

UTILIZAÇÃO DE REDE DE SENSORES (*ZIGBEE*)
PARA MONITORAÇÃO E CONTROLE DOMÉSTICO

Manuela Ferreira de Lima

DEL / POLI / UFRJ

Projeto submetido para a obtenção do título de
Engenheiro Eletrônico e de Computação
ao Departamento de Eletrônica e de Computação
da Escola Politécnica da UFRJ

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO
ESCOLA POLITÉCNICA
DEPARTAMENTO DE ELETRÔNICA E DE COMPUTAÇÃO

**Utilização de Rede de Sensores (*Zigbee*) para Monitoração e Controle
Doméstico**

Autor:

Manuela Ferreira de Lima

Orientador:

Prof. Luís Henrique Maciel Kosmalski Costa, Dr.

Examinadores:

Prof. Marcelo Luiz Drumond Lanza, M Sc.

Prof. Miguel Elias Mitre Campista, D. Sc.

DEL
Agosto de 2011

Dedico esse trabalho a minha querida e amada mãe, que está sempre ao meu lado, nos momentos bons e, nos ruins também. Que me dá força e estímulo para continuar sempre, a nunca desistir.

Dedico a ela todos os frutos do trabalho que está por vir nessa nova fase, sem ela não sei se estaria aqui. Sem a força dela, talvez não fosse forte o suficiente para seguir em frente, mas com ela ao meu lado estou aqui e irei ainda mais longe, pois seus conselhos são extremamente valiosos, imensuráveis e sinceros.

Agradecimentos

Agradeço a todos aqueles que me ajudaram a passar por mais essa fase da vida, que se fizeram presentes, que quiseram participar do meu aprendizado, que me ensinaram muito, que trocaram muitas experiências comigo.

Agradeço também aqueles que por algum motivo não puderam estar presentes ou porque já não estão mais entre nós, ou porque a vida lhes propiciou uma nova oportunidade em outro lugar.

Agradeço aqueles professores que independente do momento contribuíram me dando força e conselhos nos momentos difíceis em minha vida acadêmica e que me mostraram que tudo isso enfim servirá para alguma coisa.

Deixo aqui um agradecimento especial aos amigos Oliver von Behr Kuster e Eduardo Gonçalves que dedicaram dias de sua vida para me ajudar a concluir esse projeto.

Um agradecimento mais que especial ao meu namorado, Leandro Santos Neto, por ser meu revisor, apoiador e incentivador nos momentos mais difíceis e, acima de tudo, por ser meu companheiro em todos os momentos.

Enfim, agradeço aqueles que se dispuseram a me agüentar durante esse tempo, que dedicaram suas orações e que acreditaram em mim.

A todos vocês deixo aqui meu sincero agradecimento!

Resumo do Projeto Final apresentado ao DEL/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Engenheiro Eletrônico e de Computação.

Utilização de rede de sensores (*Zigbee*) para monitoração e controle doméstico

Manuela Ferreira de Lima

Agosto de 2011

Orientador: Luís Henrique Maciel Kosmowski Costa

Departamento: Engenharia Eletrônica e de Computação

Este projeto tem como objetivo principal o estudo do (*Zigbee*), em todas as suas vertentes. Foi visto que o (*Zigbee*) pode ser uma ótima ferramenta de trabalho, tanto para uso acadêmico quanto para uso comercial.

De início, é feita uma breve exposição do trabalho, abordando o tema de forma objetiva e direta, de modo a facilitar o entendimento do leitor. Foram estipuladas algumas metas para o projeto com o objetivo de facilitar o desenvolvimento do mesmo durante o período de execução.

No capítulo seguinte, foi abordada inicialmente a área de redes de computadores, com explicações técnicas sobre protocolo, arquitetura, características do padrão IEEE 802.15.4 e topologias de rede. Foi realizada breve explanação sobre o funcionamento das redes de computadores, com foco maior nas redes sem fio e, em especial, nas redes (*Zigbee*).

Com os resultados das simulações foram feitas análises com o intuito de avaliar se o funcionamento dos dispositivos condiz com o esperado (baixo consumo, pouca potência utilizada, taxa de transferência a 250kb/s). Dessas análises, verificamos o tempo de resposta dos dispositivos, seu funcionamento em modo autônomo e algumas respostas com interferência direta de uma variável externa, no caso, a interferência do ambiente sobre o controle executado pelo (*Zigbee*).

Vale ressaltar que, o (*Zigbee*) não tem a pretensão de substituir o (*Bluetooth*), mas sim complementá-lo. O (*Zigbee*) apresenta algumas vantagens significativas sobre o (*Bluetooth*) como o baixo custo de manutenção e o aumento da vida útil da bateria, já o (*Bluetooth*) possui uma taxa de transferência (1Mbit/s) bem maior que o (*Zigbee*) (máximo de 250kbits/s).

Palavras Chave: (*Zigbee*), IEEE 802.15-4, rede, topologia de rede, arquitetura, (*Bluetooth*), modos de operação, tipos de dispositivos

Abstract of the final project presented to DEL/UFRJ as part of the pre-requisites for graduation in Eletronic and Computing Engeneering.

Using Zigbee sensor network for monitoring and home control

Manuela Ferreira de Lima

Agosto de 2011

Professor: Luís Henrique Maciel Kosmalski Costa

Department: Eletronic and Computing Engeneering

The main objective of this project is the study of Zigbee in all of its aspects. As our first prerogative, Zigbee could fit both academic and commercial use.

A brief exposition about the topic will be done to approach different areas both objective and direct, introducing the subject in an easy and quick way of understanding. Some goals will be set for the project in order to facilitate its development during the implementation period. May be that, during the study, we find a result that could change the course of its process. But everything that happens will be documented.

In the next chapter, the initial approach will be computers networks, with all technical explanation about protocol, architecture, the characteristics of IEEE802.15.4, network topology. Ultimately, a brief explanation about the operational behavior computers networks have, focusing wireless networks and specially Zigbee networks. It was also possible to approach the best topologies to be used with Zigbee. Or should I say nowadays, the more commonly used topologies.

After the extraction of data from the simulation results, some analysis were made (like the beacon rate, about the power used, the low-cost battery). From that analysis we would be able to see the devices time response, its operation in autonomous mode and

some responses to the direct interferences of an external variable, in this particular case, the environment.

As an important note, Zigbee doesn't have the intention to substitute Bluetooth, but complement its use. Zigbee has shown some significant advantages over Bluetooth as low-cost maintenance and the raise of its battery. In the case of Bluetooth, its transfer rate (1 Mbit/s) is bigger than Zigbee (maximum 250kbits/s).

Key-words: (*Zigbee*), IEEE 802.15-4, network, network topology, architecture, (*Bluetooth*), operation modes, device types

Lista de Acrônimos

- APL : *Application ou Aplicação*
- APS : *Application Support ou Suporte a Aplicação*
- BNC : *British Naval Connector ou Bayonet Neil Concelman ou Bayonet Nut*
- BPSK : *Binary Phase Shift Keying*
- DLL : *Data Link Layer ou Camada de Dados*
- DSSS : *Direct Sequence Spread Spectrum*
- FCS : *Frame Check Sequence*
- FFD : *Full Function Device*
- GTS : *Guaranteed Time Slots (Período de Tempo Garantido)*
- IEEE : *Institute of Electrical and Electronics Engineers*
- ISM : *Industrial, Scientific and Medical Radio Bands*
- ISO : *International Organization for Standardization*
- LLC : *Logical Link Control Sublayer ou Subcamada de Controle de Enlace Lógico*
- MAC : *Medium Access Control ou Controle de Acesso ao Meio*
- MFR : *MAC Footer*
- MHR : *MAC Header*

| | |
|-----------|---|
| MPDU : | <i>MAC Protocol Data Unit</i> |
| MSDU : | <i>MAC Service Data Unit</i> |
| MSK : | <i>Minimum Shift Keying</i> |
| NS2 : | <i>Network Simulator 2</i> |
| NWK : | <i>Network ou Rede</i> |
| O-QPSK : | <i>Offset Quadrature Phase-Shift Keying</i> |
| OSI : | <i>Open Systems Interconnection ou Interconexão de Sistemas Abertos</i> |
| PHY : | <i>Camada Física</i> |
| PN : | <i>Pseudo-Noise</i> |
| PPDU : | <i>PHY Protocol Data Unit</i> |
| PSDU : | <i>PHY Service Data Unit</i> |
| QoS : | <i>Quality of Service</i> |
| RFD : | <i>Reduced Function Device</i> |
| RMS : | <i>Root Mean Square</i> |
| UFRJ : | <i>Universidade Federal do Rio de Janeiro</i> |
| WYSIWYG : | <i>What You See is What You Get</i> |

