

# Eficiência dos Modelos de Transmissão de Dados do Padrão ZigBee - IEEE 802.15.4 Numa Rede de Sensores Sem Fio

Jorge R. Beingolea<sup>1</sup>, Sergio T. Kofuji<sup>1</sup>, Juliana L. Cardoso<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Laboratório de Sistemas Integráveis - Universidade de São Paulo (USP)  
CEP: 05508-900 – São Paulo – SP – Brasil

{jorge,kofuji}@pad.lsi.usp.br, jcardoso@lsi.usp.br

**Resumo.** Neste trabalho avaliaram-se os modelos de Transmissão ao Coordenador Beacon-Enabled e Transmissão a partir do Coordenador Beacon-Disabled propostos na norma IEEE 802.15.4 e adotados pelas RSSF (Redes de Sensores Sem Fio) sobre o padrão de comunicações ZigBee. A avaliação é feita em um ambiente interno (Indoor) considerando relações de variações de distância e perda de pacotes, entre outras. Foram feitas configurações e medições em cenários reais e a programação dos nós sensores foi feita através do Sistema Operacional TinyOs 2.0. Avaliou-se como estes modelos de transmissão afetam o desempenho da RSSF tendo como métricas a vazão de dados, taxa de perda de pacotes e consumo de energia.

## 1. Introdução

Um dos maiores desafios nas redes *ad-hoc* e nas redes de sensores sem fio é desenvolver técnicas de comunicação que possuam baixas taxas de consumo de energia, uma vez que este recurso é sempre limitado para as arquiteturas de redes existentes. Como resposta a esta necessidade, verifica-se a aparição de novos padrões de comunicação que procuram resolver tais limitações com baixas taxas de transmissão de dados em frequências altas, como é o caso do padrão ZigBee [Zigbee 2005] baseado na norma IEEE 802.15.4 [802.15 2006], que descreve as seguintes camadas: camada física - PHY (*Physical*) para LR-WPAN (*Low-Rate Wireless Personal Area Network*) e a camada de enlace MAC (*Medium Access Control*). O padrão ZigBee-802.15.4 propõe resolver as limitações existentes nas redes sem fio através de técnicas de gerenciamento de energia e modulação em quadratura de fase O-QPSK (*offset quadrature phase-shift keying*) que permite uma maior taxa de transmissão de pacotes e maiores distâncias de cobertura através de topologias Estrela (*star*) e Malha (*mesh*). O padrão propõe também o uso de modelos de comunicação eficientes, baseados em *Beacon* e CSMA/CA e protocolos de roteamento que permitam maximizar as características das redes sem fio. Uma grande quantidade de estudos sobre as características da norma 802.15.4 tem sido realizada ultimamente. Em [Misic 2004] o desempenho de várias características do 802.15.4 são avaliadas com base em simulações no NS2. Em [Neugebauer 2005], onde um novo algoritmo para a adaptação da ordem do beacon é empregado em uma topologia de rede estrela, avaliações são feitas baseadas em simulações. Timmons e Scalon [Timmons and Scanlon 2004] apresentam análises matemáticas do desempenho do 802.15.4 em relação às redes de sensores para aplicações médicas. Lee [LEE 2005] realizou uma série de análises de desempenho através de vários experimentos práticos, incluindo os efeitos de: 1) transmissão direta e indireta; 2) mecanismos CSMA-CA; 3) modo *beacon* habilitado; 4)

tamanho do *payload* de dados (o tamanho do *payload* varia entre 20 bytes até 127 bytes). Embora vários estudos sobre o padrão tenham sido realizados a maioria são baseados em simulações ou análise matemática. Faz-se necessária a realização de experimentos em ambientes reais como em [Ferrari 2007] que possam permitir a obtenção de resultados que auxiliem no desenvolvimento de novos hardwares e aplicações para as novas RSSF no padrão Zigbee.

