

REDES DE SENSORES SEM FIO EM MONITORAMENTO E CONTROLE

Sergio Torres dos Santos

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DA COORDENAÇÃO DOS PROGRAMAS DE PÓS-GRADUAÇÃO DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM CIÊNCIAS EM ENGENHARIA ELÉTRICA.

Aprovada por:

---

Prof. Aloysio de Castro Pinto Pedroza, Dr.

---

Prof. Luís Henrique Maciel Kosmalski Costa, Dr.

---

Prof. José Ferreira de Rezende, Dr.

---

Prof. Marcelo Gonçalves Rubinstein, D.Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

JUNHO DE 2007

De TORRES DOS SANTOS, SERGIO

Redes de Sensores sem Fio em Monitoramento e Controle [Rio de Janeiro] 2007

XVI, 71 p. 29,7 cm (COPPE/UFRJ, M.Sc., Engenharia Elétrica, 2007)

Dissertação - Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE

1. Sensores sem fio
2. ZigBee
3. Redes LRWPAN

I. COPPE/UFRJ    II. Título (série)

*"Embora ninguém possa voltar atrás e fazer um novo começo, qualquer um pode começar agora e fazer um novo fim." (Chico Xavier)*

# Agradecimentos

Primeiramente a Deus por permitir que este objetivo pudesse ser alcançado.

Aos meus pais Francisco e Marilda que com muito sacrifício permitiram que eu me dedicasse aos estudos ao longo da minha vida estudantil.

À minha primeira professora e saudosa avó Ruth Gauz Torres.

À minha querida esposa Penha pelo amor e carinho, e pela paciência e compreensão durante o período de mestrado.

A todos os professores do GTA pelas lições apreendidas.

Aos professores Aloysio Pedroza e Luís Henrique Kosmalski pela orientação, amizade e confiança.

Aos professores José Rezende e Marcelo Rubinstein pela presença na banca examinadora.

À empresa Petrobras pela oportunidade.

Aos superiores hierárquicos do Centro de Pesquisas da Petrobras, em especial Alessandro Lanzillotta pelo apoio recebido.

A todos os colegas do GTA em especial Laila, Marcel, Fabiana, Henrique, Yuri e Ítalo pela amizade e companherismo.

Resumo da Dissertação apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciências (M.Sc.)

## REDES DE SENSORES SEM FIO EM MONITORAMENTO E CONTROLE

Sergio Torres dos Santos

Junho/2007

Orientadores: Aloysio de Castro Pinto Pedroza  
Luís Henrique Maciel Kosmalski Costa  
Programa: Engenharia Elétrica

Os avanços nas áreas de tecnologias sem fio e microeletrônica permitiram o monitoramento remoto de uma região utilizando uma rede formada por microssensores. Com este desenvolvimento surgiu uma demanda crescente por monitoração e controle sem fio em ambientes industriais e residenciais. Algumas tecnologias já se encontram no mercado, destinadas a este tipo de aplicação e dentre elas destaca-se o padrão ZigBee. Essas aplicações sofrem restrições em seu desempenho devido à interferência interna entre os nós. Este trabalho mostra esta influência, através da vazão em diferentes taxas e quantidade de nós, mostrando condições que devem ser respeitadas e evitadas em um cenário de automação e controle, em que se exige mais confiabilidade que alta taxa de dados. Este estudo pode servir de base não só para outros trabalhos com redes de sensores ZigBee, mas principalmente para projetistas na criação de redes ZigBee, considerando aspectos como: cenário, número de nós, vazão e taxa de entrega de dados.

Abstract of Dissertation presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (M.Sc.)

## WIRELESS SENSOR NETWORKS IN MONITORING AND CONTROL

Sergio Torres dos Santos

June/2007

Advisors: Aloysio de Castro Pinto Pedroza  
Luís Henrique Maciel Kosmalski Costa

Department: Electrical Engineering

The advances in wireless technologies and microelectronic have enabled interesting new applications for wireless devices. With this development it appeared an increasing demand for remote monitoring and control in industrial and residential environments. Some technologies are already met in the market, destined to this type of application and amongst them the ZigBee standard is distinguished. These applications suffer restrictions in its performance due to internal interference between nodes. This work shows this influence, through the throughput in different rates and amounts of nodes, showing conditions that must be respected and be prevented in a scenery of automation and control, where if demand more reliability than a data high rate. This study it can not only serve of base for other works with ZigBee sensors networks, but mainly for designers in the creation of ZigBee networks, considering aspects as: scenery, number of nodes, throughput and packet delivery ratio.

# Sumário

<b>Resumo</b>	<b>v</b>
<b>Abstract</b>	<b>vi</b>
<b>Lista de Figuras</b>	<b>x</b>
<b>Lista de Tabelas</b>	<b>xiii</b>
<b>Lista de Acrônimos</b>	<b>xiv</b>
<b>1 Introdução</b>	<b>1</b>
1.1 Motivação . . . . .	1
1.2 Objetivo . . . . .	2
1.3 Trabalhos Relacionados . . . . .	3
1.4 Organização . . . . .	4
<b>2 Fundamentos Teóricos</b>	<b>5</b>
2.1 Introdução . . . . .	5
2.2 IEEE 802.15.4 . . . . .	6
2.2.1 Topologia . . . . .	7

2.2.2	Arquitetura . . . . .	8
2.2.3	PHY . . . . .	10
2.2.4	MAC . . . . .	14
2.2.5	Transferência de Dados . . . . .	19
2.2.6	Associação e Desassociação . . . . .	21
2.3	ZigBee . . . . .	23
2.3.1	Topologia de Rede (NWK) . . . . .	23
2.3.2	AODV: <i>Ad hoc On Demand Distance Vector</i> . . . . .	24
2.4	Outros Protocolos . . . . .	24
2.4.1	Bluetooth . . . . .	25
2.4.2	Z-Wave . . . . .	27
2.4.3	WI-FI . . . . .	28
2.5	Comentários . . . . .	29
<b>3</b>	<b>Aplicação à Automação</b>	<b>30</b>
3.1	Introdução . . . . .	30
3.2	Redes de Supervisão e Controle . . . . .	31
3.3	Trabalho . . . . .	35
3.4	Construção dos Cenários . . . . .	36
3.5	Ferramenta . . . . .	37
3.6	Comentários . . . . .	39
<b>4</b>	<b>Simulação</b>	<b>41</b>
4.1	Introdução . . . . .	41

## SUMÁRIO

---

4.2	Cenário 1 . . . . .	42
4.2.1	Resultados 2.4 GHz . . . . .	42
4.2.2	Resultados 902/868 MHz . . . . .	44
4.3	Cenário 2 . . . . .	47
4.3.1	Resultados . . . . .	48
4.4	Cenário 3 . . . . .	51
4.4.1	Resultados . . . . .	51
4.5	Cenário 4 . . . . .	56
4.5.1	Resultados 2.4 GHz . . . . .	58
4.5.2	Resultados 902 MHz . . . . .	60
4.6	Comentários . . . . .	62
<b>5</b>	<b>Conclusões</b>	<b>66</b>
	<b>Referências Bibliográficas</b>	<b>68</b>

# Lista de Figuras

2.1	Topologia ZigBee . . . . .	9
2.2	Camadas de Rede . . . . .	11
2.3	Canais . . . . .	12
2.4	Quadro <i>superframe</i> . . . . .	15
2.5	Formato do Pacote de Dados . . . . .	18
2.6	Formato do Pacote de Reconhecimento . . . . .	18
2.7	Intervalo entre quadros . . . . .	18
2.8	Transferência de Dados para o Coordenador . . . . .	20
2.9	Transferência de Dados do Coordenador . . . . .	21
2.10	Gráfico comparativo de protocolos . . . . .	25
3.1	Sistema Supervisório com Controle . . . . .	33
3.2	Sistema Supervisório sem Controle . . . . .	33
4.1	Cenário 1: 2 estações . . . . .	42
4.2	Vazão útil x n° de Bytes/pacote: 2 estações 2.4 GHz . . . . .	43
4.3	Taxa de Entrega : 2 estações 2.4 GHz . . . . .	44
4.4	Vazão útil x n° de Bytes/pacote: 2 estações 902 MHz . . . . .	45

## LISTA DE FIGURAS

---

4.5	Vazão útil x n° de Bytes/pacote: 2 estações 868 MHz . . . . .	45
4.6	Taxa de Entrega : 2 estações 902 MHz . . . . .	46
4.7	Taxa de Entrega : 2 estações 868 MHz . . . . .	46
4.8	Cenário 2 - 2.4 GHz . . . . .	47
4.9	Cenário 2 - 902 MHz . . . . .	47
4.10	Vazão 2.4 GHz . . . . .	49
4.11	Vazão 902 MHz . . . . .	49
4.12	Taxa de Entrega 2.4 GHz . . . . .	50
4.13	Taxa de Entrega 902 MHz . . . . .	50
4.14	Cenário 3 - 2.4 GHz . . . . .	51
4.15	Cenário 3 - 902 MHz . . . . .	51
4.16	Vazão 2.4 GHz . . . . .	52
4.17	Vazão 902 MHz . . . . .	53
4.18	Taxa de Entrega 2.4 GHz . . . . .	54
4.19	Taxa de Entrega 902 MHz . . . . .	54
4.20	Taxa de Entrega 2.4 GHz . . . . .	55
4.21	Taxa de Entrega 902 MHz . . . . .	55
4.22	Cenário 4 . . . . .	57
4.23	Taxa de Entrega 7 nós 2.4 GHz . . . . .	59
4.24	Taxa de Entrega 13 nós 2.4 GHz . . . . .	59
4.25	Taxa de Entrega 25 nós 2.4 GHz . . . . .	60
4.26	Taxa de Entrega 7 nós 902 MHz . . . . .	61
4.27	Taxa de Entrega 13 nós 902 MHz . . . . .	61

*LISTA DE FIGURAS*

---

4.28 Taxa de Entrega 25 nós 902 MHz . . . . .	62
4.29 Cenário - Exemplo . . . . .	64

# Lista de Tabelas

2.1	ZigBee x Bluetooth . . . . .	27
2.2	ZigBee x Z-Wave x Wi-Fi . . . . .	28
4.1	Cenário 1 . . . . .	43
4.2	Cenário 2 . . . . .	48
4.3	Cenário 3 . . . . .	52
4.4	Cenário 4 . . . . .	58

# Lista de Acrônimos

AODV :	<i>Ad hoc On Demand Distance Vector;</i>
BI :	<i>Beacon Interval;</i>
BO :	<i>Beacon Order;</i>
BER :	<i>Bit Error Rate;</i>
BPSK :	<i>Binary Phase Shift Keying;</i>
CAP :	<i>Contention Access Period;</i>
CBR :	<i>Constant Bit Rate;</i>
CCA :	<i>Clear Channel Assessment;</i>
CFP :	<i>Contention Free Period;</i>
CRC :	<i>Cyclic Redundancy Check;</i>
CSMA-CA :	<i>Carrier sense Multiple Access with Collision Avoidance;</i>
DSSS :	<i>Direct Sequence Spread Spectrum;</i>
ED :	<i>Energy Detection;</i>
FCS :	<i>Frame Check Sequence;</i>
FFD :	<i>Full-Function Device;</i>
FH :	<i>Frequency Hopping;</i>
FHSS :	<i>Frequency Hopping Spread Spectrum;</i>
GTS :	<i>Guaranteed Time Slot;</i>
HMI :	<i>Human-Machine Interface;</i>
IEEE :	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers;</i>
IFS :	<i>Interframe Spacing;</i>
IP :	<i>Internet Protocol;</i>
ISM :	<i>Industrial, Scientific, and Medical;</i>

## LISTA DE TABELAS

---

LAN :	<i>Local Area Network;</i>
LIFS :	<i>Long Interframe Spacing;</i>
LLC :	<i>Logical Link Control;</i>
LQI :	<i>Link Quality Indication;</i>
LR-WPAN :	<i>Low-Rate Wireless Personal Area Network;</i>
MAC :	<i>Medium Access Control;</i>
MFR :	<i>MAC Footer;</i>
MHR :	<i>MAC Header;</i>
MPDU :	<i>MAC Protocol Data Unit;</i>
MSDU :	<i>MAC Service Data Unit;</i>
MPLS :	<i>Multi-Protocol Label Switching;</i>
NWK :	<i>Network;</i>
OFDM :	<i>Orthogonal Frequency Division Multiplexing;</i>
O-QPSK :	<i>Offset Quadrature Phase-Shift Keying;</i>
OSI :	<i>Open Systems Interconnection;</i>
PAN :	<i>Personal Area Network;</i>
PDU :	<i>Protocol Data Unit;</i>
PHR :	<i>PHY Header;</i>
PHY :	<i>Physical Layer;</i>
PLC :	<i>Programmable Logic Controllers;</i>
POS :	<i>Personal Operating Space;</i>
PPDU :	<i>PHY Protocol Data Unit;</i>
PSDU :	<i>PHY Service Data Unit;</i>
RFD :	<i>Reduced-Function Device;</i>
SAP :	<i>Service Access Point;</i>
SCADA :	<i>Supervisory Control and Data Acquisition;</i>
SD :	<i>Superframe Duration;</i>
SHR :	<i>Synchronization Header;</i>
SIFS :	<i>Short Interframe Spacing;</i>
SO :	<i>Superframe Order;</i>
SSCS :	<i>Service Specific Convergence Sublayer;</i>

*LISTA DE TABELAS*

---

UTP : *Unshielded Twisted Pair;*

UWB : *Ultra Wide Band;*

WPAN : *Wireless Personal Area Network.*

# Capítulo 1

## Introdução

O avanço que tem ocorrido na área de microprocessadores, novos materiais de sensoriamento, micro sistemas eletromecânicos e comunicação sem fio tem estimulado o uso de sensores inteligentes em áreas ligadas a processos físicos, químicos, biológicos e outros. As redes de sensores sem fio (RSSF) diferem de redes de computadores tradicionais em vários aspectos. Normalmente essas redes possuem um grande número de nós distribuídos, têm restrições de energia e devem possuir mecanismos para autoconfiguração e adaptação devido a problemas como falhas de comunicação e perda de nós. Uma RSSF tende a ser autônoma e requer um alto grau de cooperação para executar as tarefas definidas para a rede.

### 1.1 Motivação

Atualmente, existem diversos padrões que definem transmissão em médias e altas taxas para voz, vídeo, rede de computadores pessoais, entre outros. Entretanto, até o presente momento pouco temos sobre padrões que estejam de acordo com as necessidades únicas da comunicação sem fio entre dispositivos de controle e sensores. Os principais requisitos deste tipo de rede são baixa latência, limitações severas de energia, baixo custo e possibilidade de implementação de redes com elevado número de dispositivos e baixa complexidade dos nós da rede. Dentre os padrões de redes sem fio ainda em desenvolvi-

mento ou já no mercado destacam-se o Bluetooth, ZigBee, Wi-Fi e UWB. Nas aplicações de monitoramento com sensores sem fio não é necessária uma alta taxa de dados como em UWB, mas os fatores custo e consumo de energia são de capital importância sendo então mais adequado o padrão ZigBee, uma vez que Wi-Fi apresenta um consumo de energia maior em função de sua maior potência e o Bluetooth apesar de no momento apresentar um baixo custo, características como alta latência e consumo ainda elevado, não o faz adequado a este tipo de aplicação.

Em dezembro de 2004 foi definido o padrão ZigBee por uma aliança de empresas de diferentes segmentos do mercado chamada "ZigBee Alliance" [1]. Este protocolo foi projetado para permitir comunicação sem fio confiável com baixo consumo de energia e baixas taxas de transmissão para aplicações de monitoramento e controle. Para implementar as camadas MAC (Medium Access Control) e PHY (Physical Layer) o ZigBee utiliza a definição 802.15.4 do IEEE que opera em bandas de frequências livres. Os rádios IEEE 802.15.4 operam nas faixas de frequência de 868 MHz na Europa, 915 MHz nos Estados Unidos e 2.4 GHz nos outros lugares do mundo. Dependendo do cenário, as interferências internas dos nós podem degradar significativamente o desempenho da rede, afetando a utilização em aplicações de automação e controle. O estudo da vazão em diferentes taxas e frequências mostra o quanto a velocidade e o número de nós influenciam no desempenho.

## **1.2 Objetivo**

O objetivo deste trabalho é construir uma referência de dados de um protocolo que atenda às características de uma aplicação de monitoramento e controle, no caso o ZigBee. Esses dados estão relacionados com o índice de sucesso na entrega dos dados (taxa de entrega) e velocidade de envio de dados em alguns cenários. Os resultados deste trabalho servirão de base de consulta para um projetista de rede de sensores que queira desenvolver um cenário real com alguma confiabilidade.

## 1.3 Trabalhos Relacionados

Vários trabalhos foram feitos com simulações testando algumas especificações do ZigBee, tanto nas camadas inferiores MAC e PHY quanto na camada de rede. Logo que foi tornado público o padrão IEEE 802.15.4 em maio de 2003 [2], vários artigos foram desenvolvidos com foco na teoria [3–7] e outros com simulações explorando as especificações contidas na norma.

Nia-Chiang et al [8] estudaram o impacto de uma rede heterogênea em um roteamento de malha ZigBee. Como será visto no capítulo seguinte o padrão ZigBee definiu dois nós com capacidades diferentes, e este estudo fez uma comparação do protocolo de roteamento ZigBee com o conhecido protocolo AODV [9, 10] em uma rede com mobilidade.

Joe Hoffert et al [11] pesquisaram através de simulações, diversas configurações efetuadas no IEEE 802.15.4 com o objetivo de buscar melhor desempenho nas áreas de confiabilidade e gerenciamento de energia. Na análise de resultados procurou recomendar não só a melhor configuração, como sugestões de melhoria nas especificações do padrão IEEE 802.15.4.

Gang Lu et al [12] analisaram o consumo de energia e desempenho do protocolo IEEE 802.15.4 em função do *duty cycle* e sincronização.

Marina Petrova et al [13] apresentaram um estudo sobre a interferência entre os padrões IEEE 802.15.4 e IEEE 802.11 [14] quando operando concorrentemente em 2.4 GHz. Mostraram então que quem sofre mais com a interferência é o IEEE 802.15.4 e que necessita de uma diferença de pelo menos 7 MHz entre as frequências operacionais para que possa ter um desempenho satisfatório.

Jianliang Zheng e Myung Lee [16, 17] desenvolveram o suporte ns2 para IEEE 802.15.4 e fizeram várias experiências, entre elas: transmissão com e sem quadro de sinalização (*beacon*); associação de dispositivos na rede; CSMA; transmissão de dados direta, indireta e reservada (GTS); colisões em função do tamanho do quadro de sincronismo (*superframe*). Os resultados deste estudo serviram de base neste trabalho, principalmente na escolha do parâmetro BO (*Beacon Order*) do *superframe*.

## 1.4 Organização

Este trabalho está estruturado em 5 capítulos. No Capítulo 2 são apresentados os fundamentos teóricos, tais como as características das redes de monitoramento e controle, os conceitos básicos da rede ZigBee, do padrão IEEE 802.15.4 e um resumo de outras redes sem fio dedicadas a esta aplicação. O Capítulo 3 descreve os conceitos de um sistema real de supervisão e automação, a proposta do trabalho com seus objetivos, a construção dos cenários e a ferramenta utilizada nas simulações. O Capítulo 4 apresenta as simulações realizadas, os resultados alcançados e um exemplo de cenário utilizando esses resultados. Finalmente, o Capítulo 5 traz as conclusões e sugestões para trabalhos futuros.

# Capítulo 2

## Fundamentos Teóricos

### 2.1 Introdução

UMA rede de monitoramento e controle ou de automação industrial formada por sensores de grandezas físicas (temperatura, umidade, pressão, etc.) e dispositivos atuadores (chaves, relés, etc.) não necessita de uma largura de banda elevada para funcionar, mas sim de uma latência pequena e baixo consumo de energia para preservar a vida útil das baterias. Ainda são poucos os padrões de redes sem fio para aplicações em redes locais utilizando sensores e outros dispositivos de controle. Um dos segmentos onde mais tem crescido a aplicação de redes sem fio é o das redes domésticas, principalmente em aplicações de automação comercial e residencial. Atualmente encontramos diversos equipamentos controlados remotamente, desde televisores, home theaters, DVD's, até computadores, impressoras, etc. O padrão ZigBee foi projetado para atender às especificações dessas aplicações.

ZigBee é um padrão que foi definido em dezembro de 2004 por uma aliança de empresas de diferentes segmentos do mercado chamada "ZigBee Alliance" [1]. Hoje fazem parte deste grupo mais de 200 empresas, entre as quais a Texas Instruments, Freescale, Microchip, Schneider Electric, Philips, Motorola, Siemens, Samsung, etc. Para implementar as camadas MAC (*Medium Access Control*) e PHY (*Physical Layer*) o ZigBee utiliza a definição 802.15.4 do IEEE, que opera em bandas de frequências livres. IEEE

e Zigbee Alliance têm trabalhado juntas para especificar todas as camadas de protocolos. IEEE 802.15.4 trata da especificação das duas camadas inferiores, enquanto ZigBee Alliance provê as camadas superiores (da camada de rede à camada de aplicação) da pilha do protocolo. Este protocolo foi projetado para permitir comunicação sem fio confiável, de baixo custo com baixo consumo de energia e baixas taxas de transmissão para aplicações de monitoramento e controle.