Sumário

| | |
|-----------------------------|-------------|
| Resumo | iv |
| Abstract | vi |
| Lista de Acrônimos | viii |
| Lista de Figuras | xii |
| Lista de Tabelas | xiv |
| I Introdução | 1 |
| I.1 Tema | 1 |
| I.2 Delimitação | 1 |
| I.3 Justificativa | 2 |
| I.4 Objetivos | 3 |
| I.5 Metodologia | 3 |
| I.6 Descrição | 3 |
| II Zigbee | 5 |

| | |
|--|-----------|
| <i>SUMÁRIO</i> | xi |
| II.1 Protocolo | 5 |
| II.2 Arquitetura | 9 |
| II.3 Características | 13 |
| II.4 Tipos de Dispositivos | 15 |
| II.4.1 Full Function Device (FFD) | 15 |
| II.4.2 Reduced Function Device (RFD) | 16 |
| II.4.3 Papéis de Dispositivos | 16 |
| Coordenador | 16 |
| Roteador | 17 |
| Dispositivo Final | 17 |
| II.5 Modos de Operação | 18 |
| II.5.1 Modo Beacon | 18 |
| II.5.2 Modo Non-Beacon | 18 |
| II.6 Topologia de Rede | 18 |
| II.7 Zigbee X Bluetooth | 21 |
| III Aplicação e Testes | 23 |
| III.1 Análises | 23 |
| IV Conclusão | 28 |
| Referências Bibliográficas | 31 |
| A Códigos Fonte | 33 |

Lista de Figuras

| | | |
|-------|--|----|
| II.1 | Situação do padrão (<i>Zigbee</i> dentro do IEEE 802 [1]). | 6 |
| II.2 | Aplicação <i>Zigbee</i> | 9 |
| II.3 | Camadas OSI X <i>Zigbee</i> . [1] | 10 |
| II.4 | Formato do Frame MAC. | 10 |
| II.5 | Estrutura do Super-Frame | 12 |
| II.6 | Estrutura de Canais e Frequências do IEEE 802.15.4 [2] | 14 |
| II.7 | Comparação do <i>Zigbee</i> com Outras Tecnologias Wireless. | 14 |
| II.8 | Configuração dos dispositivos e rede <i>Zigbee</i> | 16 |
| II.9 | Diferentes topologias de rede [3]. | 19 |
| II.10 | Topologia em Malha [4]. | 19 |
| II.11 | Topologia em Árvore. | 20 |
| II.12 | Topologia em Estrela. | 20 |
| II.13 | Topologia Ponto-a-Ponto. | 21 |
| III.1 | Tráfego <i>Beacon</i> com 50 nós em 40 segundos. | 25 |
| III.2 | Tráfego BCN com 50 nós em 120 segundos. | 25 |

| | |
|--|----|
| III.3 Tráfego AODV com 50 nós em 40 segundos. | 26 |
| III.4 Tráfego AODV com 50 nós em 120 segundos. | 26 |

Lista de Tabelas

| | | |
|------|--|----|
| II.1 | Benefícios dos Membros <i>Zigbee Alliance</i> | 7 |
| II.2 | Benefícios dos Membros <i>Zigbee Alliance</i> | 8 |
| II.3 | Canais e Frequências | 14 |
| II.4 | Funcionalidades dos Dispositivos <i>Zigbee</i> | 15 |
| II.5 | Tipos de Dispositivos | 17 |
| II.6 | Tecnologias Sem Fio | 22 |

Capítulo I

Introdução

I.1 Tema

O tema do estudo é o Zigbee [5], que é um conjunto de especificações para comunicação através de pequenos circuitos de radiofrequência e de baixa potência utilizando o padrão 2003 IEEE 802.15.4 [6].

Será feita uma comparação do Zigbee com o Bluetooth [7], já que este consome mais energia e tem alcance menor e, um breve estudo sobre redes e suas diferentes topologias.

I.2 Delimitação

Em 2008, durante um estágio, surgiu a oportunidade de trabalhar com *Zigbee*. Seria uma chance única de aprender uma nova ferramenta de trabalho e que poderia trazer facilidades para as pessoas em geral. Seu uso seria diverso, tanto para áreas industriais e acadêmicas como para áreas domésticas e comerciais.

Ao longo de dois anos, extensos testes de hardware, prático e teórico foram feitos. Muito foi absorvido e posto em prática e, qual forma seria a melhor forma para aproveitar todo esse conhecimento, todo esse desenvolvimento e aprendizado ao longo desses dois

anos se não colocá-lo em papel.

A partir de então, surgiu à vontade de fazer esse projeto de graduação. Para que tudo que foi absorvido não se perdesse com o tempo, não ficasse esquecido em um canto do conhecimento e, sim que ficasse gravado no meio acadêmico todo o empenho e esforço destinado a esse trabalho de imenso valor tecnológico e intelectual.

Após o período de dois anos, já fora da empresa que introduziu o *Zigbee* a luz do meu conhecimento, continuei os estudos sozinha com ajuda de professores e amigos. Foi um ano de muito suor desenvolvendo o *Zigbee* não mais com ajuda do hardware, mas sim com o simulador NS - 2 (*Network Simulator - 2*) [8]. Nele foram construídos cenários de pequeno porte, de modo que fosse feita uma análise sobre o tráfego de dados dentro de uma rede *Zigbee* que estivesse sendo utilizada em um prédio e que tivesse o intuito de monitorar cada andar desse mesmo prédio, ou que esses dispositivos estivessem monitorando uma rede elétrica [9], por exemplo.

I.3 Justificativa

O desafio de desbravar uma tecnologia aparentemente nova é sempre empolgante e hoje, onde a informação é divulgada de forma rápida e fácil através de diversos tipos de mídia - como internet, televisão, celular, etc. - não é possível parar de se atualizar, se mantendo constantemente “conectado” em dia com as notícias do mundo, tecnológico.

O *Zigbee* vem sendo muito usado como sensor [10], mas ele também pode ser utilizado para monitorar a umidade, temperatura, além realizar verificações de consumo de diversas atividades. Inclusive dentro da área de medicina, ele está inserido, como por exemplo no monitoramento corporal e de pacientes, controles residenciais, comerciais e industriais, entre outros [11].

I.4 Objetivos

O objetivo desse trabalho é conhecer intensamente o método de funcionamento do *Zigbee* e de seu protocolo. Verificar o porquê do baixo consumo de energia do *Zigbee* e como ele se enquadraria no mundo de hoje.

Colocar *Zigbee* e *Bluetooth* lado a lado para que se entenda as diferenças, vantagens e desvantagens de cada um desses dispositivos e, ter uma visão de como um pode complementar o outro no mundo.

I.5 Metodologia

O projeto foi dividido em duas fases. Na primeira fase foi estudado o conceito *Zigbee*, o protocolo 802.15.4. Após estudar os aspectos positivos e negativos do *Zigbee*, passamos para a segunda fase.

Na fase dois, o simulador foi submetido a uma troca intensa de pacotes que pediam o reconhecimento de nós da rede, que possibilitou a obtenção de dados importantes para análise do protocolo. Esses dados, deveriam conter informações sobre o tempo de atividade dos dispositivos como cada dispositivo reage ao enviar determinado pacote.

Capturado nesses dados, haviam informações como o número de beacons (que será explicado no item 2.5 deste projeto), e informações vindas do protocolo AODV [12], que tem por finalidade evitar o uso abusivo de banda e diminuir o intenso processamento nos nós, que funcionam nesse projeto como roteadores em sua maioria.

I.6 Descrição

No capítulo seguinte, foi abordado o *Zigbee*, o protocolo em si, algumas diferenças entre o mesmo e o *Bluetooth*, quais topologias de redes [13] pode-se aplicar utilizando-o, suas configurações e designações.

Ao longo do capítulo serão mostrados os diferentes tipos de dispositivos e suas respectivas características, seus modos de operação e arquitetura. Por fim, será mostrado uma breve diferenciação entre *Zigbee* e *Bluetooth* e, como os dois podem conviver juntos, sem a ameaça que um possa substituir o outro com a evolução da tecnologia.

No capítulo 3 será exposto as aplicações e testes feitos durante o estudo e desenvolvimento do projeto. Seus erros e acertos, simulações e gráficos dos testes executados.

Para a conclusão, fecharemos o projeto deixando claro que o *Zigbee* não veio para substituir o *Bluetooth*, mas sim para complementá-lo em suas soluções. Que o *Zigbee* é um forte dispositivo dentro da área de redes e que tem sua utilidade ainda muito minimizada devido a pouca divulgação e utilização de seus dispositivos.

Capítulo II

Zigbee

II.1 Protocolo

O nome Zigbee surgiu da analogia do movimento - zig, relativo ao zigue-zague que as abelhas fazem ao transmitirem informações ao enxame ao se locomoverem, e bee, que se refere ao próprio nome, abelha, em inglês. O funcionamento dessa comunicação se assemelha a uma rede mesh, onde cada nó tem função independente. Se, porventura, um nó parar, a informação é transmitida pelos outros nós da rede até chegar ao seu destino.

A criação do Zigbee ocorreu em 1998, quando engenheiros constataram que o Wi-Fi e o Bluetooth não seriam adequados para diversas aplicações, tanto na área de pesquisa e desenvolvimento, quanto na área prática. Em 2000, dois grupos, Zigbee - HomeRF spinoff e o IEEE 802 Grupo de Trabalho 15, se juntaram para atender às necessidades dos ambientes industriais e residenciais de baixo custo e baixa potência dentro das redes sem fio [14]. Em 2003, o padrão IEEE 802.15.4 foi terminado e, em 2004, após uma retificação, o protocolo foi finalmente liberado ao público. Ao final de 2007, o Zigbee Pro foi finalizado.

