

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA
DE SANTA CATARINA**

**DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ELETRÔNICA
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
DESENVOLVIMENTO DE PRODUTOS ELETRÔNICOS DIGITAIS**

SANDRO NATALINO DEMETRIO

REDES DE SENSORES SEM FIO

FLORIANÓPOLIS

2009

SANDRO NATALINO DEMETRIO

REDES DE SENSORES SEM FIO

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Banca Examinadora do Curso de Pós-Graduação Lato Sensu – Especialização em Desenvolvimento de Produtos Eletrônicos do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina IFSC, como requisito parcial para obtenção do Grau de Especialista em Desenvolvimento de Produtos Eletrônicos, sob a orientação do Professor Francisco Édson Nogueira de Mélo, Msc.

FLORIANÓPOLIS

2009

REDES DE SENSORES SEM FIO

SANDRO NATALINO DEMETRIO

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à banca examinadora do Curso de Pós-Graduação Lato Sensu – Especialização em Desenvolvimento de Produtos Eletrônicos Digitais do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina – IFSC – em cumprimento a requisito parcial para obtenção do título de Especialista em Desenvolvimento de Produtos Eletrônicos Digitais.

APROVADO PELA BANCA EXAMINADORA
EM FLORIANÓPOLIS, 01 DE JUNHO DE 2009.

Prof. Francisco Édson Nogueira de Melo, Msc.
Orientador

Prof. Golberi de Salvador Ferreira, Dr.

Prof. Delmar Carvalho de Souza, Msc.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente à minha esposa, Mábile, e minha filha, Isadora, pelo apoio e compreensão quando utilizado o tempo que delas era de direito para freqüentar o curso de especialização e para a realização deste trabalho.

Ao meu orientador pela confiança depositada e pela paciência.

A todos os professores do IFSC que participaram do curso, no qual confirmaram a qualidade de ensino da instituição através da sua respectiva atuação junto aos alunos.

RESUMO

Por muitos anos todos os padrões desenvolvidos para redes sem fios eram destinados a aplicações de alta taxa de dados. Devido a necessidade de padronizar as redes de sensores sem fio, foi criado pelo IEEE o padrão IEEE 802.15.4 que satisfaz aos requisitos de confiabilidade, segurança, baixa potência, baixo custo e baixa taxa de transmissão. Para patrocinar o crescimento de aplicações com o uso do padrão IEEE 802.15.4 foi criada a Aliança ZigBee, com o propósito de criar regras comuns para integração de aplicações, denominado padrão ZigBee. O objetivo deste trabalho foi desenvolver um estudo sobre as tecnologias de redes sem fio, mais especificamente sobre as particularidades das redes de sensores sem fio. De forma complementar aos estudos, foi desenvolvido um experimento integrando redes de computadores TCP/IP, através do protocolo SNMP, com redes de sensores sem fio, demonstrando os benefícios e possibilidades geradas pela integração das redes de sensores sem fio com as redes TCP/IP.

Palavras-chave: LR-WPAN, Redes, Wireless, Comunicação, Sensores, ZigBee.

ABSTRACT

For many years, all developed standards for wireless networks were destined to high data rates applications. With the needs to standardize the wireless sensor networks, was created by IEEE the standard IEEE 802.15.4 that meets the requirement of reliability, safety, low power, low cost and low data rate. To sponsor the growth of IEEE 802.15.4 standard applications, the ZigBee Alliance was created, destined to create a framework for applications, the standard created is named ZigBee Standard. Finally, the work aims develop a study on the wireless networks technologies, the LR-WPAN networks properties and the IEEE 802.15.4 and ZigBee standards. An experiment was developed, to complement the studies, integrating TCP/IP networks using the SNMP management protocol with the wireless sensors networking, showing the benefits and possibilities provided by integration of both networks.

Keywords: LR-WPAN, Networks, Wireless, Communication, Sensors, ZigBee.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	14
2	REDES SEM FIO.....	16
2.1	REDES DE COMPUTADORES SEM FIO.....	16
2.2	O TERMO WIRELESS.....	17
2.3	AMBIENTES DE REDES DE COMPUTADORES SEM FIO.....	17
2.3.1	Redes Locais (LAN – Local Area Network).....	17
2.3.2	Redes Pessoais (PAN).....	18
2.3.3	Redes Metropolitanas (MAN).....	18
2.3.4	Redes de Longas Distâncias (WAN).....	18
2.4	TOPOLOGIAS DE REDES SEM FIO.....	19
2.4.1	Redes Estruturadas.....	19
2.4.2	Redes Não Estruturadas.....	20
2.4.3	Redes Sem Fio “AD HOC”.....	20
2.5	PADRÕES PARA REDES SEM FIO.....	21
2.5.1	Padrão IEEE 802.15 (WPAN).....	21
2.5.2	Padrão IEEE 802.11 (WLAN).....	22
2.5.2.1	O Padrão IEEE 802.11a.....	24
2.5.2.2	O Padrão IEEE 802.11b.....	25
2.5.2.3	O Padrão IEEE 802.11g.....	25
2.5.3	O Padrão IEEE 802.16 (WMAN).....	25
2.6	ROTEAMENTO EM REDES SEM FIO.....	26
2.6.1	Roteamento Para Hosts Móveis.....	27
2.6.2	Roteamento Em Redes Ad Hoc.....	28
3	O PADRÃO IEEE 802.15.4 E A ALIANÇA ZIGBEE.....	30
3.1	O PADRÃO IEEE 802.15.4.....	30
3.1.1	Escopo do Padrão.....	30
3.1.2	Características Gerais.....	31
3.1.3	Topologias da Rede.....	32
3.1.3.1	Formação da Rede.....	33
3.1.3.1.1	Formação da Rede em Topologia Estrela.....	33
3.1.3.1.2	Formação da Rede em Topologia Peer-to-Peer.....	34
3.1.4	Arquitetura do Padrão.....	35
3.1.4.1	Camada Física (PHY).....	36
3.1.4.2	Subcamada MAC.....	36
3.1.5	Visão Funcional.....	37
3.1.5.1	O Superquadro (Superframe).....	37
3.1.5.2	Modelo de Transferência de Dados.....	38
3.1.5.2.1	Modelo de Transferência para o Coordenador.....	38
3.1.5.2.2	Modelo de Transferência do Coordenador.....	39
3.1.5.2.3	Transferência de Dados em Redes Peer-to-Peer.....	41
3.1.6	Estrutura do Quadro.....	41
3.1.6.1	Quadro de Sinalização.....	41
3.1.6.2	Quadro de Dados.....	42
3.1.6.3	Quadro de Reconhecimento.....	43
3.1.6.4	Quadro de Acesso ao Meio (MAC Frame).....	43
3.1.7	Características de Robustez.....	44
3.1.8	Considerações Sobre o Consumo de Energia.....	44
3.1.9	Considerações Sobre Segurança.....	45

3.2	A ALIANÇA ZIGBEE	46
3.2.1	Propósito da Aliança ZigBee	46
3.2.2	Topologias	47
3.2.3	O Padrão ZigBee	48
3.2.4	Mecanismos de Segurança do ZigBee	49
3.2.4.1	Sem Segurança	49
3.2.4.2	Lista de Controle de Acesso	49
3.2.4.3	Modo Seguro	49
4	PROJETANDO REDES LR-WPAN E AS POSSÍVEIS APLICAÇÕES	50
4.1	PARÂMETROS DE PROJETO PARA REDES LR-WPAN	50
4.1.1	Área de Cobertura.....	51
4.1.2	Quantidade de Nós da Rede.....	51
4.1.3	Taxa de Dados	51
4.1.4	Limites de Latência	52
4.1.5	Interconexão com Outras Aplicações	52
4.1.6	Planta a ser Instalada x Obstáculos.....	53
4.1.7	Existência de Geradores de Interferência	53
4.1.8	Segurança.....	55
4.1.9	Qualidade de Serviço (QoS – Quality of Service).....	55
4.1.10	Escalabilidade	56
4.2	TOPOLOGIAS E SUAS PARTICULARIDADES.....	56
4.2.1	Topologia Estrela (star)	57
4.2.2	Topologia em Árvore de Agrupamentos (Cluster-Tree)	57
4.2.3	Topologia em Malha (Mesh)	58
4.3	O HARDWARE DOS SENSORES	60
4.3.1	O Hardware da Interface de Rádio (Transceptor)	60
4.3.2	Dispositivos Computacionais	61
4.4	INTEGRAÇÃO ALÉM DAS LR-WPAN.....	62
4.4.1	Gateways	63
4.4.2	Pontes (bridges)	64
4.5	BANDAS DE RF UTILIZADAS POR DISPOSITIVOS IEEE 802.15.4	65
4.5.1	Bandas Não Licenciadas Para Redes LR-WPAN no Brasil	66
4.5.2	Banda de 868.3MHz a 870MHz.....	66
4.5.3	Banda de 902MHz a 928MHz.....	67
4.5.4	Banda de 2.4 GHz.....	67
4.6	VISADA DIRETA	68
4.7	APLICAÇÕES	68
5	ESTUDO DE CASO	70
5.1	O MÓDULO EZ430-RF2500.....	70
5.1.1	Comunicação Wireless	72
5.2	O PROTOCOLO SNMP	73
5.2.1	Agente de Gerenciamento	74
5.3	O EXPERIMENTO REALIZADO	75
5.3.1	NMS Utilizado e Testes Realizados com SNMP	76
6	CONCLUSÃO.....	80
6.1	TRABALHOS FUTUROS	80
7	REFERÊNCIAS	82

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E ACRÔNIMOS

ACL	<i>Access Control List</i>
AES	<i>Advanced Encryption System</i>
AODV	<i>Ad Hoc On-demand Distance Vector</i>
AP	<i>Access Point</i>
BPS	<i>Bit Per Second</i>
BPSK	<i>Binary PSK</i>
CAP	<i>Content Access Period</i>
CID	<i>Cluster Identification</i>
CLH	<i>Cluster Head</i>
CPU	<i>Central Processing Unit</i>
CRC	<i>Cyclic Redundancy Check</i>
CSMA-CA	<i>Carrier Sense Multiple Access - Carrier Avoidance</i>
DSSS	<i>Direct Sequence Spread Spectrum</i>
ETSI	<i>European Telecommunication System Interconnection</i>
FCS	<i>Frame Check Sequence</i>
FFD	<i>Full Function Device</i>
FHSS	<i>Frequency Hopping Spread Spectrum</i>
GTS	<i>Guaranteed Time Slot</i>
HTML	<i>Hyper Text Markup Language</i>
IDE	<i>Integrated Development Environment</i>
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>
IP	<i>Internet Protocol</i>
ISM	<i>Industrial, Scientific and Medical</i>
ITU	<i>International Telecommunication Union</i>
LAN	<i>Local Area Network</i>
LED	<i>Light Emitting Diode</i>
MAC	<i>Media Access Control</i>

MAN	<i>Metropolitan Area Network</i>
MANET	<i>Mobile Ad Hoc Networks</i>
MFR	<i>MAC Footer</i>
MHR	<i>MAC Header</i>
MIC	<i>Message Integrity Code</i>
MIB	<i>Management Information Base</i>
MLME	<i>MAC Local Management Extension</i>
MPDU	<i>MAC Protocol Data Unit</i>
MSDU	<i>MAC Service Data Unit</i>
MSP	<i>Mixed Signal Processor</i>
NMS	<i>Network Management System</i>
OFDM	<i>Orthogonal Frequency Domain Multiplexing</i>
OSI	<i>Open System Interconnection</i>
O-QPSK	<i>Off-set QPSK</i>
PAN	<i>Personal Area Network</i>
PDA	<i>Personal Digital Assistance</i>
PHY	<i>Physical Media</i>
PLME	<i>PHY Local Management Extension</i>
POS	<i>Personal Operating Area</i>
PPDU	<i>PHY Protocol Data Unit</i>
PSDU	<i>PHY Service Data Unit</i>
PSK	<i>Phase Shift Keying</i>
QoS	<i>Quality of Service</i>
QPSK	<i>Quaternary PSK</i>
RAM	<i>Random Access Memory</i>
RF	<i>Rádio Frequência</i>
RFD	<i>Reduced Function Device</i>
SAP	<i>Service Access Point</i>
SNMP	<i>Simple Network Management Protocol</i>

TCP/IP	<i>Transmission Control Protocol / Internet Protocol</i>
TIC	Tecnologia da Informação e Comunicação
UWB	<i>Ultra Wide Band</i>
U-NII	<i>Unlicensed National Information Infrastructure</i>
WAN	<i>Wide Area Network</i>
WLAN	<i>Wireless LAN</i>
WMAN	<i>Wireless MAN</i>
WPAN	<i>Wireless PAN</i>
WWAN	<i>Wireless WAN</i>
XML	<i>Extensible Markup Language</i>
ZED	<i>ZigBee Expansion Device</i>

LISTA DE FIGURAS

Figura 01 – Rede estrutura com AP.....	19
Figura 02 – Rede não estruturada.....	20
Figura 03 – Rede <i>Ad Hoc</i>	21
Figura 04 – Problema de acesso ao meio.	23
Figura 05 – Roteamento para hosts x mobilidade.	27
Figura 06 – Topologias de uma rede LR-WPAN.....	33
Figura 07 – Topologia em árvore de agrupamentos.....	35
Figura 08 – Camadas do padrão IEEE 802.15.4 e relação com demais camadas.	36
Figura 09 – Formador do quadro superframe.....	37
Figura 10 – Transmissão para um coordenador de rede com sinalização.	38
Figura 11 – Transmissão para um coordenador de rede sem sinalização.....	39
Figura 12 – Transmissão do coordenador em uma rede com sinalização.	40
Figura 13 – Transmissão do coordenador em uma rede sem sinalização.....	40
Figura 14 – Formato do quadro de sinalização (<i>Beacon frame</i>).....	41
Figura 15 – Formato do quadro de dados.	42
Figura 16 – Formato do quadro de reconhecimento.....	43
Figura 17 – Formato do quadro de acesso ao meio (MAC).	43
Figura 18 – Topologias possíveis em uma rede ZigBee.....	47
Figura 19 – Camadas do padrão ZigBee.	48
Figura 20 – As redes LR-WPANs possíveis conexões com outras redes.	52
Figura 21 – Certos obstáculos limitam o raio de alcance das redes LR-WPAN.....	53
Figura 22 – Geradores de interferências no sinal das LR-WPAN.....	54
Figura 23 – Topologia estrela.....	57
Figura 24 – Topologia em árvore de agrupamentos.....	58
Figura 25 – Topologia em malha.....	59
Figura 26 – Arquitetura de um microcontrolador típico.....	61
Figura 27 – Pilha de protocolos de um Gateway ZigBee.....	63
Figura 28 – Gateway ZigBee.....	64
Figura 29 – Estendendo uma rede ZigBee através do uso de ZEDs.	64
Figura 30 – Pilha do protocolo da ZED.....	65
Figura 31 – KIT de desenvolvimento ez430-RF2500 [23].	71
Figura 32 – Formato de um pacote SimpliciTI.....	73
Figura 33 – Solução de gerenciamento integrada com NMS através de SNMP	76
Figura 34 – Agente SNMP desenvolvido.....	76
Figura 35 – Interface Windows do NMS ActiveXperts Network Monitor.	77
Figura 36 – Interface Web do NMS ActiveXperts Network Monitor.....	78
Figura 37 – Avaliando o comando SET do SNMP no SO Debian.....	79

LISTA DE TABELAS

Tabela 01 – Materiais com Influência no sinal de RF [16].	55
Tabela 02 – Bandas utilizadas pelo padrão 802.15.4 [14].....	65

1 INTRODUÇÃO

Até poucos anos atrás contávamos com um contexto no qual existiam somente soluções e padrões para redes sem fio que buscavam acima de tudo altas taxas de transferências para dados, voz, vídeo e etc., inexistindo padrões com o propósito de servir aplicações para redes com dispositivos sensores e de controle.

As necessidades de aplicações para redes de sensores e de controle possuem requisitos de baixo custo de instalação e dos dispositivos de rede (nós de rede), alta durabilidade de baterias e grande quantidade de nós.

Com o propósito de desenvolver a padronização necessária para cobrir as necessidades supracitadas, o IEEE criou o padrão IEEE 802.15.4 lançado em maio de 2003 destinado às redes caracterizadas então como Rede Sem Fio Pessoais de Baixa Velocidade, comumente denominada pelo seu acrônimo em inglês LR-WPAN (*Low Rate - Personal Area Networks*).

Além do padrão IEEE 802.15.4, a indústria reconheceu a necessidade de criar padrões em nível de aplicação para as rede de sensores sem fio, sendo criada uma aliança entre várias empresas interessadas. A aliança então foi criada para fomentar a criação de padrões para aplicações e o desenvolvimento de soluções globais em redes LR-WPAN. A aliança recebeu o nome de ZigBee e o padrão por ela desenvolvido foi denominado padrão ZigBee. O nome ZigBee foi adotado devido a analogia dos nós de redes de sensores se comunicando em malha como sendo comportamento similar a de um conjunto de abelhas.

Inicialmente, quando foi lançado o padrão ZigBee, somente associados poderiam ter acesso ao padrão ZigBee, porém, com o objetivo de fortalecer os propósitos da aliança, em agosto de 2005 o padrão se tornou público com algumas restrições de uso comercial.

Sendo os dois padrões citados os alicerces para o desenvolvimento de soluções LR-WPAN, o objetivo deste trabalho é obter conhecimento sobre redes de computadores sem fios necessários para compreender o seu o funcionamento, fortalecendo o foco em redes caracterizadas como LR-WPAN e nos padrões IEEE 802.15.4 e ZigBee.

Este trabalho começa com redes de computadores sem fios, seus tipos e características, tendo a revisão bibliográfica concluída tratando temas relacionados com o padrão IEEE 802.15.4 e o padrão ZigBee.

Terminada a revisão bibliográfica, são expostas as linhas de base a serem consideradas em projetos de redes LR-WPAN utilizando o padrão IEEE 802.15.4 e ZigBee.