Este trabalho foi focado nas duas camadas inferiores (MAC e PHY), portanto baseado no padrão IEEE 802.15.4 e tendo como algoritmo da camada de rede o protocolo AODV, não sendo considerado o algoritmo de roteamento hereditário especificado para ZigBee [1]. As seções seguintes mostram os fundamentos do protocolo IEEE 802.15.4, um resumo sobre as camadas superiores especificadas para ZigBee, e por fim uma descrição comparativa com outros protocolos.

## 2.2 IEEE 802.15.4

Este padrão define um protocolo e interconexão para dispositivos de comunicação de dados usando baixa taxa de dados, baixa potência, baixa complexidade e transmissões de rádio frequência de pequeno alcance em uma rede sem fio (WPAN). WPAN são redes sem fio usadas para transportar informação sobre distâncias relativamente curtas. Diferentemente das redes locais sem fio (WLAN), as conexões efetuadas via WPANs envolvem pouca ou nenhuma infra-estrutura. Isto permite que sejam implementadas soluções de baixo custo e de alta eficiência em energia. O padrão IEEE 802.15.4 define um padrão para a camada física (PHY) e para a camada de acesso ao meio (MAC) para redes sem fio de pequeno alcance com baixas taxas (LR-WPAN).

LR-WPAN é uma rede de comunicação simples e de baixo custo que permite conectividade em aplicações com potência limitada e necessidades de desempenho não tão rígidas. Os objetivos principais de uma LR-WPAN são facilidade de instalação, transferência de dados confiável, operação de curto alcance, baixíssimo custo e uma vida útil bastante significativa da bateria, enquanto mantém um protocolo simples e flexível.

Algumas características desta rede são:

- Taxa de dados de 250 Kbps, 40 Kbps, e 20 Kbps;
- Operação em topologia estrela, árvore e malha;
- Endereços de 16 bits ou estendidos de 64 bits;
- Alocação de intervalos de tempo garantidos (GTS);
- Acesso ao canal (CSMA-CA);
- Protocolo com reconhecimento de dados para confiabilidade na transferência;
- Baixa potência de consumo;
- Detecção de energia (ED);
- Indicação da qualidade do Link (LQI);
- 16 canais na banda de 2450 MHz, 10 canais em 915 MHz e 1 canal em 868 MHz.

### 2.2.1 Topologia

Podemos identificar dois tipos de dispositivos em uma rede IEEE 802.15.4:

**FFD (*Full Function Device*)** - pode funcionar em qualquer topologia do padrão, desempenhando a função de coordenador da rede ou roteador e conseqüentemente ter acesso a todos os outros dispositivos dentro de seu alcance de transmissão. São dispositivos mais completos;

**RFD (*Reduced Function Device*)** - dispositivo mais simples, com menos memória, utilizado nas pontas da rede sem atribuições de reenvio de mensagem, ou seja não pode atuar como um coordenador de rede ou roteador. Pode comunicar-se apenas com um FFD.

Cada rede consiste de múltiplos FFDs e RFDs, com um dos FFDs designado como coordenador da rede. Dependendo da aplicação, a rede pode operar em uma das duas topologias: topologia em estrela ou topologia ponto a ponto (vide figura 2.1).

Na topologia estrela, a comunicação é estabelecida entre dispositivos e um único controlador central, chamado coordenador PAN. O coordenador PAN pode ser alimentado por energia contínua, enquanto os outros dispositivos normalmente seriam alimentados por bateria. As aplicações que se encaixam neste tipo de topologia, são: automação residencial, periféricos de computador pessoal, jogos e aplicações médicas [18].

Após um FFD ser ativado pela primeira vez, ele pode estabelecer sua própria rede e tornar-se o Coordenador PAN. Cada rede inicializada escolhe um identificador PAN, que não é concorrentemente usado por alguma outra rede dentro da esfera de influência do rádio. Isto permite que cada rede estrela opere independentemente. Uma vez que é escolhido o identificador PAN, o coordenador permite que outros dispositivos se liguem à sua rede. Todos os dispositivos operando na rede, em qualquer topologia terão cada, um único endereço estendido de 64 bits. Este endereço poderá ser utilizado para comunicação direta dentro da PAN, ou pode ser trocado por um endereço curto alocado pelo coordenador PAN quando o dispositivo se associa.

A topologia ponto a ponto (*peer to peer*) também tem um coordenador PAN, contudo, difere da topologia em estrela pelo fato de que qualquer dispositivo FFD pode se comunicar com outro desde que ele esteja no seu raio de alcance de transmissão. Esta topologia permite a implementação de redes mais complexas, tais como formação em redes de malha ou em árvore (*Cluster-tree*). Aplicações como monitoramento e controle industrial, monitoramento na agricultura, e segurança se enquadram nesta topologia. Uma rede ponto a ponto pode também permitir múltiplos saltos para rotear mensagens de qualquer dispositivo para algum outro da rede. Tais funções são executadas pela camada de rede.

A rede *Cluster-tree* é um caso especial de uma rede ponto a ponto, onde a maioria dos dispositivos são FFDs e um dispositivo RFD pode conectar-se no final de um ramo. Qualquer FFD pode agir como um coordenador e prover serviços de sincronização para outros dispositivos e coordenadores, porém somente um desses coordenadores será o coordenador PAN.

### 2.2.2 Arquitetura

A arquitetura LR-WPAN é definida em camadas baseada no modelo OSI (*Open Systems Interconnection*). Cada camada é responsável por uma parte do padrão e oferece serviços para as camadas superiores. As interfaces entre as camadas servem para definir

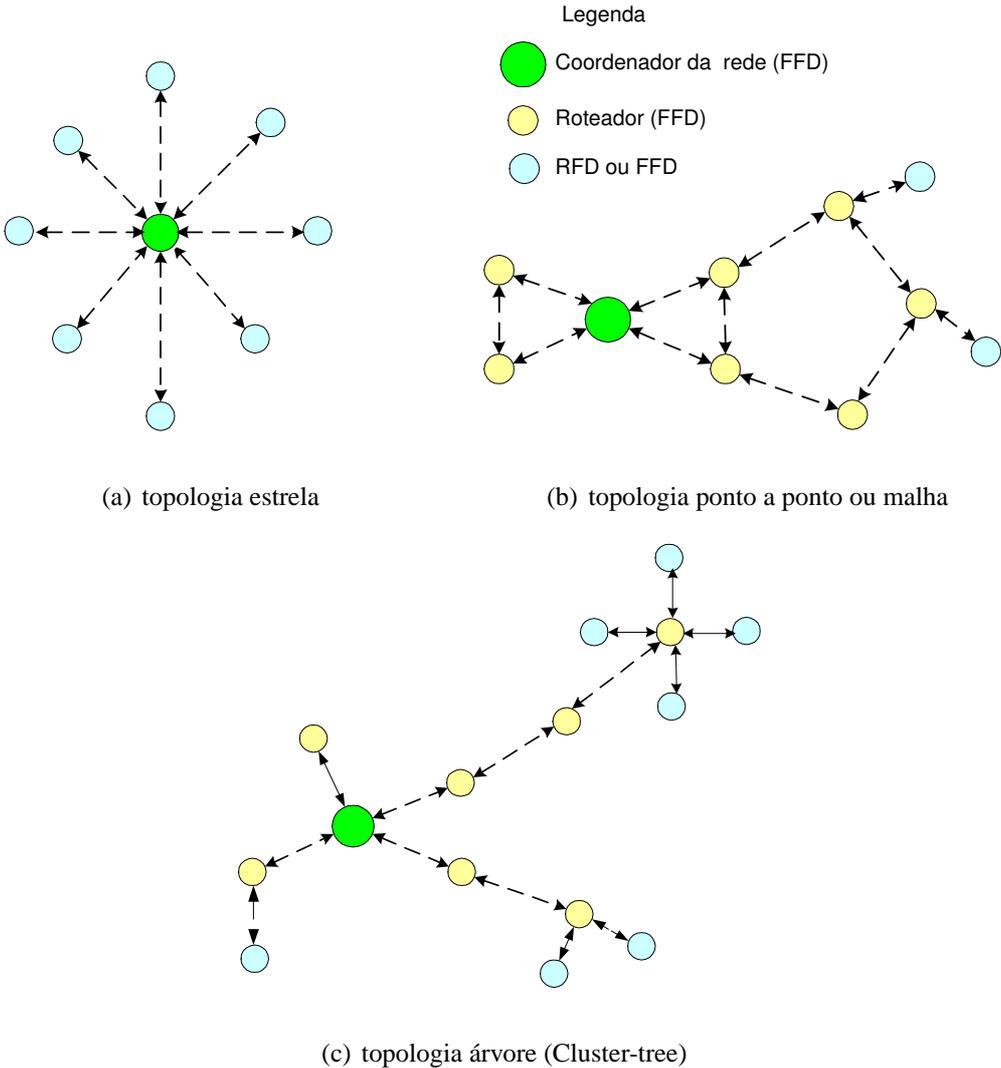


Figura 2.1: Topologia ZigBee

os enlaces lógicos que são descritos na norma IEEE 802.15.4 [2]. Um dispositivo LR-WPAN compreende uma camada física (PHY) que contém os transceptores de radiofrequência com seu mecanismo de controle de baixo nível e uma subcamada MAC que provê acesso para a camada física.

As camadas superiores mostradas na figura 2.2 consistem da camada de aplicação, do suporte à aplicação e de uma camada de rede que provê configuração da rede, manipulação e roteamento de mensagens definidas pelo grupo ZigBee Alliance. A camada de rede é responsável pela descoberta de rota e a entrega dos pacotes de dados. Em redes de sensores ad hoc, onde um grande número de nós é utilizado randomicamente, a descoberta de múltiplas rotas em uma topologia de malha é uma tarefa difícil. É igualmente desafiador manter e reparar rotas quando os nós são relocados ou desligam, por falta de bateria por exemplo. Inúmeros algoritmos de roteamento têm sido desenvolvidos para suportar redes ad hoc e especificamente neste trabalho foi utilizado o algoritmo AODV descrito mais adiante.

A subcamada IEEE 802.2 LLC (*Logical Link Control*) pode acessar a subcamada MAC através da subcamada SSCS (*Service Specific Convergence Sublayer*). Ela provê acesso às primitivas definidas para a subcamada MAC. As primitivas são essencialmente funções que são usadas para interagir com a subcamada MAC. Elas são usadas para executar funções tais como fazer uma requisição, receber uma notificação, e examinar ou modificar um atributo MAC. Dois atributos de particular importância são *omacBeaconOrder* (BO) e *macSuperframeOrder* (SO). Estes atributos definem o intervalo no qual são enviados quadros de sinalização (*beacons*) pelo coordenador e o comprimento do período ativo do *superframe*, respectivamente.

### 2.2.3 PHY

A especificação da camada física descreve como os dispositivos IEEE 802.15.4 devem se comunicar através de um canal sem fio. Ela define as bandas ISM, que não requerem licenciamento, de 2.4 GHz e 868/915 MHz. A banda de frequência ISM 2.4 GHz é utilizada em todo o mundo, enquanto que as bandas ISM 868 MHz e ISM 915 MHz são

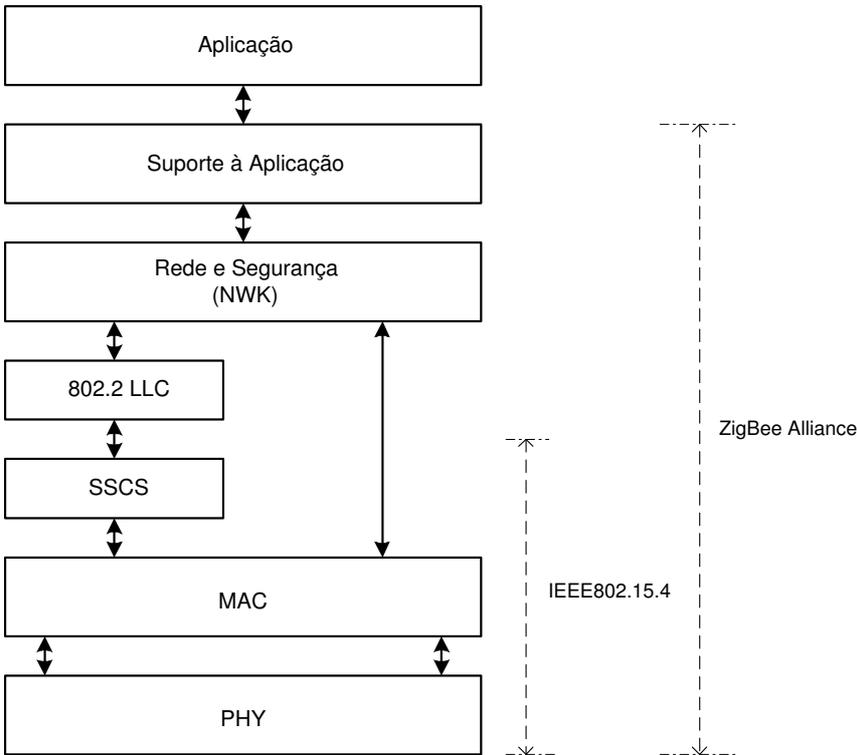


Figura 2.2: Camadas de Rede

utilizadas na Europa e América do Norte, respectivamente.

Como visto na figura 2.3 um total de 27 canais com três diferentes taxas de dados são alocadas pelo IEEE 802.15.4: 16 canais com uma taxa de dados de 250 Kbps em 2.4 GHz ([19–21]), 10 canais com uma taxa de dados de 40 Kbps na banda de 915 MHz e 1 canal com uma taxa de dados de 20 Kbps na banda de 868 MHz. A modulação BPSK (*Binary Phase Shift Keying*) é utilizada na banda de 868/915 MHz e a modulação O-QPSK (*Offset Quadrature Phase-Shift Keying*) na banda de 2.4 GHz. Ambas as modulações oferecem uma taxa de erro (BER) muito baixa com relação a um baixo nível de sinal ruído (SNR). Diferente do Bluetooth [22], o IEEE 802.15.4 não usa salto de frequências, mas é baseado em espalhamento de espectro de sequência direta (DSSS). Isto é muito útil em nossas medidas de interferência interna reportada no capítulo de simulações.

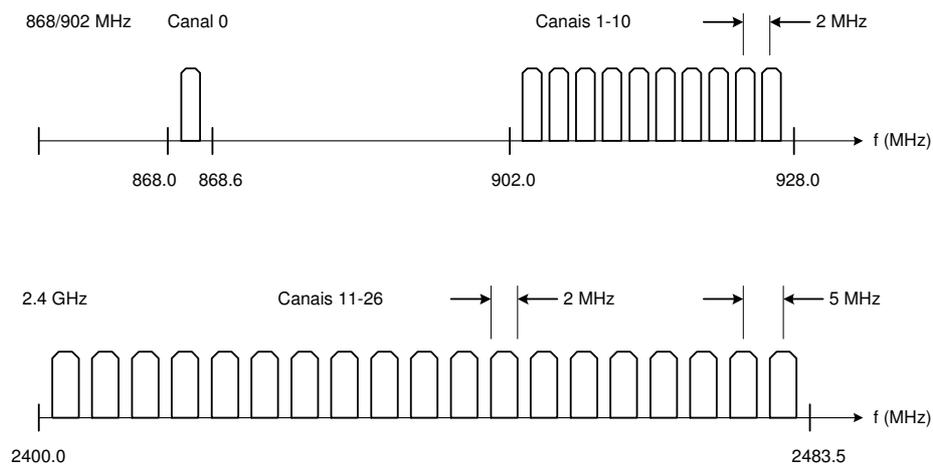


Figura 2.3: Canais

A camada física é responsável pela ativação e desativação do transceptor, seleção do canal de frequência, transmissão e recepção de dados, detecção de energia no canal (ED), indicação da qualidade do link (LQI) para os pacotes recebidos e CCA (*clear channel assessment*) para o protocolo CSMA-CA da camada MAC.

A medida da detecção de energia do receptor (ED) é usada pela camada de rede como parte do algoritmo de seleção de canal. Corresponde a uma estimativa da potência do sinal recebido dentro da largura de banda do canal IEEE 802.15.4.

A medida LQI (*Link Quality Indication*) é uma caracterização da intensidade e/ou qualidade do pacote recebido. A medida pode ser implementada usando a medida ED, uma estimativa da relação sinal/ruído ou uma combinação desses métodos. O LQI é reportado como um inteiro de 8 bits. Os valores máximo e mínimo LQI são associados com os valores de mais baixa e alta qualidade dos sinais IEEE 802.15.4 detectáveis pelo receptor, e os outros valores estariam uniformemente distribuídos entre esses dois limites.

O CCA (*Clear Channel Assessment*) é executado de acordo com a configuração de um dos métodos descritos abaixo:

- Energia acima do nível: CCA reportará o estado do meio como ocupado após detectar um nível de energia acima do nível ED;
- Detecta somente a portadora: CCA reportará o estado do meio como ocupado após a detecção do sinal da portadora. Este sinal pode estar acima ou abaixo do nível ED;
- Detecta portadora com energia acima do nível: CCA reportará o estado do meio como ocupado após a detecção da portadora com energia acima do nível ED.

A estrutura do pacote PPDU (*PHY Protocol Data Unit*), ilustrado na figura 2.5 consiste nos seguintes componentes básicos:

- SHR (*Synchronization Header*), que permite ao dispositivo receptor sincronizar com o feixe de bits, através de 4 Bytes correspondentes ao campo PS (*Preamble Sequence*) e um Byte no campo SFD (*Start of Frame Delimiter*);
- PHR (*PHY Header*), campo de 1 Byte (FL - *Frame Length*) que contém informação do comprimento em Bytes do quadro PSDU;
- PSDU (*PHY Service Data Unit*) que são os dados de comprimento variável vindos da camada MAC (MPDU).

O tamanho máximo do PSDU é fornecido pela constante `aMaxPHYPacketSize`, que é igual a 127 Bytes.

No caso do quadro de reconhecimento os campos SHR e PHR são idênticos ao quadro de dados, porém o PSDU é composto somente de 5 Bytes vindos da camada MAC (vide figura 2.6).

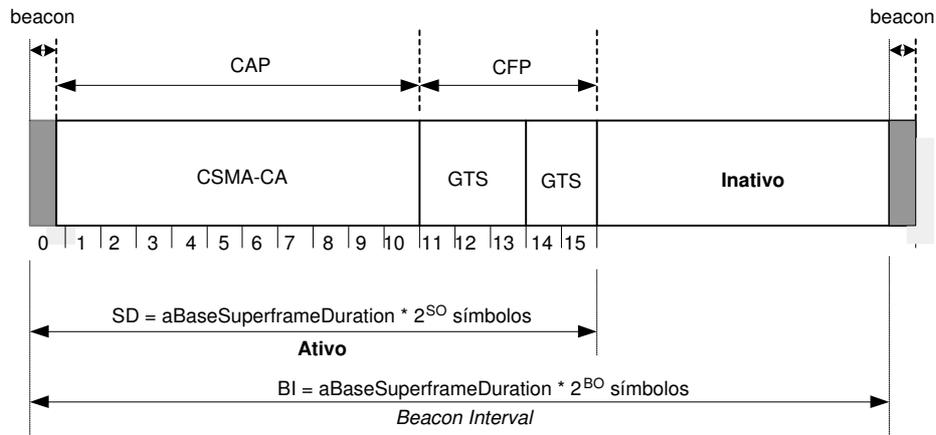
### 2.2.4 MAC

A subcamada MAC trata todo acesso ao canal de rádio físico e é responsável pelas seguintes tarefas: geração e sincronização de *beacons*; suporte de associação e desassociação na rede PAN; suporte opcional à segurança do dispositivo; gerenciamento de acesso ao canal via CSMA-CA [23]; manutenção dos tempos reservados (*slots* GTS) [24] e prover validação e reconhecimento de mensagem. Os *beacons* são pacotes de controle que delimitam quadros utilizados pelo coordenador para sincronizar com os demais dispositivos da rede.

Uma rede PAN pode ser configurada com *beacon* habilitado ou desabilitado. No caso de uma rede com *beacon* desabilitado, os dispositivos podem comunicar-se em qualquer tempo após uma fase de associação. O acesso ao canal e a contenção são gerenciados usando o mecanismo CSMA-CA (*Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance*). Cada vez que um dispositivo quer transmitir um quadro de dados ou comandos MAC, ele espera por um período randômico de tempo. Se após a espera o canal é encontrado livre, o dispositivo transmite seu dado. Se o canal está ocupado o dispositivo aguarda um outro período randômico antes de tentar acessar o canal novamente. Quadros de reconhecimento são enviados sem usar o mecanismo CSMA-CA.

Em uma rede com *beacon* habilitado, o coordenador da rede PAN transmite um *beacon* periodicamente no qual os outros dispositivos o usam para sincronização e para determinação de quando estão liberados para transmissão e recepção de mensagens. A mensagem *beacon* é usada para definir uma estrutura chamada de *superframe* em que todos os nós na rede PAN seriam sincronizados. Esta estrutura é mostrada na figura 2.4.