Durante o processo de criação desse protocolo, foram envolvidas, a princípio, 100 empresas. Dentre elas, a Philips Semiconductors consta como pioneira e principal partici-

pante no desenvolvimento do protocolo. Após 2004, esse número cresceu e hoje constam mais de 200 associados. Essa aliança de empresas foi nomeada como Zigbee Alliance [15] e, figuram nessa lista, empresas como Bosch, Siemens, Motorola, Samsung, Texas Instruments entre outras não menos importantes [16].

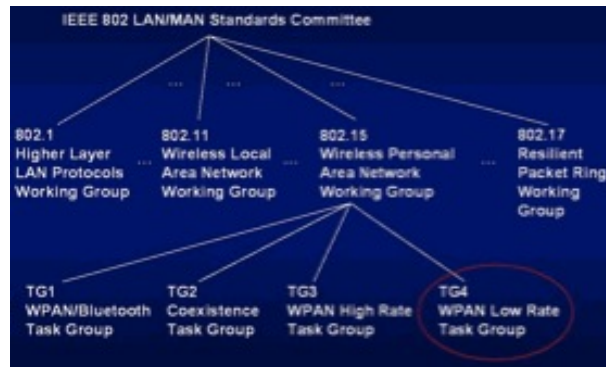


Figura II.1: Situação do padrão (*Zigbee* dentro do IEEE 802 [1]).

Atualmente, o protocolo é aberto para quem quiser utilizá-lo, fazendo-se necessário o pagamento de uma taxa anual somente para quem quiser participar da Zigbee Alliance. Essa taxa se difere dentro da aliança, pois é possível fazer parte dela de três formas distintas: participants (participantes), promoters (fundadores) e adopters (associados) [17]. A seguir uma tabela retirada do site da Zigbee Alliance com os benefícios de cada opção de participação:

O protocolo tem como principais objetivos a automatização das construções de nós de rede ad-hoc de baixa velocidade, a redução do tempo de utilização do rádio e da energia gasta e a especificação das camadas mais baixas (física e MAC - medium access control). Além disso, podemos destacar o baixo consumo promovido pelo uso dessa nova tecnologia, principalmente no que diz respeito à economia no consumo de baterias durante o funcionamento do protocolo.

Na indústria, temos produtos voltados para controle e monitoração, segurança pública, o qual inclui sensoriamento e determinação de locais possíveis de desastre; sensores automotivos, tais como monitoração da pressão dos pneus; aprimoramento nas técnicas de agricultura, como o sensoriamento de umidade do solo, pesticidas, herbicidas e os níveis

Tabela II.1: Benefícios dos Membros *Zigbee Alliance*

| Benefícios dos Membros da Zigbee Alliance | Fundador | Participantes | Associados |
|---|----------|---------------|------------|
| Direito a um lugar na mesa de Diretores | x | | |
| Homologar a proposta de especificações | x | | |
| Direito, automático, ao voto em todos os grupos | x | | |
| Preferência à escolha de patrocínios na Open House Platinum | x | | |
| Contribuir com a entrada de dos documentos requisitados | x | x | |
| Contribuir com propriedade intelectual para as especificações e prover subsídios para a evolução das especificações | x | x | |
| Acesso às especificações Zigbee antecipadamente | x | x | |
| Acesso às especificações finais e já aprovadas | x | x | x |
| Elegível como candidato a Diretor Técnico do Comitê | x | x | |
| Propor comitês e tópicos para trabalho | x | x | |
| Comparecer nas reuniões do comitê | x | x | |
| Participar e votar nos grupos de trabalho | x | x | |
| Votar nas especificações propostas | x | x | |
| Elegível para comandar os grupos de trabalho | x | x | |
| Comparecer nas reuniões trimestrais da Alliance | x | x | |
| Comparecer nos eventos de interoperabilidade da Alliance | x | x | x |
| Comparecer aos workshops e conferências de desenvolvedores da Alliance | x | x | x |

Tabela II.2: Benefícios dos Membros *Zigbee Alliance*

| Benefícios dos Membros da Zigbee Alliance | Fundador | Participantes | Associados |
|--|----------|---------------|------------|
| Participar nos eventos de marketing | x | x | |
| Participar na divulgação de imprensa | x | x | |
| Administração do logo Zigbee nos produtos certificados | x | x | |
| Uso do logo da Zigbee Alliance (dentro das diretrizes de uso) | x | x | x |
| Receber material de marketing ZigBee Alliance | x | x | x |
| Acesso à área de membros da página de internet da ZigBee Alliance | x | x | |
| Acesso à área de associados da página de internet da ZigBee Alliance | | | x |
| Acesso ao Alliance email | x | x | |
| Acesso aos emails dos grupos perfil de tarefa, teleconferências e documentação | x | x | x |
| Receber notícias da ZigBee Alliance | x | x | x |

de PH [17], entre outros.

Para uso residencial, podemos levar em consideração vários setores de mercado, como periféricos de computador (mouse, teclado, joystick, games, etc.), produtos eletrônicos (rádios, televisões, CDs, DVDs, controles remotos, incluindo o que chamamos de controle remoto universal), produtos com foco na automação residencial (aquecedores, ventiladores, ar-condicionado, eletrônicos voltados para segurança, iluminação, entre outros).

A taxa de dados máxima necessária para essas aplicações está dentro de um intervalo de 115,2kb/s para os periféricos de computador e menos de 10kb/s para produtos eletrônicos voltados para a automação residencial. Igualmente, está à latência máxima para esses respectivos produtos, que vai de 15ms (periféricos) a 100ms ou mais (automação

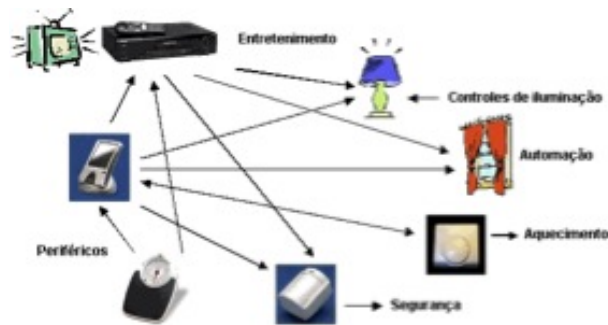


Figura II.2: Aplicação *Zigbee*.

residencial).

II.2 Arquitetura

A arquitetura segue o modelo OSI de sete camadas com pequenas alterações. O IEEE fez modificações nas camadas física (PHY) e MAC, e elas seguem o protocolo 802.15.4, já as camadas de aplicação (APL), rede (NWK) e suporte a aplicação (APS) seguem o modelo definido pela *Zigbee Alliance*. Uma melhor abordagem para a explicação do protocolo é feita a seguir.

O padrão 802.15.4 trouxe segurança, proporcionando boa interação com equipamentos de uso profissional, industrial e pesquisa, como também equipamentos domésticos e de utilidade comum a usuários finais. Além disso, define interfaces com baixas taxas de transmissão, por exemplo, menores que 250Kbps.

A figura II.3 mostra como o padrão 802.15.4 e as alterações da *Zigbee Alliance* se encaixam dentro do modelo de referência ISO-OSI. As camadas de Apresentação e Sessão não possuem equivalentes na pilha protocolar do *Zigbee*/IEEE 802.15.4, pois estas não foram mexidas e encontram exatamente iguais dentro do *Zigbee*, não havendo necessidade de representação.

O projeto IEEE 802 dividiu a camada de dados (DLL) em duas: MAC, que é a camada



Figura II.3: Camadas OSI X Zigbee. [1]

mais próxima do *hardware* e varia conforme a implementação da camada física, e a LLC, definida pelo IEEE 802.2 e comumente utilizada nos padrões 802.3, 802.11 e 802.15.

Os recursos da camada MAC são os vários tipos de topologias com baixo nível de complexidade, com baixo custo de energia e pouco uso de memória, associações e desassociações, reconhecimento de entrega de frame, mecanismo de acesso ao canal, validação de frame.

A figura II.4, mostra a estrutura do frame MAC e como ele foi desenvolvido para suportar os diferentes tipos de pacotes.

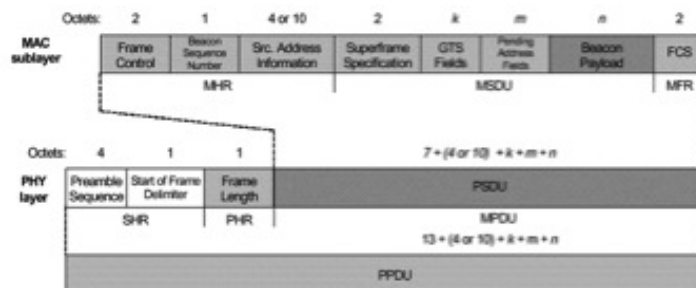


Figura II.4: Formato do Frame MAC.

O frame MAC é chamado de Unidade de Protocolo de Dados MAC (MPDU) e é composto por cabeçalho MAC (MHR), unidade de serviço de dados MAC (MSDU) e

rodapé MAC (MFR) e, não pode ultrapassar mais que 127 bytes de comprimento.