De forma avaliar os recursos e a possibilidade de convergência das redes de sensores sem fio com as redes tradicionais TCP/IP, foi desenvolvido um experimento utilizando um módulo de desenvolvimento da Texas Instruments, o ez430-RF2500, demonstrando as potencialidades das redes sem fio para aplicações estanques, como para integração de vários tipos de redes existentes.

2 REDES SEM FIO

Neste capítulo serão abordadas de forma genérica as redes de computadores sem fios, seus tipos e particularidades, apresentando o assunto de forma a torná-lo mais claro e determinar qual a posição das redes LR-WPAN nas redes de computadores.

2.1 REDES DE COMPUTADORES SEM FIO

Basicamente, as redes de computadores consistem de dois ou mais computadores ligados entre si, compartilhando recursos, trocando mensagens, etc. Existem várias formas pelas quais os recursos de vários equipamentos podem ser compartilhados, mediante meios de acesso, protocolos e requisitos de segurança. Um dos meios para compartilhar recursos e trocar mensagens entre computadores é utilizando as ondas eletromagnéticas, caracterizadas como meios de transmissão não guiados, ou seja, não possuem meio físico para o transporte do sinal [01].

Através da utilização de ondas de rádio ou infravermelho, os computadores estabelecem a comunicação de dados entre os pontos da rede. Basicamente, os dados são modulados em ondas de rádio e transmitidos por meio de ondas eletromagnéticas. Apesar da existência de tecnologias para a transmissão de dados utilizando várias faixas do espectro eletromagnético, este trabalho abordará apenas a comunicação de dados por ondas de rádio [02].

Uma arquitetura de redes de computadores sem fio é composta por interfaces e protocolos que estão no escopo deste trabalho, bem como dispositivos de software e hardware, necessários para o seu funcionamento.

Dentro das arquiteturas de redes sem fio, podemos citar basicamente a existência de quatro estruturas: as redes de comunicação pessoal ou WPAN (*Wireless Personal Area Network*), as redes de comunicação local ou WLAN (*Wireless Local Area Network*), as redes de comunicação metropolitana ou WMAN (*Wireless Metropolitan Area Network*) e as redes de comunicação de longa distância ou WWAN (*Wireless Wide Area Network*). Apesar das várias tecnologias necessárias para implementar as arquiteturas citadas acima, e de elas

possuírem características similares, o escopo deste trabalho está focado em redes de computadores pessoais sem fio (WPAN) detalhadas nos capítulos seguintes.

2.2 O TERMO *WIRELESS*

Wireless é um termo utilizado para descrever telecomunicação que utiliza ondas eletromagnéticas (substituindo cabos elétricos e/ou ópticos) para transportar o sinal para parte ou todo o caminho da comunicação. Alguns dispositivos de monitoramento, como alarmes de intrusão, que empregam ondas acústicas acima do perceptível ao ouvido humano, também são classificados, às vezes, como sem fio. Os primeiros transmissores sem fio entraram no ar no início do século 20, com o nome de telegrafia sem fio (através do código Morse).

Mais tarde, com o uso de modulação, foi possível a transmissão de voz e música através de ondas eletromagnéticas. O uso desta forma de transmissão veio então a ser chamada de rádio. Com o advento da televisão, fax, comunicação de dados, e com o uso de uma maior porção do espectro eletromagnético, o termo *wireless* ressurgiu [03].

2.3 AMBIENTES DE REDES DE COMPUTADORES SEM FIO

O funcionamento das redes de computadores sem fio é muito similar ao funcionamento das redes de computadores cabeadas. Como mencionado anteriormente, a diferença básica é a inexistência de cabos interligando os computadores.

A seguir serão apresentados alguns tipos de redes sem fio, e classificando-as conforme o seu tamanho, formato e aplicabilidade.

2.3.1 Redes Locais (LAN – *Local Area Network*)

Redes locais, muitas vezes denominadas LANs, são redes privadas, com o alcance restrito a um único edifício ou um campus universitário, por exemplo, com até alguns quilômetros de extensão. Estas redes são utilizadas amplamente para conectar computadores pessoais e estações de trabalho em ambientes empresariais, industriais, universidades, entre outros, com o propósito de permitir o compartilhamento de recursos e a troca de informações. As redes sem fio LANs são similares às redes de computadores cabeadas LANs. O protocolo mais comum em LANs sem fio é o IEEE 802.11 [04].

2.3.2 Redes Pessoais (PAN)

As redes pessoais, também denominadas de redes domésticas, já estão presentes de forma limitada. Muitos lares já possuem sistemas de alarme, redes de computadores com acesso à Internet, entre outras. Porém, a sua grande maioria possui uma estrutura dedicada para cada aplicação. A idéia fundamental é que, no futuro, a maioria dos lares estará configurada para estas redes e que todos os dispositivos poderão se comunicar entre si, estando acessíveis à Internet. O ideal seria que todas as aplicações pudessem utilizar uma mesma rede. Os principais padrões que estruturam as redes PAN sem fio (WPAN) são elaborados pelo grupo de trabalho do IEEE denominado 802.15. Entre os padrões para redes pessoais sem fio existentes, estaremos focalizando o padrão IEEE 802.15.4, que é o padrão para redes LR-WPAN [04].

2.3.3 Redes Metropolitanas (MAN)

As redes metropolitanas têm a abrangência de uma cidade. Exemplos de redes metropolitanas são as redes de televisão a cabo, disponíveis em muitas cidades. O principal padrão que descreve o uso de redes sem fio MAN é o IEEE 802.16 e os seus derivados [04].

2.3.4 Redes de Longas Distâncias (WAN)

Também conhecidas como redes geograficamente distribuídas, as redes de longa distância abrangem uma grande área geográfica, geralmente um país ou continente. Na maioria das redes de comunicação de longa distância, a estrutura é composta por enlaces de longa distância (destinados a interligar os usuários) e elementos de comutação (destinados a escolher o melhor caminho para os dados serem transmitidos). Esses elementos de comutação são geralmente chamados de roteadores. Apesar de existirem regras que determinam como os enlaces WAN sem fio funcionam, a maioria destes enlaces funciona com estruturas de visada direta (os dois pontos precisam estar visíveis e sem obstruções entre si) e, neste caso, sendo aplicados na maioria das vezes, protocolos proprietários na sua implementação [04].

2.4 TOPOLOGIAS DE REDES SEM FIO

Nesta parte trataremos do formato das redes sem fio (composição) ou, como é tecnicamente chamada, da topologia. Basicamente possuímos duas topologias de redes wireless. A “*broadband*”, rede estruturada que possui um elemento, e como o próprio nome informa, dá suporte à estrutura de comunicação. A segunda topologia é a não estruturada, na qual não existem elementos que forneçam estruturas centralizadoras para comunicação entre os nós de rede, sendo que cada nó de rede utiliza diretamente os seus respectivos transceptores para trocarem informações entre si.

2.4.1 Redes Estruturadas

Nas redes móveis estruturadas os computadores móveis estão em contato com um elemento que fornece o suporte à comunicação. Este elemento geralmente é conhecido como ponto de acesso ou AP (*Access Point*). Neste tipo de rede, toda a troca de informações deve, necessariamente, passar pelo ponto de acesso, mesmo que os equipamentos móveis estejam a uma distância que possibilite a comunicação diretamente entre eles.

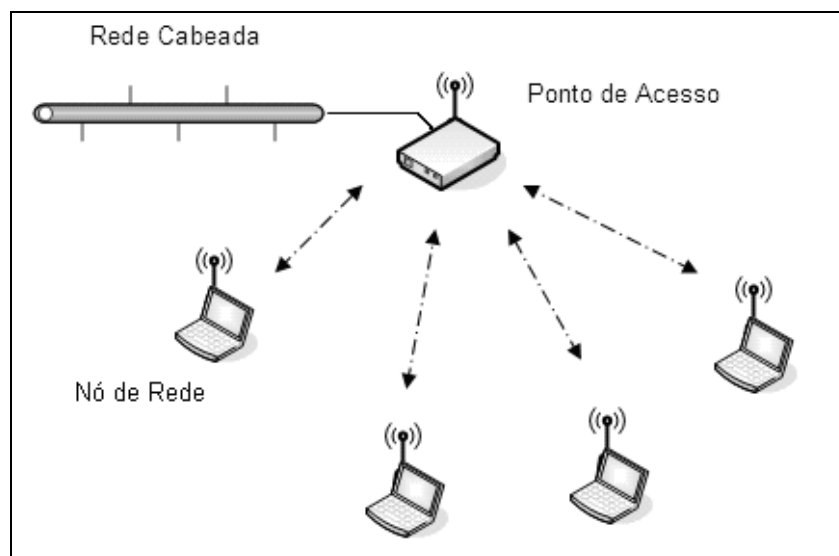


Figura 01 – Rede estrutura com AP.

Geralmente o ponto de acesso, que fornece suporte para o funcionamento da rede sem fio estruturada, também tem a função de porta de saída (*Gateway*) da rede sem fio para outras redes, por exemplo, redes cabeadas.

2.4.2 Redes Não Estruturadas

Em redes sem fio não estruturadas inexitem elementos coordenadores da troca de informações. Neste tipo de rede o quesito mobilidade não é levado em conta, necessitando recursos especiais para o suporte de tal característica.

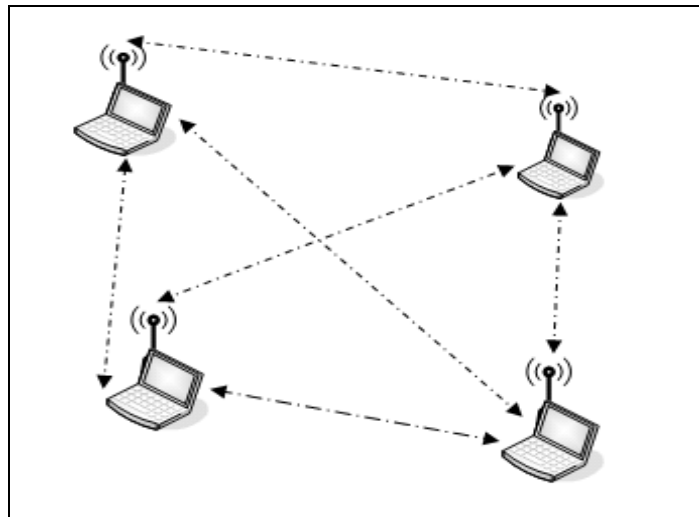


Figura 02 – Rede não estruturada.

2.4.3 Redes Sem Fio “AD HOC”

O termo “*Ad Hoc*” tem origem do latim e significa “para isto”, ou seja, é um recurso criado para ser usado em um problema específico ou imediato. Porém, uma rede *Ad Hoc* sem fio é algo mais que isso. Em uma rede *Ad Hoc* não existe uma topologia pré-determinada e muito menos um controle centralizado. Este tipo de rede não requer (ao contrário das redes estruturadas) elementos centralizadores (como é o caso dos APs) configurados previamente [05].

Em uma rede sem fio *Ad Hoc*, os elementos que trocam informações só fazem parte da rede durante a sessão de transferência de informações ou, no caso de elementos móveis, enquanto estão localizados dentro de área de alcance do restante da rede [05].

As redes sem fio *Ad Hoc* móveis também são conhecidas como MANETs (*Mobile Ad Hoc NETWORKS*) [06].

Como os elementos e a comunicação de uma rede sem fio *Ad Hoc* podem se mover arbitrariamente, a topologia da rede pode mudar frequentemente e de forma imprevisível,

necessitando de recursos que forneçam suporte a permanente adaptação e reconfiguração de rotas [06].

A utilização de redes *Ad Hoc* está geralmente atrelada a cenários onde existe a necessidade de se instalar rapidamente uma rede de comunicação, ou em situações onde não exista infra-estrutura instalada previamente, ou ainda onde a instalação de uma infra-estrutura não é viável.

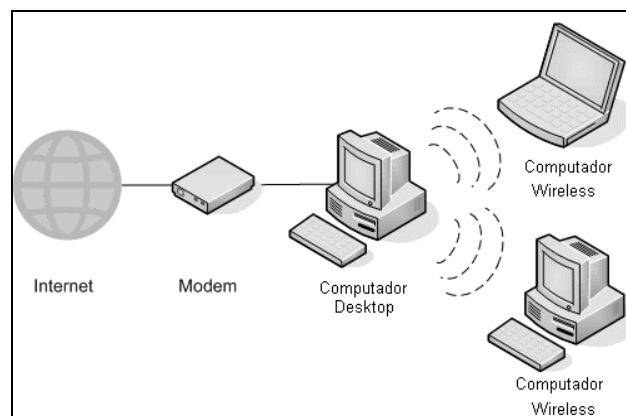


Figura 03 – Rede *Ad Hoc*.

2.5 PADRÕES PARA REDES SEM FIO

Nesta parte serão apresentados os principais protocolos de comunicação para redes sem fio relacionadas com redes PAN, LAN e MAN. São eles: IEEE 802.15, para redes pessoais (WPAN); IEEE 802.11, para redes locais (WLAN) e IEEE 802.16, para redes metropolitanas (WMAN).

2.5.1 Padrão IEEE 802.15 (WPAN)

A quantidade de redes sem fio pessoais (WPAN) para aplicações relacionadas com sensores e outros dispositivos de controle é limitada. Existem basicamente sistemas proprietários, elaborados para atender necessidades específicas, como as redes de automação industrial [06].

Podemos citar como exemplo aplicações com sensores de temperatura e gases, acionamentos de relés e chaves e etc., que não necessitam de uma alta largura de banda,

porém necessitam de uma baixa latência e eficiência no consumo de energia para atenderem a necessidade de baixo tempo de resposta das aplicações e alto desempenho das baterias [06].

Com o propósito de padronizar as comunicações sem fio para redes WPANs, o IEEE criou um grupo denominado 802.15, que é responsável pela elaboração de padrões para redes pessoais sem fio, descrevendo como os dispositivos para redes pessoais sem fio devem interagir [07].

Dentro da família de padrões IEEE 802.15 são encontrados os seguintes padrões: o IEEE 802.15.1, denominado Bluetooth (atualmente utilizado por dispositivos portáteis e móveis); o IEEE 802.15.3, destinado para WPANs que necessitam de alta taxa de transmissão de dados (conhecido também como UWB) e o IEEE 802.15.4, destinados às aplicações que se caracterizam pela baixa taxa de transmissão de dados e necessidade de longa duração de bateria. Este último será abordado profundamente, tendo em vista que é o cerne deste trabalho.

2.5.2 Padrão IEEE 802.11 (WLAN)

O desejo por LANs sem fio surgiu junto com os primeiros computadores portáteis (notebooks), pois muitas pessoas gostariam de entrar em um escritório e magicamente se conectarem a Internet. A partir deste momento, começaram a surgir diversos grupos desenvolvendo soluções para atender a essa necessidade, e também os problemas de incompatibilidade, visto que um computador com uma interface de rede com a marca X não se comunicava com uma estação base Y e vice-versa [04].

Devido ao problema de incompatibilidade, a IEEE, que já trabalhava com a padronização de protocolos de redes guiadas, ficou responsável por elaborar padrões para as redes sem fio. Tal padrão foi nomeado de IEEE 802.11. O padrão IEEE 802.11 também é conhecido por *Wi-Fi* (do inglês *wireless fidelity*, ou seja, fidelidade em redes sem fio). O padrão IEEE 802.11 trabalha de dois modos: na presença de uma estação base, também chamada de *Access Point* (AP), e na ausência de uma estação base, conhecidos respectivamente como estruturado e não estruturado, que foram abordados nas seções anteriores [04].

Na época em que o padrão IEEE 802.11 estava sendo projetado, as redes *Ethernet*, baseadas no padrão IEEE 802.3, já haviam dominado o mercado. Sendo assim, o IEEE decidiu tornar o padrão IEEE 802.11 compatível com a *Ethernet* acima da camada de enlace de dados. Na prática, o padrão IEEE 802.11 é composto por dois padrões incompatíveis, uma versão mais simples que utiliza modulação FHSS com ciclos rápidos entre os saltos de frequência, usando a faixa de frequência não licenciada ISM e 79 canais. Na teoria, mesmo com algum dos canais estando inutilizável por interferência, os demais que deverão estar livres poderão ser utilizados para transmissão. Caso as informações não passem, elas são enviadas novamente [04].

Na versão mais complexa do padrão IEEE 802.11, é utilizada a modulação DSSS, ou seja, transmite em todos os canais disponíveis simultaneamente, e dessa forma é possível atingir uma velocidade de transmissão de até 2Mbps, porém, o consumo de energia também aumenta. O IEEE na mesma época lançou uma terceira versão do padrão IEEE 802.11 que utiliza infravermelho que, no entanto, nunca foi implementada [08].

Não obstante o 802.11 seja compatível com o *Ethernet* a partir da camada de enlace de dados, existem vários desafios a serem superados na camada física e de enlace de dados, não podendo ser feita uma analogia somente de substituição de cabos por ondas de rádio.

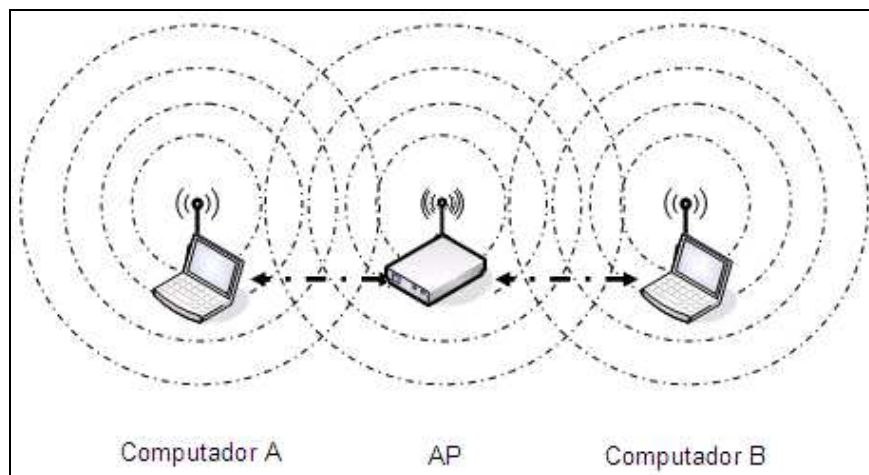


Figura 04 – Problema de acesso ao meio.