O formato de um *superframe* é definido pelo coordenador. O *superframe* é limitado pelos *beacons* e é enviado pelo coordenador. O quadro *beacon* é transmitido no primeiro intervalo de tempo (*slot*) de cada *superframe*. Se o coordenador não deseja usar a estrutura de superframes, ele pode desligar as transmissões de *beacons*. Os *beacons* são usados para sincronizar os dispositivos associados, para identificar a PAN, e para descrever a estrutura dos superframes. Existe um período ativo durante o qual a comunicação se processa e um período inativo (opcional), durante o qual os dispositivos podem desli-

Figura 2.4: Quadro *superframe*

gar seus transceptores para conservar energia. O período ativo é dividido em 16 períodos de tempo iguais (*slots*). Imediatamente seguindo o *beacon* vem o período de acesso de contenção (CAP). Durante este período os dispositivos devem se comunicar usando o mecanismo *slotted* CSMA-CA. Isto é similar ao CSMA-CA sem *slots* exceto pelo fato de que os períodos de *backoff* são alinhados com os limites dos *slots*. O CAP deve conter pelo menos oito períodos ativos mas pode chegar a até 16. Seguindo o CAP temos um opcional período livre de contenção (CFP), que pode ter até sete períodos ativos. Em um CFP o coordenador PAN reserva períodos (GTS) [7, 24] para algum dispositivo. Durante um GTS um dispositivo tem acesso exclusivo ao canal e não executa CSMA-CA. Durante um desses GTSs, um dispositivo pode transmitir dados ou receber dados de seu coordenador PAN, mas não ambos. Um GTS será reservado somente pelo coordenador da rede (PAN). O comprimento de um GTS deve ser um múltiplo inteiro de um período ativo (*slot*). Todos os GTSs devem ser contíguos no CFP e são localizados no final do período ativo do *superframe*. Um dispositivo pode desabilitar seu transceptor durante um GTS designado para outro dispositivo a fim de conservar energia. Para cada GTS o coordenador armazenará no pacote *beacon* o intervalo de partida (*slot*), comprimento, direção e endereço do dispositivo associado. A direção do GTS é especificada como transmissão ou recepção.

A estrutura do *superframe* é definida pelos valores dos atributos *macBeaconOrder* (BO) e *macSuperframeOrder* (SO). O intervalo de tempo no qual o coordenador trans-

mitirá seus quadros *beacon* é definido como BI (*Beacon Interval*) e se relaciona com o parâmetro BO (*macBeaconOrder*) da seguinte maneira:

para  $0 \leq BO \leq 14$

$$BI = aBaseSuperframeDuration * 2^{BO} \text{ simbolos}$$

onde  $aBaseSuperframeDuration = 960 \text{ simbolos}$

Se BO=15 o *superframe* não existirá e o valor do *macSuperframeOrder*, SO, será ignorado.

A unidade símbolo é uma unidade de tempo que depende do tipo de modulação utilizado em cada banda de frequência. Nas bandas de 902/868 MHz a modulação é BPSK e um símbolo corresponde a um 1 bit, enquanto na banda de 2.4 GHz com modulação O-QPSK um símbolo corresponde a 4 bits.

O atributo MAC *macSuperframeOrder* (SO) define o comprimento da porção ativa do *superframe*. O Intervalo de tempo relativo à parte ativa do *superframe* SD (*Superframe Duration*) se relaciona com o parâmetro SO (*macSuperframeOrder*) da seguinte maneira: para  $0 \leq SO \leq BO \leq 14$ ,

$$SD = aBaseSuperframeDuration * 2^{SO} \text{ simbolos}$$

A porção ativa de cada *superframe* é dividida em 16 intervalos igualmente espaçados com duração de  $aBaseSlotDuration * 2^{SO}$ , onde  $aBaseSlotDuration = 60 \text{ simbolos}$ . O *superframe* é composto de 3 partes: um *beacon*, um CAP (*Contention Access Period*) e um CFP (*Contention Free Period*). O *beacon* é transmitido sem o uso de CSMA, no início do *slot* 0, e o CAP começa imediatamente após o *beacon*. O CFP se presente, segue imediatamente após o CAP e se estende até o final da porção ativa do *superframe*. Todos os GTSs alocados estarão dentro do CFP.

Durante SD, a parte ativa, os nós podem enviar seus quadros no começo de cada *slot* usando *slotted* CSMA/CA durante o período CAP. No caso do canal estar ocupado, o nó computa seu período de *backoff* baseado em um número de intervalos de tempo (*slots*).

As redes PAN que quiserem usar uma estrutura de *superframe* configurarão o atributo *macBeaconOrder* (BO) com um valor entre 0 e 14 e *macSuperframeOrder* com um

valor entre 0 e o valor de *macBeaconOrder*. Em caso contrário estes atributos seriam configurados com o valor de 15. Neste caso o coordenador não transmite *beacons* e todas as transmissões, com a exceção de quadros de reconhecimento e quadros de dados que imediatamente seguem o reconhecimento de um comando de pedido de dados usam o mecanismo CSMA-CA para acessar o canal. Além disso os GTSs não são permitidos.

A rede LR-WPAN define quatro estruturas de quadros: quadro de *beacon*, quadro de dados, quadro de reconhecimento e quadro de comandos MAC [2].

O formato geral do quadro de dados MAC (MPDU) é dado na figura 2.5 e consiste nos seguintes componentes básicos:

- MHR (*MAC header*), que contém um campo de controle de 2 Bytes (FC - *Frame Control*), 1 Byte para número de seqüência e de 4 a 20 Bytes para campo de endereçamento;
- MSDU (*MAC Service Data Unit*) são os dados de comprimento variável, que são provenientes da camada superior;
- MFR (*MAC footer*), é composto de 16 bits FCS (*Frame Check Sequence*).

Portanto o tamanho máximo do *overhead* na camada MAC (MHR + MFR) no quadro de dados é igual a 25 Bytes.

A recepção com sucesso e a validação de um quadro de dados ou de comando MAC pode ser opcionalmente confirmado com um reconhecimento. Se o dispositivo fonte não recebe um reconhecimento após algum período de tempo, ele assume que a transmissão não teve sucesso e repete a transmissão do quadro.

O quadro de reconhecimento, mostrado na figura 2.6, consiste nos seguintes campos:

- MHR (*MAC header*), que contém um campo de controle de 2 Bytes (FC - *Frame Control*) e 1 Byte para número de seqüência;
- MFR (*MAC footer*), é composto de 16 bits FCS (*Frame Check Sequence*).

Os campos MHR e MFR juntos formam o quadro de reconhecimento MAC (MPDU).

O período IFS (*Interframe Spacing*) define a quantidade de tempo que separa a transmissão de dois quadros consecutivos. De fato, a subcamada MAC necessita de uma quantidade finita de tempo para processar o dado recebido pela camada física. Se uma transmissão requer um reconhecimento, a separação entre o quadro de reconhecimento e a

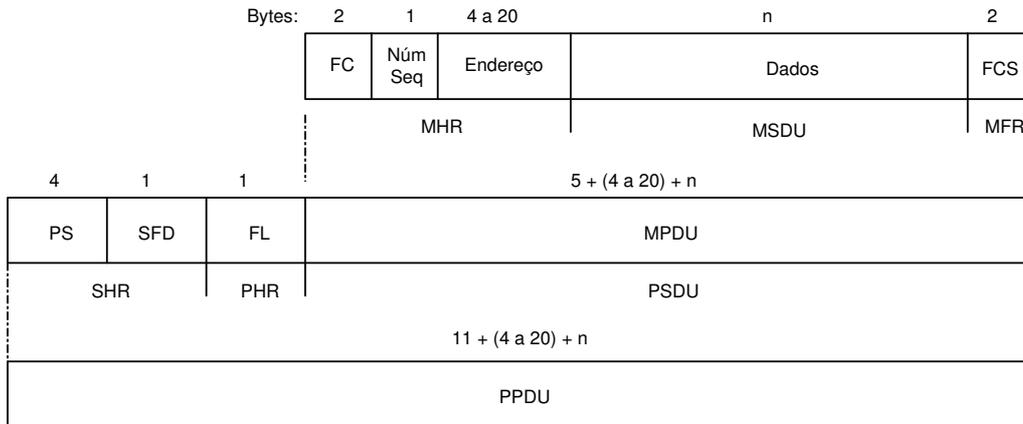


Figura 2.5: Formato do Pacote de Dados

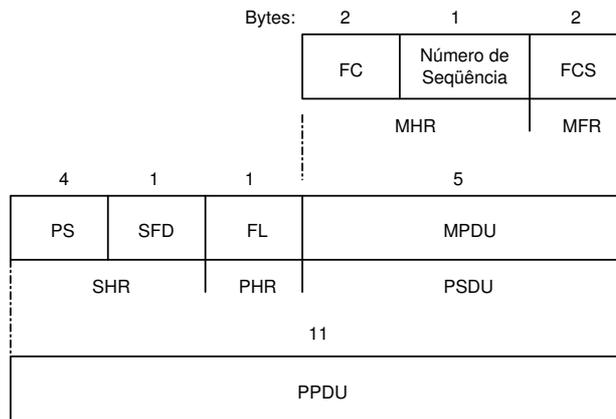
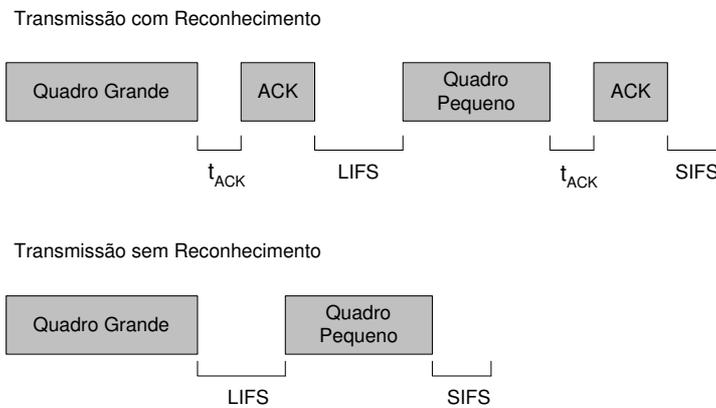


Figura 2.6: Formato do Pacote de Reconhecimento



Onde,  $aTurnaroundTime \leq t_{ACK} \leq (aTurnaroundTime + aUnitBackoffPeriod)$

Figura 2.7: Intervalo entre quadros

próxima transmissão será de pelo menos um período IFS. A duração de um período IFS é dependente do tamanho do quadro transmitido. Quadros (MPDUs) de até  $aMaxSIFSFrameSize = 18$  Bytes de comprimento serão seguidos de um período SIFS de uma duração de no mínimo  $aMinSIFSPeriod = 12$  símbolos. Quadros (MPDUs) com comprimentos maiores que  $aMaxSIFSFrameSize$  Bytes serão seguidos por um período LIFS de uma duração de no mínimo  $aMinLIFSPeriod = 40$  símbolos. A figura 2.7 ilustra estes conceitos. O algoritmo CSMA-CA leva em conta esta requisição nas transmissões no CAP (*Contention Access Period*).

### 2.2.5 Transferência de Dados

Existem três tipos de transferência de dados. O primeiro é a transferência de dados do dispositivo para o coordenador. O segundo é a transferência de dados de um coordenador para um dispositivo. A terceira é a transferência de dados entre dois dispositivos ponto a ponto. Em uma topologia estrela somente duas dessas transferências são usadas, porque os dados somente podem ser trocados entre o coordenador e um dispositivo. Na topologia ponto a ponto os dados são trocados entre dispositivos na rede, e conseqüentemente todas as três formas de transferência podem ser utilizadas.

O mecanismo para cada tipo de transferência depende se a rede suporta a transmissão de *beacons*. Uma rede com *beacon* habilitado é usada para suportar dispositivos de baixa latência. Se a rede não necessita suportar tais dispositivos, ela pode não usar o *beacon* para transferências normais, contudo o *beacon* é ainda utilizado para associação de rede.

O primeiro tipo de transferência de dados é um mecanismo que transfere dados de um dispositivo para um coordenador. Quando um dispositivo quer transferir dados para um coordenador em uma rede com *beacon* habilitado, ele primeiro aguarda o *beacon* da rede, e uma vez detectado, o dispositivo se sincroniza com a estrutura *superframe*. No ponto apropriado o dispositivo transmite seu quadro de dados, usando o CSMA-CA para o coordenador. O coordenador reconhece a recepção de dados correta transmitindo um quadro de reconhecimento opcional, conforme mostrado na figura 2.8(a).

Quando o dispositivo quer transferir dados em uma rede sem habilitação de *beacons*,

ele transmite seu quadro de dados usando CSMA-CA para o coordenador. O coordenador reconhece a recepção correta dos dados transmitindo um quadro de reconhecimento opcional, conforme mostrado na figura 2.8(b).

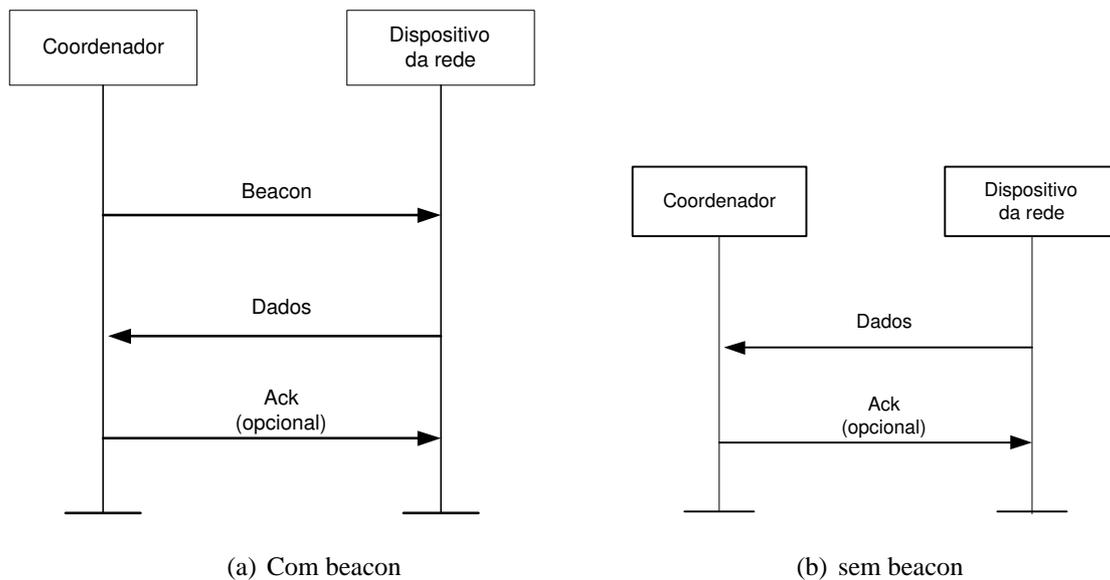


Figura 2.8: Transferência de Dados para o Coordenador

O segundo tipo de transferência de dados, conhecido como transmissão indireta é o mecanismo que transfere dados de um coordenador para um dispositivo. Quando o coordenador quer transferir dados para um dispositivo em uma rede com *beacon* habilitado, ele indica no *beacon* da rede que a mensagem de dados está pendente. O dispositivo periodicamente escuta os *beacons* da rede e se uma mensagem está pendente, transmite um comando MAC requisitando o dado, usando CSMA-CA. O coordenador reconhece a recepção correta da requisição de dados transmitindo um quadro de reconhecimento. O quadro de dados pendente é então enviado usando CSMA-CA. O dispositivo reconhece a recepção correta dos dados transmitindo um quadro de reconhecimento. Após receber o reconhecimento, a mensagem é removida da lista de mensagens pendentes no *beacon*. Esta seqüência é mostrada na figura 2.9(a).

Quando um coordenador quer transferir dados para um dispositivo em uma rede sem habilitação de *beacons*, ele armazena os dados do dispositivo apropriado e aguarda um contato e requisição dos dados. O dispositivo pode fazer contato transmitindo um co-

mando MAC de requisição de dados, usando CSMA-CA para seu coordenador. O coordenador reconhece a recepção correta do pedido de dados, transmitindo um quadro de reconhecimento. Se os dados estão pendentes, o coordenador transmite o quadro de dados, usando CSMA-CA para o dispositivo. Se o dado não está pendente, o coordenador transmite um quadro de dados com comprimento zero para indicar que não havia dados pendentes. Seqüência mostrada na figura 2.9(b).

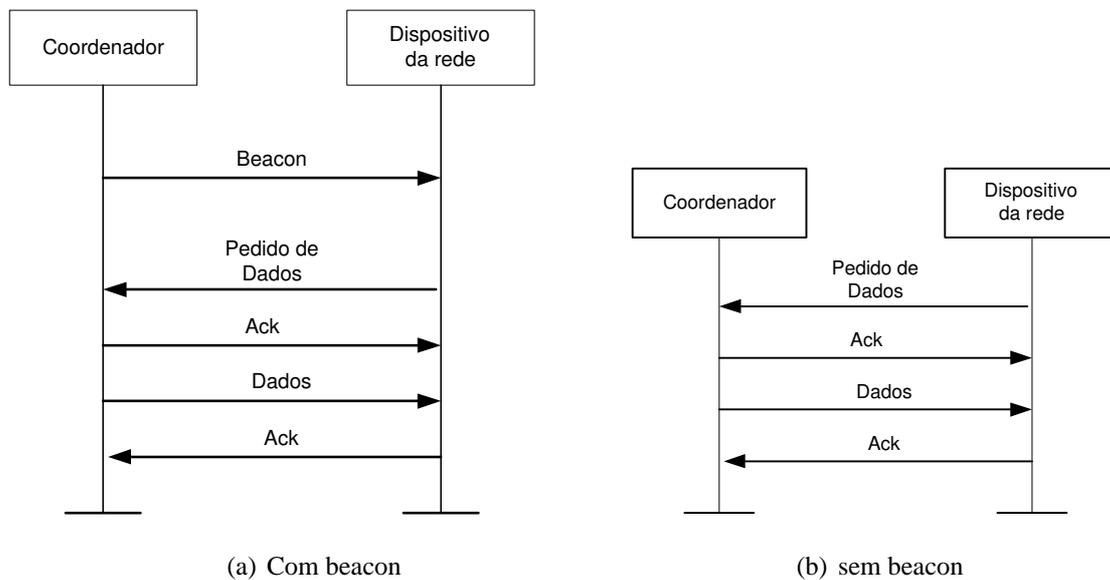


Figura 2.9: Transferência de Dados do Coordenador

Na transferência de dados em uma rede PAN ponto a ponto, cada dispositivo pode se comunicar com qualquer outro dispositivo que esteja dentro do alcance de seu rádio de transmissão.

### 2.2.6 Associação e Desassociação

A associação de um dispositivo parte após ele ter completado uma exploração ativa ou passiva do canal. A exploração passiva permite que um dispositivo localize algum coordenador transmitindo quadros *beacons* dentro de sua área de alcance (POS), enquanto que na exploração ativa o dispositivo transmite um comando de pedido de *beacon*. Os resultados da exploração são então usados para escolher uma PAN adequada caracterizada

pelo seu canal físico (*phyCurrentChannel*), seu identificador (*macPANId*) e seu endereço curto (*CoordShortAddress*) ou longo (*CoordExtendedAddress*) [2].

Um dispositivo não associado iniciará seu procedimento enviando um comando de pedido de associação para o coordenador de uma rede PAN existente. Se o comando é recebido corretamente, o coordenador enviará um quadro de reconhecimento (*acknowledgement*). Este reconhecimento contudo não significa que o dispositivo tenha sido associado. O coordenador necessita de tempo para determinar se os recursos utilizados em uma PAN são suficientes para permitir mais um outro dispositivo como associado. Esta decisão é tomada dentro de um intervalo de tempo de *aResponseWaitTime* símbolos. Se existirem recursos suficientes, o coordenador reservará um endereço curto para o dispositivo e gerará um comando de resposta de associação contendo o novo endereço e um estado indicando sucesso na associação. Se não existirem recursos suficientes, o coordenador gerará um comando de resposta de associação contendo um estado indicando falha. Esta resposta será enviada para o dispositivo usando transmissão indireta.

No outro lado, o dispositivo, após obter o quadro de reconhecimento, espera pela resposta durante o tempo de *aResponseWaitTime* símbolos. Na recepção de um comando de resposta de associação, o dispositivo enviará um quadro de reconhecimento. Se a associação tiver sucesso, ele armazenará o endereço do coordenador.

Quando o coordenador quer que um de seus dispositivos associados deixe a rede PAN, ele envia um comando de notificação de desassociação para o dispositivo, usando transmissão indireta. Após recepção do pacote, o dispositivo envia um quadro de reconhecimento. Mesmo que este reconhecimento não seja recebido, o coordenador considerará o dispositivo desassociado.

Se um dispositivo associado quer deixar o PAN, ele envia um comando de notificação de desassociação para o coordenador. Após a recepção, o coordenador envia um quadro de reconhecimento. Mesmo se o reconhecimento não é recebido o dispositivo considerará-se desassociado. Ao desassociar-se, o dispositivo removerá todas as referências daquela rede PAN e o coordenador removerá todas as referências do dispositivo desassociado.