O cabeçalho MAC é dividido em três campos. O campo de controle do frame, que determina como será o formato de todo o frame e qual será seu conteúdo. O campo de endereçamento, que pode conter até 20 bytes de informação. Alguns exemplos de conteúdo para este campo são: dados - com origem e destino de pacotes, reconhecimento - campo sem conteúdo, *beacon* - com origem do pacote. Isso permite que os pacotes sejam pequenos e o protocolo se mantenha flexível e eficiente.

O campo de carga (*payload*) tem comprimento variável e os dados contidos nele dependem do tipo de frame. Dos quatro tipos possíveis de frames acima citados, somente os frames de dados e beacon contêm informação enviada às camadas superiores, já os frames de reconhecimento e comando são usados nas comunicações ponto-a-ponto.

O conteúdo do frame de seqüência numérica tem que ser igual ao frame de reconhecimento da transmissão anterior. Quando os conteúdos desses dois frames são comparados através do frame de verificação de seqüência (FCS) e constata-se que os mesmos são iguais, pode-se considerar uma transmissão bem sucedida [18].

A camada de rede é responsável pelo controle geral da rede, como nomeação e ligação dos serviços que incorpora as tarefas necessárias aos serviços de roteamento, endereçamento, congestionamento e controle do número de pacotes trafegados pelo usuário.

As redes construídas nesse padrão possibilitam que o crescimento da mesma seja auto-organizado e tenha capacidade de automanutenção a fim de minimizar o custo total do usuário final; ela também suporta um grande número de nós, com latência reduzida, ligados a um mesmo coordenador.

Para se conseguir baixas latências, o IEEE 802.15.4 LR-WPAN opera em modo chamado de super-frame, o qual o coordenador PAN (coordenador de rede dedicado) transmite super-frame beacons em intervalos pré-determinados que possam durar até 245s.

Como o acesso ao canal é baseado em contenção, o coordenador PAN tem permissão para atribuir um período de tempo específico (GTS) a um único dispositivo que requer

banda dedicada. Esse conjunto de ações gera um período, que é chamado de período livre de contenção, localizado antes do próximo *beacon*, e sua comunicação é realizada pelo *beacon* pelo coordenador PAN.

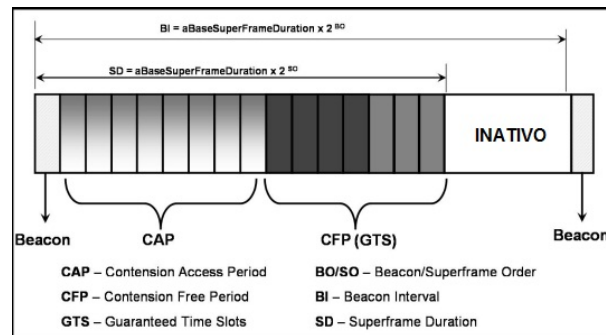


Figura II.5: Estrutura do Super-Frame

As camadas física e MAC possibilitam uma ampla gama de aplicações de rede. Ambas as camadas são moduladas utilizando DSSS, como esse tipo de modulação tem uma densidade espectral de potência muito baixa, seu uso permite que um número consideravelmente alto de dispositivos seja utilizado.

Devido a enorme competição dos dispositivos domésticos pela rede sem fio, o padrão inclui uma seleção dinâmica de canais, embora a seleção específica de algoritmos seja deixada para a camada de rede. Enquanto a camada MAC faz uma varredura dentro da lista de canais suportados em busca de um beacon, a camada física realiza rotinas tais como detecção do nível de energia na recepção, indicação da qualidade do *link* e troca de canal, o que traz agilidade na transmissão. O foco dessa rotina visa estabelecer o canal de operação inicial e rapidez nas respostas com longas interrupções.

Cada pacote ou unidade de protocolo de dados da camada física (PPDU) contém um cabeçalho de sincronização (preâmbulo mais o início da delimitação do pacote) que indica o comprimento e a carga do pacote ou a unidade de serviço de dados da mesma (PSDU).

Os pacotes podem ter até 127 bytes de comprimento e se espera que a informação contida neles sejam referentes a aplicações de monitoração, de controle de segurança, iluminação, ar-condicionado, entre outras aplicações que demandam mais, como jogos

interativos e periféricos de computador.

As frequências 868MHz e 915MHz utilizam o método de modulação DSSS, que codifica os dados binários para que possa abordar como cada bit será transmitido, essa seqüência resultante é modulada para a portadora usando BPSK.

A frequência de 2.4GHz emprega uma técnica de modulação 16-ário quase-ortogonal também baseada no método DSSS, o qual dados binários são agrupados em símbolos de 4 bit. Esses dados codificados são modulados dentro da portadora utilizando o MSK.

É esperado que dispositivos com 1mW de potência, tenham um alcance de 10 a 20 metros. Como exemplo podemos ter um aumento moderado na transmissão, em uma rede com topologia estrela para prover total cobertura a uma rede caseira. Para aplicações que permitam maior latência, a rede com topologia em malha pode prover uma alternativa mais atrativa para tal cobertura desde que cada dispositivo precise somente de potência suficiente para se comunicar com o vizinho mais próximo [18].

II.3 Características

- Consumo de potência baixo e implementação simples, com interfaces de baixo custo.
- Dois estados principais de funcionamento: “ativo” quando a placa de transmissão e recepção se encontra ligada e “dormente”, quando esta mesma placa encontra-se desativada.
- Simplicidade de configuração e redundância de dispositivos (operação segura).
- Densidade elevada dos nós pela rede. As camadas PHY e MAC permitem que as redes funcionem com grande número de dispositivos ativos. Este atributo é crítico para aplicações com sensores e redes de controle.
- Protocolo simples que permite a transferência confiável de dados com níveis apropriados de segurança.

Além disso, os dispositivos Zigbee operam na faixa ISM, que incluem as frequências de 2.4GHz (Global), 915MHz (América) e 868MHz (Europa), com taxas de 250Kbps com 16 canais, 40Kbps com 10 canais e 20Kbps com 1 canal para essas frequências, respectivamente.

A tabela II.3 e as figuras II.6 e II.7 que ilustram a divisão de canais por frequência.

Tabela II.3: Canais e Frequências

| Número do Canal | Frequência Central do Canal (MHz) |
|-------------------------|-----------------------------------|
| $k = 0$ | 868,3 |
| $k = 1,2, \dots, 10$ | $906 + 2(k - 1)$ |
| $k = 11, 12, \dots, 26$ | $2405 + 5(k - 11)$ |

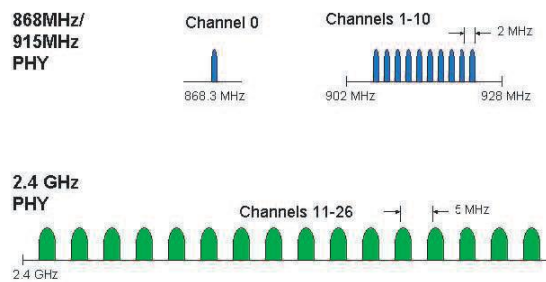


Figura II.6: Estrutura de Canais e Frequências do IEEE 802.15.4 [2]

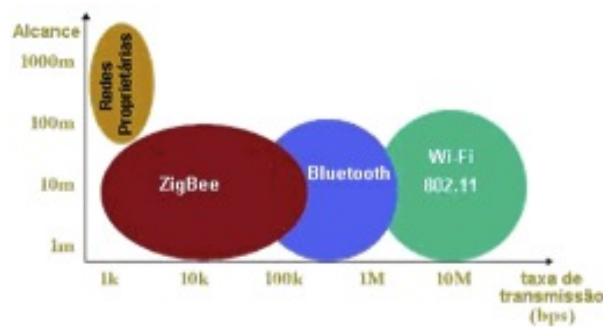


Figura II.7: Comparação do Zigbee com Outras Tecnologias Wireless.

As velocidades de conexão alcançadas atualmente ficam entre 10Kbps e 115Kbps, com alcance entre 10m e 100m, dependendo da potência dos equipamentos e do ambiente, que pode apresentar interferências eletromagnéticas, obstáculos físicos, etc.

II.4 Tipos de Dispositivos

Existem dois tipos de dispositivos *Zigbee*, onde cada um desempenha um papel específico na rede e contribui com dados de diferentes níveis de relevância. Cada tipo de configuração colabora para um tipo de função dentro da rede. Se criarmos uma rede “*mesh*” ou malha, cada dispositivo terá seu papel e esta rede poderá ser analisada de acordo com a distribuição desses equipamentos. Veja a tabela II.4 que mostra o desempenho dos dispositivos citados acima.

Tabela II.4: Funcionalidades dos Dispositivos *Zigbee*

| Coordenador da Rede - FFD | Nó da Rede - RFD |
|---------------------------------------|--|
| Ajustes de parâmetros da rede | Função passiva na rede |
| Transmite informações pela rede | Efetua buscas por redes disponíveis |
| Gerencia os nós da rede | Transferência de dados da aplicação |
| Armazena informações dos nós de rede | Determina o status dos dados |
| Distribui mensagens entre nós de rede | Solicita dados ao coordenador da rede |
| Opera tipicamente no estado ativo | Pode permanecer no estado dormente por longos períodos |

II.4.1 Full Function Device (FFD)

Em português: Dispositivos de Função Completa. Esses dispositivos possuem uma construção mais complexa, funcionam em toda a topologia padrão da rede e podem operar em um dos três modos lógicos (ZC, ZR, ZED) e conseqüentemente ter acesso a todos os

dispositivos da rede.