Este estudo dos modelos de transmissão procura estabelecer a eficiência dos mesmos em uma RSSF através da área de cobertura para cada modelo em um ambiente interno. O tamanho do pacote de dados aplicado em nossos experimentos é de 20 bytes devido às restrições de hardware existentes nas RSSF obtendo-se uma vazão menor em relação aos experimentos realizados por [LEE 2005], porém, com um maior índice de eficiência com relação à Taxa de Perda de pacotes e maiores distâncias de cobertura para o modelo *Beacon-Enabled*. Com o objetivo de conhecer o impacto destes modelos no consumo de energia dos nós foi adotado o sistema utilizado por Raskovic [Raskovic 2004], no entanto, a interface de leitura dos dados (Multímetro e Osciloscópio) é substituída por uma DAQ-PXI 6071E com uma maior capacidade de amostragem, sendo, que, o tratamento dos dados é realizado através de um programa em LabView.

Este artigo está organizado da seguinte maneira: inicialmente é apresentada a norma IEEE 802.15.4 com seus modelos de transmissão de dados e a aplicação desse modelo diretamente às redes de sensores sem fio (RSSF) através do padrão ZigBee. Em seguida, são detalhados os procedimentos para a realização do teste em cenário real e a forma de medição do desempenho. Finalmente, são apresentados resultados em relação à vazão de dados, taxa de perda de pacotes e consumo de energia que são comentados na conclusão.

## **1.1. Modelos de Transmissão de Dados IEEE 802.15.4**

O 802.15.4 especifica duas formas ou modelos de transmissão de dados na camada MAC: Transmissão ao Coordenador, que pode ser sem *beacon* (*Beacon-Disabled*) e com *beacon* (*Beacon-Enabled*), e a Transmissão desde o Coordenador, que também pode ser com *beacon* (*Beacon-Enabled*) e sem *beacon* (*Beacon-Disabled*).

### **1.1.1. Transmissão ao Coordenador**

Esta transação de dados é o mecanismo para transferir de um nó para um dispositivo coordenador na rede. Numa rede com *Beacon-Enabled*, quando um dispositivo deseja transferir dados a um coordenador, escuta primeiro o *beacon na rede*, como é mostrado na Figura 1(a). Quando o *beacon* é encontrado o nó sincroniza a estrutura de *superframe*. No momento apropriado o dispositivo transmite os dados (*Frame*) usando CSMA/CA *slotted* ao coordenador. O coordenador reconhece a transmissão bem sucedida de dados transmitindo um pacote de confirmação (*acknowledgment*). Em uma rede com *Beacon-Disabled*, quando um dispositivo deseja transferir dados, transmite simplesmente seu pacote de dados usando CSMA/CA ao coordenador [LEE 2005] [802.15 2006]. O coordenador reconhece a recepção bem sucedida dos dados transmitindo um ACK de reconhecimento, como mostrado na Figura 1(b).

### 1.1.2. Transmissão a partir do Coordenador

É o mecanismo que permite a transferência de dados de um nó coordenador para um nó da rede. Numa rede com *beacon* quando o coordenador deseja transmitir dados para um nó na rede é indicado num *beacon* que existe uma mensagem de dados pendente para esse nó. O nó escuta o canal de forma periódica para ver se existe um *beacon* apontando uma mensagem para ele, caso ela exista transmite um comando MAC que pede os dados usando *CSMA/CA slotted*. O coordenador reconhece a recepção bem sucedida do pedido dos dados transmitindo um *frame* de confirmação (*acknowledgment*) [LEE 2005]. O pacote de dados pendente é transmitido usando *CSMA/CA slotted*. Finalmente, o nó reconhece a recepção bem sucedida dos dados transmitindo um ACK de confirmação de recebimento do pacote. Esta sequência é representada na Figura 1(c). Para o caso de uma rede *Beacon-Disabled* 1(d), quando um coordenador deseja transferir dados para um dispositivo na rede, primeiro armazena os dados até que o dispositivo apropriado faça o contato e os peça.

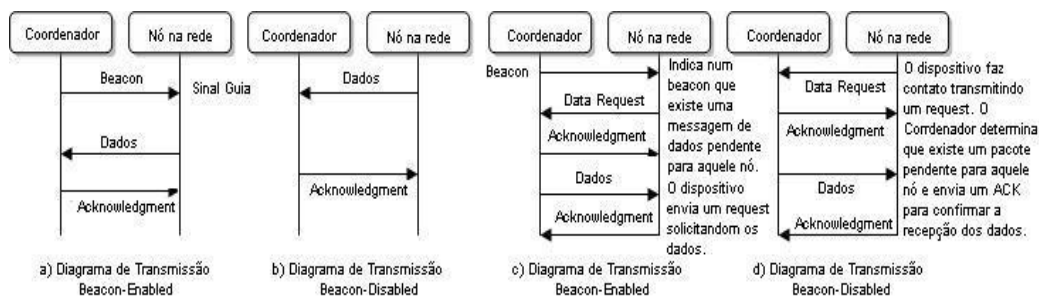


Figura 1. Transmissão ao Coordenador (a)(b) e a partir do Coordenador (c)(d).