## 2.3 ZigBee

A especificação ZigBee de responsabilidade da *ZigBee Alliance* define as camadas de rede, segurança e aplicação. A arquitetura do ZigBee foi desenvolvida em camadas. Cada camada executa serviços específicos para servir à camada acima: a entidade de dados provê dados para o serviço de transmissão e a entidade de gerência fornece informações para todos os outros serviços. Cada entidade de serviço expõe uma interface para a camada superior através do ponto de acesso (SAP) e cada SAP suporta um número de primitivas para ativar a funcionalidade solicitada.

### 2.3.1 Topologia de Rede (NWK)

As responsabilidades da camada de rede incluem mecanismos usados para conexão e desconexão de dispositivos em uma rede, de aplicação de segurança aos quadros e roteamento para seus destinos. Além disso a camada de rede inclui a descoberta e manutenção de rotas entre dispositivos envolvidos na rede. A descoberta e armazenamento da informação da vizinhança também são feitos nesta camada. A camada NWK de um coordenador é responsável por iniciar uma nova rede sempre que apropriado e assinalar endereços para os novos dispositivos associados.

A camada de rede (NWK - figura 2.2) do ZigBee suporta a topologia em estrela, árvore e malha. Numa topologia do tipo estrela, a rede é controlada por um único dispositivo chamado coordenador ZigBee. Este coordenador é responsável por iniciar e manter os dispositivos da rede e todos os outros dispositivos, conhecidos com "*end devices*", diretamente comunicando com o coordenador ZigBee.

Nas topologias malha e estrela, o coordenador ZigBee é responsável por inicializar a rede e pela escolha dos parâmetros chave de rede. A rede pode ser estendida através do uso de roteadores ZigBee. Em topologias tipo árvore os roteadores movem dados e controlam mensagens através do uso da estratégia de roteamento hierárquico.

A função de gerenciamento da rede deve ser implementada pelo coordenador ZigBee, pelo roteador ou dispositivo lógico, conforme a configuração estabelecida via aplicação

ou durante a instalação. Essa função será executada pelo coordenador ou pelo roteador e tem a habilidade para selecionar um canal que não está em uso, para a criação de uma nova PAN. É possível formar uma rede sem que exista um dispositivo pré-designado como coordenador, onde o primeiro dispositivo de função completa (FFD) ativado assume esta função.

O processo de gerência de rede permite a especificação de uma lista de canais para o procedimento de buscas na rede. A norma é utilizar todos os canais na banda de operação selecionada. Além disso, a gerência de rede é responsável pelos procedimentos de busca para determinar as redes na vizinhança e a identidade do seu dispositivo coordenador e roteador.

O roteamento ZigBee executa dois roteamentos distintos, roteamento hierárquico, utilizado principalmente na topologia em árvore, e roteamento AODV [9, 10, 25], utilizado neste trabalho e descrito na seção seguinte.

### 2.3.2 AODV: *Ad hoc On Demand Distance Vector*

AODV é um algoritmo reativo de roteamento, ou seja, um nó não tem que descobrir ou manter uma rota para outro nó, a não ser que haja necessidade de comunicação. Quando o nó fonte deseja transmitir dados para um nó de destino, dá-se o início da descoberta de rota. O nó fonte constrói um pacote de RREQ (*Route Request*) e o envia por difusão (*broadcasting*). Cada nó que o recebe e não conhece o destino, o reenvia apenas uma vez. Ao chegar no destino ou em algum nó que o conheça, é construído o pacote RREP (*Route Reply*) e enviado de volta pelo caminho reverso. Com a chegada deste pacote no nó fonte, fica então definido um caminho para a transmissão dos dados e o nó fonte pode iniciar a transmissão. Este foi o protocolo utilizado nas simulações descritas no capítulo 4.

## 2.4 Outros Protocolos

Alguns protocolos podem servir como referência para um estudo comparativo com o ZigBee. O foco corrente é em aplicações residenciais, prediais e industriais. Para prover

serviços de controle e monitoramento, não é necessário ter alta taxa de dados e na maioria dos cenários das aplicações torna-se difícil suportar alto consumo de energia. Portanto dois atributos importantes são o consumo de potência e a taxa de dados. Muitas tecnologias desenvolvidas procuraram focar o suporte para mais altas taxas de dados com maior alcance, que têm um impacto direto nos requisitos de potência, que por sua vez influencia no fator custo, tamanho e complexidade do projeto. Nenhum deles foi capaz de ultrapassar estes obstáculos para se adequar às necessidades de uma aplicação residencial/industrial. As seções seguintes mostram outras tecnologias sem fio que são utilizadas em automação e tecnologia de sensores.

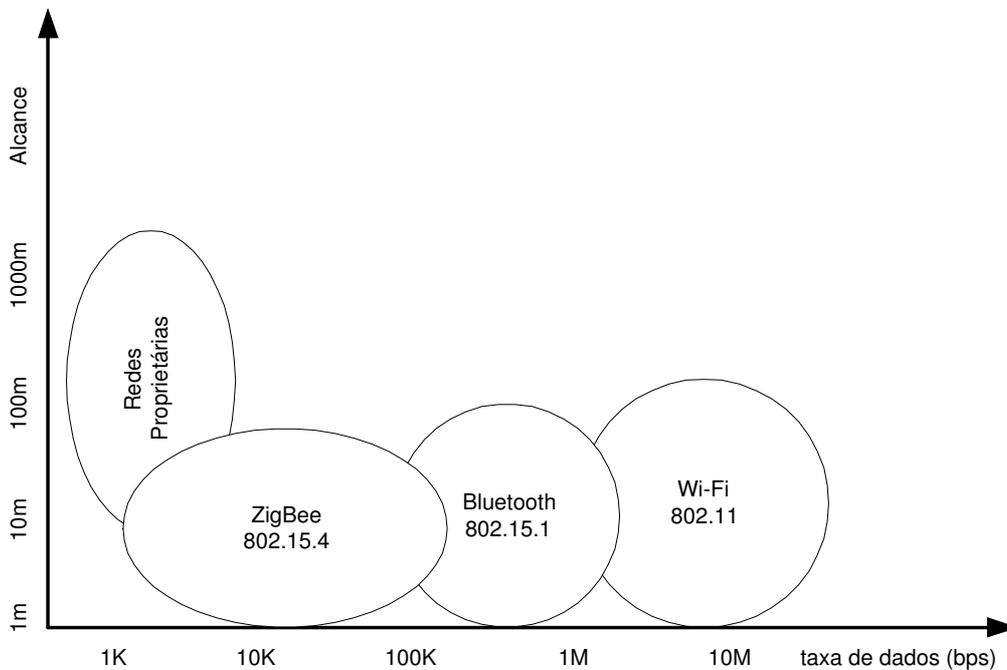


Figura 2.10: Gráfico comparativo de protocolos

### 2.4.1 Bluetooth

Bluetooth é um padrão de rede sem fio (IEEE 802.15.1) bem conhecido para aplicações de média taxa de dados [22, 26]. Trata-se de uma tecnologia de comunicação de pequeno alcance, planejada para substituir cabos e/ou dispositivos eletrônicos fixos. Suas características principais são robustez, baixa complexidade, baixa potência e tecnologia

de baixo custo. Utiliza a banda de frequência ISM 2.4 GHz, utilizada universalmente com salto de frequência (FHSS) e usando pacotes de tamanho pequeno. O salto de frequência é feito numa razão de 1600 vezes por segundo e tem como objetivo evitar interferência. Neste padrão o alcance é em torno de 10 metros, podendo estendê-lo para 100 metros com um amplificador de potência. Ele pode transferir dados em uma taxa máxima de 1 Mbps. As especificações correntes definem uma rede pequena chamada *piconet* formada por sete dispositivos escravos e um coordenador mestre. Também algumas redes *piconets* podem ser unidas para formar uma grande rede (*scatternets*). Aplicações típicas incluem dispositivos inteligentes (PDAs, telefones celulares, PCs), periféricos de dados (mouses, teclados, *joysticks*, câmeras, impressoras) e periféricos de áudio (fones de ouvido, auto-falantes, receptores estéreo).

Baseado em seu universo de aplicação e suas características, nós podemos concluir que o Bluetooth pode ser um bom concorrente para automação. Contudo o empenho do Bluetooth em cobrir muitas aplicações e prover qualidade de serviço o tem desviado de um projeto simples, fazendo-o caro e inapropriado para algumas aplicações requerendo baixo custo e baixo consumo de energia. Além disso a falta de flexibilidade em redes maiores (*scatternets*). Algumas pesquisas mostram que Bluetooth apresenta problemas de escalabilidade [22, 26].

A capacidade de transferência de dados é muito maior em Bluetooth, que é capaz de transmitir áudio e gráficos sobre pequenas redes e fazer transferências de arquivos. ZigBee de outro modo, é mais adequado para transmitir menores pacotes sobre grandes redes. Provavelmente a característica principal do ZigBee é seu pequeno consumo de energia, que o torna melhor para dispositivos onde a bateria é raramente substituída, podendo uma bateria normal durar até 2 anos ou mais. Bluetooth é uma substituição de cabo para produtos como computadores *laptop*, telefones e fones de ouvido (*headsets*). Estes dispositivos necessitam de uma carga regular e usam um modelo de potência como um telefone móvel.

ZigBee também leva vantagem quando se trata de latência em aplicações de baixa potência. O tempo de ligação para um novo escravo é tipicamente 30ms e o tempo necessário para um escravo mudar do estado de repouso para ativo, ou de acesso a um

Tabela 2.1: ZigBee x Bluetooth

	ZigBee	Bluetooth
Padrão (MAC + PHY)	IEEE 802.15.4	IEEE 802.15.1
Taxa de Transferência	250 Kbps	1 Mbps
Modulação	DSSS	FHSS
Corrente na Transmissão	30mA	40mA
Corrente em <i>Standby</i>	3uA	200uA
Expectativa de vida da bateria	1000 dias	1 a 7 dias
Tempo de acesso à rede	30ms	3s
Tempo de transição dos escravos	15ms	3s
Tempo de acesso ao canal	15ms	2ms

canal é em torno de 15ms. Os dispositivos bluetooth necessitam de 3 segundos para qualquer ligação na rede ou para alterar o seu estado de repouso para ativo, embora eles sejam mais rápidos no acesso ao canal (2ms). A tabela 2.1 destaca as principais diferenças entre esses dois protocolos [1]. Os dados sobre expectativa de vida útil da bateria, tem a finalidade de comparar ordens de grandeza entre os protocolos.

### 2.4.2 Z-Wave

Z-Wave é uma tecnologia sem fio proprietária, de pequeno alcance e baixa taxa de dados, da Zensys Inc [27]. Esta empresa se alinhou com mais de 100 outras empresas a fim de prover serviços de automação predial. Z-Wave é uma tecnologia de comunicação baseada em rádio frequência sem fio projetada para controle de iluminação comercial e residencial, aplicações de monitoramento tais como leitura de medidor, refrigeração (HVAC), controle de acesso, detecção de incêndio, etc.

Apresenta características que o faz concorrer com ZigBee em automação residencial, dentre elas o baixo consumo de energia, topologia em malha e baixo custo. Tem menor taxa de dados que ZigBee, 9600 bps, trabalha na banda de frequência de 868/900 MHz

Tabela 2.2: ZigBee x Z-Wave x Wi-Fi

	ZigBee	Z-Wave	WI-FI
Padrão (MAC + PHY)	IEEE 802.15.4	Proprietário	IEEE 802.11
Taxa de Transferência	250 Kbps	9600 bps	11/54 Mbps
Frequência	868/902MHz/2.4GHz	868/900MHz	2.4GHz/5GHz
Modulação	DSSS	FSK	DSSS/OFDM
Corrente na Transmissão	30mA	—	400mA
Corrente em <i>Standby</i>	3uA	—	20mA
Expectativa de vida da bateria	1000 dias	1000 dias	0,5 a 5 dias
Alcance (m)	10/30	100	30/100

e utiliza modulação FSK. Asseguram que não sofrem tanto com interferência por não trabalhar na faixa de 2.4 GHz e consideram que Z-Wave é mais simples com menos necessidade de memória. Porém Z-Wave possui uma desvantagem significativa que é o fato de ser uma tecnologia proprietária, onde o cliente fica na dependência de um único fabricante (*chip*), diferente de um protocolo aberto onde qualquer fabricante que siga o padrão, IEEE 802.15.4 no caso do ZigBee, pode fornecer o componente. A tabela 2.2 destaca as principais diferenças entre esses dois protocolos [27].

### 2.4.3 WI-FI

Abreviatura de *wireless fidelity* e é usado genericamente quando se refere a algum tipo de rede IEEE 802.11 (802.11a, 802.11b, etc.) [14]. O termo foi promulgado pela Wi-Fi Alliance. Não se pode dizer que Wi-Fi não seja um concorrente para aplicações residenciais e industriais, porém seu suporte a uma maior largura de banda, maior consumo de energia e preço superior o faz indesejável em automação residencial. Wi-Fi é mais adequado às aplicações que necessitem de transmissões de áudio e vídeo. A tabela 2.2 destaca as principais diferenças entre esses dois protocolos [28].

## 2.5 Comentários

Em função das especificações de cada protocolo apresentado e das características intrínsecas das aplicações de monitoramento e controle, com ênfase em baixo consumo, baixo custo, baixa latência, pacotes pequenos e baixa razão de dados, o padrão ZigBee apresentou inúmeras vantagens e conseqüentemente foi escolhido como o protocolo mais adequado e base para este trabalho. No próximo capítulo serão apresentados os conceitos de uma aplicação de automação, a proposta deste estudo com a construção dos cenários e a ferramenta utilizada na simulação.

# Capítulo 3

## Aplicação à Automação

### 3.1 Introdução

Os recursos e especificações do padrão ZigBee são recomendados para um determinado universo de aplicações como automação predial, automação residencial, controle e monitoramento industrial, etc. Aplicações estas que não necessitam de uma elevada taxa de dados, mas de uma latência pequena e alta confiabilidade. As taxas reais medidas são menores que as especificadas e dependem de uma série de fatores como topologia, taxa de envio de dados e escalabilidade por exemplo. Apesar deste grupo de aplicações não necessitar de uma elevada taxa de dados cada aplicação em particular tem que trabalhar com uma taxa mínima, sendo então de enorme valia termos como referência cenários diferentes com seus limites, baseados nos valores reais de velocidade e na taxa de entrega de pacotes de dados. Este trabalho tem como objetivo a determinação desses valores através das simulações com diferentes cenários.

Nas seções seguintes são abordados os conceitos de uma aplicação real de automação, a proposta deste trabalho, justificativas na construção dos cenários e a ferramenta usada na simulação.

## 3.2 Redes de Supervisão e Controle

As redes de supervisão e controle [29] são muito importantes nos sistemas de automação industrial. A idéia é dar uma pequena introdução aos conceitos deste sistema para melhor entendimento da utilização dos resultados deste trabalho em uma aplicação de monitoramento e controle.

Os sistemas de supervisão e controle podem ser divididos em três funções básicas: supervisão, operação e controle, que podem ser definidos da seguinte forma:

- supervisão - operações de monitoramento do processo;
- operação - verifica e comanda os procedimentos de controle e operação dos equipamentos de processo;
- controle - controle dinâmico de acordo com o comportamento global do processo.

Um sistema supervisorio permite que sejam monitoradas e rastreadas informações de um processo produtivo ou instalação física. Tais informações são coletadas através de equipamentos de aquisição de dados e, em seguida, manipulados, analisados, armazenados e, posteriormente, apresentados ao usuário. Estes sistemas também são conhecidos como SCADA (*Supervisory Control and Data Acquisition*). O objetivo principal dos sistemas SCADA é propiciar uma interface de alto nível do operador com o processo, informando-o em tempo real de todos os eventos de importância da planta.

Os componentes físicos de um sistema de supervisão podem ser resumidos, de forma simplificada, em: sensores e atuadores, interface homem-máquina (HMI), rede de comunicação, estações remotas (aquisição/ controle) e monitoração central (sistema computacional SCADA). Os sensores são dispositivos que convertem parâmetros físicos tais como pressão, temperatura, velocidade e nível de água para sinais analógicos e digitais legíveis pela estação remota. Os atuadores são utilizados para atuar sobre o sistema, ligando e desligando determinados equipamentos.

O processo de controle e aquisição de dados se inicia nos PLCs (*Programmable Logic Controllers*), com a leitura dos valores atuais dos dispositivos que a ele estão associados

e o seu respectivo controle. Os PLCs são unidades computacionais específicas, utilizadas nas instalações fabris com a função de ler entradas, realizar cálculos ou controles e atualizar saídas.

A rede de comunicação é a plataforma por onde fluem as informações dos PLCs para o sistema SCADA e, levando-se em consideração os requisitos do sistema e a distância a cobrir, pode ser implementada através de cabos Ethernet, fibras ópticas, linhas discadas, sem fio, etc.

A interação entre os usuários do sistema e as estações de controle central é feita através de uma interface HMI (*Human-Machine Interface*). Trata-se de um equipamento que permite a visualização dos dados, muitas vezes acompanhados de animações de modo a simular a evolução do estado dos dispositivos controlados na instalação industrial.

As estações de controle central são unidades dos sistemas SCADA responsáveis pela monitoração e supervisão de todo o sistema de automação e incumbidas de recolher a informação enviada pelo PLC ou pelas estações remotas e atuar de acordo com os eventos detectados. Podem estar centralizadas em um único computador ou distribuídas por uma rede de computadores de modo a permitir o compartilhamento dos dados provenientes do sistema.

A figura 3.1 mostra um sistema de supervisão e controle com fio, onde a comunicação entre o PLC e os micros de supervisão é feita através de uma rede Ethernet TCP/IP. Os sensores e atuadores situados no campo interligam-se por fio às entradas/saídas analógicas/digitais do módulo de I/O do PLC.

A partir deste sistema básico de controle e automação, vamos considerar um sistema ainda mais simples com apenas monitoração de variáveis físicas sem controle. A planta não teria um controlador tipo PLC e todos os sensores estariam interligados em uma interface que se comunicaria com um micro de supervisão através de uma rede RS232 ou RS485, conforme mostrado na figura 3.2.

Estes são esquemas simples e convencionais de automação industrial e no primeiro caso, do sistema de supervisão e controle, poderíamos pensar em substituir as unidades situadas no campo e a comunicação dessas unidades com o PLC por um sistema sem

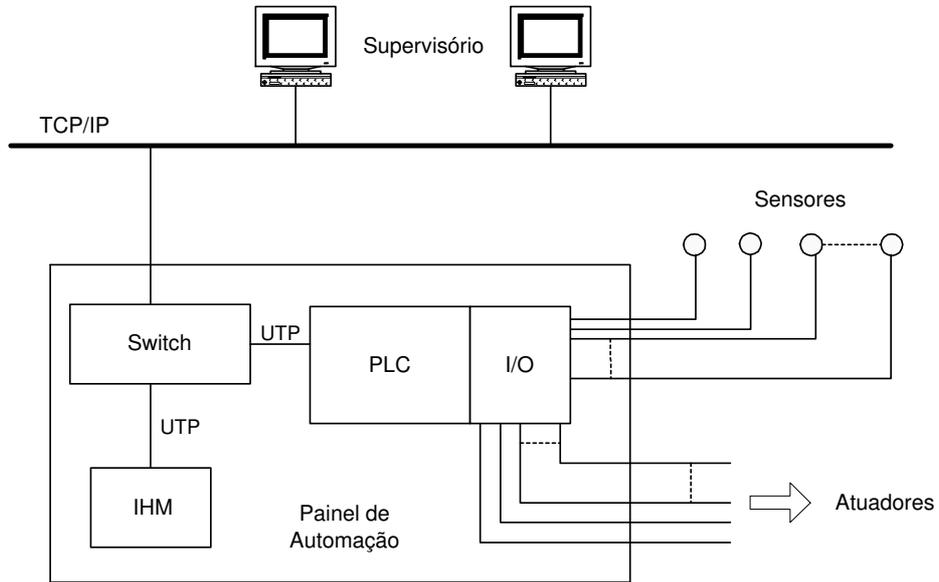


Figura 3.1: Sistema Supervisório com Controle

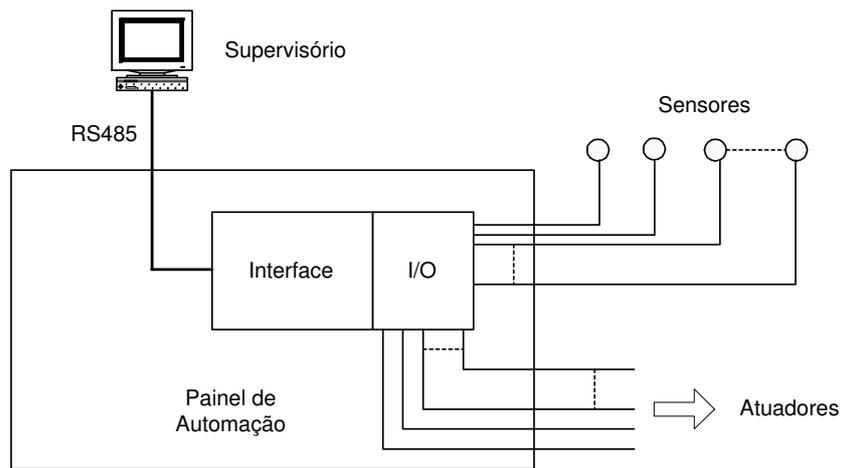


Figura 3.2: Sistema Supervisório sem Controle

fi o tipo ZigBee. Para desenvolver este sistema primeiramente o PLC deveria ter um módulo ZigBee tipo FFD que pudesse torná-lo um coordenador de rede PAN e os sensores e atuadores seriam nós sensores ZigBee FFD ou RFD, conforme necessidade ou não de rotear dados. Caso no cenário real os sensores e atuadores não estejam muito distantes entre si, poderia ser formada uma rede em estrela com um nó coordenador, de preferência com alimentação contínua. A interligação do PLC com o coordenador estrela, dependendo da distância poderá exigir alguns roteadores intermediários. Esta correspondência considera apenas a parte relativa ao campo na rede de supervisão, ou seja a comunicação PLC/sensores e atuadores, e não à comunicação efetuada com os micros supervisórios através da rede *Ethernet*.