II.4.2 Reduced Function Device (RFD)

Em português: Dispositivos de Função Reduzida. São dispositivos de construção mais simples e só podem se comunicar em rede tipo estrela. Por esse mesmo motivo, são dispositivos que serão somente utilizados no final da configuração como *end-points*, o que faz com que eles tenham um consumo ainda mais reduzido.

Veja os diferentes tipos de configuração na figura II.8.

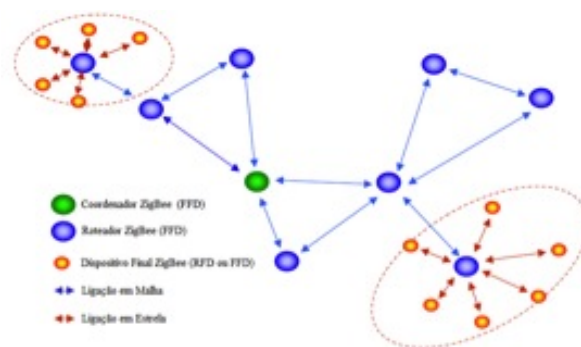


Figura II.8: Configuração dos dispositivos e rede *Zigbee*.

A tabela II.5 apresenta a comparação dos diferentes tipos de dispositivos e suas funcionalidades.

II.4.3 Papéis de Dispositivos

Coordenador

Há apenas um coordenador em toda a rede. Ele é capaz de estruturá-la e reestruturá-la, além de controlar o fluxo de informações. Possui, também, autonomia de comutar dados entre redes, podendo se tornar raiz e armazenar informações das mesmas. Encaixa-se dentro das configurações FFD.

Tabela II.5: Tipos de Dispositivos

| Coordenador (ZC) | Roteador (ZR) | Dispositivo Final (ZED) | Função na Camada de Rede |
|------------------|---------------|-------------------------|--|
| x | | | Estabelecer uma nova rede Zigbee |
| x | x | | Conceder endereço lógico de rede |
| x | x | | Permitir que dispositivos entrem/saiam da rede |
| x | x | | Manter lista de vizinhos e rotas |
| x | x | | Rotear pacotes da camada de rede |
| x | x | x | Transferir pacotes da camada de rede |

Roteador

Seleciona a rota a outros dispositivos da rede, comuta protocolos entre as diferentes redes e permite a comunicação entre computadores de redes diferentes. Encaixam-se dentro das configurações FFD.

Dispositivo Final

Como são apenas os nós (folhas) da rede, se restringem apenas a trocar dados com os roteadores e coordenadores. Por esse mesmo motivo consomem menos energia, pois se mantêm praticamente em modo inativo quase que todo o tempo. Uma vantagem desses dispositivos é que possuem pouca memória, pois não precisam rotear nenhuma informação. Encaixam-se dentro das configurações RFD.

II.5 Modos de Operação

É o modo de operação que irá definir o principal objetivo da criação do *Zigbee*, o baixo consumo de potência. Juntamente com a baixa taxa de transmissão, a redução do ciclo de trabalho (*duty cycle*) possibilita o uso de baterias mais duradouras.

II.5.1 Modo Beacon

Neste modo, dispositivos que funcionam como roteadores sinalizam (*beaconing*) o tempo todo em busca de confirmação de outros roteadores na rede. Outros nós na rede não precisam fazer o mesmo e, por isso, são configurados para saber o tempo de envio dos sinais (*beacons*). Enquanto isso não ocorre, eles permanecem “dormindo” (*sleep mode*), o que possibilita que o consumo de energia seja mínimo.

II.5.2 Modo Non-Beacon

Nesse modo, todos os dispositivos da rede permanecem com seus receptores ligados esperando sinalização. Dessa forma, o consumo de energia é maximizado, o que requer o uso de baterias mais potentes.

II.6 Topologia de Rede

Existem diferentes tipos de topologia de rede como mostra a figura II.9: a feita em barramento (*bus*), anel (*ring*), malha (*mesh*), estrela (*star*), linha (*line*), árvore (*tree*), ponto-a-ponto (*peer-to-peer*), híbrida (*hybrid*), etc. Para nosso estudo se faz interessante somente topologias que podem ser aplicadas as redes sem fio como as topologias em malha, árvore, estrela, ponto-a-ponto e híbrida.

Hoje em dia as topologias mais utilizadas são: malha, árvore, estrela e ponto-a-ponto (*full connected* ou *peer-to-peer*). Na topologia em malha, um computador pode estar

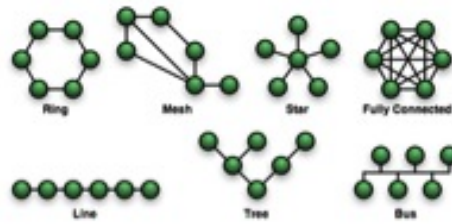


Figura II.9: Diferentes topologias de rede [3].

ligado a todos os outros ou não, o que a torna muito complexa, pois quanto mais computadores ligados à rede, maior será o número de nós, maior será o número de rotas e mais complexa ela se tornará. Além disso, na topologia em malha como apresentado na figura II.10, o nó somente envia o pacote e somente o nó destinatário irá recebê-lo após alguns saltos dentro da rede, porém sem a interferência ou a leitura dos dados por outros usuários.

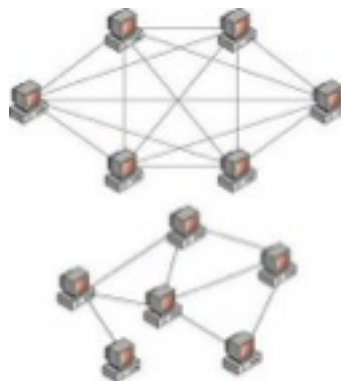


Figura II.10: Topologia em Malha [4].

Já a topologia em árvore da figura II.11 corresponde a uma seqüência de barras interconectadas ou a uma coluna dorsal, onde temos o tronco principal com os diversos ramos menores conectados a ele. Como cada caminho de um ramo pode ser dividido em dois, temos que ter cuidado com a taxa de transmissão, que será menor que nos outros tipos de topologia.

Na topologia estrela (figura II.12), toda a informação deve passar obrigatoriamente por uma estação central inteligente, que deve conectar cada estação da rede e distribuir

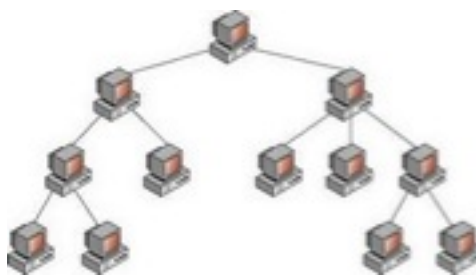


Figura II.11: Topologia em Árvore.

o tráfego para que uma estação não receba, indevidamente, dados destinados às outras.

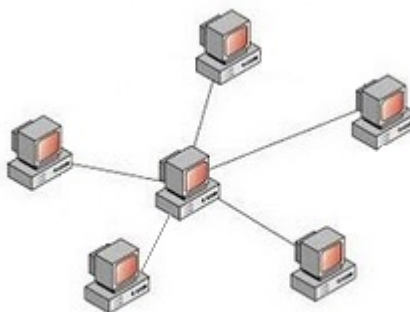


Figura II.12: Topologia em Estrela.

Finalmente, as redes ponto-a-ponto (II.13) são uma arquitetura de sistemas distribuídos caracterizada pela descentralização das funções da rede, onde cada nó participa ora como cliente, ora como servidor.

Algumas aplicações, como as de periféricos de computadores, exigem uma conexão com baixa latência, como é o caso da topologia em estrela, enquanto outras, como as utilizadas em perímetros de segurança, demandam uma grande área de cobertura, como as das redes ponto-a-ponto.

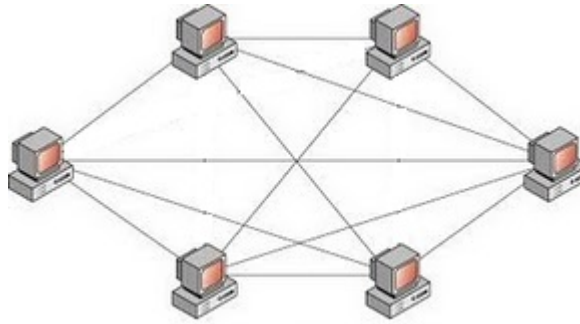


Figura II.13: Topologia Ponto-a-Ponto.

II.7 Zigbee X Bluetooth

É possível destacar como diferença o tamanho de memória utilizado em cada um dos dispositivos, o *Bluetooth* pode ter no máximo 100KB de memória enquanto o *Zigbee* pode chegar a 256KB. Outra diferença notável é a taxa de transmissão que, diferente do *Bluetooth* (1Mbps), pode chegar a no máximo 250kbps.

Agora, na tabela II.6 comparamos os dispositivos em termos de finalidade de uso, vemos que tanto o *Zigbee* quanto o *Bluetooth* não competem entre si, e sim podem se complementar. A usabilidade do *Bluetooth* é voltada para PDAs, computadores e celulares, já o *Zigbee* é voltado a sensores, equipamentos de nível industrial e controle remotos.