Tomando como base a Figura 04, imagine que A está transmitindo para AP, deixando o meio ocupado, porém, como as ondas de rádio de A não chegam até B, B ao verificar o meio de transmissão constata que o mesmo está livre e quando for tentar efetuar a transmissão de dados não conseguirá, visto que AP estará ocupado. Este tipo de problema deve ser resolvido pelo padrão IEEE 802.11.

Um segundo problema é a possibilidade de reflexão dos sinais de rádio, que pode ocorrer em objetos sólidos dentro do escopo da rede, podendo fazer com que o sinal seja recebido várias vezes [04].

Outra característica intrínseca às redes sem fio é o fator mobilidade versus recursos disponíveis em uma determinada zona de trabalho. A grande maioria dos aplicativos não está preparada para a possibilidade de mobilidade. Por exemplo, muitos programas processadores de texto possuem uma lista de impressoras que podem escolher para imprimir um documento, quando o computador no qual o processador de texto funciona é levado a um novo ambiente, a lista interna de impressoras se torna inválida [04].

Uma quarta particularidade relacionada também à mobilidade é a que quando uma determinada estação móvel muda de área, ela entra no escopo de outra estação base, processo conhecido como "*handoff*", principalmente em redes de telefonia celular. Para este caso é necessário um tipo de transferência que mantém a funcionalidade.

Em 1997, o IEEE lançou um padrão que trata as particularidades mencionadas e outras questões, e que funcionava a uma velocidade de 1Mbps ou 2Mbps. Porém, tendo em vista a velocidade que as redes *Ethernet* ofereciam na época, houve uma reclamação de que as velocidades apresentadas eram baixas. Isso fez com que a IEEE continuasse o trabalho, resultando na criação de dois novos padrões publicados em 1999, o IEEE 802.11a e o IEEE 802.11b. O padrão IEEE 802.11a faz uso de uma faixa de frequência mais larga que o padrão IEEE 802.11 e funciona com velocidade de até 54Mbps. Já o padrão IEEE 802.11b, que utiliza a mesma faixa de frequência que o padrão IEEE 802.11, atinge uma velocidade de 11Mbps, utilizando uma técnica de modulação diferente. Existe ainda o padrão IEEE 802.11g, que utiliza a faixa de frequência do padrão IEEE 802.11, porém, utiliza a mesma técnica de modulação do padrão IEEE 802.11a [04].

2.5.2.1 O Padrão IEEE 802.11a

O padrão IEEE 802.11a faz uso da faixa ISM utilizando a banda U-NII e modulação OFDM, projetada para, principalmente, minimizar a interferência causada através de sinais refletidos. Seu maior ponto fraco é o fato de não poder ser utilizada na Europa devido a padrões que definem o uso da Hiperlan do ETSI, que é um padrão europeu para redes sem fio [08].

2.5.2.2 O Padrão IEEE 802.11b

É baseado no padrão IEEE 802.11, que utiliza modulação DSSS. Faz uso de técnicas otimizadas de modulação, que permitem que a velocidade de transmissão atinja a velocidade anteriormente mencionada de 11Mbps. Ao atingir os 11Mbps, o padrão conseguiu superar o limite de velocidade de 10Mbps fornecido pelo padrão *Ethernet* original. Este foi um dos motivos pelo qual o padrão IEEE 802.11 é chamado de *Wi-Fi* [08].

2.5.2.3 O Padrão IEEE 802.11g

O padrão IEEE 802.11g é uma extensão do padrão IEEE 802.11b, porém, ele consegue velocidades de até 54Mbps utilizando a banda ISM de 2.4GHz, com a tecnologia OFDM que também é utilizada no padrão IEEE 802.11a. Se comparada a velocidade do padrão IEEE 802.11g com a velocidade do padrão 802.11b, que é de no máximo 11Mbps, é perceptível um grande avanço de desempenho [09].

Dispositivos com interfaces 802.11g podem trabalhar a uma velocidade mais baixa (11Mbps, por exemplo) sendo compatíveis com dispositivos que utilizam uma interface 802.11b [10].

2.5.3 O Padrão IEEE 802.16 (WMAN)

Tendo em vista o crescimento da banda larga, a procura por tecnologias que podem fornecer este tipo de serviço é grande, ainda mais tecnologias que dispensam o lançamento de mídias guiadas (cabos) entre o provedor de serviço e o usuário, que é o caso das redes sem fio [04].

Com a falta de padronização das tecnologias de redes sem fio de banda larga, a produção de software e hardware em massa para oferecer suporte às redes sem fio não era possível, fazendo com que o custo da implantação das estruturas de redes sem fio de banda larga não tivesse um preço competitivo [04].

Para resolver o problema da falta de padrão, em 1999, o IEEE foi incumbido de elaborar um padrão a ser utilizado pelo mercado. Ele foi denominado com o próximo número disponível dos grupos já existentes do IEEE, no caso o padrão IEEE 802.16, oficialmente

chamado de “*Air Interface for Fixed Broadband Wireless Access Systems*” (interface aérea para sistemas fixos de acesso sem fio de banda larga), eventualmente conhecido também como MAN sem fio ou enlace local sem fio [04].

Uma pergunta que geralmente é feita em relação ao padrão IEEE 802.16 é por que não utilizar o padrão IEEE 802.11 para cumprir o papel fornecedor de suporte para o serviço de banda larga. Existem razões muito boas, e podemos começar pelo fato de que eles resolvem problemas diferentes.

Enquanto que, para o padrão IEEE 802.11 os computadores podem se locomover, isso não ocorre para os usuários de banda larga, que geralmente são edifícios e residências. Sendo assim, mobilidade não é relevante para o padrão IEEE 802.16 [04].

O padrão IEEE 806.16 pode utilizar dispositivos *full-duplex*, o que o padrão IEEE 802.11 tenta evitar para manter o preço das interfaces baixo [04].

Uma vez que o escopo do padrão IEEE 802.16 é metropolitano, o que implica que podem existir distâncias com vários quilômetros, a potência recebida pela estação-base pode variar de estação para estação, afetando a relação sinal/ruído, necessitando para compensação, vários esquemas de modulação [04].

Como a largura de banda está relacionada diretamente com o tamanho da faixa de frequência disponível, o padrão IEEE 802.16 opera na faixa de 10GHz a 66GHz, não servindo ao uso das bandas ISM utilizadas pelo padrão IEEE 802.11, classificadas como bandas estreitas. Como a frequência de operação é alta e por conseqüente as ondas possuem comprimentos milimétricos, é necessária uma camada física bem definida para contornar as particularidades das ondas milimétricas. Um exemplo é o fato da forte absorção destas minúsculas ondas pela água, especialmente no caso de chuvas. Isso faz com que seja necessária a existência de tratamento robusto de erros [11].

Ainda devido ao uso de ondas milimétricas, podemos citar a característica de que elas podem ser concentradas em feixes direcionais (diferente do padrão IEEE 802.11, que é utilizado geralmente de forma omnidirecional).

2.6 ROTEAMENTO EM REDES SEM FIO

A principal função da camada de rede, tomando como base o modelo de referência OSI (*Open Systems Interconnection* – Interconexão de Sistemas Abertos), é a de encaminhar pacotes da máquina de origem para a máquina de destino. O algoritmo de roteamento é a parte do software da camada de rede que é responsável pela decisão sobre a linha de saída para a qual o pacote de entrada deve ser enviado. É útil fazer uma distinção entre roteamento, que é a tomada de decisão sobre quais rotas utilizar, e encaminhamento, que acontece quando um pacote chega e é levado até a linha de saída [04].

2.6.1 Roteamento Para Hosts Móveis

Os hosts móveis, com a propriedade de mobilidade, criam uma nova dificuldade, uma vez que antes de encaminhar um pacote é necessário localizá-lo. Os hosts que nunca se movem são chamados de hosts estacionários, e estão conectados à rede por fios de cobre ou fibras óticas. Já os hosts migrantes são basicamente hosts estacionários que se deslocam de um local fixo para outro, de tempos em tempos, porém, só usam a rede quando estão fisicamente conectados a ela [04].

A princípio, todos os hosts possuem um endereço local inicial, que além de identificá-lo serve para informar a sua localização. Para esta análise, partiremos do princípio de que estes endereços são permanentes. O objetivo do encaminhamento em sistemas com hosts móveis é o de tornar possível o envio de pacotes para hosts que estejam utilizando os seus endereços locais e fazer com que os pacotes alcancem esses hosts de forma eficiente, onde quer que eles possam estar [04], porém, o grande problema é localizá-los.

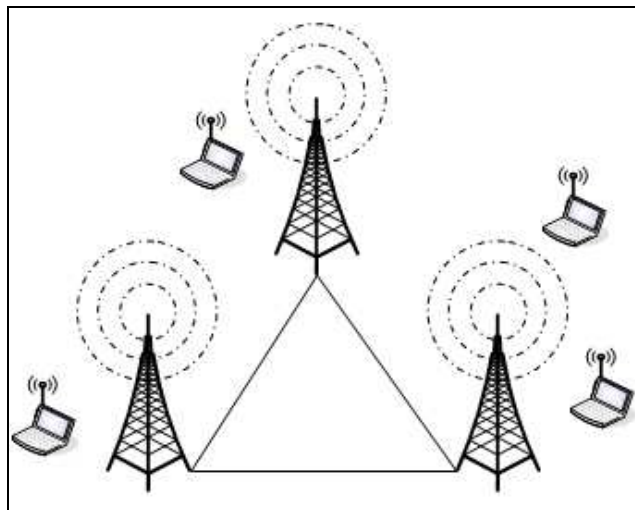


Figura 05 – Roteamento para hosts x mobilidade.

Tomando como base a Figura 05, a estrutura de comunicação é dividida em pequenas células ou áreas, e em redes, geralmente são LANs ou células sem fio. Para cada área temos um agente externo que controla o acesso de hosts móveis que entram no seu respectivo escopo e, além disso, cada área tem um agente local, que controla os hosts cuja base encontra-se no escopo, mas que no momento podem estar em outro local. Quando um novo host entra em uma área, seja conectando-se a ela ou passando por ela (no caso de uma célula sem fio), seu computador deverá se registrar com o agente externo da respectiva área. Este por sua vez deverá consultar o agente local do host móvel e verificar se o mesmo poderá associar-se (baseado nos dados de endereçamento e autenticação) à rede. Caso a associação seja possível, o agente externo informará a nova localização para o agente local do host móvel. A partir deste momento a base local do host móvel deverá encaminhar todos os pacotes endereçados ao host móvel para a sua nova localização temporária. Existem outros recursos e particularidades para o cenário em questão, porém, são extensas e fogem do propósito do trabalho apresentado [04].

2.6.2 Roteamento Em Redes *Ad Hoc*

Nas seções anteriores foi realizada uma abordagem de roteamento para o caso de hosts móveis e roteadores são fixos, porém, temos casos mais extremos onde os roteadores também são móveis. Podemos citar [04]:

- Grupo de pessoas com computadores móveis em uma área não estruturada;
- Uma frota de navios no mar;
- Trabalhos de emergência em atendimentos de áreas que tenham a infra-estrutura destruída.

Em todos os casos citados, cada nó tem funcionalidade de host e de roteador e, geralmente no mesmo equipamento, estas características são aplicáveis em redes Ad Hoc ou Manets, como mencionado em seções anteriores.

O que torna as redes *Ad Hoc* diferentes das redes fisicamente conectadas é que todas as regras habituais a respeito de topologias fixas, vizinhos fixos e conhecidos, relacionamento entre endereço de rede e localização, entre outras, são repentinamente abandonadas. Nas redes Ad Hoc, os roteadores podem ir e vir, ou aparecerem em novos lugares de um momento

para o outro, alterando a topologia a todo o tempo, fazendo com que a validade dos caminhos tenha que se alterar de modo espontâneo [04].

Existem diversos algoritmos de roteamento para redes *Ad Hoc*. Podemos citar o AODV (*Ad Hoc On-demand Distance Vector*), que consiste num algoritmo de roteamento de vetor distância, adaptado para funcionar em um ambiente móvel e que leva em consideração a largura de banda limitada e a baixa duração das baterias nesse ambiente [04].

Um item que os protocolos de roteamento destinados às redes *Ad Hoc* devem levar em consideração é o mapa de energia dos dispositivos quando da utilização de baterias. A energia para estes dispositivos é limitada, cabendo aos hosts com função de roteador, que mais possuem energia disponível, a prioridade de uso para a função de encaminhamento. Com esta estrutura, pode existir um *backbone* virtual baseado no mapa de energia da rede, sendo ele composto por hosts com função de roteadores que possuem mais energia disponível [12].

O roteamento em redes *Ad Hoc* é uma área de pesquisa muito ampla, sendo indicada para trabalhos futuros. Acreditamos que o conteúdo exposto neste trabalho seja subsídio suficiente para compreender as particularidades de roteamento em redes *Ad Hoc*.

Neste capítulo foi abordado, de uma forma ampla, um cenário composto por vários tipos de redes sem fio existentes, fazendo com que seja possível compreender o foco do trabalho, que são as redes sem fios pessoais suportadas pelo padrão IEEE 802.15.4. No próximo capítulo será abordado o padrão IEEE 802.15.4, junto com a Aliança ZigBee que foi criada para impulsionar a aplicação destas redes.

3 O PADRÃO IEEE 802.15.4 E A ALIANÇA ZIGBEE

O capítulo anterior apresentou um panorama sobre redes de computadores sem fio, suas classes e particularidades. O que possibilitou compreender o espaço no qual está localizado o foco do trabalho, que são as redes pessoais sem fio que utilizam o padrão IEEE 802.15.4.

Neste capítulo será visto com profundidade o padrão IEEE 802.15.4, considerado o “chassi” das redes classificadas como LR-WPAN. Será abordada também a Aliança ZigBee e os seus propósitos.

3.1 O PADRÃO IEEE 802.15.4

O padrão IEEE 802.15.4 foi motivado pela existência de aplicações específicas, que necessitam de um padrão flexível, com dispositivos de baixo custo, baixo consumo de energia, e que possuem uma necessidade de baixa taxa de transferência e curto alcance. Até o surgimento do padrão IEEE 802.15.4, os padrões existentes não forneciam estas características, o que impedia a implementação de certas aplicações no campo industrial, na medicina, agricultura, no campo automotivo e de automação residencial. Serão vistas as principais características do padrão IEEE 802.15.4 de forma intensa, tendo em vista que o mesmo é base do trabalho proposto [13].

3.1.1 Escopo do Padrão

O escopo do padrão IEEE 802.15.4 é definir especificações para a camada física (conhecida também por camada PHY, do inglês *PHYSical*) e para a subcamada de acesso ao meio (conhecida também como MAC, acrônimo em inglês do termo *Media Access Control*, ou Controle de Acesso ao Meio). Estas camadas são destinadas a promover conectividade a uma baixa taxa de transferência em meio sem fio para dispositivos fixos, portáteis ou móveis. Grande parte destes dispositivos faz uso de bateria com capacidade limitada, trabalhando em uma área de operação pessoal (conhecida como POS – *Personal Operating Area*), que possui um raio de 10 metros [14].

Não obstante o padrão tenha sido definido para uma POS, os dispositivos podem trabalhar em um raio de maior alcance, considerando quedas nas taxas de transmissão. O padrão define como taxa máxima de transferência 250kbps, que satisfaz a uma vasta gama de aplicações, sendo escalonável a ponto de ser utilizada para automação e monitoramento (que usam valores típicos de 20Kbps ou menos) que fazem uso de comunicação sem fio.

3.1.2 Características Gerais

Os objetivos específicos do padrão IEEE 802.15.4 são de proporcionar facilidade na instalação, transferência de dados confiáveis, operação em uma curta distância, dispositivos de custo extremamente baixo, razoável tempo de operação de baterias, mantendo um protocolo simples e flexível [14].

Algumas das características de uma rede IEEE 802.15.4 são:

- Transmissão sem fio a taxas de 250Kbps, 40Kbps e 20Kbps;
- Operação nas topologias em estrela e ponto-a-ponto, também conhecida pelo termo em inglês *peer-to-peer*;
- Endereçamento de 16 bits (curto) ou 64 bits (estendido);
- Alocação garantida de *time slots*;
- Acesso ao meio utilizando CSMA-CA;
- Protocolo de reconhecimento para transferência confiável;
- Baixo consumo de energia;
- Detecção de energia;
- Indicação de qualidade de enlace;
- 16 canais na banda de 2450MHz, 10 canais na banda de 915MHz e 01 canal na banda de 868MHz.

Dois tipos de dispositivos podem participar de uma rede LR-WPAN: dispositivos FFD (*Full-Function Devices*) e dispositivos RFD (*Reduced-Function Devices*). Os dispositivos FFD funcionam como coordenadores da PAN, como roteadores ou como simplesmente nós finais. Já os dispositivos RFD são componentes de aplicação simples, como chaves liga-desliga, sensores fim de curso e similares, que não necessitam transmitir grande quantidade de

dados, fazendo com que a sua implementação destes possa ocorrer utilizando recursos mínimos.

A existência de dois ou mais dispositivos utilizando o mesmo canal de comunicação em uma POS constitui basicamente uma WPAN. No entanto, em uma WPAN sempre deverá existir no mínimo um dispositivo FFD atuando como coordenador da WPAN [14].

Uma rede IEEE 802.15.4 faz parte da família de padrões WPAN, uma vez que a cobertura de uma rede LR-WPAN pode ultrapassar o perímetro POS, o que caracteriza uma WPAN. Na verdade, a área de cobertura de uma rede sem fio não pode ser definida com precisão, uma vez que as características de propagação são dinâmicas e incertas. Como vimos em capítulos anteriores, pequenas mudanças de posição e/ou direção podem mudar a potência do sinal e a qualidade do link de comunicação.

3.1.3 Topologias da Rede

Uma LR-WPAN pode trabalhar conforme a aplicação em duas topologias: topologia em estrela e topologia *peer-to-peer*.

Na topologia em estrela, os dispositivos se comunicam com um dispositivo central, chamado de coordenador da PAN (PAN *coordinator*). Um dispositivo LR-WPAN geralmente possui alguma aplicação associada e é o ponto de inicialização e finalização da comunicação. Já o coordenador da PAN pode ter funções específicas, mas pode ser também utilizado para iniciar, terminar, ou encaminhar a comunicação na rede PAN [14].