No segundo caso, do sistema de monitoramento apenas, (figura 3.2) a substituição por um sistema sem fio com ZigBee seria mais fácil e de menor custo, uma vez que a implementação de módulos ZigBee adaptados a um microcomputador seria mais barata e mais imediata que a adição em um PLC, além do fato de um sistema de controle ser mais rígido no que diz respeito ao determinismo. Portanto para este sistema de monitoramento teríamos o micro de supervisão com um cartão ZigBee funcionando como coordenador da rede. Este micro teria um aplicativo que convertesse as informações na tela conforme feito nos supervisórios atuais em redes com fio. Os sensores e atuadores do campo seriam os nós sensores ZigBee formados em uma ou duas sub-redes estrela, dependendo da quantidade de nós. Para aumentar o alcance da rede, roteadores ZigBee poderiam ser utilizados.

Em função do cenário, número de sensores e tamanho do pacote o projetista poderá ter uma idéia do limite na taxa de dados com os resultados deste estudo, porém outros parâmetros teriam que ser considerados no desenvolvimento de uma rede sem fio para esta aplicação. Por exemplo um estudo dos protocolos da camada de rede da especificação ZigBee, uma vez que com a necessidade de roteadores intermediários teremos configurado uma topologia *cluster-tree*. No final do capítulo seguinte é apresentado um exemplo de cenário para verificação do limite da taxa de dados tomando como base os resultados deste trabalho.

### 3.3 Trabalho

O projetista de rede ao desenvolver uma rede de sensores sem fio para atuar em uma aplicação de monitoramento e controle necessitará para análise de alguns parâmetros necessários à construção de sua rede, como número e tipo de sensores, área de atuação, tamanho do pacote de dados, latência, taxa de dados, consumo de energia, preço, etc. Os resultados deste trabalho proverão este profissional ou pesquisador de uma base de dados com alguns desses parâmetros que o auxiliarão no desenvolvimento da rede.

Este trabalho procurou levantar dados baseado nas especificações do padrão IEEE 802.15.4, ou seja concentrado nas duas camadas inferiores, com protocolo AODV, sem testar outros protocolos de rede especificados para o ZigBee.

Descobrir os limites do protocolo no que diz respeito à taxa de dados é fundamental para a construção de uma boa base de consulta. A qualidade da comunicação representada pela taxa de entrega de pacotes é um atributo muito importante para as aplicações de monitoramento. Este trabalho procurou focar nestes atributos, executando simulações em alguns cenários, buscando resultados que pudessem servir de referência para desenvolvedores de rede sem fio. Em função disso as simulações em cada cenário foram executadas com várias taxas de envio de dados (Kbps ou pacotes/s) com a finalidade de se encontrar a vazão real e taxas de entrega de dados próximas de 100%. Foi adotado o índice de 90% como valor mínimo na taxa de entrega, ou seja, considerou-se que resultados acima de 90% são considerados bons em uma aplicação de monitoramento e controle.

Inicialmente a idéia foi descobrir a vazão real máxima de dados em função do tamanho do pacote, até 100 Bytes e com isso formarmos uma tabela composta da banda de frequência, vazão e tamanho do pacote.

Dando continuidade à pesquisa, o próximo passo foi testar o desempenho de cenários com roteadores, verificando então a influência deles na vazão e na taxa de entrega. Este passo foi importante na medida em que mostrou a influência do número de roteadores intermediários e da taxa de envio de dados no desempenho do protocolo.

Em seguida o trabalho focou em uma topologia estrela, tendo como objetivo a obtenção de resultados no desempenho de sistemas em função do número de dispositivos, com informações partindo de todos os nós para o coordenador da rede, o que seria de se esperar em um cenário real.

### 3.4 Construção dos Cenários

A taxa nominal de dados especificada para IEEE 802.15.4 não é a mesma da taxa real, devido ao *overhead* e aos pacotes de reconhecimento e depende também do tamanho do pacote. Para se descobrir a taxa real de dados em uma simulação, o caminho mais simples é a medição da vazão entre dois nós, um como fonte e outro como destino. Este foi o primeiro cenário simulado neste trabalho. A razão entre o número de dados recebidos no destino e o número de dados enviados pela fonte foi a outra métrica utilizada. Para cada banda de frequência variou-se a taxa de envio de dados, obtendo-se com isso valores que pudessem servir como base de consulta.

O cenário 1 permitiu a obtenção das taxas máximas, porém representou uma situação ideal, uma vez que continha apenas 2 nós. Na prática precisamos estender os alcances sem ter que aumentar a potência do nó e conseqüentemente o consumo de energia. Com o objetivo de analisar a influência de nós roteadores intercalados nas rotas de tráfego de dados, foram criados os cenários 2 e 3. Estes cenários seguiram o mesmo perfil linear do cenário 1, porém com um número determinado de nós roteadores entre a fonte e o destino. A diferença entre os cenários 2 e 3 foi apenas no número de roteadores. Bandas de frequências diferentes necessitam de uma quantidade de roteadores diferentes para cobrir a mesma distância. O cenário 3 utilizou menos roteadores e taxas de envio de dados mais baixas com o objetivo de se alcançar taxas que proporcionassem um bom resultado para servir de referência.

Dentre as topologias especificadas para o ZigBee, a topologia em estrela se destaca como uma das topologias que podem ser bastante utilizadas no mundo real e foi o próximo cenário de análise neste trabalho. Neste cenário já não importava tanto a vazão e sim a relação entre dados enviados e dados recebidos. Em uma aplicação de monitoramento

e controle é importante que todos os dados transmitidos cheguem ao destino. Portanto o objetivo da simulação com este cenário foi a descoberta dos limites de desempenho em função não só do tamanho do pacote, mas do número de nós fontes e das taxas de envio de dados. Este cenário apresentou também a diferença na associação dos nós componentes da rede com o coordenador e toda a comunicação foi sincronizada através de um *superframe*. O tamanho do *superframe* e de sua parte ativa definidos, respectivamente, pelos parâmetros *macBeaconOrder* (BO) e *macSuperframeOrder* (SO) foram escolhidos baseado no trabalho de Jianliang Zheng e Myung Lee [16], ou seja BO=SO=3.

Assim temos que:

$$BI(BeaconInterval) = SD(SuperframeDuration) = 960 * 2^3 = 7680 \text{ simbolos}$$

Com o objetivo de se evitar o problema do terminal escondido neste cenário, foi adotado um plano único de alcance, ou seja a transmissão de qualquer nó alcança todos os nós da rede. Foram simulados três cenários estrela com 7,13 e 25 nós.

### 3.5 Ferramenta

O simulador utilizado foi o NS-2 [30, 31] versão 2.28. A parte relativa ao protocolo IEEE 802.15.4 foi desenvolvida no *Joint Lab of Samsung and the City University of New York* por Jianliang Zheng e Myung J. Lee [16].

Para os experimentos descritos nesta dissertação foi utilizado o modelo de propagação (*Two Ray Ground*). Independente do modelo a potência recebida diminui com o aumento da distância e neste a atenuação é de  $d^4$ , onde  $d$  é a distância.

Em todas as figuras que mostram resultados de simulação, cada um dos pontos que geraram as curvas é a média de 10 amostras com intervalo de confiança de 95%. As amostras são obtidas com as entradas de sementes diferentes no gerador de números aleatórios (RNG) do NS-2. Todas as estações fonte utilizaram fluxos UDP de taxa constante (*Constant Bit Rate* - CBR). Os tamanhos dos pacotes são de 10 a 100 Bytes, sendo o intervalo de tempo das simulações de 100 segundos. O valor de 100 Bytes foi o valor máximo permitido para o pacote de dados do IEEE 802.15.4, uma vez que o tamanho

máximo do PSDU é de 127 Bytes e nestas simulações o *overhead* total foi de 27 Bytes. Este *overhead* constituiu-se de 20 Bytes da camada de rede mais 7 Bytes da camada MAC.

O parâmetro *RXThresh* tem como significado a sensibilidade mínima do sensor ou nó em termos de potência, ou seja para níveis inferiores ao valor configurado neste parâmetro o nó não será capaz de decodificar a mensagem. O parâmetro *Csthresh* é a sensibilidade mínima para a detecção da portadora. Na simulação, *RXThresh* foi definido com -92dBm e *Csthresh* foi configurado com -92dBm para os cenários 1 e 4, e -97dBm para os cenários 2 e 3. Os alcances dependem desta sensibilidade e da altura da antena.

A potência de transmissão foi de 0dBm com uma antena de altura igual a metade do comprimento de onda em quase todos os cenários. A exceção foi no cenário 4 na banda de 2.4 GHz que se utilizou uma antena de altura igual ao comprimento de onda, com a finalidade de se ter um plano de alcance único para todos os nós da rede.

Todas as métricas foram definidas com respeito às camadas MAC e PHY a fim de isolar os efeitos dessas camadas das camadas superiores. Foram definidas as seguintes métricas:

- 1 - Vazão de dados (Kbps)
- 2 - Taxa de entrega de pacotes que é a razão entre os pacotes recebidos com sucesso no destino e o número de pacotes enviados pela fonte (100 x pacotes recebidos/pacotes enviados)%.

A simulação em cada banda de frequência necessitou de alterações no programa fonte do NS-2 (Network Simulator). O programa fonte original dava prioridade a operação em 2.4 GHz, pois somente explorava um canal das bandas de 868/902 MHz se todos os canais de 2.4 GHz estivessem ocupados. Foi feita então uma alteração no arquivo `p802_15_4sscs.cc`, comentando as seguintes linhas:

```
//for(i=11;i<27;i++)  
//if(T_UnscannedChannels & (1<i))==0)  
//break  
//if(i>=27)
```

Conforme citado no capítulo anterior o canal 0 corresponde à banda de 868 MHz,

canais 1 a 10 à banda de 902 MHz e canais 11 a 27 à banda de 2.4 GHz. Neste mesmo arquivo o parâmetro que defini quantos e quais os canais explorados teve que ser alterado para simulação em cada banda.

Para 868/902 MHz

```
//Scan the channels 0, 1 e 2
```

```
UINT_32 SSCS802_15_4::ScanChannels= 0x0007
```

Para 2.4 GHz

```
//Scan the channels 11, 12 e 13
```

```
UINT_32 SSCS802_15_4::ScanChannels= 0x03800
```

O tempo de espera do reconhecimento também depende da banda de frequência. Na banda de 2.4 GHz é igual a 54 Símbolos e nas bandas de 868/902 MHz os tempos são de 120 Símbolos. Portanto no arquivo p802\_15\_4const.h foram feitas as seguintes alterações:

Para 868 MHz

```
#define def_phyCurrentChannel 0
```

```
#define def_phyChannelsSupported 0x07ff
```

```
#define def_macAckWaitDuration 120
```

Para 902 MHz

```
#define def_phyCurrentChannel 1
```

```
#define def_phyChannelsSupported 0x07ff
```

```
#define def_macAckWaitDuration 120
```

Para 2.4 GHz

```
#define def_phyCurrentChannel 11
```

```
#define def_phyChannelsSupported 0x07ffffff
```

```
#define def_macAckWaitDuration 54
```

## 3.6 Comentários

Este capítulo procurou dar noções de uma aplicação industrial, apresentou a proposta deste trabalho, as preliminares da simulação e a descrição de algumas alterações efetuadas

no programa fonte do NS-2. O capítulo seguinte descreve as simulações realizadas em diversos cenários. Apresenta-se dividido de acordo com cada cenário e dentro deles seus resultados em cada banda de frequência. Na seção de comentários um exemplo de cenário que poderia ser aplicado em um sistema de supervisão utilizando os resultados obtidos nas simulações.

# Capítulo 4

## Simulação

As simulações tiveram como objetivo a descoberta dos limites na vazão de dados e na taxa de entrega do IEEE 802.15.4 em alguns cenários adequados à aplicação de monitoramento e controle. Estes limites serão úteis na definição dos cenários e das taxas de dados para a aplicação mencionada.

### 4.1 Introdução

O cenário 1 utilizou uma topologia ponto a ponto com apenas 2 nós. No cenário 2 foi utilizado um maior número de nós, porém mantendo a disposição linear do cenário anterior. O cenário 3 foi do mesmo tipo do cenário anterior, porém com menor número de nós roteadores. Estes cenários não utilizaram quadros de sincronismo ou *beacon* habilitado. No cenário 4 foi utilizada a topologia em estrela com 7, 13 e 25 nós. Diferente dos três cenários anteriores o cenário 4 utilizou quadros de sincronismo ou *beacon* habilitado. Em todos os cenários o método de acesso foi CSMA-CA.

Como citado em capítulo anterior a taxa nominal do meio depende da banda de frequência, ou seja 250 Kbps/2.4 GHz, 40 Kbps/902 MHz e 20 Kbps/ 868 MHz.

Nas simulações com os cenários 1, 2 e 3 a velocidade de saída dos dados do nó fonte (CBR) foi de 60, 120 e 250 Kbps na banda de 2.4 GHz, 10, 20 e 40 Kbps na banda de

902MHz e 5, 10 e 20 Kbps na banda de 868 MHz, A simulação com a banda de 868 MHz só foi realizada no cenário 1, porque é muito semelhante à banda de 902 MHz e a taxa nominal é a metade. No cenário 4 o envio de dados (CBR) foi de 2 a 20 pacotes/s em 2.4 GHz e 0,5 a 10 pacotes/s em 902 MHz.

Este capítulo é dividido em seções para cada cenário simulado com seus resultados. Nos cenários com topologia em estrela a seção foi subdividida de acordo com a banda de frequência e seus resultados. A última seção contém os comentários e um exemplo de um cenário com parâmetros estimados, baseados nos resultados obtidos com as simulações.

## 4.2 Cenário 1

O objetivo da simulação neste cenário foi o de se medir a taxa máxima real de dados em uma rede IEEE 802.15.4. O cenário é formado por 2 nós em que um deles transmite dados a uma taxa constante para o nó de destino.



Figura 4.1: Cenário 1: 2 estações

Os valores dos parâmetros estão mostrados na tabela 4.1.

### 4.2.1 Resultados 2.4 GHz

Como ilustrado na Figura 4.2 a vazão real máxima encontrada foi menor que 130 Kbps no melhor caso, com o pacote de 100 Bytes, representando 52% da vazão nominal. A medida que se diminui o número de Bytes do pacote a vazão diminui em função de um *overhead* maior. *Overhead* este causado pelo tamanho fixo do cabeçalho de 27 Bytes e um maior número de reconhecimentos (*ACK*) devido ao maior número de pacotes.

Para observação do limite de vazão da banda de 2.4 GHz a taxa de 250 Kbps é a mais

Tabela 4.1: Cenário 1

Taxa Nominal do Meio (Kbps)	250	40	20
Taxa de Dados - CBR (Kbps)	60,120,250	10,20,40	5,10,20
Frequência	2.4 GHz	902 MHz	868 MHz
Distância entre os nós	10.0 m	10.0 m	10.0 m
Altura da Antena	6.25 cm	16.6 cm	17.3 cm
Alcance do rádio (RXThresh)	12.5 m	33.2 m	34.5 m
Alcance da portadora (CSThresh)	12.5 m	33.2 m	34.5 m
Quantidade de Bytes/pacote	10 a 100	10 a 100	10 a 100
Métrica 1 - Vazão	Kbps	Kbps	Kbps
Métrica 2 - Taxa de Entrega	%pacotes	%pacotes	%pacotes

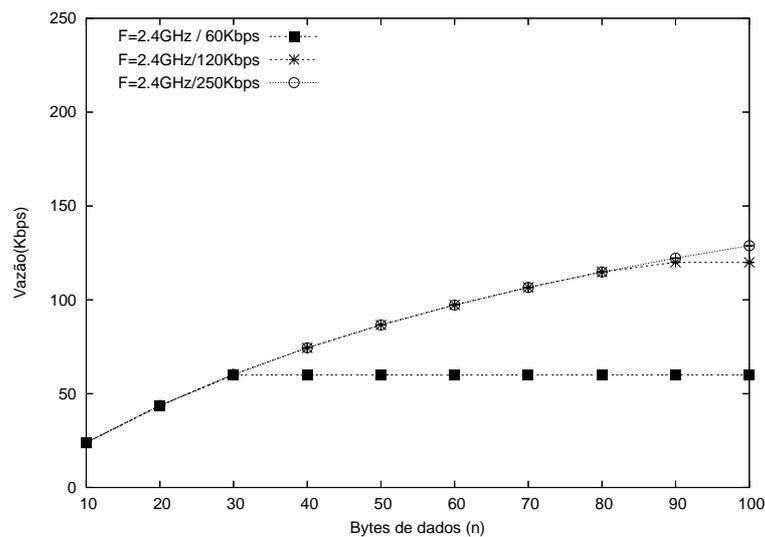


Figura 4.2: Vazão útil x n° de Bytes/pacote: 2 estações 2.4 GHz

representativa, porém a simulação de mais duas taxas de 60 e 120 Kbps dá uma idéia dos limites em taxas menores e é muito útil em aplicações de controle e monitoramento. A Figura 4.2 nos mostra uma saturação na vazão, uma vez que as taxas de dados de 120 e 250 Kbps apresentam a mesma velocidade para pacotes de até 80 Bytes.

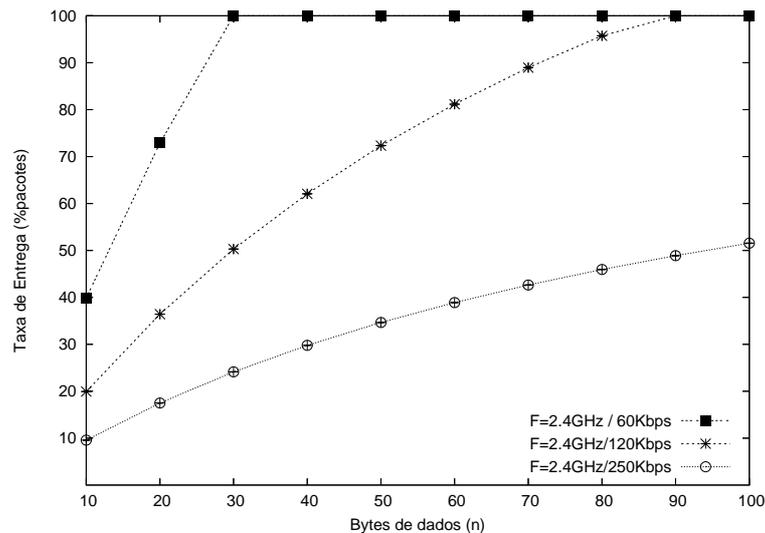


Figura 4.3: Taxa de Entrega : 2 estações 2.4 GHz

A Figura 4.3 retrata a segunda métrica, a razão do número de pacotes recebidos pela estação de destino pelo número de pacotes enviados pela estação fonte. Como pode ser observado, as taxas de 60 Kbps e 120 Kbps apresentaram um resultado satisfatório para pacotes de tamanhos maiores ou iguais a 30 e 70 Bytes, respectivamente. Para pacotes com menor número de Bytes nas taxas acima ou qualquer número de pacotes na taxa de 250 Kbps não seria adequado a sua utilização em uma aplicação de controle e monitoramento a não ser em casos onde as taxas em questão estivessem superdimensionadas.

#### 4.2.2 Resultados 902/868 MHz

Como ilustrado nas Figuras 4.4 e 4.5 a vazão real máxima encontrada foi 25 Kbps em 902 MHz e 12.8 Kbps em 868 MHz, representando 62.5% e 64% da vazão nominal, respectivamente. A variação da vazão em função do tamanho do pacote segue a mesma lógica observada para a banda de 2.4 GHz.