### 1.2. Transmissão *Beacon-Enabled* na RSSF - ZigBee

Nas redes Zigbee não são mencionados de forma específica os modelos de transmissão do 802.15.4 e sim as transferências com *beacon* e sem *beacon*. No entanto, dentro das RSSF estas apresentam um processo mais simples devido às restrições computacionais destes dispositivos;

Na transferência de dados com *Beacon-Enabled* o nó que deseja transmitir dados ao nó coordenador escuta o *beacon* na rede. Quando o *beacon* é achado o nó transmite seu pacote de dados usando *CSMA-CA*. O *beacon* liberado pelo coordenador tem também por objetivo dinamizar e disponibilizar o canal para uma nova sequência de transmissão.



Figura 2. Beacon transmitido pelo coordenador segundo intervalos de tempo.

Na Figura 2 é mostrada uma sequência de transmissão de pacotes de quatro dispositivos comuns na rede e um nó coordenador especificado com ID (00). Observa-se que o envio de um *beacon* pelo nó coordenador determina o início de uma nova sequência de transmissão para os nós na rede (ver Figura 2 coluna do ID do nó, nós 7, 6, 9, 8).

### 1.3. Transmissão *Beacon-Disabled* na RSSF - ZigBee

Na transferência de dados com *Beacon-Disabled* o nó que deseja enviá-los transmite simplesmente seu pacote de dados usando CSMA/CA ao coordenador. O coordenador reconhece a recepção bem sucedida dos dados, mas, não transmite ACK de confirmação, o qual faz com que o nó envie em intervalos de tempo um pedido de confirmação de recebimento (*ACK Request*) da integridade dos dados enviados (Figura 3).

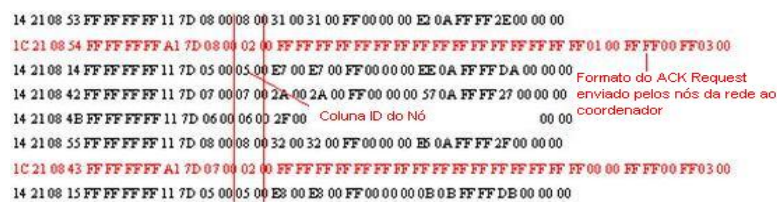


Figura 3. ACK enviados ao coordenador pelos nós da rede.

O envio excessivo do *ACK request* demanda um tempo maior de atividade do sistema de rádio e acrescenta o consumo de energia do nó sendo confirmado através dos experimentos de consumo de energia.

## 2. Experimento

### 2.1. Configuração do Cenário e Considerações Iniciais

É muito comum que as simulações em software não repliquem as condições de obtenção de dados de uma situação real, pois, não conseguem capturar os erros que ocorrem na iteração do hardware transmissor sem fio e o ambiente de propagação. Por isso, faz-se evidente a necessidade de maiores contribuições feitas em cenários reais para determinar os fenômenos que possam influenciar negativamente o desempenho da rede. Neste trabalho, é criado um cenário real para a realização dos testes obtendo-se resultados de maior exatidão. Consideraram-se como métricas de desempenho a vazão de dados, taxa de perda de pacotes e consumo de energia. Para a realização dos testes foi montada uma rede baseada no dispositivo TmoteSky [Moteiv 2005] em um ambiente interno de 300m<sup>2</sup>. No percurso da realização dos testes foi criada uma relação entre a variação de distâncias e o modelo de transmissão empregado, medindo finalmente o consumo de corrente pelos nós sensores. A configuração do temporizador para o ciclo de envio de pacotes é de cada 2000ms (*int INITIAL-TIMER-RATE = 2000*). O período de tempo determinado para captura dos log da rede foi de 300s (5 minutos).

