>o</sup> Congresso Internacional de Automação, Sistemas e Instrumentação, São Paulo, 2011.
- Gabriel, E.V.B.; Ferracioli, L.C.; Palhares, L.B. (2010) *Etiqueta Eletrônica para Gôndolas*, Monografia de Conclusão de Curso de Graduação em Engenharia Elétrica, Instituto Mauá de Tecnologia, São Caetano do Sul, SP.
- Hayt, W.H.; Buck, J.A. (2008) *Eletromagnetismo*. São Paulo, SP: McGraw-Hill.
- Iserman, R. (1992) *Digital Control Systems*, Vol. II, Springer-Verlag, Berlin.
- Macedo, B.M.; Filho, M.P.M.; Garcia, R.M.; Garcia, V. (2009) *Aplicação de Rede Mesh em Sistema de Sensoriamento Remoto*, Monografia de Conclusão de Curso de Graduação em Engenharia Elétrica, Instituto Mauá de Tecnologia, São Caetano do Sul, SP.
- Messias, A.R. (2008) *Controle e Aquisição de Dados Via XBee/ZigBee® (IEEE 802.15.4)*, Disponível em: <http://www.rogercom.com/ZigBee/ZigBee.htm> Acesso em 02/07/2011.
- Patané, E. J. *Implementação de Controle de Velocidade em Malha Fechada para Motores de Corrente Contínua Utilizando Sistema de Aquisição de Dados*, Dissertação de Mestrado em Engenharia de Processos Químicos e Bioquímicos, Instituto Mauá de Tecnologia, 2008.
- Santos, F.A.S.; Silva, M.A.C.; Amoroso, P.R.; Nagoya, T.T. (2010) *Sistema de Localização de Pessoas Aplicando Tecnologia Sem Fio*, Monografia de Conclusão de Curso de Graduação em Engenharia Elétrica, Instituto Mauá de Tecnologia, São Caetano do Sul, SP.
- Wikipédia, A enciclopédia livre. *Arduino*, 2011. Disponível em <http://pt.wikipedia.org/wiki/Arduino>>. Acesso em: 12/10/2011.