Como já mencionado, o coordenador da PAN é o primeiro dispositivo que controla a rede, e por possuir uma maior carga de trabalho, é um dos que mais consome energia, sendo geralmente alimentado por meio de fontes não limitadas, diferentemente dos dispositivos simples que são alimentados por baterias.

Na topologia *peer-to-peer* também existe um coordenador da PAN, porém, é diferente da topologia em estrela, uma vez que os demais dispositivos podem se comunicar diretamente entre si, ou seja, com os demais dispositivos que estejam no seu raio de alcance. A topologia *peer-to-peer* permite a formação de redes complexas para serem implementadas, como a topologia em malha. Aplicações como as de controle e monitoramento industrial, redes de sensores sem fio, inventário de recursos, inteligência na agricultura e sistemas de segurança,

podem se beneficiar de uma rede em malha. Uma rede *peer-to-peer* pode ser uma rede *Ad Hoc* com propriedade de auto-organização e auto-recuperação. Estas características permitem que uma mensagem possa sofrer vários processos de encaminhamento até chegar ao seu destino, uma vez que estas funcionalidades são pertinentes à camada três, e as mesmas não são abordadas no padrão IEEE 802.15.4 [14].

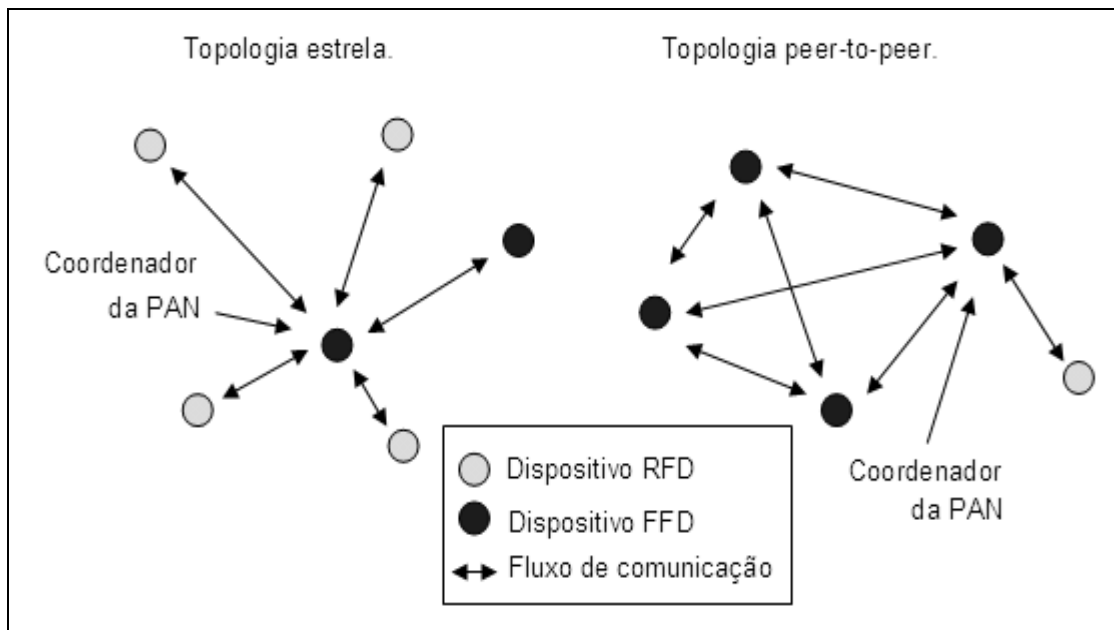


Figura 06 – Topologias de uma rede LR-WPAN.

3.1.3.1 Formação da Rede

Apesar da formação da rede estar relacionada com a camada três e não fazer parte do padrão IEEE 802.15.4, abordaremos a formação das redes nas LR-WPAN por considerar um item pertinente na compreensão do trabalho.

3.1.3.1.1 Formação da Rede em Topologia Estrela

Em uma topologia em estrela, após o FFD estar ativo em um primeiro momento, ele estabelece a sua própria rede e transforma-se em nó coordenador da PAN. Todas as PANs existentes funcionam independentemente de outras PANs em operação, o que é obtido com o uso de um identificador de PAN. Este identificador não pode ser utilizado por qualquer outra PAN que esteja dentro do raio de alcance do rádio da PAN ao qual está associado. Depois que um identificador de PAN é escolhido, o coordenador da PAN pode permitir que outros

dispositivos se associem à PAN. Vale ressaltar que ambos os dispositivos, FFD e RFD podem se associar a uma PAN neste caso.

3.1.3.1.2 Formação da Rede em Topologia *Peer-to-Peer*

Em uma rede *peer-to-peer* cada dispositivo é dotado de recursos que permitem comunicar-se com qualquer outro dispositivo dentro do raio de alcance do seu transceptor. Um dispositivo é nomeado de coordenador da PAN. Na prática, o coordenador da PAN é o primeiro dispositivo que utiliza o canal de comunicação. As mais variadas estruturas podem ser construídas através da topologia *peer-to-peer* e podem impor restrições topológicas na formação da rede [14].

Um exemplo de topologia de comunicação *peer-to-peer* é a topologia em árvore de agrupamentos (*cluster-tree*). A topologia em árvore de agrupamentos é um tipo especial de rede *peer-to-peer*, na qual a maioria dos dispositivos é do tipo FFD. Um dispositivo RFD pode conectar-se a uma rede com topologia em árvore de agrupamentos como se fosse um ramo final (uma folha), através de um dispositivo FFD. Qualquer FFD pode atuar como coordenador e disponibilizar serviços de sincronização para dispositivos RFD e a outros coordenadores. Nesta topologia, somente um dos coordenadores pode ser o coordenador geral, e que conseqüentemente deve possuir capacidades computacionais superiores aos demais componentes da rede. O coordenador da PAN forma o primeiro agrupamento, estabelecendo o agrupamento principal (CLH) e verificando os identificadores disponíveis a partir do identificador zero (CID = 0). Após esta etapa, o mesmo envia um frame de sinalização em broadcast para os dispositivos vizinhos, se anunciando. Um dispositivo, recebendo o frame de sinalização, pode solicitar a sua respectiva associação à rede formada pelo CLH. Se o coordenador da PAN permitir a associação, ele adiciona o novo dispositivo como um dispositivo associado na lista de dispositivos vizinhos. Com o novo dispositivo já agregado à lista de dispositivos vizinhos, deve iniciar o envio periódico de mensagens de sinalização ao novo dispositivo. Outro candidato pode se associar à rede criada através deste dispositivo, porém, se ele não estiver apto a se associar a rede, irá procurar por novos dispositivos passíveis de associação.

Apresentamos uma forma simples de rede, mas grandes redes podem ser criadas através da união de vários agrupamentos. Um exemplo de rede pode ser representado na

Figura 07. Uma vantagem das redes formadas como árvores de agrupamento é a área coberta, que pode ser grande, e a grande desvantagem é o acréscimo na latência das mensagens [14].

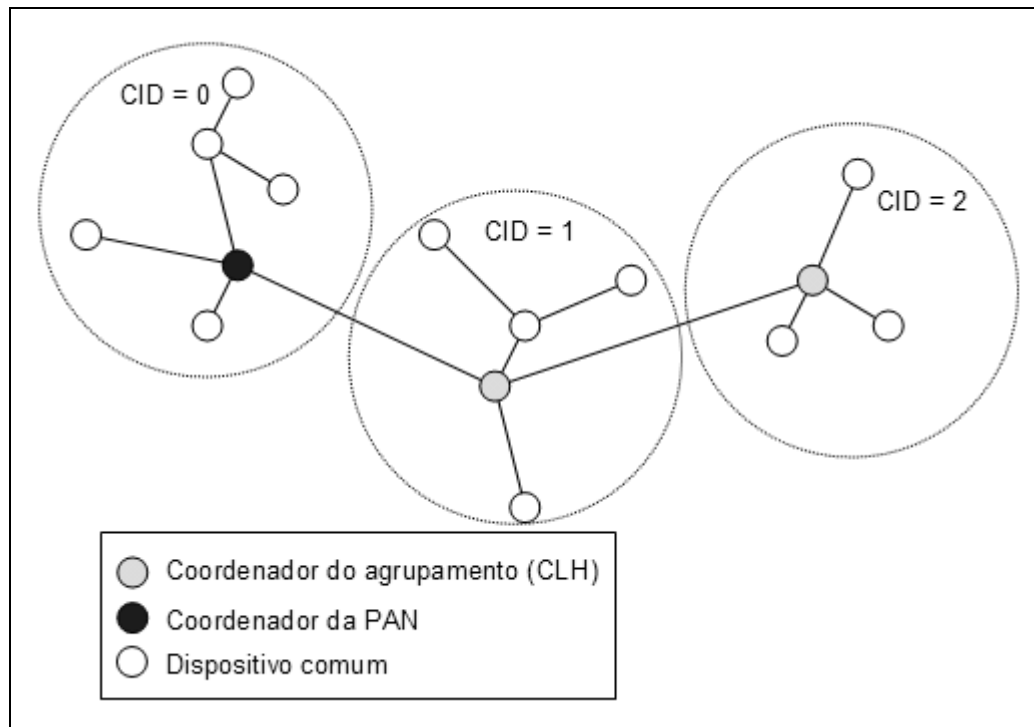


Figura 07 – Topologia em árvore de agrupamentos.

3.1.4 Arquitetura do Padrão

A arquitetura do padrão LR-WPAN é definida em alguns blocos de forma a simplificá-la, e tais blocos são comumente chamados de camadas. Cada camada possui uma determinada função, que em formato de uma pilha, faz com que cada camada forneça serviços para a respectiva camada superior. A disposição das camadas é baseada no modelo OSI [14].

Um dispositivo LR-WPAN compreende as camadas física (PHY), que contempla o transceptor de RF, e a subcamada de acesso ao meio (MAC) que, por sua vez, inclui mecanismos que controlam o acesso ao meio para todo o tipo de transmissão. A Figura 08 apresenta graficamente as camadas que serão descritas nas seções seguintes:

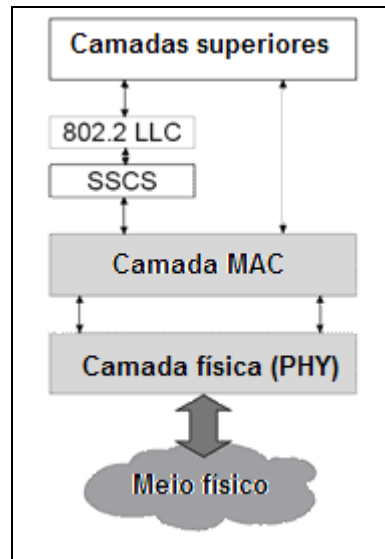


Figura 08 – Camadas do padrão IEEE 802.15.4 e relação com demais camadas.

3.1.4.1 Camada Física (PHY)

A PHY disponibiliza dois serviços: o serviço de dados PHY e o serviço de gerenciamento da PHY, que faz interface com a entidade de gerenciamento da camada física (PLME). O serviço de dados da PHY permite a transmissão e recepção de unidades de dados PHY (PPDUs) através dos canais físicos de rádio [14].

3.1.4.2 Subcamada MAC

A subcamada MAC fornece dois serviços: o serviço de dados MAC e o serviço de gerenciamento MAC. O serviço de gerenciamento MAC faz interface com a entidade de gerenciamento da subcamada MAC (MLME), que por sua vez é o ponto de acesso ao serviço (SAP) da subcamada superior. O serviço de dados MAC permite a transmissão e a recepção de unidades de dados do protocolo MAC (MPDUs) através do serviço de dados da PHY [14].

As características da subcamada MAC são: gerenciamento da sinalização (*beacon management*), acesso ao canal, gerenciamento GTS, validação de quadros, reconhecimento de quadros, associação e dissociação. Além disso, a subcamada MAC oferece auxílio para a utilização de mecanismos de segurança.

3.1.5 Visão Funcional

Nesta seção será feita a abordagem sobre o funcionamento de uma LR-WPAN, incluindo as informações sobre o superquadro (*superframe*), o modelo de transferência de dados, a estrutura dos quadros, características de robustez, considerações sobre consumo de energia e segurança.

3.1.5.1 O Superquadro (*Superframe*)

O padrão LR-WPAN permite o uso otimizado da estrutura do superframe. O formato é definido pelo coordenador e é delimitado por quadros de sinalização, enviados também pelo coordenador da PAN. O superframe é dividido em 16 aberturas iguais. O quadro de sinalização (*beacon frame*) é enviado na primeira abertura como pode ser visto na Figura 09:

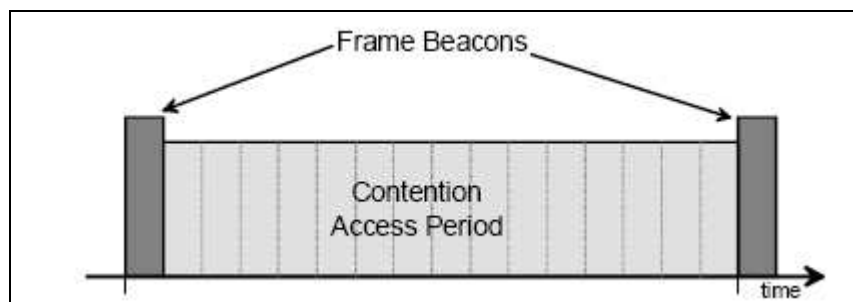


Figura 09 – Formador do quadro superframe.

Se o coordenador da PAN não desejar utilizar *superframes*, basta deixar de enviar os quadros de sinalização. Os quadros de sinalização são utilizados para sincronizar os dispositivos agregados à PAN, tanto para identificar a PAN, como para descrever a estrutura do superframe [14].

Qualquer dispositivo que desejar transmitir durante o período de contenção para acesso (CAP – *Content Access Period*), que fica entre os quadros de sinalização, deve competir com os demais dispositivos usando um mecanismo CSMA-CA sincronizado.

O superframe pode ser dividido em duas partes, a porção ativa e a porção inativa. Durante a porção inativa o coordenador não deve interagir com a sua respectiva PAN, entrando em modo de economia de energia (*low-power mode*). Para aplicações que necessitam de baixa latência nas mensagens ou com necessidade específica de taxas de transmissão, o coordenador da PAN pode dedicar porções ativas do superframe para estas

aplicações. Estas partes do superframe são chamadas de aberturas de tempo garantidas (*Guaranteed time slots – GTS*) [14].

3.1.5.2 Modelo de Transferência de Dados

Em uma LR-WPAN existem três tipos de transferências de dados: para o coordenador, a partir do coordenador e entre dispositivos FFD (também conhecida por “*peer devices*”).

O mecanismo para cada tipo de transferência depende da existência de suporte à sinalização por parte da rede.

3.1.5.2.1 Modelo de Transferência para o Coordenador

Quando um dispositivo deseja transferir dados para o coordenador da PAN em uma rede com suporte à sinalização, ele primeiro fica na escuta aguardando o quadro de sinalização. Após receber o quadro, o dispositivo se sincroniza com a estrutura do superframe. No momento apropriado, o dispositivo transmite os dados utilizando um mecanismo de CSMA-CA sincronizado para o coordenador. O coordenador, recebendo os dados, opcionalmente pode enviar um quadro de reconhecimento, completando a operação. A Figura 10 demonstra o processo [14].

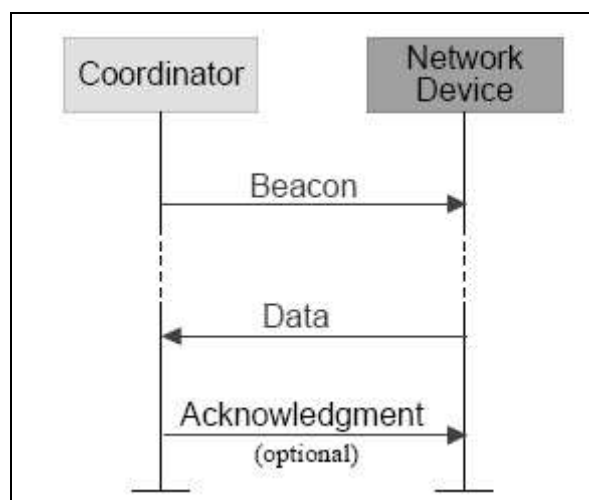


Figura 10 – Transmissão para um coordenador de rede com sinalização.

Quando um dispositivo deseja fazer uma transmissão para o coordenador em uma rede sem suporte à sinalização, ele simplesmente envia os dados utilizando um mecanismo de

CSMA-CA simples para o coordenador. Novamente, o coordenador pode enviar um quadro de reconhecimento opcional. A Figura 11 demonstra o processo.

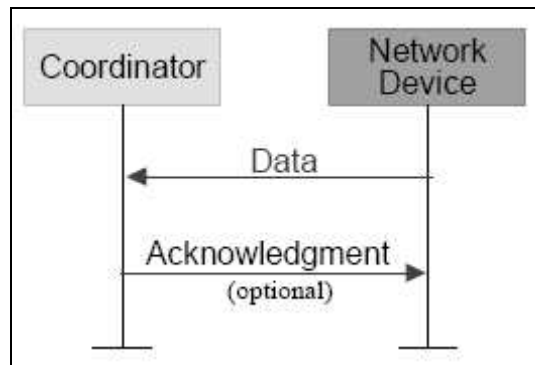


Figura 11 – Transmissão para um coordenador de rede sem sinalização.

3.1.5.2.2 Modelo de Transferência do Coordenador

Quando o coordenador da PAN deseja transmitir dados para um dispositivo em uma rede com suporte à sinalização, ele informa ao dispositivo a existência de dados pendentes através do quadro de sinalização. Como os dispositivos escutam periodicamente os quadros de sinalização, ao detectar a existência de dados a serem recebidos ele envia um comando MAC solicitando os dados, utilizando um mecanismo CSMA-CA sincronizado. O coordenador da PAN reconhece a solicitação de dados e opcionalmente envia um quadro de reconhecimento. Em seguida, o quadro de dados pendentes é enviado através de um mecanismo de CSMA-CA sincronizado. O dispositivo, após receber os dados, envia um quadro de reconhecimento indicando sucesso na recepção. A transação é completada e o coordenador da PAN, recebendo o quadro de reconhecimento do dispositivo, retira a mensagem recém enviada da lista de mensagens pendentes do quadro de sinalização. O processo é demonstrado na Figura 12.