No que tange às camadas, o gerenciamento de serviço MAC do IEEE 802.15.4 possui 26 primitivas em comparação com o IEEE 802.15.1 (*Bluetooth*), que possui 131 e 32 eventos. O IEEE 802.15.4 MAC possui baixa complexidade, se tornando muito apropriado para aplicações low-end (baixa finalidade), ainda que ao custo de recursos menores que os do padrão 802.15.1.

Tabela II.6: Tecnologias Sem Fio

| | Wi-Fi (ZR) | Zigbee (ZED) | Bluetooth |
|--|-----------------------------|-------------------------------|---|
| Padrão | IEEE 802.11a, b, g, n | IEEE 805.15.4 | IEEE 802.15.1 |
| Taxa de Dados | 11(b) até 54 Mbps (a, g, n) | 250 Kbps, 40Kbps, 20Kbps | 1 Mbps |
| Frequências RF | 2.4 e 5 GHz bands | 2.4 GHz, 915 MHz, 898 MHz | 2.4 GHz |
| Nº de Nós | 100+ | 65,000 | 8 |
| Alcance | 100m | 10 - 100m | 8m (Classe II, III) até 100m (Classe I) |
| Modulação | DSSS e OFDM | DSSS | FHSS |
| Arquitetura | Estrela - Ponto de Acesso | Rede em Malha | Ponto a Ponto |
| Vida da Bateria | 1 - 3 horas | Anos (baixo ciclo de serviço) | 4 - 8 horas (streaming audio) |
| Memória | - | 32KB, 64KB, 128KB, 256KB | <100KB |
| Corrente de Transmissão / Standby | 350mA | 30mA / 3uA | 65 até 170mA / 200uA |
| Tempo de Acesso a Rede | - | 30ms | 3s |
| Tempo de transição dos dispositivos escravos dos estado dormindo para o estado ativo | - | 15 ms | 3 s |

Capítulo III

Aplicação e Testes

III.1 Análises

O projeto foi iniciado na tentativa de montar uma rede de *Zigbees* que conseguisse se comunicar com o coordenador somente utilizando o dispositivo mais próximo. A idéia era estabelecer comunicação dos dispositivos dentro de um prédio, o qual teria espalhado em seus andares diversos dispositivos *Zigbees*. Foram utilizados, a princípio, onze dispositivos. Um, configurado como coordenador - ZC, e dez configurados como roteadores - ZR.

A rede foi construída colocando-se dois dispositivos por andar e utilizando cinco andares de um prédio, com o coordenador localizado na cobertura do mesmo. A dificuldade era colocar os dispositivos para se comunicarem independente da rotina a ser feita, pois a rede não conseguia manter-se, além de haver muita perda de pacotes. Por algum motivo, a rede se perdia. Foi verificada se a energia inicial oferecida aos dispositivos era insuficiente, o que foi prontamente descartado. A possibilidade de configuração de alguns dispositivos também foi eliminada, pois no script de configuração, os *Zigbees* encontravam-se todos configurados da mesma forma.

Ao longo dos testes e calibrações do simulador e de seus parâmetros, a rede não apresentou problemas. Os *Zigbees* se comunicaram perfeitamente, com pouca perda de

pacotes e sem nenhuma perda de nós da rede.

Após a definição dos parâmetros da rede, o simulador rodou o *script* sem problemas e a rede não apresentou qualquer dificuldade na obtenção de dados provenientes dos dispositivos. Algumas das mudanças feitas ao *script* em cada simulação foram: o aumento do número de nós por andar, o aumento do número de andares (cada andar acrescido continha dois dispositivos *Zigbees*) e o aumento do número de nós e de andares em uma mesma simulação.

Todas as simulações manifestavam o mesmo comportamento, onde a troca de informações se dava com saltos de um dispositivo, ou seja, cada nó conversava somente com o nó imediatamente acima ou com o nó que se localizava no mesmo andar. Conforme se aumentava o número de nós e/ou de andares, a intensidade do tráfego de dados aumentava (como previsto), ocasionando algumas perdas de pacotes (também como previsto), mas nenhuma perda significativa.

Foram retirados da análise dados com informações dos pacotes BCN (*beacon*), AODV e DROP. Utilizar o pacote “*beacon*” para teste se fez necessário para ver se os dispositivos realmente se comunicavam em tempos pré-determinados. O uso do pacote “AODV” serviu para verificar se realmente a rede estava economizando banda com o tráfego de pacotes de “descoberta de caminho” [19]. E, finalmente, os pacotes “DROP” para verificar a quantidade de pacotes perdidos ao longo da simulação.

Como os pacotes BCN, ou *beacon*, são pacotes de sinalização, como explicado anteriormente, o ideal seria a não inundação dos mesmos na rede, pois isso causaria um gargalo, podendo até travá-la ou atrasar o fluxo de dados, que é o mais importante dentro de uma transmissão.

Nas simulações, é possível notar que o número inicial de pacotes do tipo BCN é pequeno e sofre um aumento aos poucos, pois o coordenador, a princípio, não sabe quantos nós formam a rede, nem a que distância estão esses nós. Depois do envio dos primeiros BCN, a quantidade é aumentada e passa a subir a cada nova requisição. Como nessa primeira simulação o tempo é reduzido, pode-se notar que há apenas um fluxo crescente de pacotes

(enviados, recebidos e perdidos).

Veja o gráfico III.1:

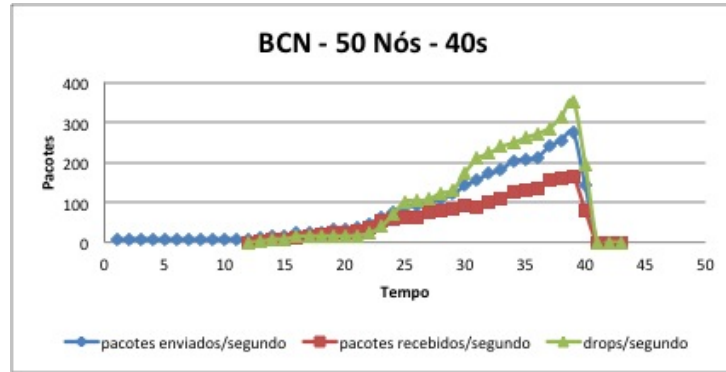


Figura III.1: Tráfego *Beacon* com 50 nós em 40 segundos.

Pelo gráfico III.1, estima-se a princípio que o tráfego tenda ao infinito, pois a única queda existente é devido ao término da simulação.

O gráfico III.2 mostra que as suposições iniciais devido ao gráfico anterior falharam, pois o tráfego de BCN acaba se tornando uma constante até que a comunicação seja interrompida, ou neste caso, a simulação seja encerrada.

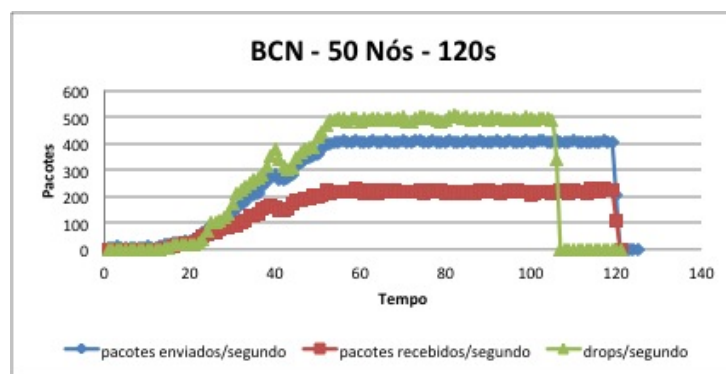


Figura III.2: Tráfego BCN com 50 nós em 120 segundos.

No gráfico III.2, nota-se um fluxo significativo de BCN, em torno de 400 pacotes enviados por segundo, o que é uma quantidade razoável de banda para pacotes desse tipo. Nota-se também que a rede opera no modo *non-beacon*, pois os pacotes são enviados

intermitentemente.

Para pacotes AODV, a quantidade de pacotes recebidos é bem maior que a quantidade de pacotes enviados, pois seu protocolo é baseado em pedidos, ou seja, é um protocolo reativo, o tráfego é gerado mediante requisição.

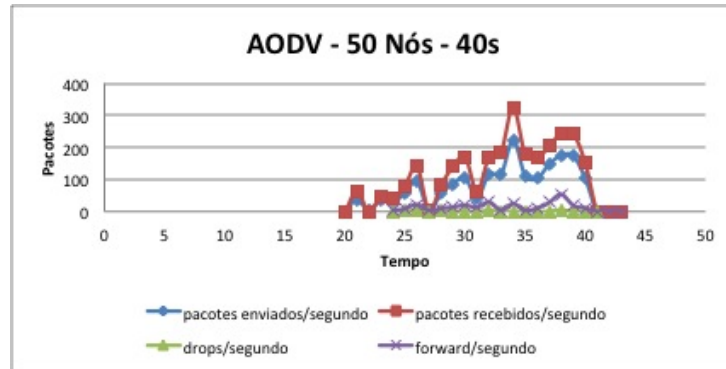


Figura III.3: Tráfego AODV com 50 nós em 40 segundos.