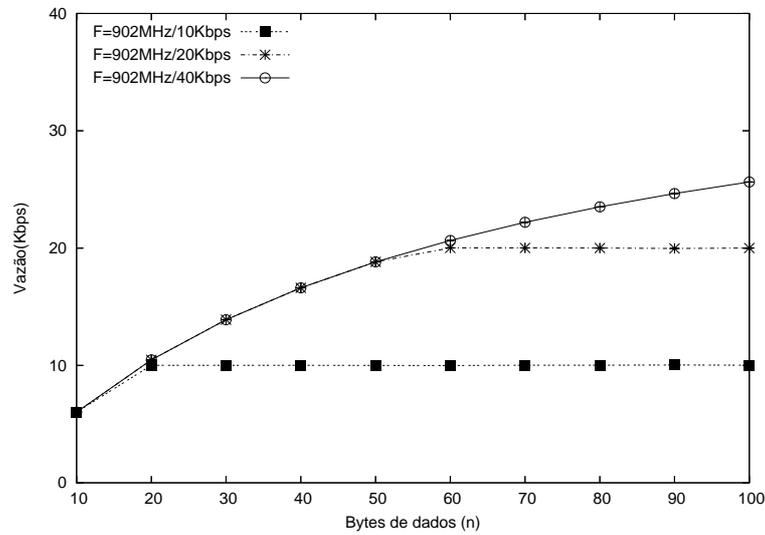


Figura 4.4: Vazão útil x nº de Bytes/pacote: 2 estações 902 MHz

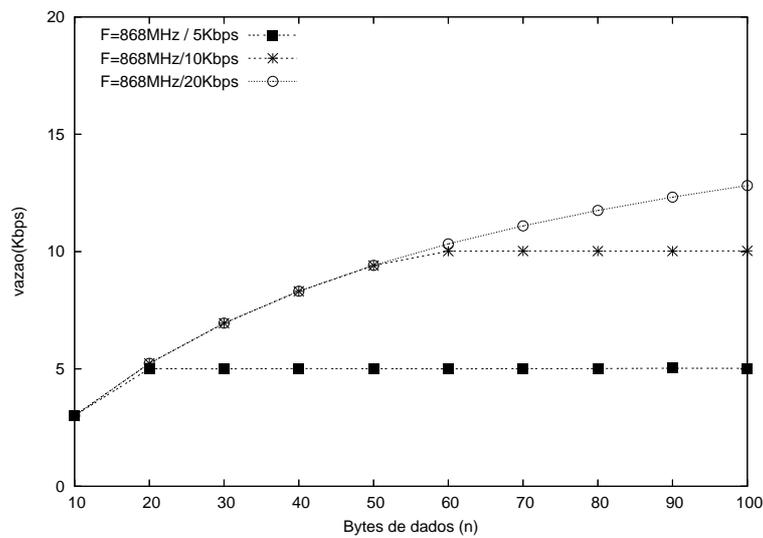


Figura 4.5: Vazão útil x nº de Bytes/pacote: 2 estações 868 MHz

Também na banda de 902/868 MHz observa-se uma saturação na vazão, sendo que nas taxas de 10 Kbps (868 MHz) e 20 Kbps (902 MHz), a partir de pacotes com 60 Bytes essas taxas já alcançam seus limites e para as taxas de 5 Kbps (868 MHz) e 10 Kbps (902 MHz) a partir de 20 Bytes.

Na segunda métrica, ambas as bandas de frequência apresentaram resultados equivalentes. Para a velocidade dos dados na fonte de 40 Kbps em 902 MHz e 20 Kbps em

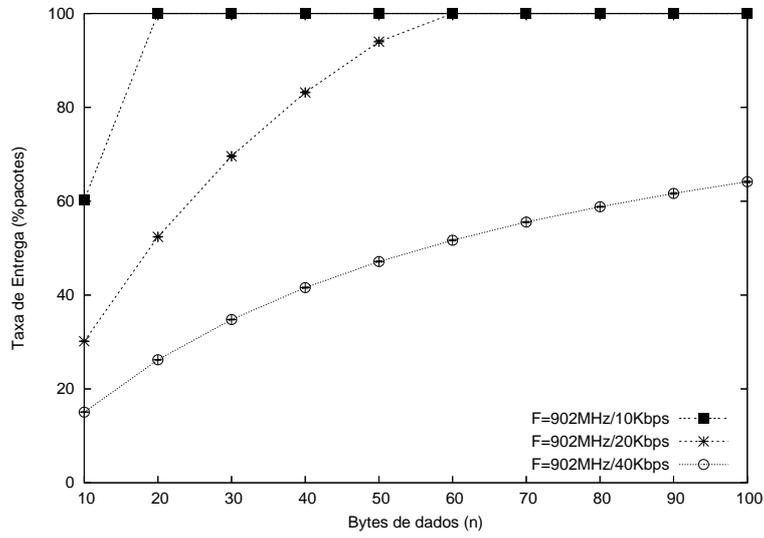


Figura 4.6: Taxa de Entrega : 2 estações 902 MHz

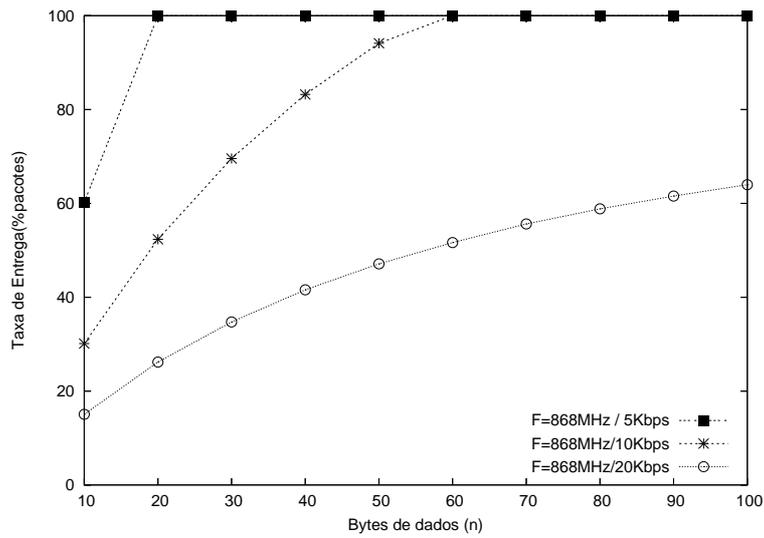


Figura 4.7: Taxa de Entrega : 2 estações 868 MHz

868 MHz a taxa de entrega não chegou a 65%. Nas demais velocidades a taxa de entrega foi próxima de 100% para pacotes maiores ou iguais a 50 Bytes nas velocidades intermediárias de cada banda (20/10 Kbps) e para pacotes maiores ou iguais a 20 Bytes para velocidades menores. Comparado com a banda de 2.4 GHz, o desempenho da banda de 902/868 MHz foi ligeiramente melhor, porém como a diferença nos valores absolutos são grandes, em termos de velocidade, a utilização da primeira ainda é a mais indicada.

### 4.3 Cenário 2

De posse dos resultados das simulações com o cenário 1 o próximo passo foi construir um cenário com roteadores e verificar o quanto a vazão e a taxa de entrega seriam afetados. Uma vez que a simulação anterior mostrou uma equivalência entre as frequências de 902 MHz e 868 MHz e tendo este último menor velocidade, as próximas simulações retratam apenas as bandas de 2.4 GHz e 902 MHz. Foram incluídos 10 roteadores para simulações com a banda de 2.4 GHz e 3 roteadores para a banda de 902 MHz. O motivo da inclusão de quantidades diferentes de roteadores nas bandas se deu porque a banda de frequência mais baixa permite um alcance maior e conseqüentemente menos nós para atingir a mesma distância. As figuras 4.8 e 4.9 mostram os cenários para 2.4 GHz e 902 MHz.

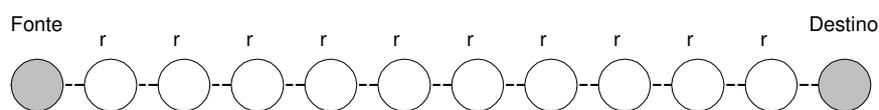


Figura 4.8: Cenário 2 - 2.4 GHz

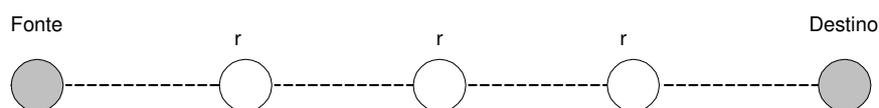


Figura 4.9: Cenário 2 - 902 MHz

Tabela 4.2: Cenário 2

Taxa Nominal do Meio (Kbps)	250	40
Taxa de Dados - CBR (Kbps)	60,120,250	10,20,40
Frequência	2.4 GHz	902 MHz
Número de nós	12	5
Distância entre os nós	8.0 m	22.0 m
Altura da Antena	6.25 cm	16.6 cm
Alcance do rádio (RXThresh)	12.5 m	33.2 m
Alcance da portadora (CSThresh)	16.6 m	44.2 m
Quantidade de Bytes/pacote	10 a 100	10 a 100
Métrica 1 - Vazão	Kbps	Kbps
Métrica 2 - Taxa de Entrega	%pacotes	%pacotes

Neste cenário os nós intermediários apenas roteiam os pacotes de dados para o destino. A distância entre os nós foi escolhida, baseada primeiramente na sensibilidade do nó ZigBee conforme padrão IEEE 802.15.4, na potência de transmissão, na banda de frequência e na altura da antena. A sensibilidade dos nós (*RXThresh*) utilizada neste cenário foi de -92dBm e para a portadora (*CSThresh*) -97dBm. Com antena de altura igual a metade do comprimento de onda os alcances no modo de propagação TwoRayGround são de 12.5m e 33.2m nas frequências de 2.4 GHz e 902 MHz respectivamente. A relação entre esses alcances foi a relação utilizada na distância entre os nós em 2.4 GHz (8m) e 902 MHz (22m). A tabela 4.2 mostra os valores dos parâmetros.

### 4.3.1 Resultados

A Figura 4.10 mostra uma curva saturada e no melhor caso com pacotes de 100 Bytes, a vazão atinge em torno de 24 Kbps representando apenas 9.6% da taxa nominal de 250 Kbps em 2.4 GHz. De acordo com a Figura 4.11, na banda de 902 MHz, a vazão máxima foi de 7 Kbps, ou seja 17.5% da taxa nominal de 40 Kbps.

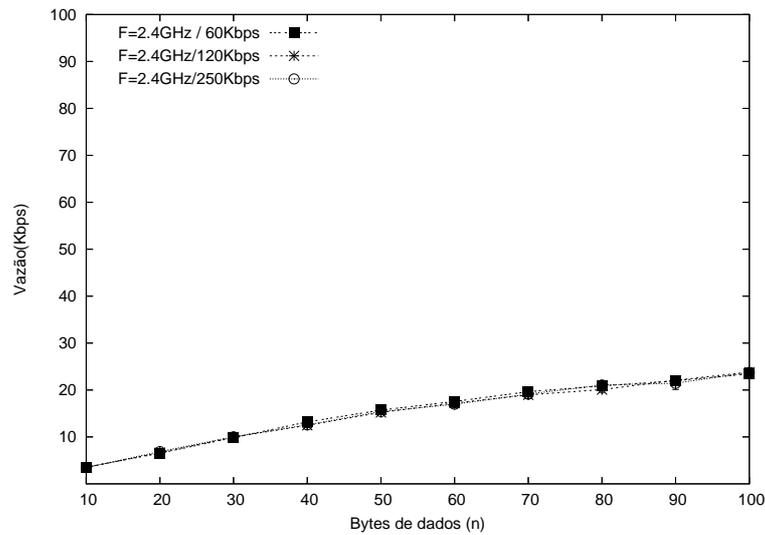


Figura 4.10: Vazão 2.4 GHz

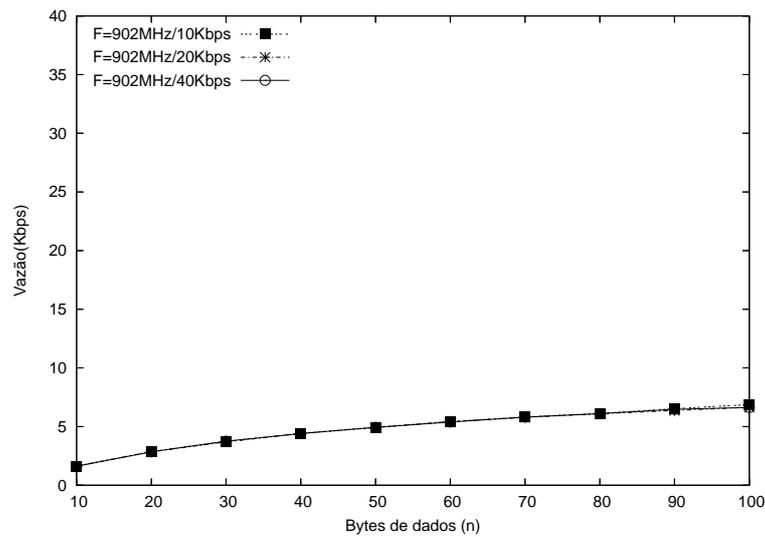


Figura 4.11: Vazão 902 MHz

A relação entre pacotes recebidos e pacotes enviados na banda de 2.4 GHz foi muito reduzida tornando inviável um cenário real deste tipo para aplicações de controle e monitoramento. A taxa utilizada para este tipo de aplicação teria que ser menor que 60Kbps, uma vez que nesta velocidade com 100 Bytes a taxa de entrega foi de 39%. Para a banda de 902 MHz na taxa de 10 Kbps, a taxa de entrega para pacotes de 100 Bytes ficou em 69%, resultado este ainda insuficiente para um modelo real.

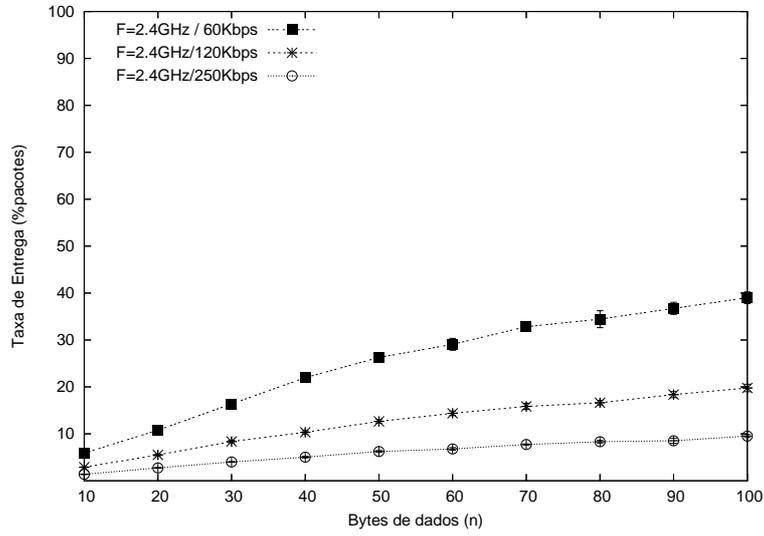


Figura 4.12: Taxa de Entrega 2.4 GHz

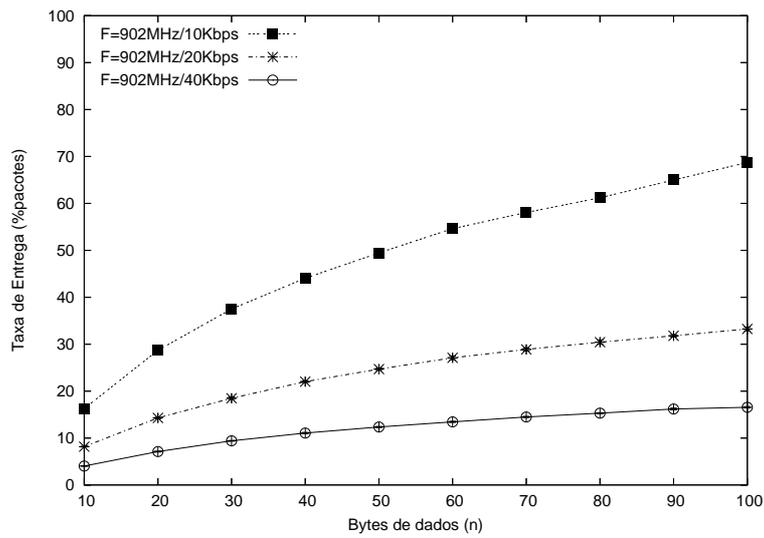


Figura 4.13: Taxa de Entrega 902 MHz

## 4.4 Cenário 3

Os resultados da simulação anterior com o cenário 2 mostraram que este não é um modelo adequado para uma aplicação real de controle e automação, e então foi necessário reduzir o número de roteadores e a taxa de dados para se obter um melhor desempenho.

O cenário 3 mantém a mesma topologia anterior com um menor número de nós. Foram 4 roteadores em 2.4 GHz e 1 roteador em 902 MHz. As figuras 4.14 e 4.15 mostram os cenários para 2.4 GHz e 902 MHz. Além da variação no número de nós para este cenário foram executadas simulações com seis taxas de envio de dados para cada banda de frequência (Taxa de Dados 1 e 2), sendo que para a taxa de dados 2 a métrica utilizada foi a taxa de entrega. Os demais parâmetros da simulação anterior foram mantidos, conforme observado na tabela 4.3.

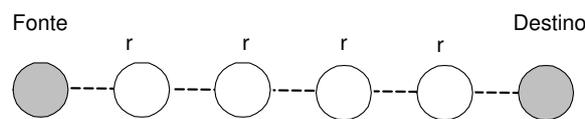


Figura 4.14: Cenário 3 - 2.4 GHz

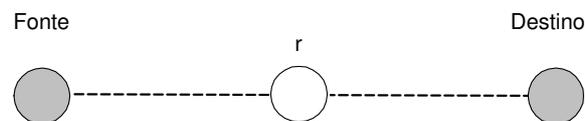


Figura 4.15: Cenário 3 - 902 MHz

### 4.4.1 Resultados

Neste cenário os nós intermediários apenas roteiam os pacotes de dados para o destino. A Figura 4.16 mostra uma curva saturada e a vazão máxima atingida em 2.4 GHz foi

Tabela 4.3: Cenário 3

Taxa Nominal do Meio (Kbps)	250	40
Taxa de Dados 1 - CBR (Kbps)	60,120,250	10,20,40
Taxa de Dados 2 - CBR (Kbps)	10,20,40	2,4,8
Frequência	2.4 GHz	902 MHz
Número de nós	6	3
Distância entre os nós	8.0 m	22.0 m
Altura da Antena	6.25 cm	16.6 cm
Alcance do rádio (RXThresh)	12.5 m	33.2 m
Alcance da portadora (CSThresh)	16.6 m	44.2 m
Quantidade de Bytes/pacote	10 a 100	10 a 100
Métrica 1 - Vazão	Kbps	Kbps
Métrica 2 - Taxa de Entrega	%pacotes	%pacotes

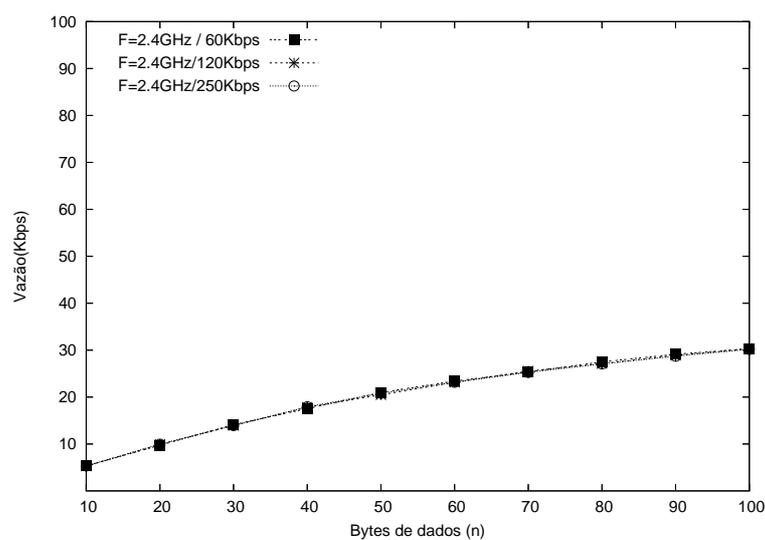


Figura 4.16: Vazão 2.4 GHz

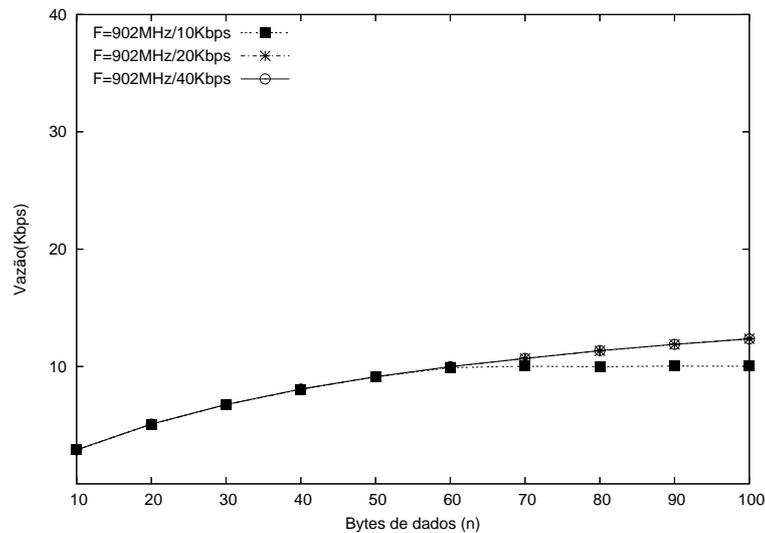


Figura 4.17: Vazão 902 MHz

30 Kbps representando 12% da taxa nominal e em 902 MHz tivemos 12.4 Kbps, ou seja 31% da nominal. A banda de 902 MHz manteve um desempenho melhor em função de seu maior alcance e por conseguinte um menor número de nós para cobrir a mesma distância.