### 2.2. Hardware Empregado

O TmoteSky, desenvolvido pela Moteiv Corporation [Moteiv 2005], é a última geração de Motes de Berkeley. Compatível com o Telosb [Crossbow 2005], são motes baseados no padrão ZigBee, com baixo consumo de energia, taxa elevada de transmissão de dados (250Kbps) e aplicações para RSSF, projetadas com tolerância a falhas e de fácil

desenvolvimento. O transmissor RF CC2420 [Chipcon 2006] trabalha na banda ISM de 2.4 GHz, o que permite interoperabilidade com outros dispositivos 802.15.4. O sistema de rádio utiliza a modulação O-QPSK (*offset quadrature phase-shift keying*), um microcontrolador MSP430 de 8MHz da Texas Instruments com 10k RAM e 48k Flash, uma interface de programação e coleta de dados via USB e um sistema de autenticação e encriptação AES 128.

### 2.3. Configuração do Hardware para avaliação

A rede é composta por cinco nós sensores, sendo um nó sensor configurado na base como nó coordenador e outros quatro como dispositivos comuns. Inicialmente todos os nós da rede serão programados com a opção *Beacon-Enabled* e para a segunda avaliação serão programados com a opção *Beacon-Disabled*. Os dispositivos comuns (nós da rede) terão uma variação de distância em relação ao nó coordenador de 20m até 75m.

### 2.4. Ferramenta para análise do consumo de Energia

O consumo de energia de um sistema em teste é determinado normalmente de duas formas: utilizando uma ponta de medição de corrente ou resistor de *shunt*. No primeiro modo são amostrados os valores da fonte e das pontas de corrente, que é tipicamente uma função linear da corrente através do braço (1). No segundo modo, são amostrados os valores da fonte e a tensão no resistor de shunt, que é uma função direta da corrente; o consumo de energia total do sistema em teste pode ser calculado como indicado em (2) [Raskovic 2004]. Como as medidas com as pontas de corrente não são intrusivas os resistores de *shunt* interferem na operação do sistema em teste e não são indicados quando existem grandes variações de corrente.

$$P_{SUT} = V_{SUT}I = V_{Supply} \cdot II = f(V_{CProbe}) \quad (1)$$

$$P_{SUT} = V_{SUT}I = V_{Supply} - V \frac{V_{shunt}}{R_{shunt}} \quad (2)$$

O sistema empregado (baseado no segundo modelo (2)) é um resistor de *shunt* de 10ohm. O valor da tensão foi lido por um cartão de aquisição de dados PXI 6071E da National Instruments. Um Vi (Instrumento Virtual) construído através da linguagem de programação gráfica LabView, controlando o PXI, realiza a coleta e o processamento dos valores lidos (Figura 4).

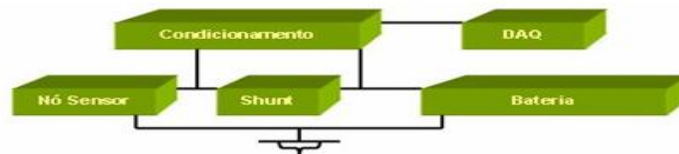


Figura 4. Diagrama de blocos do Sistema de Teste.

### 3. Resultados

Foram consideradas e observadas as métricas de:

#### 1. *Vazão de Dados*

Para a avaliação de vazão de dados (número de bits por segundo que chegam ao coordenador), além das variáveis de tipos de transmissão escolhidas, são determinadas distâncias de 20m até 75m (as distâncias foram determinadas em função do alcance de sinal dos nós sensores com o coordenador). Os gráficos da Figura 5(a) e 5(b) mostram a vazão da rede para os dois tipos de transmissão.