Pode-se notar também, que o fluxo de pacotes AODV do gráfico III.3 acontece em ondas, pois os nós só fazem requisição de rota quando não conseguem enviar os pacotes pelas rotas pré-definidas em sua tabela de roteamento. Se o nó seguinte não souber essa rota, ele encaminha (*forward*) a requisição para o próximo nó, e assim continua o processo até que o pacote seja entregue ao destinatário.

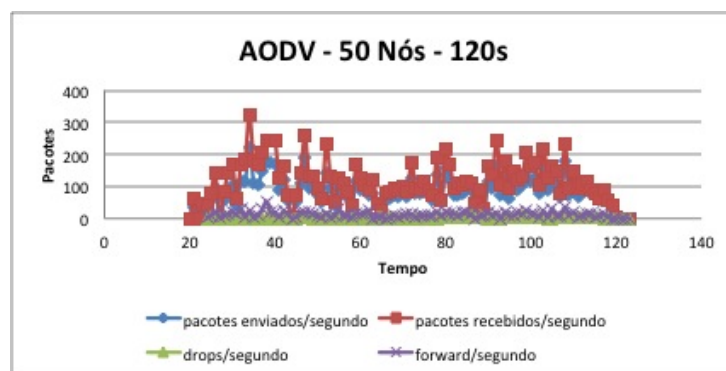


Figura III.4: Tráfego AODV com 50 nós em 120 segundos.

O gráfico III.4 mostra que no início da simulação há um fluxo maior de pacotes AODV

e no decorrer da mesma, a intensidade desse fluxo diminui. Se for traçada uma reta de tendência em cima do gráfico veremos que o fluxo decrescerá ao longo da simulação.

Essas informações foram retiradas das simulações com 50 nós, pois apresenta os resultados com melhores comparações aos longo dos testes. É possível ver nesses gráficos as tendências que cada um seguirá conforme é aumentado o tempo de simulação.

Capítulo IV

Conclusão

Após longo estudo, testes e simulações vimos que o *Zigbee* é, realmente, uma ótima ferramenta para ser utilizado em uma rede de sensores para monitoração e controle não só de equipamentos industriais como também domésticos. Seu baixo consumo de potência, seu alto poder de ramificação, o que faz com que a rede *Zigbee* consiga um alto alcance e, uma taxa de transferência razoável, o transformam em uma tecnologia promissora e totalmente viável no mundo hoje.

Atualmente, podemos encontrar alguns equipamentos já em uso com o *Zigbee*, como controles remotos e interruptores sem fio que não precisam ser previamente configurados, basta apenas ligá-los e o coordenador faz a identificação e inserção do novo dispositivo à rede. O referido dispositivo começa a funcionar como um roteador de pacotes, além de exercer a sua respectiva função, que pode ser a de interruptor ou de controle remoto.

A simulação mostra uma rede de dez nós que se comunica com o coordenador, que por sua vez aloca cada nó dentro da rede. Dentro do processo de aprendizagem desse novo dispositivo, vários problemas ocorreram e muito se aprendeu.

Uma das coisas que deve ser ressaltada é o ótimo desempenho dos dispositivos. O *Zigbee* surgiu com o intuito de prolongar a vida das baterias, e conseguiu alcançar esse objetivo. Com o modo “*beacon*” ativado, os dispositivos conseguem economizar muita

energia, pois se mantêm em estado latente até que o tempo pré-determinado para receber o beacon seja alcançado e faça com que o mesmo “acorde”. E, mesmo que os dispositivos estejam no modo “*non-beacon*”, economizariam bateria (não tanto quanto no modo beacon) graças aos algoritmos otimizados que foram utilizados na definição do protocolo.

Caso o *Zigbee* fosse usado no protocolo de comunicação de controles remotos, DVDs, televisores conectados e eletrodomésticos eles teriam a vantagem de se comunicarem independentemente da configuração, pois uma das propriedades do *Zigbee* é a sua capacidade de se auto-estruturar, não havendo a necessidade de configuração por parte de técnicos.

Outro ponto a ser destacado é a diminuição do custo com a manutenção, não só de baterias como dos próprios dispositivos, pois à medida que suas baterias acabassem ou se o *hardware* apresentasse algum defeito, bastaria substituí-los. Pois demoraria tanto tempo para isso ocorresse, que novos *hardwares* com inovações melhores já estariam no mercado.

Enfim, ao final deste trabalho podemos ver que a tecnologia *Zigbee* veio, não para substituir o *Bluetooth*, mas sim para complementá-lo, facilitar a interação de equipamentos sem fio, tais como controle industrial (controle de processo, gerenciamento de energia, rastreamento de equipamentos), cuidado médico pessoal (monitoramento de pacientes, monitoramento corporal), automação comercial de edifícios (segurança, ventilação, controle de acesso, controle de iluminação, aquecimento), eletrônica de consumo (TV, VCR, DVD/CD, controle remoto), computadores e periféricos (mouse, teclados, joystick, etc.) e controle residencial e comercial (segurança, ventilação, controle de iluminação, controle de acesso, irrigação de jardim, aquecimento).

Como trabalhos futuros, seria interessante o teste prático dessa tecnologia. A construção de uma rede pequena que fizesse o controle de interruptores, com a captura do tráfego de rede gerado pela comunicação desses equipamentos. Essa rede poderia ter diversas modificações, tais como o número de nós, simulações práticas da entrada e saída de um nó e/ou vários nós da rede. Seria realizada uma análise do tempo de resposta desses nós que entraram e/ou saíram.

Com imenso prazer termino aqui este trabalho gratificante que possibilitou o fechamento de uma fase importantíssima de minha vida.

Referências Bibliográficas

- [1] “Zigbee Brasil: O que é Zigbee”, 2008, <http://zigbeebrasil.blogspot.com/2008/12/o-que-zigbee.html>.
- [2] “Zigbee. Grupo de Teleinformática e Automação - GTA”, http://www.gta.ufrj.br/grad/10_1/zigbee/index.html.
- [3] “Topologia de Rede”, http://pt.wikipedia.org/wiki/Topologia_de_rede.
- [4] “IMEI Joana: Topologia de Rede”, 2009, <http://imeijoanagalvao.blogspot.com/2009/12/topologia-de-rede.html>.
- [5] “Tutorial sobre Zigbee”, http://www.teleco.com.br/tutoriais/tutorialzigbee/pagina_1.asp.
- [6] “IEEE 802.15.4”, <http://www.ieee802.org/15/pub/TG4.html>.
- [7] “The Official Bluetooth Technology Web Site”, <http://www.bluetooth.com/Pages/Bluetooth-Home.aspx>.
- [8] “Network Simulator - NS”, <http://isi.edu/nsnam/ns>.
- [9] MAGALHÃES, C. A. D., “Um Sistema de Medição Remota de Consumo de Energia Elétrica Baseado no Protocolo Zigbee”, *UFRJ/COPPE*, , 2008.
- [10] RICARDO, C. A., “Rede de Sensores: Zigbee”, *PUC/PR*, , 2006.
- [11] “Meet the Zigbee Standard. Sensor Mag”, Junho 2003, <http://www.sensormag.com/articles/0603/14>.

- [12] “AODV”, <http://www.ietf.org/rfc/rfc3561.txt>.
- [13] TANENBAUM, A. S., *Computer Networks*. Terceira ed. Prentice Hall Inc, 1996.
- [14] “Zigbee Vital in Industrial Application. EE Times”, 2003, <http://www.eetimes.com/story/OEG20030727S0002>.
- [15] “Zigbee Alliance”, <http://www.zigbee.org>.
- [16] “Zigbee Alliance Members”, <http://www.zigbee.org/About/OurMembers/tabid/191/Default.aspx>.
- [17] GUTIERREZ, J. A., “IEEE 802.15.4: A Developing Standard for Low-Power, Low-Cost Wireless Personal Area Network”, *IEEE Network*, , 2001.
- [18] CALLAWAY, E., “Home Networking with IEEE802.15.4: A Developing Standard for Low-Rate Wireless Personal Area Network”, *IEEE Communications Magazine*, , 2002.
- [19] “Teleco - Inteligência em Telecomunicações”, <http://www.teleco.com.br/tutoriais/tutorialprotocolo>.