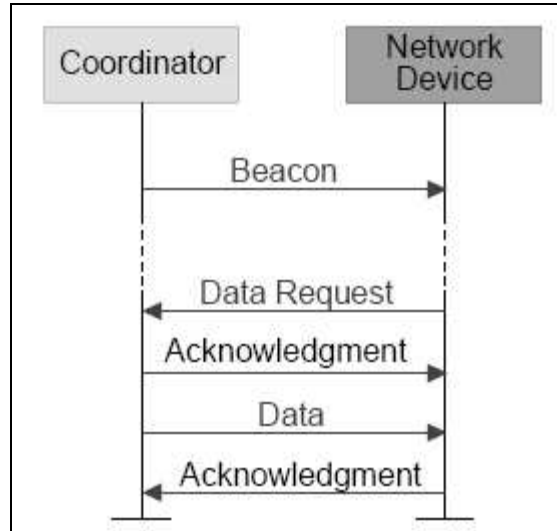


Figura 12 – Transmissão do coordenador em uma rede com sinalização.

Quando um coordenador deseja transmitir dados para um dispositivo em uma rede sem suporte à sinalização, ele armazena os dados até que o dispositivo envie um comando MAC solicitando-os através de mecanismo CSMA-CA simples. Vale ressaltar que a frequência na qual o dispositivo faz as requisições de dados para o coordenador neste caso é definida pela aplicação. O coordenador, recebendo o comando MAC envia um quadro de reconhecimento indicando o sucesso na recepção do comando, e se existirem dados pendentes para o dispositivo os mesmos são enviados através de um mecanismo de CSMA-CA simples. O dispositivo, ao receber o quadro de dados, envia um quadro de reconhecimento indicando sucesso na operação. O processo está concluído. A Figura 13 demonstra graficamente o processo.

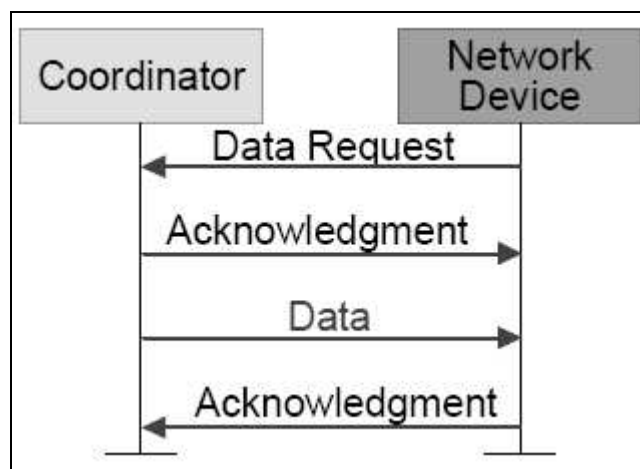


Figura 13 – Transmissão do coordenador em uma rede sem sinalização.

3.1.5.2.3 Transferência de Dados em Redes *Peer-to-Peer*

Em uma rede *peer-to-peer*, os dispositivos trocam mensagens entre si dentro do raio de alcance de seus transceptores, utilizando mecanismos simples CSMA-CA. Existem métodos de sincronização e troca de mensagens, porém, são itens fora do escopo do padrão.

3.1.6 Estrutura do Quadro

As estruturas dos quadros utilizados no padrão IEEE 802.15.4 foram desenhadas de forma a reduzir ao máximo a complexidade, porém, mantendo ao mesmo tempo a estrutura robusta para permitir transmissões sobre um canal com ruídos [14].

Cada camada do protocolo adiciona cabeçalhos (*headers*) e rodapés (*footers*) específicos da camada. A LR-WPAN descreve quatro tipos de estrutura de quadros:

- De sinalização, utilizado pelo coordenador para enviar sinalizações;
- De dados, utilizado para transmitir dados;
- De reconhecimento, utilizado para indicar sucesso na recepção de mensagens;
- De comando MAC, utilizado para todos os controles MAC de transferência.

3.1.6.1 Quadro de Sinalização

A Figura 14 demonstra o quadro de sinalização:

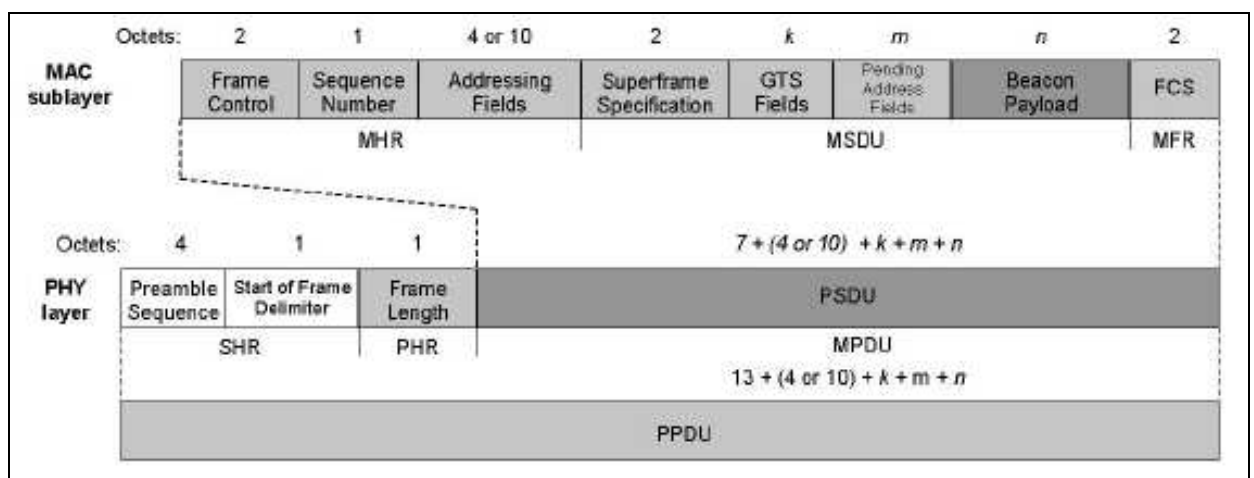


Figura 14 – Formato do quadro de sinalização (*Beacon frame*).

Em uma rede com suporte a sinalização (*Beacon-Enabled Network*), os coordenadores podem enviar quadros de sinalização, como é mostrado acima. A unidade de serviço de dados da MAC (MSDU) é composta pela estrutura do quadro, lista de endereços pendentes, lista de endereços, campos de alocação das aberturas de tempo (GTS) e conteúdo de dados do frame de sinalização (*Beacon Payload*). A MSDU é prefixada com um cabeçalho (MHR) e pós-fixada com rodapé (MFR). O MHR contém campos de controle MAC, número de seqüência do quadro de sinalização e informações sobre endereçamento. Já o MFR contém um campo de verificação de conteúdo de 16 bits (FCS). Como pode ser visto o MHR, MSDU e MFR formam o quadro de sinalização MAC (MPDU) [14].

O MPDU é passado para a camada PHY como dado da camada (*PHY Payload - PSDU*). A PSDU então é prefixada com um cabeçalho de sincronização (SHR), que é composto por um preâmbulo e um delimitador de início de quadro, e o cabeçalho da camada física (PHR) composto por um campo que possui o tamanho da PSDU em número de octetos. O SHR, PHR e PSDU formam o quadro de camada física (PPDU) [14].

Como poderá ser constatado nas próximas seções, somente a composição do quadro MAC sofre alteração, o PPDU tem o mesmo formato nos quadros de dados.

3.1.6.2 Quadro de Dados

Como pode ser visto na Figura 15, a única diferença entre o quadro de dados e o quadro de sinalização é a composição do campo MSDU, que no caso do quadro de dados contém somente informações de dados da camada superior.

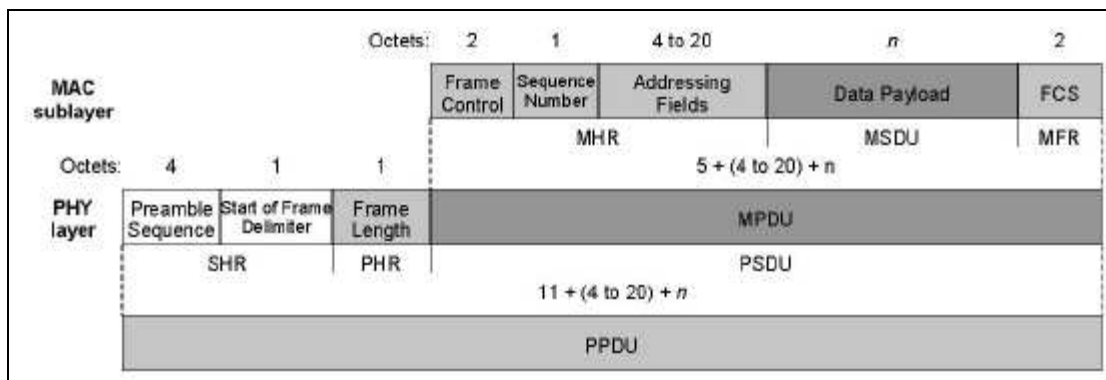


Figura 15 – Formato do quadro de dados.

3.1.6.3 Quadro de Reconhecimento

O quadro de reconhecimento pode ter a única função de indicar sucesso na transmissão de uma mensagem, através do número da mesma (campo número de seqüência). Este quadro não possui MSDU, sendo o quadro MAC (MPDU) composto somente neste caso pelo MHR e pelo MFR. A Figura 16 demonstra o formato do quadro de reconhecimento:

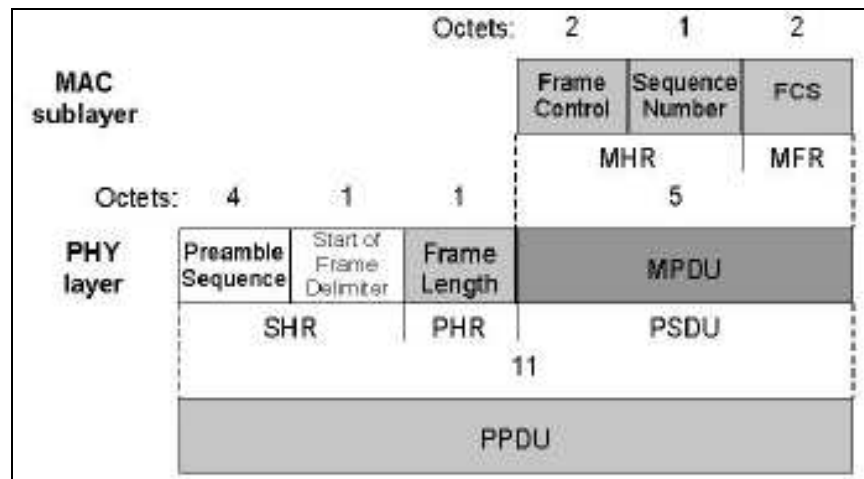


Figura 16 – Formato do quadro de reconhecimento.

3.1.6.4 Quadro de Acesso ao Meio (MAC Frame)

Como podemos constatar na Figura 17, novamente o que muda no quadro de acesso ao meio em relação aos demais é a MSDU, que neste caso é composta por um campo com o tipo de comando (*command type*) e um campo de dados do comando (*Command Payload*).

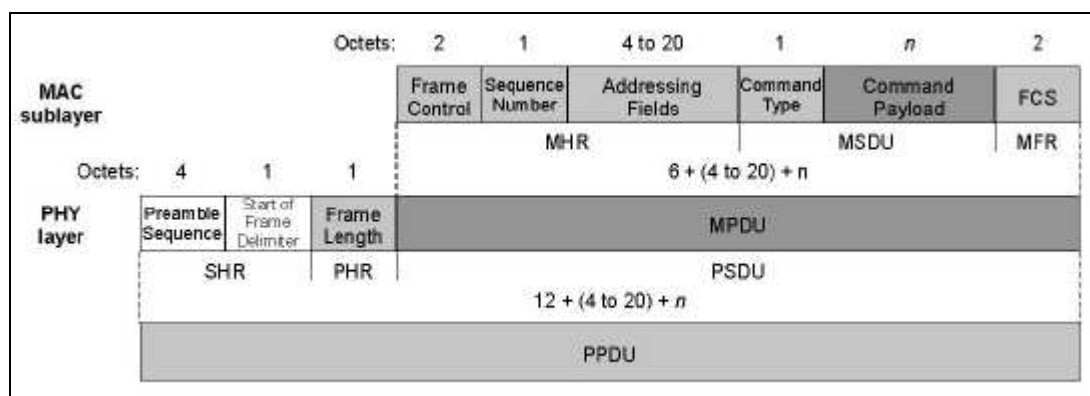


Figura 17 – Formato do quadro de acesso ao meio (MAC).

3.1.7 Características de Robustez

O IEEE 802.15.4 emprega vários mecanismos para assegurar a robustez na transmissão de dados. Os mecanismos empregados são o CSMA-CA, o frame de reconhecimento e a verificação de dados [14].

As redes LR-WPAN utilizam dois tipos de mecanismos de acesso ao meio, que dependem da configuração da rede. Um dos métodos de acesso funciona sem o uso de quadros de sinalização (*Beacon Frames*) e o outro faz o uso. No método Beacon Frames, a transmissão é sincronizada com o processo de sinalização, tendo recursos reservados para a transmissão (*slot times*). Neste método os quadros de reconhecimento e de sinalização são enviados sem o uso do mecanismo CSMA-CA. Já no método que não utiliza quadros de sinalização o dispositivo deve escutar o meio e só poderá transmitir quando o meio estiver ocioso, os congestionamentos ocorridos são tratados com o uso de um algoritmo de *backoff*. Neste método os quadros de reconhecimento são enviados sem o uso do mecanismo CSMA-CA [14].

Para uma transmissão mais confiável de dados e comandos, são implementadas mensagens de reconhecimento. Caso o dispositivo que recebeu a mensagem por algum motivo não conseguiu manipular a mensagem, o mesmo não envia a mensagem de reconhecimento, não confirmando a recepção da mensagem. O transmissor, após algum período de transmissão, se não receber o quadro de reconhecimento, assume que a transmissão não teve sucesso e, conseqüentemente, envia o quadro novamente. Se depois de um determinado número de tentativas o transmissor ainda não receber um quadro de reconhecimento, ele pode finalizar a transação ou tentar novamente. Quando o reconhecimento não é necessário, o transmissor da mensagem assume que a transmissão teve sucesso [14].

Para detectar bits com erro, é empregado um mecanismo de FCS através de um campo de 16 bits, onde é utilizado CRC da ITU para proteger qualquer quadro [14].

3.1.8 Considerações Sobre o Consumo de Energia

Em várias aplicações que utilizam o padrão IEEE 802.15.4, os dispositivos são alimentados por baterias ou outros dispositivos de alimentação limitados, em que a recarga e/ou substituição em um curto período de tempo é impraticável. Tendo em vista esta situação,

o consumo de energia dos dispositivos é uma preocupação importante e foi considerada na elaboração dos protocolos do padrão em questão, porém, a implementação física dos dispositivos que utilizam o padrão IEEE 802.15.4 merece cuidados especiais tanto quanto, se não maiores, aos que foram utilizados na elaboração do protocolo.

Como mencionado, na elaboração da estrutura do padrão IEEE 802.15.4 foi considerado o uso de dispositivos alimentados por baterias. Em muitas aplicações o gerenciamento de energia pode ser aplicado, ainda mais pelo fato de que grande parte do consumo de energia ocorre durante estados ociosos dos dispositivos. Vale lembrar que, periodicamente, os dispositivos devem escutar o meio de forma a verificar se existem mensagens pendentes.

Outro fator que está relacionado com o gerenciamento de consumo de energia são os requisitos das aplicações sobre a latência das mensagens, que é inversamente proporcional ao tempo de atividade dos transceptores dos dispositivos. Considere-se que estes dispositivos devem ficar escutando o meio o maior tempo possível.

Dispositivos que possuem alimentação alternativa às baterias (como geralmente é o caso dos coordenadores de PANs) podem optar por ficar com os transceptores RF continuamente escutando o meio [14].

3.1.9 Considerações Sobre Segurança

Como em outras aplicações que utilizam RF para a transmissão de dados, existem aplicações que se encaixam no padrão IEEE 802.15.4 que também necessitam de segurança. Em muitos casos é necessário determinar linhas de atuação, que vão desde o uso de recursos junto à subcamada MAC, até o fornecimento de serviços de forma a garantir a segurança e a interoperabilidade entre os dispositivos que utilizam o padrão IEEE 802.15.4.

As linhas de base para a aplicação de segurança vão desde a implementação de recursos que mantenham uma lista de controle de acesso (ACL) até o uso de criptografia simétrica para a proteção dos frames transportados [14].

A segurança não é simples de programar, pois ela causa impacto direto na taxa de transmissão de dados úteis, e grande parte dos dispositivos possuem características computacionais limitadas [14].

As camadas superiores devem determinar quando a segurança deve ser utilizada na subcamada MAC e fornecer todos os requisitos-chaves para prover os serviços de segurança [14].

Gerenciamento de chaves, autenticação de dispositivos e proteção para novos dados (*freshness protection*) podem ser ofertados pelas camadas superiores, porém, estão fora do escopo do padrão IEEE 802.15.4 e do trabalho.

3.2 A ALIANÇA ZIGBEE

O padrão ZigBee é definido por uma aliança de empresas que atuam em diferentes segmentos do mercado, chamada de “ZigBee Alliance”. O ZigBee foi projetado para permitir a comunicação sem fio confiável, aliada ao baixo consumo de energia e taxas de transmissão. Tais características são destinadas para aplicações de monitoramento e controle. Para implementar a camada MAC (*Media Access Control*) e a camada física (*PHY – Physical Layer*), o ZigBee faz uso do padrão IEEE 802.15.4 que opera como já visto em seções anteriores, em bandas de frequências livres (ISM) [15].