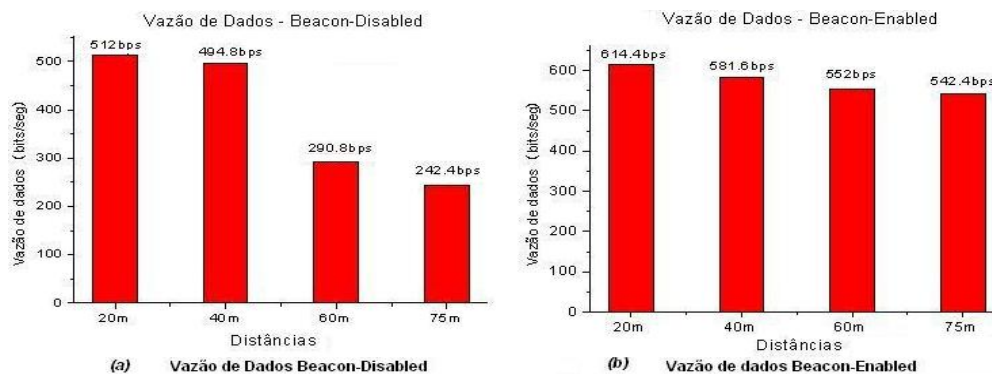


Figura 5. Vazão de Dados Transmissão *Beacon-Disabled* e *Beacon-Enabled*.

Observa-se que existe um melhor comportamento da rede com o modelo *Beacon-Enabled* atingindo taxas de 614bps (aos 20m) e de 542bps (aos 75m). Para o caso de transmissão *Beacon-Disabled* atinge-se taxas de 512bps (20m) e de 242bps (75m). Em relação ao segundo caso existe uma queda inicial de 16,67% (20m) com relação ao primeiro caso. Os valores mais significativos são os obtidos aos 75m existindo uma queda de 55,31% na transmissão com *Beacon-Disabled* em comparação ao primeiro modelo nas mesmas distâncias.

Pode-se concluir que a diferença de vazão está claramente determinada pelo modelo de transmissão empregado existindo uma eficiência de vazão de dados na transmissão com *Beacon-Enabled* sobre o modelo *Beacon-Disabled* em distâncias superiores a 40m.

#### 2. *Taxa de Perda de Pacotes*

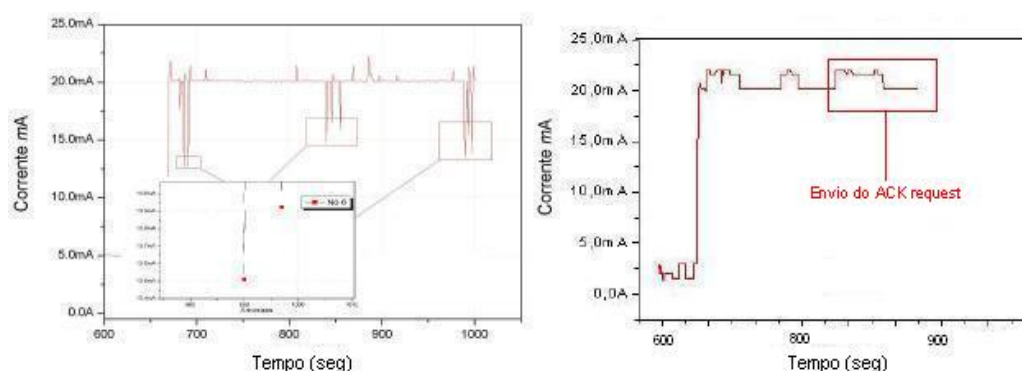
É realizada com o objetivo de determinar um indicador de qualidade em cada modelo. Observa-se na Tabela 1 (*Beacon-Disabled*) que a taxa de perda de pacotes aumenta conforme a variação das distâncias sendo significativa em distâncias superiores aos 40m. Já no caso dos valores mostrados na Tabela 1 (*Beacon-Enabled*) as taxas de perda de pacotes começam a ser significativas a partir dos 75m com relação ao modelo *Beacon-Disabled*, pois, permite ao coordenador o envio do *beacon*, que dinamiza o canal de comunicação com os nós da rede informando constantemente sua posição e alcançando uma maior área de cobertura da rede.

	Beacon-Enabled					Beacon-Disabled				
	P-Tx	P-Rx	%	PLoss	%	P-Tx	P-Rx	%	PLoss	%
20m	768	768	100	0	0,0	640	630	98,4	10	1,6
40m	727	726	99,9	1	0,1	618,5	602,5	97,4	16	2,6
60m	690	689	99,9	1	0,1	363,5	340,5	93,7	23	6,3
75m	678	671	99,0	7	1,0	303	277	91,4	26	8,6