A taxa de entrega nos dá uma idéia melhor da possibilidade ou não deste cenário com as taxas simuladas ser utilizado em uma aplicação industrial. Uma relação de pacotes recebidos por pacotes enviados menor que 90% não seria recomendada em ambientes industriais. Conforme a figura 4.18 a melhor taxa de entrega em 2.4 GHz foi de 50%, o que inviabiliza a utilização deste cenário nesta banda com as taxas simuladas. Na banda de 902 MHz, figura 4.19, a uma velocidade de envio de dados de 10 Kbps a taxa de entrega a partir de 50 Bytes foi superior a 90%. Portanto na banda de 902 MHz com uma taxa de 10 Kbps neste cenário com um roteador e pacote maior ou igual a 50 Bytes é viável em uma aplicação de controle e monitoramento.

Devido os resultados estarem ainda aquém do esperado, foram realizadas neste mesmo cenário simulações com taxa de envio de dados menores, ou seja 10/20/40 Kbps em 2.4 GHz e 2/4/8 Kbps em 902 Mhz. No caso da banda de 2.4 GHz como mostrado na figura 4.20 a taxa de 40 Kbps não apresentou uma boa taxa de entrega, porém nas taxas de 10 e 20 Kbps com tamanhos de pacotes maiores ou iguais a 20 e 40 Bytes respectivamente

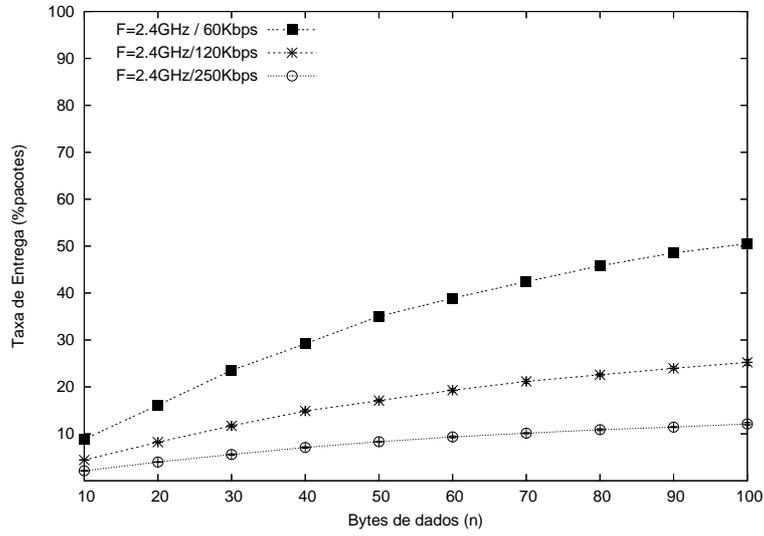


Figura 4.18: Taxa de Entrega 2.4 GHz

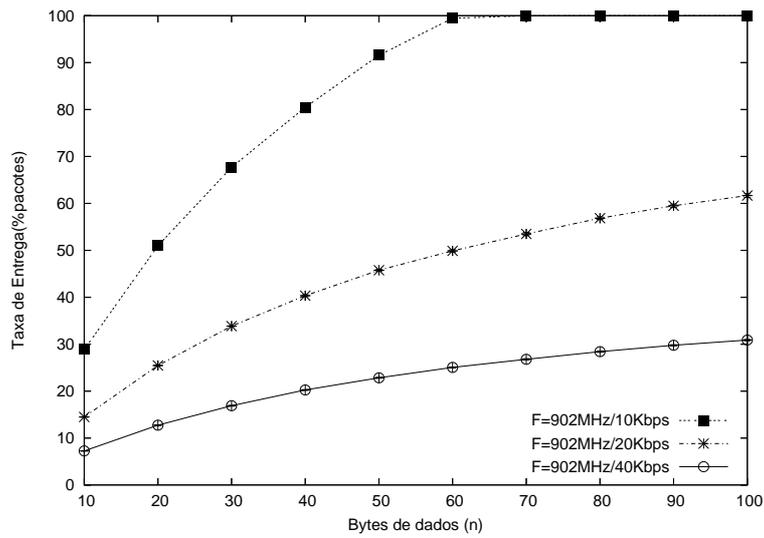


Figura 4.19: Taxa de Entrega 902 MHz

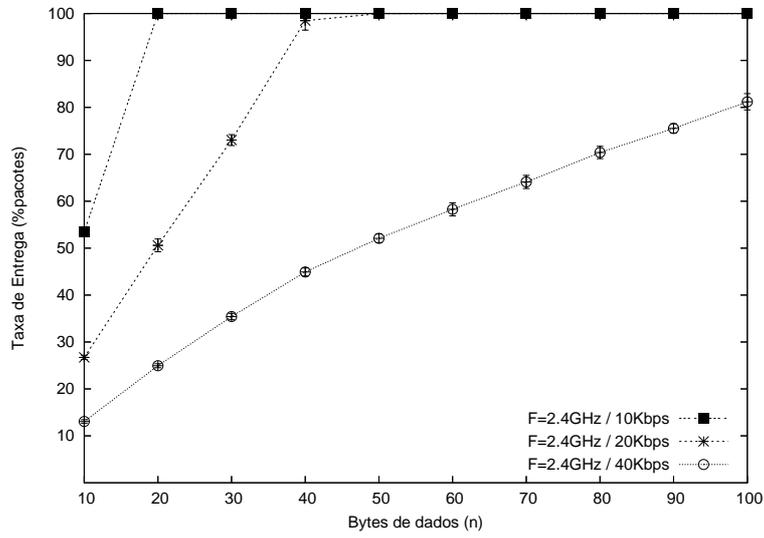


Figura 4.20: Taxa de Entrega 2.4 GHz

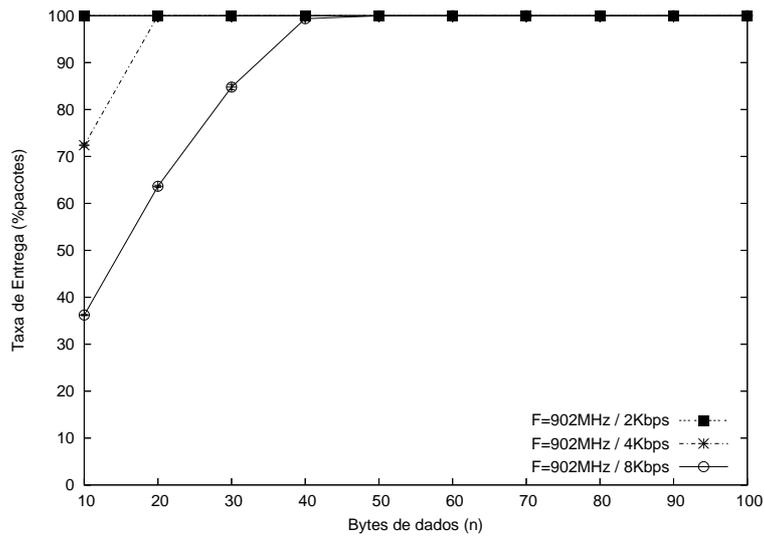


Figura 4.21: Taxa de Entrega 902 MHz

a relação foi de aproximadamente 100%.

Na banda de 902 MHz a taxa de 2 Kbps apresentou uma taxa de entrega de 100% independente do tamanho do pacote, enquanto que nas taxas de 4 e 8 Kbps 100% de entrega de dados foi conseguido com pacotes maiores ou iguais a 20 e 40 Bytes respectivamente, como observado na figura 4.21.

## 4.5 Cenário 4

Os cenários anteriores mostraram um resultado que depende do número de roteadores. Quanto menor, melhor a taxa de entrega e para um grande número de roteadores a taxa de dados tem que ser reduzida. O cenário 4 utiliza uma topologia em estrela, com um nó central como coordenador recebendo dados dos nós satélites. O objetivo continua o mesmo, ou seja descobrir os limites deste protocolo e torná-lo referência para a escolha de um cenário em uma aplicação de controle e monitoramento. Na simulação, inicialmente é reservado um intervalo de tempo para a formação da rede que depende do número de nós. Durante a formação da rede o coordenador aceita o pedido de associação de cada nó e vai se sincronizando com cada um deles na medida em que reconhece a associação. A transmissão de dados foi confi gurada com suporte *abeacons* e método de acesso CSMA-CA. Todos os nós da rede são nós fontes, enquanto o coordenador é o destino. Após a sincronização para não haver um congestionamento inicial, os nós fontes partem a transmissão com intervalo de 1s entre eles, e a mantém durante 100 segundos, que é o tempo útil de simulação.

Conforme mostrado na figura 4.22 os nós satélites distam do nó central 10 metros e em todas as simulações foi considerado um plano de alcance único com *RXThresh* maior que 20 metros, ou seja a transmissão de qualquer nó alcança todos os nós. Isto confi gura uma situação ideal em que não existe o problema do nó escondido. Para reproduzir este sinal com um alcance maior foram utilizadas antenas com alturas de 12,5 cm e 16,6 cm respectivamente para as bandas de 2.4 GHz e 902 MHz e sensibilidade dos receptores em -92dBm. Nas simulações, cada nó satélite envia os dados para o coordenador em pacotes por segundo, como pode ser visualizado na tabela 4.4. A taxa nominal do meio é a es-

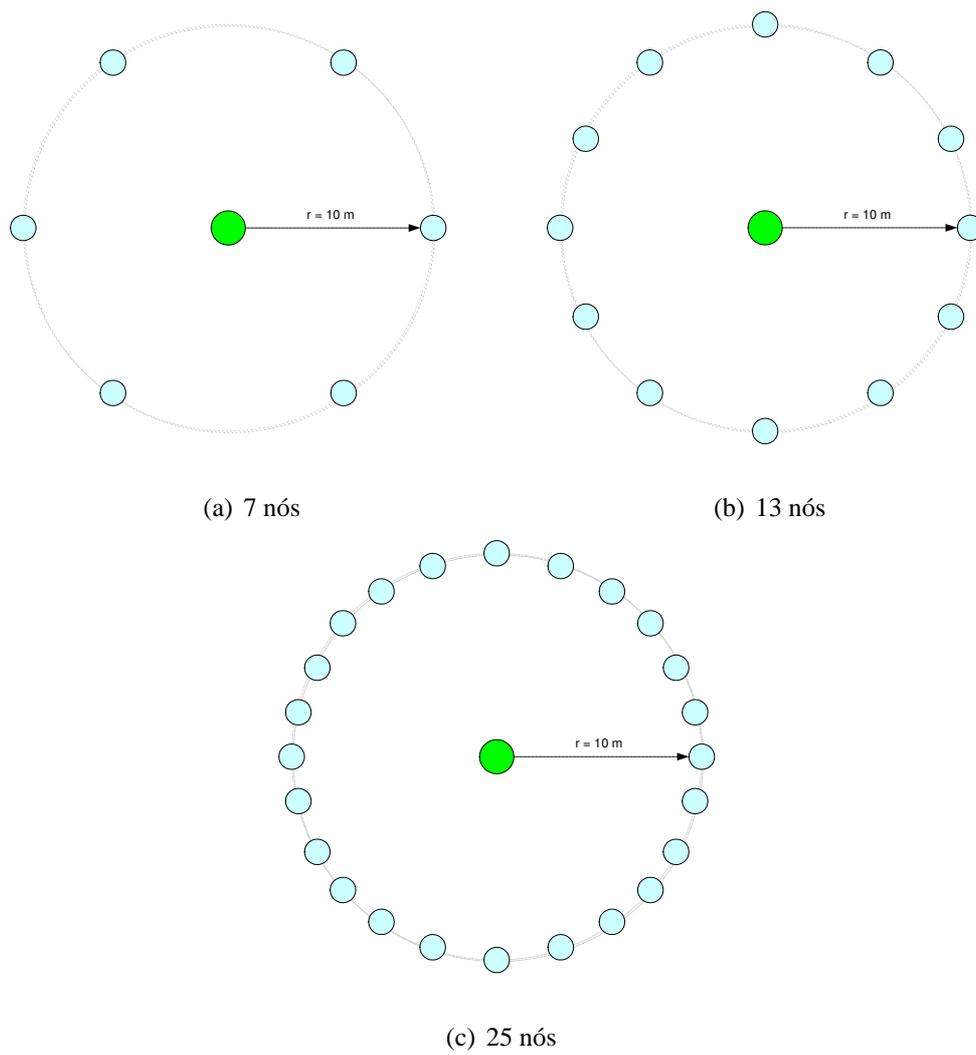


Figura 4.22: Cenário 4

Tabela 4.4: Cenário 4

Cenários	4a	4b	4c
Número de nós	7	13	25
Taxa de Dados - 2.4GHz (pacotes/s)	5,10,20	5,10,20	2,5,10
Taxa de Dados - 902MHz (pacotes/s)	2,5,10	1,2,5	1,2,5
Distância do nó coordenador	10.0 m	10.0 m	10.0 m
Alcance (RXThresh/CSThresh 2.4G)	24.95 m	24.95 m	24.95 m
Alcance (RXThresh/CSThresh 902M)	33.2 m	33.2 m	33.2 m
Quantidade de Bytes/pacote	10 a 100	10 a 100	10 a 100
Métrica - Taxa de Entrega	%pacotes	%pacotes	%pacotes

pecifi cada pelo IEEE 801.15.4, ou seja 250 Kbps para 2.4 GHz e 40 Kbps para 902 MHz.

#### 4.5.1 Resultados 2.4 GHz

Os cenários apresentados nesta seção com uma topologia em estrela se diferenciam na quantidade de nós. Quanto maior o número de nós fonte, maior o congestionamento e pior o desempenho tornando-se necessário diminuir a velocidade para se manter a mesma taxa de entrega. Nos cenários com 7 e 13 nós na banda de 2.4 GHz as velocidades de transmissão de dados simuladas foram de 5, 10 e 20 pacotes/s e no cenário de 25 nós, as velocidades foram 2, 5 e 10 pacotes/s. A figura 4.23 mostra que no cenário com 7 nós, todas as velocidades simuladas tiveram um bom desempenho, independente do tamanho do pacote. Quando se aumentou o número de nós para 13, como mostrado na figura 4.24, a velocidade de 20 pacotes/s não conseguiu manter uma boa taxa de entrega nem mesmo com pacotes muito pequenos e na velocidade de 10 pacotes/s pacotes maiores que 70 Bytes não apresentaram bons resultados, enquanto que para 5 pacotes/s a taxa de entrega foi boa para todos os tamanhos do pacote.

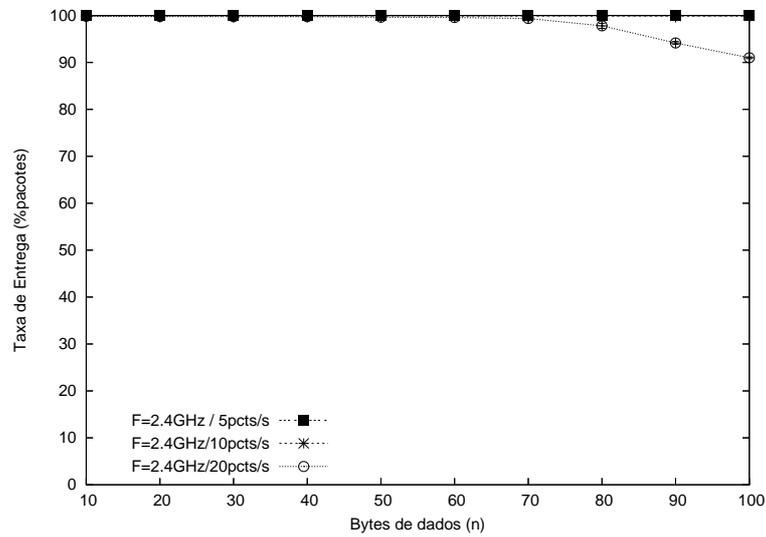


Figura 4.23: Taxa de Entrega 7 nós 2.4 GHz

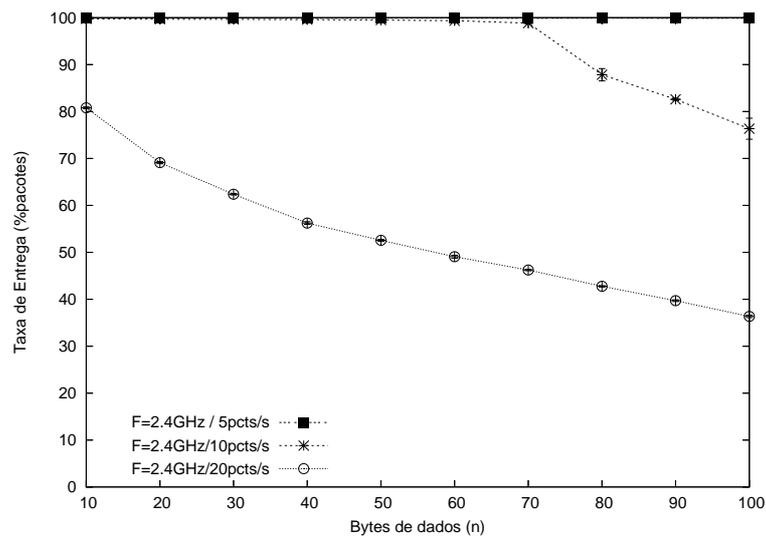


Figura 4.24: Taxa de Entrega 13 nós 2.4 GHz

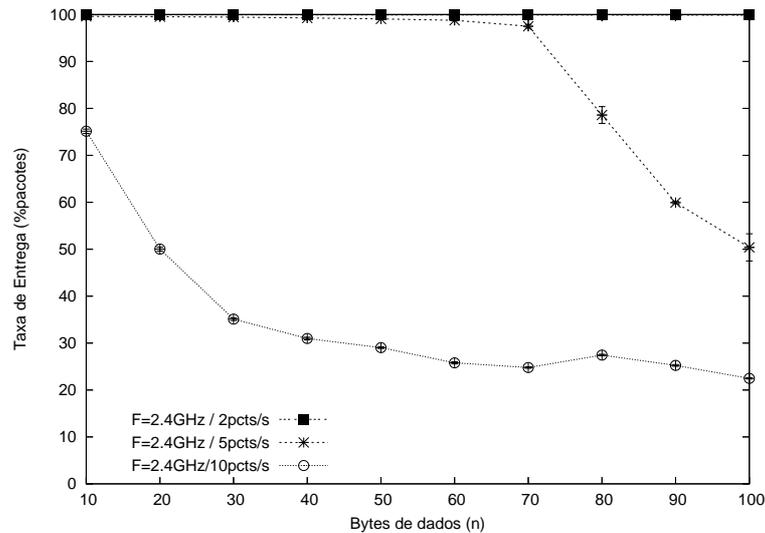


Figura 4.25: Taxa de Entrega 25 nós 2.4 GHz

Uma observação interessante é o fato que nestes cenários, diferentemente dos anteriores, o desempenho diminui com o aumento do tamanho do pacote. Isto acontece porque quanto maior o pacote, maior o número de bits em um mesmo intervalo de tempo. Nos casos anteriores a taxa de bits é constante e o aumento da quantidade de Bytes no pacote diminui o número de pacotes por intervalo de tempo, que por sua vez diminui o número de pacotes de reconhecimento, reduzindo então o *overhead* e conseqüentemente melhorando o desempenho.

No caso dos resultados do cenário de 25 nós mostrados na figura 4.25 somente na velocidade de 2 pacotes/s a taxa se manteve boa independente do tamanho do pacote, enquanto na velocidade de 5 pacotes/s apenas para pacotes menores ou iguais a 70 Bytes. Na velocidade de 10 pacotes/s a taxa de entrega apresentou índices muito ruins.