3.2.1 Propósito da Aliança ZigBee

Até a criação do ZigBee existiam diversos padrões que definiam a transmissão em médias e altas velocidades para voz, vídeo, redes de computadores pessoais, entre outros. Não existia, porém, um padrão que atendesse às necessidades específicas de aplicações sem fio destinadas para dispositivos de controle e sensores [15].

O ZigBee pode ser utilizado em diversos tipos de aplicações, das quais podemos citar:

- Automação e controle Predial;
- Controle industrial;
- Automação residencial e comercial;
- Saúde pessoal e automação hospitalar.

As principais características que estas aplicações necessitam são: baixa latência, otimização para baixo consumo de energia, possibilidade de implementação de redes com um elevado número de dispositivos e baixa complexidade dos nós da rede [15].

3.2.2 Topologias

As principais topologias utilizadas com o padrão Zigbee são mostradas na Figura 18:

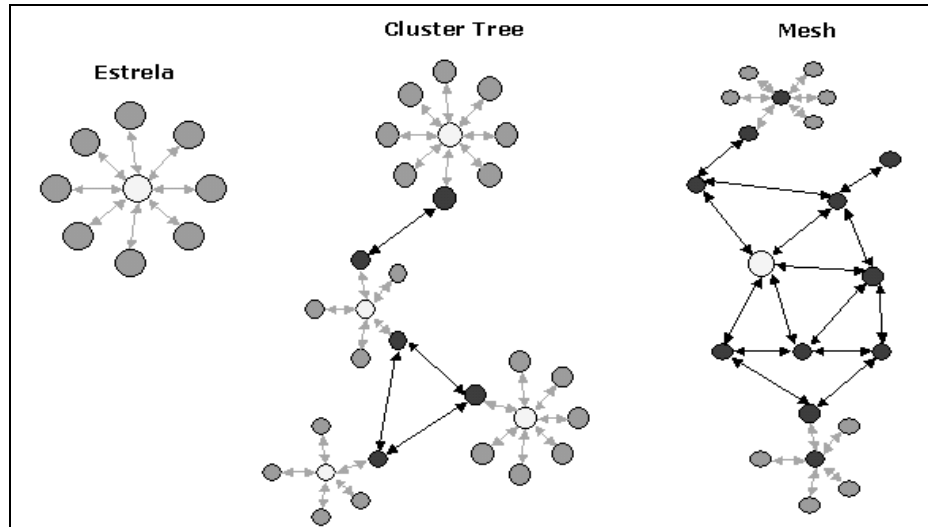


Figura 18 – Topologias possíveis em uma rede ZigBee.

Os componentes que fazem parte de uma rede que adota o padrão Zigbee são: Coordenador, roteadores e os nós finais (*End Devices*).

O papel do coordenador é iniciar a rede definindo o canal de comunicação a ser utilizado, gerenciar os nós de rede e armazenar informações sobre os mesmos. Já os dispositivos com a função de roteadores são responsáveis pelo encaminhamento das mensagens entre os nós da rede. Os nós finais, ou “*end devices*”, são, geralmente, dispositivos simples que só se comunicam com outros nós da rede.

Nas redes Zigbee um dispositivo pode permanecer por um longo período de tempo sem ter atividade na rede, além disso, o tempo de acesso é muito pequeno, tipicamente em torno de 30ms. Outra característica importante é o tamanho reduzido dos pacotes de dados que trafegam na rede.

Na topologia em malha (*mesh*), é permitido que a rede se ajuste automaticamente em sua inicialização, na entrada de novos dispositivos ou na perda de dispositivos. Nas redes em malha, existem múltiplos caminhos entre os diferentes nós, e a rede é auto-suficiente para otimizar o tráfego de dados. Com o uso da topologia em malha, podemos ter redes muito extensas cobrindo uma vasta área geográfica.

3.2.3 O Padrão ZigBee

A Figura 19 mostra as três camadas que compõem os dispositivos Zigbee:

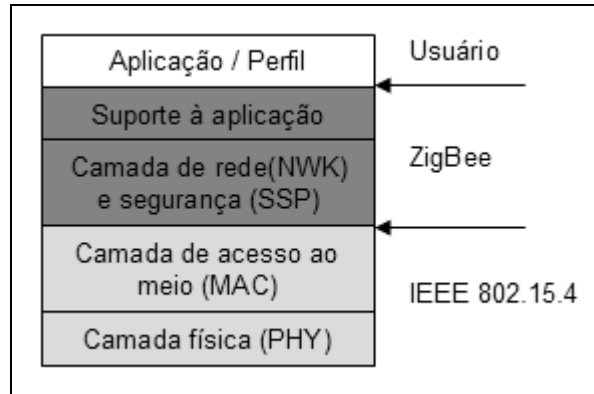


Figura 19 – Camadas do padrão ZigBee.

A pilha do padrão Zigbee, como pode ser observada, possui requisitos muito simples, podendo ser implementada em microcontroladores de oito bits.

As camadas MAC e PHY possuem as características já mencionadas no padrão IEEE 802.15.4.

A camada de rede no Zigbee possui as seguintes responsabilidades:

- Inicializar a rede;
- Habilidade para entrar e sair da rede;
- Configurar a entrada de novos dispositivos;
- Segurança dos dados de saída;
- Distribuição de endereços pelo coordenador para os dispositivos que entrarem na rede;
- Sincronização dos dispositivos da rede;
- Roteamento das informações para os destinos corretos.

A camada de aplicação é composta por três componentes: suporte à aplicação, o “*Zigbee device object*” e as funções proprietárias definidas pela empresa que desenvolveu o dispositivo;

Os serviços oferecidos no suporte à aplicação são dois: o *Discovery* e o *Binding*. O *Discovery* descobre quais pontos estão disponíveis na rede e o *Binding* une dois ou mais dispositivos considerando suas necessidade de serviços;

O “*Zigbee device object*” é o local onde é definida a função do dispositivo na rede, ou seja, ele funcionará como um coordenador, roteador ou nó final (*end device*). Além disso, existem definições relacionadas com segurança e início de solicitação de *Binding*.

3.2.4 Mecanismos de Segurança do ZigBee

Existem três modos de segurança definidos no ZigBee: sem segurança, lista de controle de acesso e modo seguro.

3.2.4.1 Sem Segurança

Neste modo não é utilizado qualquer mecanismo de segurança.

3.2.4.2 Lista de Controle de Acesso

Neste modo não é utilizada criptografia, porém, a rede rejeita os quadros provenientes de dispositivos não conhecidos.

3.2.4.3 Modo Seguro

No modo seguro, os dispositivos podem utilizar os seguintes serviços:

- Lista de controle de acesso;
- Criptografia de dados utilizando AES com algoritmo de criptografia de 128 bits.
- Integridade dos quadros, que consiste num serviço que usa o recurso de código de integridade de mensagens (MIC – *Message Integrity Code*), que protege os dados contra dispositivos que não possuem a chave de criptografia.
- Seqüencial de quadros, que é um serviço que utiliza uma seqüência de entradas que rejeita os quadros repetidos. Quando o quadro é recebido, o contado de seqüência de quadros é comparado com o último valor conhecido.

4 PROJETANDO REDES LR-WPAN E AS POSSÍVEIS APLICAÇÕES

Nos capítulos anteriores foi abordada a arquitetura das redes LR-WPAN de forma a fornecer subsídios necessários para a compreensão das redes LR-WPAN e a sua respectiva implantação.

Além dos requisitos básicos para a elaboração de uma rede LR-WPAN e suas peculiaridades, este capítulo abordará as possíveis áreas e aplicações que podem usufruir das redes LR-WPAN.

Nas próximas seções os parâmetros de uma linha para efetuar projetos em redes LR-WPAN serão abordados.

4.1 PARÂMETROS DE PROJETO PARA REDES LR-WPAN

Muitas das linhas de base utilizadas para o projeto de redes cabeadas são utilizadas da mesma forma para as redes LR-WPAN, porém, como a arquitetura possui recursos limitados, a análise das linhas de base deve ser feita fortemente em conjunto com a elaboração da aplicação, uma vez que esta possui mais flexibilidade que a estrutura LR-WPAN. Compreenda-se como aplicação, neste caso, a engenharia relacionada com software da solução a ser implementada.

Vale destacar que em redes de sensores, principalmente, a interface de rádio, como mencionado nos capítulos anteriores, é responsável pelo grande consumo de energia, que é um dos grandes fatores críticos das redes LR-WPAN. Estudos indicam que a execução de 3000 instruções gasta a mesma quantidade de energia que se utiliza para enviar um bit via rádio. Isto aponta para a necessidade de que, existindo compromisso entre comunicação e computação, o mesmo deve ser resolvido a favor da computação [12].

A seguir são expostos alguns parâmetros básicos a serem trabalhados nos projetos de redes LR-WPAN:

4.1.1 Área de Cobertura

Em função da área de cobertura necessária para a aplicação, devemos escolher qual topologia deve ser utilizada. Apesar de uma área POS (*Personal Operating Space*) possuir somente 10m de raio, existem alguns dispositivos LR-WPAN que podem trabalhar com um raio de até 75m, aumentando em muito as possibilidades. Porém, com o aumento do alcance, a taxa de dados diminui gradativamente. As particularidades da topologia e do alcance dos dispositivos serão abordadas nas seções seguintes [14].

Outro fator que determina o raio de cobertura é a banda de frequência de RF utilizada para a transmissão, o que também será exposto nas próximas seções.

4.1.2 Quantidade de Nós da Rede

A quantidade de nós é outro fator que deve ser considerado no momento do projeto. O padrão IEEE 802.15.4, através da definição dos campos de endereços, permite pouco mais de 65.500 nós utilizando o endereço de 16 bits. Vale lembrar que, quanto maior a quantidade de nós, maior o número de dispositivos compartilhando o meio, e com isso, outros fatores como a latência, por exemplo, são afetados.

Um recurso bastante limitado é a taxa de transmissão de dados. Nas seções seguintes falaremos da taxa máxima de transmissão de dados oferecida utilizando a banda ISM 2.4GHz que é de 250Kbps [14].

4.1.3 Taxa de Dados

Como visto nas seções anteriores, a taxa de dados disponibilizada para as aplicações que fazem uso da arquitetura de redes LR-WPAN é um fator limitador. Tendo em vista essa característica, deve-se trabalhar para aperfeiçoar a largura de banda, que é pequena em relação às demais arquiteturas, ao máximo. Como já mencionado no início do capítulo, sempre que possível, a engenharia da computação e do software deve ser utilizada para reduzir a quantidade de dados a serem transferidos entre dispositivos de redes LR-WPAN.

4.1.4 Limites de Latência

Existem aplicações em que a latência das mensagens deve possuir valores máximos, de forma a garantir a funcionalidade da aplicação. Apesar de não estar no escopo das redes LR-WPAN, é possível trabalhar com algumas topologias, como será visto nas próximas seções, que fornecem características de latências mensuráveis.

4.1.5 Interconexão com Outras Aplicações

Em um mundo onde a interligação de dispositivos e soluções é cada vez maior, não poderia ser diferente com as redes LR-WPAN. É grande a quantidade de aplicações em que seria interessante coletar dados gerados por redes LR-WPAN, sendo, para tanto, necessários mecanismos que permitam essa troca de mensagens entre arquiteturas diferentes.

Nas seções seguintes são apresentados dois mecanismos que poderão ser utilizados para o fim da interconexão de redes LR-WPAN derivadas da Aliança ZigBee, que suprem as necessidade de interconexão. São eles os *Gateways* e as *Bridges* (ZED).

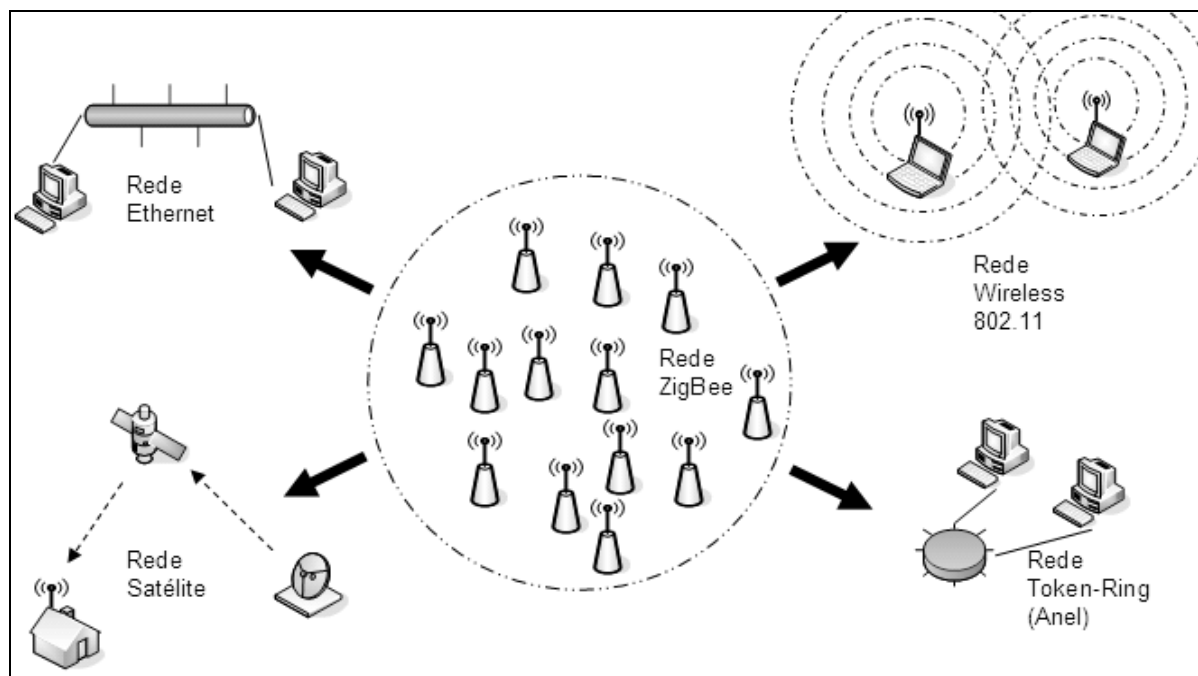


Figura 20 – As redes LR-WPANs possíveis conexões com outras redes.

4.1.6 Planta a ser Instalada x Obstáculos

As ondas eletromagnéticas possuem características que fazem com que o sinal transmitido perca potência através do ar, que podem ser consideradas desprezíveis, se consideradas pequenas distâncias. Porém, com relação aos demais meios, que no contexto de comunicação sem fio são caracterizados como obstáculos, não é possível se afirmar o mesmo, sendo em alguns casos, limitadores para o raio de alcance das redes LR-WPAN.

A seguir são apresentadas as peculiaridades das bandas utilizadas pelo padrão IEEE 802.15.4, e como estas se relacionam com fatores como alcance e atenuação do sinal pelo meio. Também será visto como é possível utilizar mecanismos para contornar a existência desses possíveis obstáculos.

Na Figura 21 é exemplificado o cenário na qual é possível encontrar o problema de perda de sinais devido à existência de obstáculos.

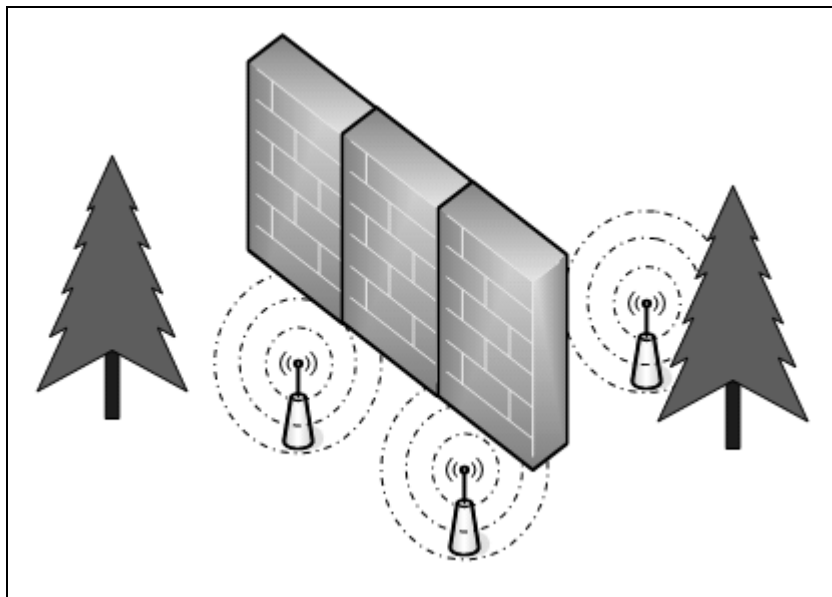


Figura 21 – Certos obstáculos limitam o raio de alcance das redes LR-WPAN.

4.1.7 Existência de Geradores de Interferência

O padrão IEEE 802.15.4 foi desenvolvido de forma a possuir características únicas que o qualifiquem como flexível. As características particulares do padrão IEEE 802.15.4 não só o tornam incompatível com as demais arquiteturas, como também o deixam susceptível a interferências devido à própria natureza do meio utilizado. Um dos principais problemas do

meio utilizado esta relacionado com o fato do protocolo IEEE 802.15.4 utilizar as bandas ISM, o que acarreta na possibilidade de existirem vários outros dispositivos (por exemplo, telefones sem fio, controles remotos e computadores) utilizando a mesma banda de operação da rede LR-WPAN.

A escolha da frequência de operação, baseada na existência de elementos geradores de interferência, é um dos fatores a serem trabalhados no projeto de redes LR-WPAN.

A escolha da frequência a ser utilizada para casos onde existe interferências está relacionado também com a caracterização do tráfego das redes LR-WPAN, visto que existem estudos que apontam que, em média, na grande maioria das aplicações em redes de sensores, os hosts ficam ativos aproximadamente 0.33% da vida útil do dispositivo com a interface de RF em funcionamento [13].