**Tabela 1. Perda de Pacotes *Beacon-Enabled*.**

### 3. Consumo de Energia

Os experimentos de consumo de energia do nó apresentam como resultado um consumo pouco constante para o caso do modelo *Beacon-Enabled*, no qual o consumo do nó varia constantemente entre 17.83mA até 20.6mA, aliás, o estado do sistema de comunicação do nó muda constantemente entre espera (*Idle* 13.5mA) (Figura 6(a)) e dormindo (*Sleep*), este último mantém longos períodos de inatividade do nó, prolongando o tempo de vida do nó em função do baixo consumo de energia. Já no modelo *Beacon-Disabled* observa-se um consumo um pouco mais uniforme com um valor inicial de 20.6mA e máximo de 23mA, de forma que o valor inicial corresponde ao estado de sincronismo do sistema de rádio do nó e o segundo valor é devido ao envio constante dos ACK (Figura 6(b)) ante a ausência de confirmação de recebimento (Ver secção 1.1.4).



**Figura 6. Consumo de Energia *Beacon-Disabled* e *Beacon-Enabled***

## 4. Conclusões

O objetivo deste trabalho foi apresentar uma análise de desempenho dos modelos de transmissão do 802.15.4 para uma RSSF sobre o padrão ZigBee.

Os experimentos dos modelos, *Beacon-Enabled* e *Beacon-Disabled* realizados através da variação de distâncias, permitiu determinar a cobertura máxima de uma rede implementada sobre estes modelos. Ao mesmo tempo, o sistema utilizado para a análise de consumo de energia permitiu evidenciar o impacto destes modelos sobre a fonte de energia dos nós.



Os resultados dos experimentos apresentam uma clara eficiência do modelo *Beacon-Enabled* com relação à vazão e consumo de energia da rede quando comparado ao modelo *Beacon-Disabled* fazendo deste modelo como ideal para diferentes ambientes e aplicações. No entanto, o modelo *Beacon-Disabled* pode ser eficiente sobre uma topologia estrela para aplicações de RSSF, onde a distância entre os nós é menor e o consumo de energia não é um fator determinante no funcionamento da rede (por exemplo, em ambientes fechados na qual a fonte de alimentação pode ser fixa).

## Referências

- 802.15 (2006). Ieee institute of electrical and electronics engineers. ieee 802.15.4- wireless médium access control (mac) and physical layer (phy), specifications for low-rate wireless personal area networks (lr-wpans). pages 1 – 679. Disponível em: <http://www.IEEE.org>. Acesso em: agosto de 2006.
- Chipcon (2006). Chipcon datasheet radio cc2420 rf transceiver: Disponível em: <http://www.chipcon.com>. acesso em: 2006.
- Crossbow (2005). Crossbow wireless sensor network. data sheet telosb mote research: Disponível em: <http://www.xbow.com>. acesso em: 2005.
- Ferrari, G.; Medagliani, P. D. P. S. M. M. (2007). Wireless sensor networks: Performance analysis in indoor scenarios. *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, (ID 81864):1–14.
- LEE, J. (2005.). An experiment on performance study of ieee 802.15.4 wireless networks. *IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation*., pages 19–22.
- Misic, J. V.; Misic, V. S. S. (2004). Performance of ieee 802.15.4 beacon enabled pan with uplink transmissions in non- saturation mode. *First International Conference on Broadband Networks (BROADNETS'04)*., pages 416–425.
- Moteiv (2005). Moteiv corporation. website: Disponível em: <http://www.moteiv.com/products/docs/tmote-sky-datasheet.pdf>. acesso em: Fevereiro 2006.
- Neugebauer, M.; Plönnigs, J. K. K. (2005). New beacon order adaptation algorithm for ieee 802.15.4 networks. In *Proceedings of the 2nd European Workshop on Wireless Sensor Networks (EWSN05)*. Istanbul 2005.
- Raskovic, D. (2004). *Energy-efficient Hierarchical Processing in the Network of Wireless Intelligent Sensors*. PhD thesis, ECE Dept. University of Alabama.
- Timmons, N. F. and Scanlon, W. (2004). Analysis of the performance of ieee 802.15.4 for medical sensor body area networking. In *Proc. IEEE Int. Conf. Sensor and Ad Hoc Communications and Networks*., pages 16–24. Santa Clara 2004.
- Zigbee (2005). Technical report, Zigbee Alliance. Home Page: Disponível em: <http://www.zigbee.org>. Acesso em: Agosto 2005.