Apêndice A

Códigos Fonte

Neste apêndice todos os códigos fonte que foram gerados são mostrados.

```
# =====
# Define options
# =====
set opt(chan)          Channel/WirelessChannel    ;# Channel Type
set opt(prop)          Propagation/TwoRayGround    ;# radio-propagation model
set opt(netif)         Phy/WirelessPhy/802_15_4
set opt(mac)           Mac/802_15_4
set opt(ifq)           Queue/DropTail/PriQueue    ;# interface queue type
set opt(ll)            LL                          ;# link layer type
set opt(ant)           Antenna/OmniAntenna        ;# antenna model
set opt(ifqlen)        150                        ;# max packet in ifq
set opt(rp)            AODV                       ;# routing protocol ?

#size of map
set opt(x) 5
set opt(y) 20
#set opt(z) 50 ?

#node settings
set opt(floor_height) 3 ;# distances between floors(vert distance between nodes)
set opt(floors) 5 ;# floors
set opt(nodes_floor) 2 ;# nodes per floor
set opt(node_hor_off) 1 ;# node horizontal offset
set opt(node_hor_sep) 5 ;# node horizontal separation
set opt(nn)           [expr $opt(floors) * $opt(nodes_floor) + 1]
```

```

#not needed, files for traffic and movement
set opt(cp)      ""           ;# cp file not used
set opt(sc)      ""           ;# node movement file

#no idea what this is
set opt(seed) 0.0

set opt(sim_start) 0
set opt(dev_start) 3 ;# device start time(in secs). The time at which the first
set opt(dev_inc) 1 ;# device start time increment time (in secs). The time value
set opt(sim_stop) 40

set opt(nam) "output.nam"
set opt(tracefd) "output.tr"

#? used when settign node_(0) as pan coord
set BO 3 ;# Non_Simulation time
set SO 3 ;# Non_Simulation time
set stopTime $opt(sim_stop) ;# Non_Simulation time

#set temp1 $val(nn)
#incr temp1 -1
#exec /root/ns-2/ns-allinone-2.28/ns-2.28/examples/backoff_test/scen_gen $temp1 25

#global defaultRNG
#$defaultRNG seed $inputseed

#? #set val(traffic) ftp ;# cbr/poisson/ftp

#Needed?
Antenna/OmniAntenna set X_ 0
Antenna/OmniAntenna set Y_ 0
Antenna/OmniAntenna set Z_ 0.0864
Antenna/OmniAntenna set Gt_ 1.0
Antenna/OmniAntenna set Gr_ 1.0

if { $opt(x) == 0 || $opt(y) == 0 } {
puts "No X-Y boundary values given for wireless topology\n"
}
if {$opt(seed) > 0} {
puts "Seeding Random number generator with $opt(seed)\n"
}

```

```

ns-random $opt(seed)
}

# create simulator instance
set ns_ [new Simulator]

#TODO:check wether opts are set
set tracefd [open $opt(tracefd) w]
$ns_ trace-all $tracefd

set namtrace [open $opt(nam) w]
$ns_ namtrace-all-wireless $namtrace $opt(x) $opt(y)

$ns_ puts-nam-traceall {# nam4wpan #} ;# inform nam that this is a trace file for w

Mac/802_15_4 wpanCmd verbose on
Mac/802_15_4 wpanNam namStatus on ;# default = off (should be turned on before other)
Mac/802_15_4 wpanNam ColFlashClr black ;# default = gold

# For model 'TwoRayGround'
Phy/WirelessPhy set CStresh_ 1.995e-13
Phy/WirelessPhy set RXThresh_ 1.995e-13
Phy/WirelessPhy set CPThresh_ 10

# The threshold values for the transmitter (CStresh_) and receiver(RXThresh_). Val
Phy/WirelessPhy set Pt_ 0.000003 ;# Transmitter power = 0.0456
Phy/WirelessPhy set freq_ 8.68e+08 ;# frequency of operation = 8.68e+08
Phy/WirelessPhy set L_ 1.0 ;# Path loss = 1.0

# set up topography object
set topo [new Topography]
$topo load_flatgrid $opt(x) $opt(y)

# Create God
set god_ [create-god $opt(nn)]

set chan_1_ [new $opt(chan)]

# configure node

$ns_ node-config -adhocRouting $opt(rp) \
-llType $opt(ll) \
-macType $opt(mac) \

```

```

-ifqType $opt(ifq) \
-ifqLen $opt(ifqlen) \
-antType $opt(ant) \
-propType $opt(prop) \
-phyType $opt(netif) \
-topoInstance $topo \
-agentTrace ON \
-routerTrace ON \
-macTrace ON \
-movementTrace ON \
        -energyModel "EnergyModel" \
        -initialEnergy 13000 \
        -rxPower 0.0648 \
        -txPower 0.0344 \
-idlePower 0.00000552 \
-channel $chan_1_

#define for all nodes:
for {set i 0} {$i < $opt(nn)} {incr i} {
set node_($i) [$ns_ node]
$node_($i) random-motion 0 ;# disable random motion
}

#set node positions
for {set i 0} {$i < $opt(floors)} {incr i} {
for {set j 0} {$j < $opt(nodes_floor)} {incr j} {
$node_([expr $i * $opt(nodes_floor) + $j + 1 ]) set X_ [expr $opt(node_hor_off)+ $j]
$node_([expr $i * $opt(nodes_floor) + $j + 1 ]) set Y_ [expr ($i + 1) * $opt(floor_height)]
$node_([expr $i * $opt(nodes_floor) + $j + 1 ]) set Z_ 0.000000000000
}
}

#set coord (node 0) position
$node_(0) set X_ $opt(node_hor_off)
$node_(0) set Y_ [expr ($opt(floors) + 1) * $opt(floor_height)]
$node_(0) set Z_ 0.000000000000

#source /root/ns-2/ns-allinone-2.28/ns-2.28/examples/backoff_test/wpan.scn

#Just a test
proc ftpTraffic { src dst starttime } {
    global ns_ node_
    set tcp($src) [new Agent/TCP]
    eval \tcp($src) set packetSize_ 60
}

```

```

set window_ 10
set sink($dst) [new Agent/TCPSink]
eval $ns_ attach-agent \ $node_($src) \ $tcp($src)
eval $ns_ attach-agent \ $node_($dst) \ $sink($dst)
eval $ns_ connect \ $tcp($src) \ $sink($dst)

set pareto($src) [new Application/Traffic/Pareto]
eval \ $pareto($src) set PacketSize_ 30
eval \ $pareto($src) set burst_time_ 0.1ms
eval \ $pareto($src) set idle_time_ 1s

eval \ $pareto($src) attach-agent \ $tcp($src)
$ns_ at $starttime "$pareto($src) start"
#set ftp($src) [new Application/FTP]
#eval \ $ftp($src) attach-agent \ $tcp($src)
#$ns_ at $starttime "$ftp($src) start"
#$ns_ at [expr $starttime + 1] "$ftp($src) stop"
}

for {set i 1} { $i < $opt(nn)} {incr i} {
#ftpTraffic SRC_NODE DST_NODE TIME
ftpTraffic $i 0 [expr 20+$i]
}

# nodechange
$ns_ at 0.0 "$node_(0) NodeLabel PAN Coord"
$ns_ at 0.0 "$node_(0) sscs startCTPANCoord 1 $BO $SO"
# startPANCoord <txBeacon=1> <BO=3> <SO=3>
# startCTPANCoord <txBeacon=1> <BO=3> <SO=3> #This is a CT=clustertree

# Loop to start all the other nodes, with the first node starting at val(dst) and t
# start at times, incremented by val(dstit), to the starting time of the previous n
for {set i 1} { $i < $opt(nn)} {incr i} {
# $ns_ at $opt(dev_start) "$node_($i) sscs startCTDevice 1 1 1 $BO $SO" ;# inicio n

# inicio na ordem decrescente:
set aux [expr $opt(nn) - $i]
$ns_ at $opt(dev_start) "$node_($aux) sscs startCTDevice 1 1 1 $BO $SO"
# startDevice <isFFD=1> <assoPermit=1> <txBeacon=0> <BO=3> <SO=3>
# startCTDevice <isFFD=1> <assoPermit=1> <txBeacon=0> <BO=3> <SO=3> #This is a CT=c

incr opt(dev_start) $opt(dev_inc)
}

```

```

#No idea what dis is
Mac/802_15_4 wpanNam PlaybackRate 0.2ms

$ns_ at $opt(sim_start) "puts \"\\nTransmitting data ...\\n\""

if { $opt(cp) == "" } {
puts "*** NOTE: no connection pattern specified."
    set opt(cp) "none"
} else {
puts "Loading connection pattern..."
source $opt(cp)
}

# defines the node size in nam
for {set i 0} {$i < $opt(nn)} {incr i} {
$ns_ initial_node_pos $node_($i) 1
}

# Tell nodes when the simulation ends
for {set i 0} {$i < $opt(nn) } {incr i} {
    $ns_ at $stopTime "$node_($i) reset";
}

$ns_ at $stopTime "stop"
$ns_ at $stopTime "puts \"NS EXITING...\\n\""
$ns_ at $stopTime "$ns_ halt"

#putaria... this was to exec the throughput script at the end...
proc stop {} {
    global ns_ tracefd val(starttime) val env
    $ns_ flush-trace
    close $tracefd
    set hasDISPLAY 0
    foreach index [array names env] {
        #puts "$index: $env($index)"
        if { ("DISPLAY" == "DISPLAY") && ("DISPLAY" != "") } {
            set hasDISPLAY 1
        }
    }
}

# if { ("val(nam)" == "wpan.nam") && ("hasDISPLAY" == "1") } {
# exec /root/ns-2/ns-allinone-2.28/nam-1.11/nam wpan.nam &
# exec kate /root/ns-2/ns-allinone-2.28/ns-2.28/examples/backoff_test/wpan.tr &
# exec cp wpan.tr /root/downloads/scripts/awk/ &
# exec awk -f avg_throughput.awk wpan.tr

```

```
#   }  
}
```

```
puts "\nStarting Simulation..."  
$ns_ run
```

```
=====
```