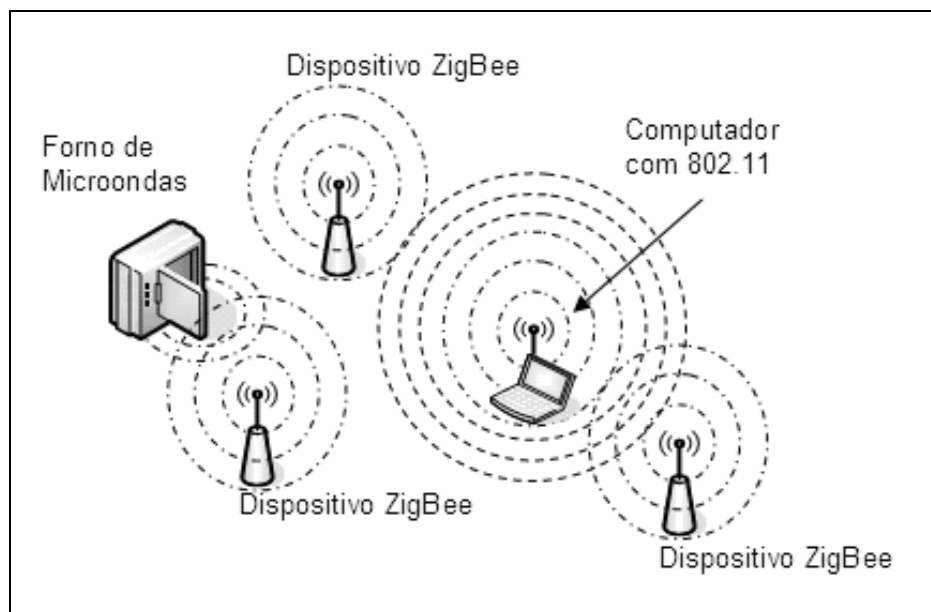


Figura 22 – Geradores de interferências no sinal das LR-WPAN

Na Figura 22 é contextualizado um ambiente de comunicação de redes de sensores sem fio com a presença de outros dispositivos que não fazem parte da rede. No entanto, utilizam o mesmo espectro eletromagnético na sua operação normal, seja gerando interferências, no caso do forno de microondas, ou seja, pela uso concomitante para a aplicação principal, como é o caso do computador com interface *wireless* 802.11.

Na tabela 01, podemos verificar o nível de influência de algumas barreiras podem causar nos sinais de RF utilizados neste padrão.

Tabela 01 – Materiais com Influência no sinal de RF [16].

Item	Barreira	Criticidade	Exemplos
01	Ar	Mínima	Ar
02	Madeira	Baixa	Divisórias; Portas; Janelas
03	Gesso	Baixa	Paredes Internas
04	Material Sintético	Baixa	Divisórias
05	Abestos	Baixa	Tetos
06	Vidros	Baixa	Janelas
07	Água	Média	Madeira Úmida; Aquário
08	Tijolos	Média	Paredes Internas e Externas
09	Mármore	Média	Paredes Internas
10	Papel	Alta	Rolos de Papel
11	Vidro Blindado	Alta	Salas de Segurança
12	Concreto	Alta	Pisos; Paredes
13	Metal	Muito Alta	Mesas; Divisórias de Metal

4.1.8 Segurança

Segurança em redes sem fio é considerado um fator crítico em redes sem fio, particularmente nas redes LR-WPAN para a implementação de mecanismos de segurança, devido às suas características de recursos computacionais e taxas de transmissão limitadas.

Não obstante as limitações do padrão IEEE 802.15.4 e das características do Zigbee, existem aplicações onde segurança é indispensável ao funcionamento, como por exemplo, em sistemas de segurança/automação residencial.

É sempre bom lembrar que segurança sempre resulta em uso de recursos, sejam eles computacionais e/ou de comunicação, sendo o último mais crítico, como descrito em seções anteriores, em dispositivos de redes LR-WPAN.

Estando a segurança da comunicação ligada à aplicação, o desenvolvedor deverá escolher nos recursos por ela disponibilizados, determinando assim o modo de segurança mais apropriado à respectiva aplicação.

4.1.9 Qualidade de Serviço (QoS – *Quality of Service*)

A qualidade de serviço é uma particularidade no projeto de redes LR-WPAN que também deve ser considerada, mais uma vez devido à baixa taxa de transmissão disponibilizada.

Existem aplicações onde é necessário alocar uma taxa de dados mínima para determinados nós, de forma a garantir que a aplicação não perca características que impactem na não funcionalidade. Podemos citar como exemplo sistemas de coleta de dados, onde nós alocados em pontos críticos, necessitam alimentar outros sistemas em tempo real.

Uma das formas de se conseguir QoS em redes LR-WPAN é através do mecanismo GTS apresentado nas seções anteriores. Porém, a qualidade de serviço também está relacionada com a topologia utilizada, como poderá ser constatado nas próximas seções.

4.1.10 Escalabilidade

A escalabilidade deve ser tratada junto ao projeto de redes, principalmente no ambiente de produção industrial, onde é aplicável o uso de redes LR-WPAN, e pelo fato de que as mudanças estão cada vez mais constantes, fazendo com que uma solução implantada seja utilizável por um longo tempo sem inutilizar o conteúdo legado.

Para as redes LR-WPAN a escalabilidade está relacionada, principalmente, com a topologia utilizada. Quando se discute escalabilidade, o que primeiro vem à mente é o aumento do número de nós ou aumento da cobertura da rede, porém, em redes LR-WPAN a escalabilidade deve ser estudada em conjunto com todas as linhas de base, e não isoladamente, visto que qualquer aumento de nós ou alteração da topologia provoca impactos nas demais variáveis como latência, taxa de transmissão, etc.

4.2 TOPOLOGIAS E SUAS PARTICULARIDADES

Como já mencionado nos capítulos anteriores, é possível trabalhar com três tipos de topologias com LR-WPAN, são elas:

- Estrela (*Star*);
- Árvore de agrupamentos (*Cluster-tree*);
- Malha (*Mesh*);

A seguir serão explanadas as principais características e aplicabilidade de cada topologia, de forma a identificar onde cada uma delas pode ser mais bem empregada.

4.2.1 Topologia Estrela (*star*)

A topologia em estrela como pode ser observada na Figura 23, é caracterizada pelo elemento concentrador, geralmente o coordenador da PAN. A existência de um elemento central implica em ponto de falha que põe em risco o funcionamento de toda a rede LR-WPAN, tornando necessários enlaces confiáveis com o coordenador da LR-WPAN.

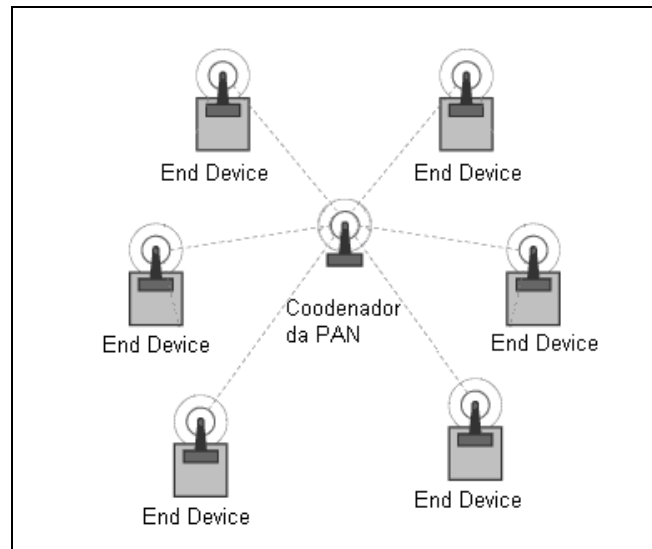


Figura 23 – Topologia estrela.

Nesta topologia em questão a comunicação entre os nós finais (conhecidos como *End Devices*) sempre é feita por intermédio do nó Coordenador da PAN.

A topologia em estrela permite trabalhar de modo sincronizado através do recurso de sinalização (*beaconed network*). Este recurso possibilita a gerência do consumo de energia, um controle otimizado sobre a latência das mensagens, inclusive fornecimento de qualidade de serviço (QoS) através do recurso GTS avaliado nas seções anteriores e que está intrínseco ao padrão IEEE 802.15.4.

4.2.2 Topologia em Árvore de Agrupamentos (*Cluster-Tree*)

Na topologia em árvore, é possível fazer uma analogia a um conjunto de redes LR-WPAN em topologia estrela, com os coordenadores unidos por caminhos únicos (não existem caminhos redundantes na topologia em estrela). Na Figura 24 é apresentada a topologia de árvore de agrupamentos.

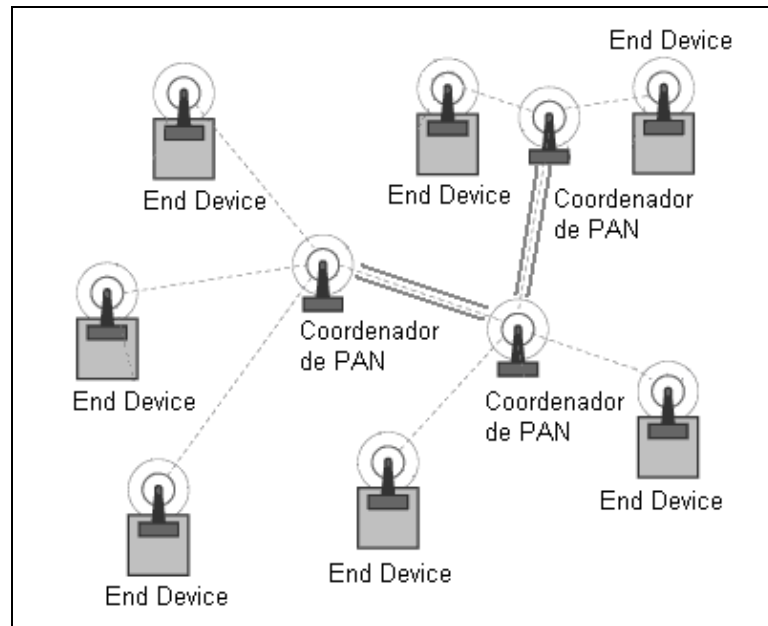


Figura 24 – Topologia em árvore de agrupamentos.

Similar à topologia em estrela, a topologia em árvore de agrupamento necessita de enlaces confiáveis entre os nós roteadores da LR-WPAN (os enlaces que formam o *backbone* da topologia).

É possível adotar o processo de sinalização nesta topologia, porém, a latência pode ser fixada somente por agrupamentos. A latência entre nós finais de diferentes agrupamentos é longa e geralmente não é possível de ser prevista.

Como vantagens desta topologia podem ser citadas: cobertura de uma vasta área com os agrupamentos de várias topologias em estrela; suporte ao gerenciamento de energia (devido à possibilidade de trabalhar com sincronismo), inclusive pelos nós roteadores que podem ser alimentados por baterias; permissão de comunicação entre nós finais (*End Devices*) que se encontram em agrupamentos diferentes, ou seja, é permitida a comunicação com vários saltos utilizando-se de outros dispositivos.

4.2.3 Topologia em Malha (*Mesh*)

A topologia em malha é uma das topologias mais interessantes e mais complexas ao mesmo tempo, tendo em vista suas características particulares, e também pela impossibilidade de aplicação dos mecanismos de controle e gerência de comunicação das redes tradicionais em sua estrutura. Na Figura 25 apresentamos a topologia em malha.

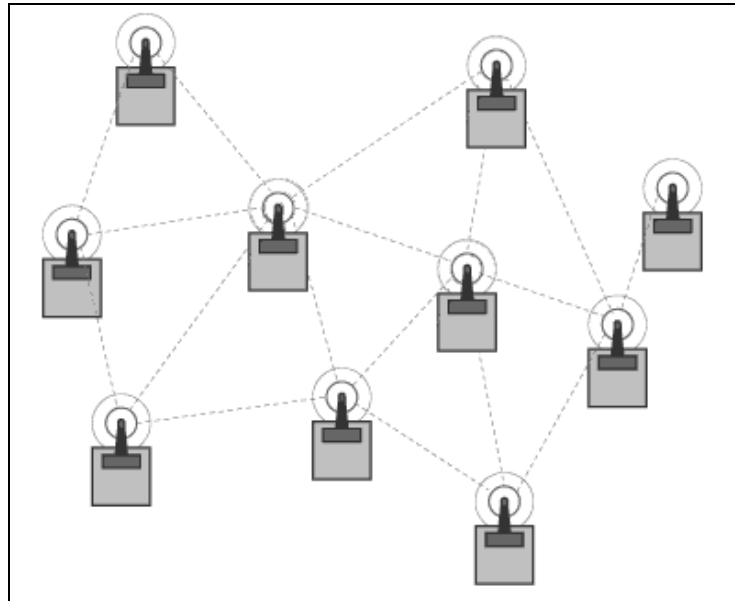


Figura 25 – Topologia em malha.

Como cada dispositivo que compõe a rede tem a função de nó final e também a função de efetuar o roteamento dele e de outros nós que compõem a rede, a topologia em malha fornece robustez, comunicação com vários saltos, que explora a possibilidade de múltiplos caminhos. Além disso, é possível formar redes dos mais variados formatos, abrangendo uma vasta área.

As redes com topologia em malha, por não possuírem elementos centralizadores que controlam a comunicação, possuem facilidade de escalabilidade, ou seja, a ampliação da rede sem mudanças estruturais grandes. Da mesma forma, como não existem elementos centralizadores, a latência entre hosts próximos é reduzida.

Devido às características de formação, a latência de grandes caminhos formados na rede é muito difícil de prever, ainda mais pelo fato destes próprios caminhos serem dinâmicos.

O consumo de energia é de difícil controle e é maior nesta topologia, tendo em vista que os nós com função de roteadores devem ficar permanentemente ouvindo o meio, não podendo ficar em modo *sleep* para economizar a fonte de energia, o que é um problema para nós roteadores que são alimentados por baterias.

Como a rede não é hierárquica, existe a necessidade de memorizar, mesmo que temporariamente, as informações de roteamento e de efetuar procuras por rotas.

4.3 O *HARDWARE* DOS SENSORES

Dependendo da aplicação a ser desenvolvida, a escolha da plataforma de *hardware* é crucial para o sucesso da aplicação, ainda mais que a plataforma utilizada está relacionada diretamente com o desempenho e consumo de energia, que são duas características importantes em aplicações que utilizam redes LR-WPAN.

4.3.1 O Hardware da Interface de Rádio (Transceptor)

Até o lançamento do padrão IEEE 802.15.4, as interfaces de comunicação disponíveis eram proprietárias e, na sua grande maioria, não eram compatíveis, fazendo com que as soluções ficassem presas ao fornecedor da interface adotada em determinada solução. Com o lançamento do padrão IEEE 802.15.4, as interfaces foram padronizadas, fazendo com que o problema anterior fosse solucionado.

A escolha do transceptor deve acompanhar as necessidades de aplicação, que basicamente ficam em torno da potência, tamanho físico e quesitos funcionais e legais sobre a banda de operação.

Os fornecedores de interfaces oferecem três tipos de interfaces. São elas:

- Interface transmissora e interface receptora em circuitos integrados separados;
- Interface transmissora e interface receptora em um único circuito (transceptor);
- Interface transmissora, interface receptora e CPU (geralmente um microcontrolador de oito bits) integrados, fornecendo uma solução única com a adoção de poucos componentes externos. Este tipo de dispositivo geralmente é caracterizado como solução SoCS (*Single on Chip Solution*).

A adoção de soluções totalmente integradas oferece várias vantagens, como consumo de energia otimizada, desempenho e tamanho, além de outras. Porém, como mencionado anteriormente, a escolha da interface está diretamente relacionada com a aplicação. Por exemplo, em uma aplicação na qual se possui um elemento processador (computador, uma solução microcontrolada, etc.) que exige unicamente a adoção de um mecanismo para oferecer suporte à comunicação com a rede LR-WPAN, o uso de um circuito integrado com somente um transceptor seria o mais apropriado.

É importante salientar que nas redes LR-WPAN a maior dissipação de potência está relacionada com o processo de transmissão e recepção, desempenhado pela interface aérea. Sendo assim, durante o processo de seleção da interface transceptora, um fator de suma importância é o seu consumo de energia, principalmente quando o nó for alimentado por baterias.

4.3.2 Dispositivos Computacionais

Entre os propósitos da criação do padrão IEEE 802.15.4 é o uso dispositivos sem fio junto a sistemas de monitoramento (sensores) e controle (atuadores), porém, as interfaces aéreas sozinhas não possuem aplicabilidade. Grande parte dos nós é composta de soluções embarcadas, cujas principais características serão descritas a seguir.

Para estas soluções embarcadas geralmente é associado um elemento inteligente, como um microcontrolador (chamado também de computador de um só *chip*), dotado dos recursos computacionais necessários para processar informações e até mesmo atuar junto a um dispositivo externo (motor, chave, *display*, etc.) [17].

Na Figura 26 é apresentado o diagrama de blocos de um microcontrolador típico.

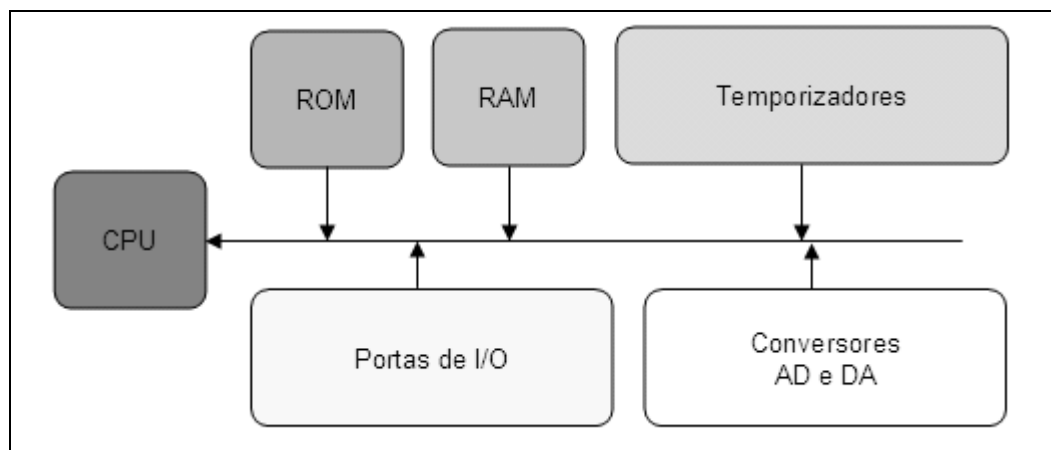


Figura 26 – Arquitetura de um microcontrolador típico.