#### 4.5.2 Resultados 902 MHz

As considerações para a banda de 2.4 GHz se repetem para 902 MHz, sendo que devido à menor taxa do meio (40 KHz) as velocidades das fontes de dados são menores. No cenário com 7 nós utilizou-se as velocidades de transmissão de dados de 2, 5 e 10 pa-

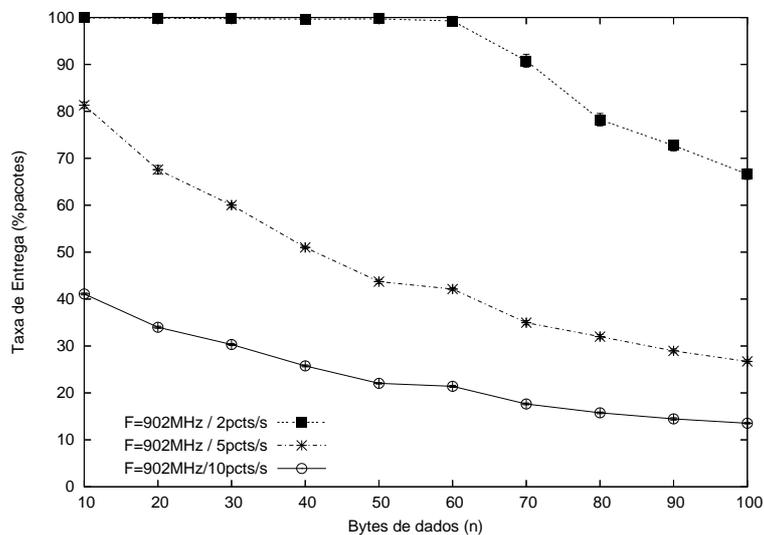


Figura 4.26: Taxa de Entrega 7 nós 902 MHz

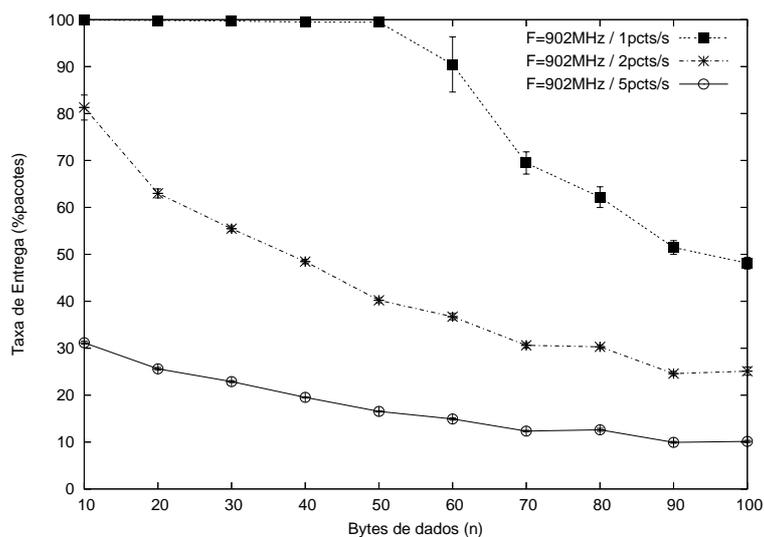


Figura 4.27: Taxa de Entrega 13 nós 902 MHz

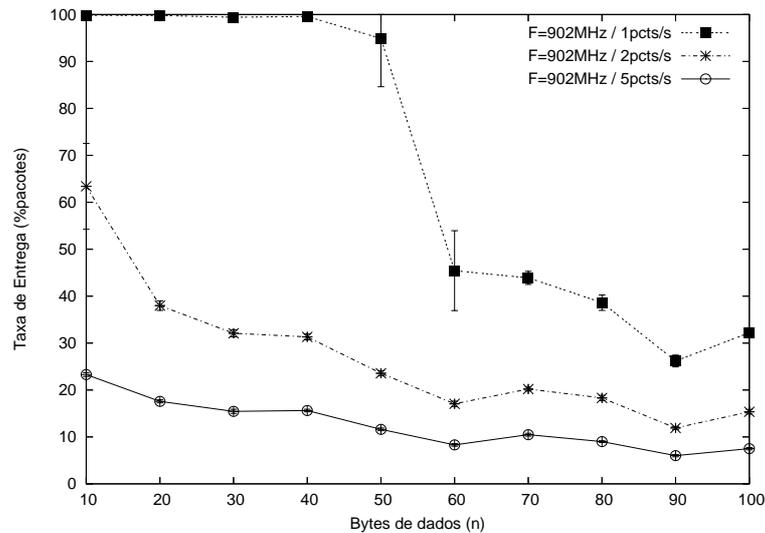


Figura 4.28: Taxa de Entrega 25 nós 902 MHz

cotes/s e nos cenários de 13 e 25 nós, as velocidades de 1, 2 e 5 pacotes/s. A figura 4.26 mostra que no cenário com 7 nós, apenas na velocidade de 2 pacotes/s e pacotes até 70 Bytes a taxa de entrega ficou próxima de 100%. Portanto 5 e 10 pacotes/s não seriam velocidades adequadas em uma aplicação. Quando se aumentou o número de nós para 13, como mostrado na figura 4.27, somente a velocidade de 1 pacote/s apresentou um bom desempenho em pacotes até 50 Bytes. Em velocidades maiores a taxa ficou comprometida. No caso de 25 nós mostrado na figura 4.28 a velocidade de 1 pacote/s ainda manteve um bom desempenho em pacotes até 40 Bytes, enquanto em velocidades maiores a queda foi significativa em relação ao cenário com 13 nós.

## 4.6 Comentários

As simulações mostraram inicialmente as vazões reais máximas em cada banda de frequência (52%, 62% e 64% da vazão nominal em 2.4 GHz, 902 MHz e 868 MHz respectivamente). As bandas de frequências mais baixas apresentaram um melhor desempenho, porém distante ainda dos valores da banda de 2.4 GHz. Com a semelhança nos resultados entre as bandas de 868 MHz e 902 MHz o estudo concentrou-se mais em 902 MHz devido a sua taxa nominal mais elevada (40 Kbps).

Verificou-se uma diminuição considerável na vazão e taxa de entrega quando roteadores eram intercalados nas rotas dos dados, e então necessitou-se diminuir a taxa de envio de dados para a manutenção de um bom desempenho.

Com 10 roteadores na banda de 2.4 GHz e 3 roteadores na de 902 MHz a vazão de dados e a taxa de entrega alcançaram valores que estão muito aquém do necessário em aplicações de monitoramento e controle, para as taxas apresentadas (60/120/250 Kbps em 2.4 GHz e 10/20/40 kbps em 902 MHz). Para se obter melhores resultados foram feitas simulações com 4 roteadores em 2.4 GHz e 1 na banda de 902 MHz. Ainda assim foi necessário simular taxas de envio de dados menores, como 10/20/40 Kbps em 2.4 GHz e 2/4/8 Kbps em 902 MHz. Finalmente procurou-se avaliar um cenário com topologia em estrela, sua escalabilidade e desempenho com pacotes de tamanhos variados.

Uma vez definido o número de nós e o tamanho do pacote de dados o projetista terá uma idéia da maior velocidade de transmissão que poderá utilizar neste tipo de cenário, ou define a velocidade e o tamanho do pacote até quantos nós poderá dispor sem comprometer a taxa de entrega.

Como exemplo, poderemos considerar um sistema formado por um computador central, coordenador da rede, que recebe as informações vindas de 12 sensores divididos em duas sub-redes tipo estrela. O coordenador de cada sub-rede estrela recebe os dados de 6 sensores e os repassa para o coordenador da rede através de um roteador, conforme mostrado na figura 4.29. Este exemplo poderia ser considerado na aplicação descrita no capítulo anterior (figura 3.2), onde o micro de supervisão corresponderia ao coordenador da rede, os roteadores e coordenadores das sub-redes estrela seriam nós ZigBee FFD, de preferência com alimentação contínua, e os sensores e atuadores da rede de automação seriam nós sensores ZigBee FFD ou RFD, alimentados com bateria.

Tomando como base os resultados obtidos neste trabalho, que valores limites da taxa de dados poderíamos contar neste cenário de modo a não comprometer a confiabilidade da rede?

Para a resolução desta questão vamos definir alguns parâmetros básicos: banda de 2.4 GHz, pacotes com 50 Bytes e consideraremos todos os 12 sensores como nós fontes.

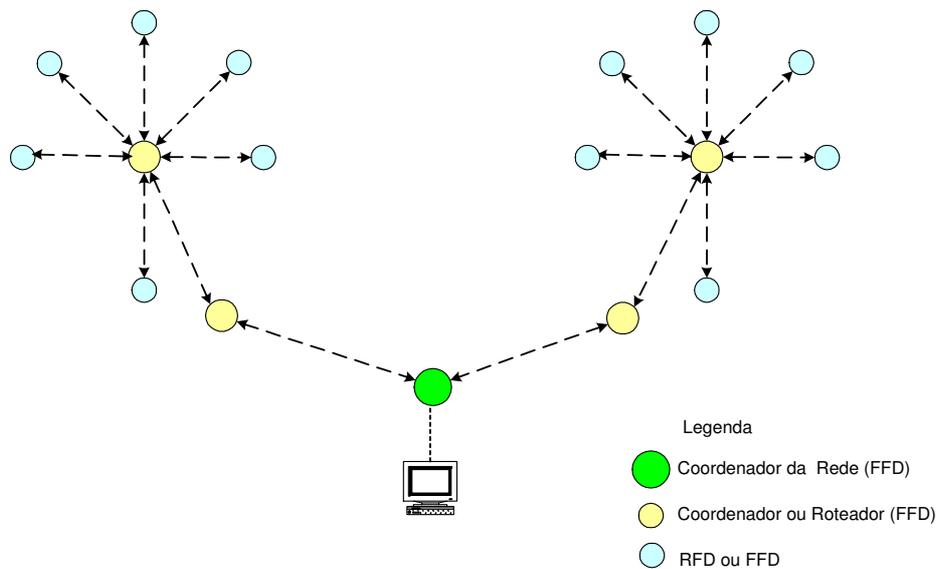


Figura 4.29: Cenário - Exemplo

Para descobrirmos que taxa de envio de dados de cada nó nas sub-redes estrela poderemos considerar, seguiremos os seguintes passos:

- 1 - taxa máxima no roteador;
- 2 - escolha de uma taxa limite para os sensores;
- 3 - verificação da taxa total de cada coordenador da rede estrela.

Passo 1: Podemos observar nos resultados do cenário 3, na figura 4.20 uma taxa de entrega em torno de 100% para taxa de envio de dados menor ou igual a 20 Kbps. Para verificar se esta taxa está dentro dos limites, basta consultar a figura 4.16 onde a vazão encontrada para 50 Bytes foi de 20.5 Kbps. Tomando por base então a taxa de 20 Kbps e considerando que no cenário 3 havia 4 roteadores ou 5 enlaces, e no nosso exemplo existe 1 roteador intermediário ou 2 enlaces até o coordenador da sub-rede estrela, podemos estimar uma taxa de dados total para o coordenador da rede de  $5/2 \times 20$  Kbps ou 50 Kbps. Como o coordenador central da rede tem dois ramos simétricos, vamos considerar a metade da taxa em cada roteador, ou seja 25 Kbps.

Passo 2: A rede estrela deste exemplo possui 6 nós e entrando no gráfico da figura 4.23 com 50 Bytes obtém-se uma taxa de entrega de 100% para todas as taxas simuladas. Considerando uma taxa de 20 pacotes/s, são 8 Kbps/nó ou 48 Kbps devido aos 6 nós.

Como esta taxa supera a taxa máxima definida para o roteador, de 25 Kbps, devemos então reduzir a velocidade de envio de dados para 10 pacotes/s, ou 4 Kbps/nó e 24 Kbps/6nós. Esta taxa é menor que a taxa máxima do roteador, portanto basta apenas agora verificar se o coordenador da sub-rede estrela tem um bom desempenho a uma taxa de 2x24 Kbps, ou 48 Kbps, uma vez que ele terá que transferir os dados para o roteador na mesma taxa que receber.

Passo 3: Uma maneira de saber qual a taxa limite do nó central da sub-rede estrela é observar os resultados da simulação com um número maior de nós, por exemplo 13 nós. Conforme figura 4.24, o melhor resultado aparece com 10 pacotes/s e 70 Bytes, onde ainda é mantida a taxa de entrega de aproximadamente 100%. Neste caso teríamos 700 Bytes/s ou 5.6 Kbps/nó ou ainda 67.2 Kbps/12nós. Esta taxa é superior ao mínimo exigido de 48 Kbps.

Portanto tudo indica que este cenário tenha um bom desempenho com uma taxa de envio de dados de 10 pacotes/s, sendo cada pacote de 50 Bytes na banda de frequência de 2.4 GHz.

# Capítulo 5

## Conclusões

O PADRÃO ZigBee foi concebido para atender as aplicações com monitoramento e controle, nas esferas residencial, predial e industrial em uma estrutura composta por sensores, cujos atributos principais fossem a simplicidade, o custo e a economia de energia. Trata-se de uma área de aplicação ainda carente de ofertas de protocolos sem fi o que atendam todos os requisitos necessários para um funcionamento confiável. Características como interferência interna, interferência externa, segurança, confiabilidade, latência e taxa de dados devem ser sempre analisadas na viabilidade do protocolo para uma determinada aplicação.

O estudo executado foi focado nos atributos interferência interna, confiabilidade, latência e taxa de dados de uma rede ZigBee, nas camadas inferiores correspondentes ao padrão IEEE 802.15.4. Este trabalho representou a primeira fase de um estudo destinado a ajudar àqueles que desejam criar uma rede sem fi o em aplicações de automação residencial, industrial, ou simplesmente em monitoramento. O desenvolvedor poderá usar os resultados deste trabalho como fonte de consulta. Parâmetros como topologia, cenário, tamanho do pacote de dados e taxa de envio de dados poderão ser melhores avaliados.

Deve-se ter sempre em mente que para se estimar uma taxa de dados ou o número de roteadores para uma determinada aplicação a taxa de entrega considerada deverá ser superior a 90%, para não comprometer a confiabilidade do sistema. O desenvolvimento de topologias ponto a ponto também poderá ter como referência o trabalho apresentado

---

tomando por base as simulações nos cenários em estrela e os cenários utilizados com roteadores.

Este trabalho provê um bom ponto de partida para o desenvolvimento de trabalhos futuros. Por exemplo o mesmo estudo poderia ser feito considerando-se uma comunicação com prioridade para alguns dispositivos. Para tanto se usaria períodos reservados (GTS) em uma comunicação com *beacon*. Estes períodos reservados são úteis em aplicações de monitoramento e controle, pois garantem que a latência não ultrapasse um valor pré-definido. Em face do programa ns-2.28 ainda não comportar o suporte para períodos reservados (GTS), este trabalho não realizou simulações de latência. O suporte ao GTS no ns-2 poderá ser objeto de trabalho futuro caso não seja liberado nas versões seguintes.

Foram criados dois grupos de trabalho no IEEE com o objetivo de aperfeiçoar o padrão IEEE 802.15.4 e num deles foram redefinidas as taxas de dados de cada banda de frequência [32]. Um trabalho futuro importante seria a repetição destas simulações, considerando as novas taxas implementadas.

Dando continuidade a este trabalho poderia ser feito um estudo de outros atributos igualmente importantes em uma rede ZigBee, como interferência externa e segurança.

Um outro ponto que poderia ser objeto de estudo diz respeito à camada de rede. Neste trabalho foi utilizado o roteamento AODV já bastante difundido em redes *ad hoc*, porém o protocolo ZigBee têm especificado um protocolo hierárquico que não foi objeto deste estudo, mas traria contribuições significativas, principalmente em cenários mais complexos.

Seria importante comentar que os resultados deste trabalho devem corresponder a uma primeira fase de consulta de um projetista ou desenvolvedor de rede, pois outros parâmetros devem ser analisados em uma rede de monitoramento e controle tais como: interferência externa, segurança, alcance, obstáculos ao sinal de radiofrequência, roteamento, consumo de energia, etc.

# Referências Bibliográficas

- [1] ZIGBEE ALLIANCE. ZigBee Specification version 1.0, dezembro de 2004. Página: <http://www.zigbee.org>.
- [2] IEEE 802.15.4. *Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications for Low-Rate Wireless Personal Area Networks(LR-WPAN)*, maio de 2003.
- [3] CALLAWAY, E., GORDAY, P., HESTER, L., GUTIERREZ, J. A., NAEVE, M., HEILE, B., E BAHL, V. Home Networking with IEEE 802.15.4: A Developing Standard for Low-Rate Wireless Personal Area Networks. *IEEE Communications Magazine* 40, 8 (2002), 70–77.
- [4] GUTIERREZ, J. A., NAEVE, M., CALLAWAY, E., BOURGEOIS, M., E MITTER, V. IEEE 802.15.4: A Developing Standard for Low-Power, Low-Cost Wireless Personal Area Networks. *IEEE Network Magazine* (2001).
- [5] GUTIERREZ, J. A., CALLAWAY, E. H., E BARRETT, R. *IEEE 802.15.4 Low-Rate Wireless Personal Area Networks: Enabling Wireless Sensor Networks*. IEEE Standards Office, New York, NY, USA, 2003.
- [6] KOUBÂA, A., ALVES, M., E TOVAR, E. Lower Protocol Layers for Wireless Sensor Networks: A Survey. Relatório Técnico TR-051101, Polytechnic Institute of Porto, Portugal, novembro de 2005.
- [7] KOUBÂA, A., ALVES, M., E TOVAR, E. IEEE 802.15.4 for Wireless Sensor Networks: A Technical Overview. Relatório Técnico TR-050702, Polytechnic Institute of Porto, Portugal, 2005.

- [8] LIANG, N.-C., CHEN, P.-C., SUN, T., YANG, G., CHEN, L.-J., E GERLA, M. Impact of Node Heterogeneity in ZigBee Mesh Network Routing. *University of California, Los Angeles, and Institute of Information Science, Taiwan* (2006).
- [9] PERKINS, C., BELDING-ROYER, E., E DAS, S. RFC 3561 - Ad hoc On-demand Distance Vector (AODV) Routing. *IETF Request for Comments* (julho de 2003).
- [10] LUCEKLEIN, E BERNDT. A Quick Guide to AODV Routing. *Wireless Communications Technologies Group, National Institute of Standards and Technology* (2002).
- [11] HOFFERT, J., KLUES, K., E ORJIH, O. Configuring the IEEE 802.15.4 MAC Layer for Single-sink Wireless Sensor Network Applications. *Washington University* (dezembro de 2005).
- [12] LU, G., KRISHNAMACHARI, B., E RAGHAVENDRA, C. S. Performance Evaluation of the IEEE 802.15.4 MAC for Low-Rate Low-Power Wireless Networks, 2004.
- [13] PETROVA, M., RIIHIJÄRVI, J., MÄHÖNEN, P., E LABELLA, S. Performance Study of IEEE 802.15.4 Using Measurements and Simulations. *RWTH Aachen University, Germany* (2005).
- [14] IEEE 802.11. *Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications for Low-Rate Wireless Personal Area Networks(LR-WPAN)*, 1999.
- [15] NEUGEBAUER, M., PLÖNNIGS, J., E KABITZSCH, K. A New Beacon Order Adaptation Algorithm for IEEE 802.15.4 Networks. *Institute for Applied Computer Science* (2005).
- [16] ZHENG, J., E LEE, M. J. A Comprehensive Performance Study of IEEE 802.15.4. *IEEE Press Book* (2006), pp. 218–237.
- [17] ZHENG, J., E LEE, M. J. Will IEEE 802.15.4 Make Ubiquitous Networking a Reality?: A Discussion on a Potencial Low Power Bit Rate. *Standard IEEE Communications Magazine*, (junho de 2004), 140–146.

- [18] GOLMIE, N., CYPHER, D., E REBALA, O. Performance Evaluation of Low Rate WPANS for Medical Applications. *National Institute of Standards and Technology* (2004).
- [19] CHIPCON. Data Sheet for CC2420 2.4GHz IEEE 802.15.4/ZigBee RF Transceiver. Página: [http://www.chipcon.com/files/CC2420\\_Data\\_Sheet\\_1.0.pdf](http://www.chipcon.com/files/CC2420_Data_Sheet_1.0.pdf).
- [20] FREESCALE. MC13192 2.4GHz Low Power Transceiver for the IEEE 802.15.4 Standard, maio de 2007. Página: [http://www.freescale.com/files/rf\\_if/doc/data\\_sheet/MC13192.pdf](http://www.freescale.com/files/rf_if/doc/data_sheet/MC13192.pdf).
- [21] MICROCHIP. MRF24J40 IEEE 802.15.4 2.4GHz RF Transceiver, 2006. Página: <http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/39776a.pdf>.
- [22] BLUETOOTH SIG. Specification of the Bluetooth System, 2001. Página : <http://www.bluetooth.com>.
- [23] KOUBÂA, A., ALVES, M., E TOVAR, E. A Comprehensive Simulation Study of Slotted CSMA/CA for IEEE 802.15.4 Wireless Sensor Networks. *WFCS 2006* (junho de 2006).
- [24] KOUBÂA, A., ALVES, M., E TOVAR, E. GTS Allocation Analysis in IEEE 802.15.4 for Real-Time Wireless Sensor Networks. *Parallel and Distributed Processing Symposium (IPDPS 2006)*.
- [25] MIDKIFF, S. F. IP Routing and MANET Routing Algorithms. *Wireless Networks and Mobile Systems* (2004).
- [26] LIU, Y., LEE, M., E SAADAWI, T. A Bluetooth Scatternet-Route Structure for Multi-hop Ad Hoc Networks. *IEEE Journal on Select Areas in Communications*. Vol. 21, Número 2 (fevereiro de 2005), pp 229–239.
- [27] ZENSY INC. Z-Wave, The Wireless Control Language, 2006. Página: <http://www.zen-sys.com>.
- [28] DAVID RUA AND NUNO MARTINS AND PEDRO REIS AND JOÃO PAULO SOUZA. Interface USB para recolha de dados de sensores remotos utilizando ZigBee e IEEE 802.15.4, 2006. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Portugal.

- 
- [29] SANTOS PINHEIRO, J. M. Introdução às Redes de Supervisão e Controle, 2006.  
Página : <http://www.projetoderedes.com.br/artigos>.
- [30] THE NETWORK SIMULATOR NS-2. Página: <http://www.isi.edu/nsnam/ns>, 2006.
- [31] The ns manual (formerly ns Notes and Documentation), fevereiro de 2006. Página :  
[http://www.isi.edu/nsnam/ns/doc/ns\\_doc.pdf](http://www.isi.edu/nsnam/ns/doc/ns_doc.pdf).
- [32] IEEE 802.15.4. IEEE 802.15 WPAN Task Group 4b (TG4b). Página:  
<http://grouper.ieee.org/groups/802/15/TG4b.html>.