Não obstante os recursos computacionais para aplicações, um tema importante na escolha dos microcontroladores para redes sem fio está associado as regras de consumo de energia e tamanho, que seguem as mesmas das adotadas para a escolha de interface aérea.

Se comparado o consumo de energia dos microcontroladores com o das interfaces de comunicação sem fio, estas ultimas consomem a maior parte da energia dos nós de rede.

Neste contexto é aconselhável, quando possível, que o processamento da informação coletada pelo nó de rede seja feita localmente, para então enviar as informações pré-processadas através da interface aérea, otimizando desta forma o envio de informações.

De forma a exemplificar, a seguir será analisado um cenário a monitoração de um reservatório de água. Poderíamos programar para que o dispositivo sensor do reservatório enviasse os dados para um sistema central e que este, por sua vez, processasse os dados e então tomasse as decisões de controle do reservatório. Porém, esta forma de trabalho consumiria muitos recursos da rede LR-WPAN, uma vez que a passagem de informações deveria ser periódica. Mas se o sensor do reservatório puder processar as informações e ele mesmo tomar as decisões, o sistema de transmissão seria mais otimizado, pois o nó de rede reportará somente informações sumarizadas e outras informações eventuais (um erro em uma válvula, motor, falta de água, por exemplo).

Por fim, a escolha do dispositivo microprocessador do nó LR-WPAN também é importante para otimizar a solução a ser implementada.

4.4 INTEGRAÇÃO ALÉM DAS LR-WPAN

As redes LR-WPAN por si próprias, na maioria dos casos, não conseguem agregar valor a uma determinada aplicação. Os dados por ela manipulados, sejam de leitura ou escrita, na maioria dos casos, trabalham associados a outras estruturas, sendo componentes de uma solução.

É estratégico que as redes LR-WPAN também façam uso de outras estruturas (sejam elas cabeadas ou não), para ajudar no desempenho ou conectar as redes fora de seu alcance.

Uma vez que, devido às características intrínsecas e necessárias do padrão IEEE 802.15.4, as interfaces das LR-WPAN não são compatíveis com as demais interfaces de redes sem fio de outros padrões existentes vistos anteriormente, faz-se necessário o uso de dispositivos que façam a interligação das redes LR-WPAN com outras redes.

Serão apresentados dois conceitos provenientes do padrão ZigBee, justamente pelo fato da interligação ser mais um quesito de aplicação que do próprio padrão IEEE 802.15.4. No contexto do ZigBee, existem dois meios para promover conectividade. São eles: *Gateways* e *Bridges*.

Os Gateways, no contexto ZigBee, são dispositivos mais flexíveis, que permitem a uma vasta gama de dispositivos e aplicações conectarem-se com a rede ZigBee.

Já as Bridges, são dispositivos muito mais simples que os Gateways, conseqüentemente possuem um menor custo que os Gateways, porém, possuem uma abrangência limitada.

4.4.1 Gateways

Gateways são dispositivos que permitem a troca de informações entre redes diferentes.

Os Gateways convertem os protocolos e dados utilizados nas redes ZigBee em formatos necessários para outros sistemas (industriais, residenciais, comerciais, etc.). Como exemplos destes formatos, podem ser citados os formatos HTML e XML, destinados às aplicações para a Internet. Na Figura 27 é demonstrada graficamente a pilha de protocolos que compõem um *Gateway* ZigBee.

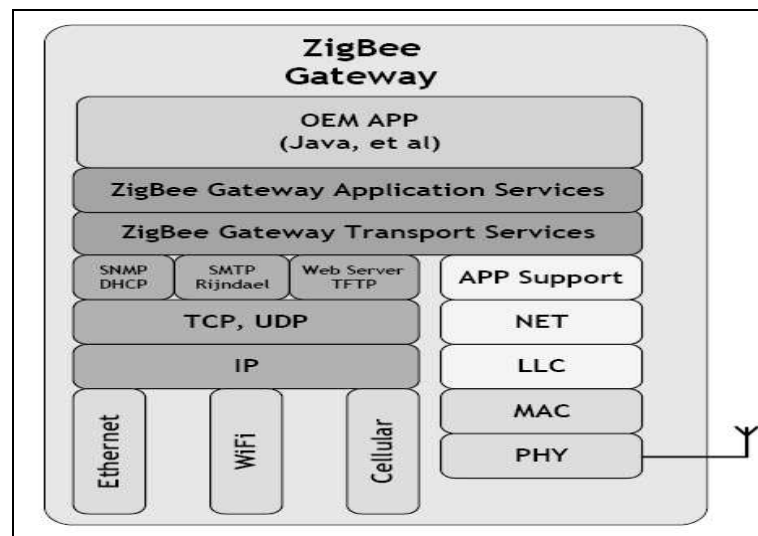


Figura 27 – Pilha de protocolos de um Gateway ZigBee.

Um *Gateway* ZigBee tem o propósito de fornecer uma interface entre uma rede ZigBee e um dispositivo IP através de uma interface no dispositivo IP. Dessa forma, o dispositivo IP é separado da rede ZigBee pela interface.

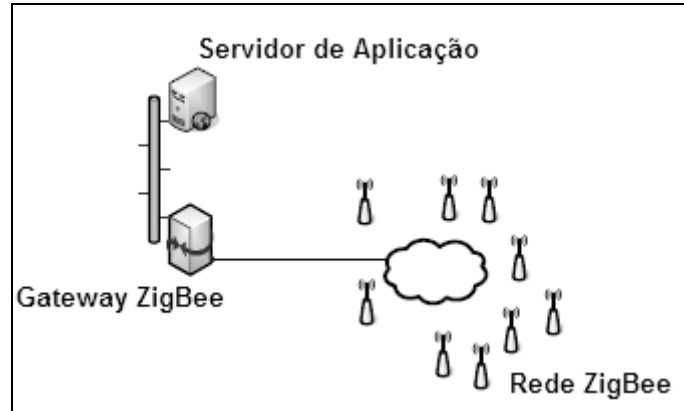


Figura 28 – Gateway ZigBee.

Utilizando a Figura 28, será descrito a seguir um exemplo: Acionamento de uma lâmpada que é controlada por algum dos nós de rede. Executado o comando na aplicação, o *Gateway ZigBee* traduz o comando para um formato compatível com as redes ZigBee que, por sua vez, traduz o endereço lógico da lâmpada para o endereço de rede da mesma, enviando logo após a mensagem. Dessa forma perceptível que o *Gateway* age como um agente ao lado do dispositivo IP, isolando detalhes entre ambas as redes.

4.4.2 Pontes (*bridges*)

As *bridges*, ou como também são conhecidas ZEDs (*ZigBee Expansion Devices*), tem a função de estender a rede Zigbee através de uma rede IP. Na Figura 29 é apresentado um contexto de uso das pontes ZigBee interligando duas LR-WPAN.

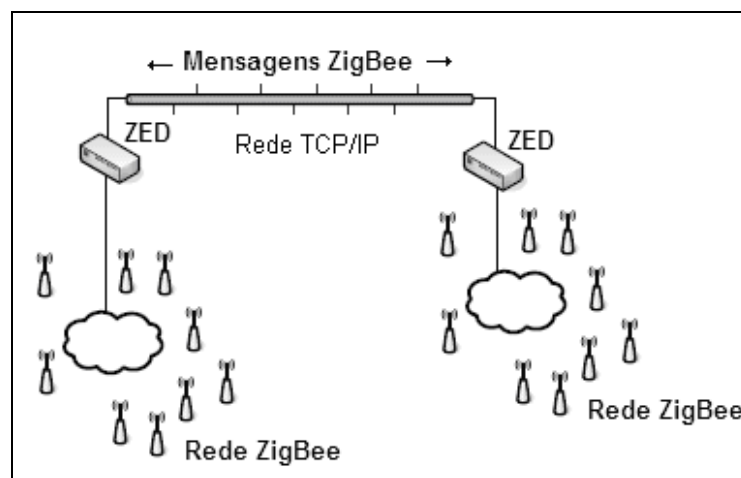


Figura 29 – Estendendo uma rede ZigBee através do uso de ZEDs.

A camada de rede ZigBee é contínua entre os dispositivos Zigbee, transportando as mensagens da rede Zigbee no campo de dados da camada de transporte da rede IP. Todo o

processo é feito de forma transparente para os dispositivos ZigBee. Na Figura 30 é apresentado graficamente a pilha de protocolos das pontes ZigBee.

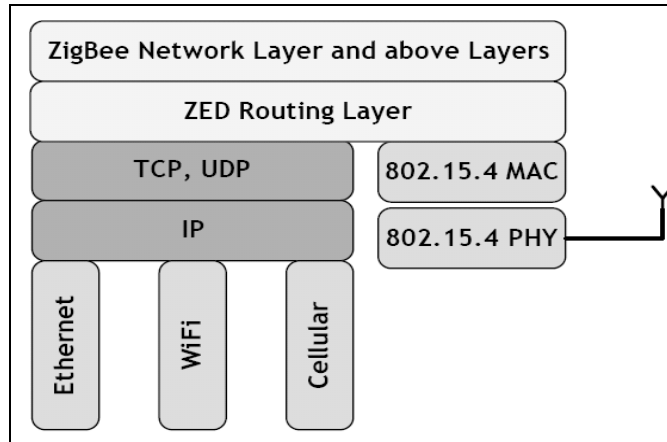


Figura 30 – Pilha do protocolo da ZED.

Entre as várias aplicações possíveis para a ZED podemos citar a criação de um *backbone* IP de baixo custo, destinado a interligar várias redes Zigbee.

Com a demonstração dos *Gateways* e ZED, é possível afirmar que com estes dois dispositivos existem condições para que seja promovida conectividade com outras redes. A padronização destes dispositivos permite que múltiplos fabricantes desenvolvam soluções que interajam entre as mesmas.

4.5 BANDAS DE RF UTILIZADAS POR DISPOSITIVOS IEEE 802.15.4

Tabela 02 – Bandas utilizadas pelo padrão 802.15.4 [14].

Item	Banda de Frequência	Licenciada	Região	Taxa de Transmissão	Número de Canais
01	868.3-870MHz	Não	Europa	20Kbps	01
02	902-928MHz	Não	Américas	40Kbps	10
03	2405-2480MHz	Não	Global	250Kbps	16

As redes LR-WPAN podem trabalhar em 27 canais de frequência, distribuídos em três bandas de frequências diferentes, com capacidades e propriedades particulares para cada banda. Devido a propriedades físicas de cada banda, elas se ajustam a determinadas particularidades que serão discutidas a seguir.

4.5.1 Bandas Não Licenciadas Para Redes LR-WPAN no Brasil

Em consulta ao Plano de Atribuição, Destinação e Distribuição de Faixas de Freqüências (Fonte: www.anatel.gov.br), foi constatado que no Brasil, das bandas utilizadas pelo padrão IEEE 802.15.4, a única que não está liberada para uso em aplicações Industriais, Científicas e Médicas, conhecida também como ISM (*Industrial, Scientific and Medical*) é a banda entre 868MHz e 870MHz, que está dentro de uma das faixas destinadas à implementação de Telecomunicações Móveis Internacionais (IMT-2000). Sendo assim, interfaces LR-WPAN que utilizam esta faixa de freqüência não podem ser aplicadas em soluções LR-WPAN no Brasil.

A verificação das faixas de freqüência é um item a ser considerado na hora de planejar a rede LR-WPAN, principalmente no momento da seleção da interface.

4.5.2 Banda de 868.3MHz a 870MHz

Esta banda de freqüência não pode ser utilizada no Brasil, porém, aplicações desenvolvidas para a Europa, onde esta faixa de freqüência é liberada para aplicações ISM, podem fazer uso desta banda.

A grande vantagem de se utilizar esta banda é a característica física proporcionada pelo alcance em relação às demais bandas, uma vez que o alcance do sinal é inversamente proporcional à sua respectiva freqüência. Uma aplicação interessante desta banda seria interligar LR-WPAN distantes que fazem uso da banda de 2.4GHz (que possuem um raio de alcance menor que o da banda em questão).

Outra vantagem é o fato de que, quanto menor a freqüência, maior a quantidade de objetos que o sinal pode atravessar com menor perda de potência devido a características de propagação do sinal eletromagnético.

A desvantagem de se utilizar esta banda é o fato de que a largura de banda do canal é de 600 kHz e só existe um canal que, com o padrão de modulação BPSK (*Binary PSK*), consegue uma taxa de transmissão de 20Kbps, ficando restrita ao uso de uma gama reduzida de aplicações.

4.5.3 Banda de 902MHz a 928MHz

Todas as características citadas no item 4.5.2, que menciona as características da banda de 868MHz, podem ser aplicadas na banda de 902MHz a 928Mhz devido à proximidade de frequência, com exceção das seguintes:

- A banda em questão é regulamentada em toda a América, inclusive no Brasil;
- A banda possui 10 canais disponíveis;
- Cada canal da banda possui uma largura de 1200KHz, o dobro da banda de 868MHz, e como ambos usam o mesmo padrão de modulação, conseqüentemente a capacidade de transmissão é dobrada para 40Kbps, o que já pode ser utilizando por uma gama de aplicações bem maior.

4.5.4 Banda de 2.4 GHz

Diferentemente das duas bandas mencionadas anteriormente nas seções 4.5.3 e 4.5.2, a banda ISM de 2.4GHz possui características únicas. Segue algumas das características desta banda:

- O IEEE 802.15.4 utiliza 16 canais desta banda ISM, sendo que cada canal possui uma largura de 2MHz. Com essa largura de banda e utilizando a modulação O-QPSK, é possível atingir uma taxa de transmissão de 250Kbps;
- A banda de 2.4GHz é utilizada por vários outros dispositivos (Telefones sem fio, Fornos de Microondas, etc.), o que deixa as aplicações LR-WPAN que utilizam esta banda susceptíveis a um nível maior de ruídos e interferências que as demais;
- Ao mesmo tempo em que a frequência de 2.4GHz, devido as suas características físicas, tem alcance limitado, esse alcance limitado é útil para se instalar ilhas de LR-WPAN em uma planta, utilizando-se para isso a mesma frequência.
- A banda de 2.4GHz, sendo destinada para aplicações ISM em escopo global, permite que sejam desenvolvidos componentes sem restrições regulamentares, podendo ser aplicados em soluções de âmbito mundial.

4.6 VISADA DIRETA

A rádio transmissão pode cobrir uma grande área e consegue vencer obstáculos como paredes, móveis, plantas etc. Sendo assim, a tecnologia de rádio não precisa de visada direta (LOS) se a frequência não for muito alta. Além disso, os produtos baseados em rádio transmissão oferecem taxas mais altas que a dos baseados em infravermelho (por exemplo, 10 Mbits/s).

4.7 APLICAÇÕES

Alguns futuristas prevêem que em médio prazo (5 anos), em casa e no trabalho, as pessoas viverão em ambientes com sensores inteligentes, e muito mais alinhados com as respectivas necessidades.

“Da mesma maneira que o computador pessoal era um símbolo dos anos oitenta, e o símbolo dos anos noventa foi a WWW, o próximo símbolo vai ser o advento de sensores baratos.”

Paul Saffo, Institute of the Future

http://www.saffo.com/essays/essay_farewellinfo.pdf

O número de empresas que tem se associado à Aliança ZigBee é um forte indício de que existem várias perspectivas em relação à aplicabilidade das redes LR-WPAN. Atualmente, já são mais de 200 empresas com a missão de projetar, testar e promover soluções utilizando o padrão IEEE 802.15.4 e o padrão ZigBee [18].

Segue a lista de algumas aplicações para as LR-WPAN [19]:

Na Indústria e Comércio:

- Monitoramento;
- Sensores de Movimento;
- Na automação da linha de produção;
- Enlaces de controle.

Na Área Médica:

- Monitoramento de pacientes;
- Registradores de dados;
- Diagnóstico remoto;

Na Automação Residencial:

- Segurança;
- Temperatura, Ventilação e Ar-Condicionado;
- Iluminação;
- Sistemas contra incêndio.

Na Área Automotiva:

- Registros de serviços de reparos;
- Controle de inventário e localização;
- Registros e manutenção.

Para as aplicações industriais, uma das características mais interessantes é a possibilidade de ser construída uma topologia em malha, que faz com seja possível transmitir dados por um caminho alternativo a um caminho inoperante, de forma dinâmica. Outra característica decisiva na adoção do padrão ZigBee é o fato de uma vez padronizado, os dispositivos serem mais baratos em relação aos dispositivos proprietários. Um exemplo de tecnologia em que poderiam ser aplicados os dispositivos ZigBee é o controle de inventário em deslocamento, que além da posição dos itens de inventário, os dispositivos ZigBee podem, através das suas interfaces bidirecionais, informar características como umidade, vibração, temperatura, etc. [06].

5 ESTUDO DE CASO

De forma a complementar o conteúdo estudado será apresentado um experimento realizado com um conjunto de desenvolvimento do fabricante Texas Instruments, o ez430-RF2500, cujas características básicas serão descritas a seguir.

Junto com o módulo ez430-RF2500 foi criado um ambiente para integração da rede de sensores sem fio com redes TCP/IP. A integração foi feita com o uso de *software* utilizando o protocolo SNMP (*Simple Network Management Protocol*) que é muito difundido no campo gerenciamento de TIC (Tecnologia da Informação e Comunicação). A integração permitirá o uso dos sensores sem fio com um sistema de monitoração de rede, conhecido também como NMS (*Network Management System*).

5.1 O MÓDULO EZ430-RF2500

Como descrito nas sessões anteriores, o microcontrolador e a interface de comunicação são itens cruciais em sistemas embarcados que compõem aplicações de sensores sem fio.

Itens relevantes do microcontrolador são: tamanho, consumo de energia, memória e periféricos. Já para a interface de comunicação o consumo também é crucial, mas a potência de transmissão e a sensibilidade de recepção são itens que devem ser avaliados.

O módulo utilizado é composto de um microcontrolador do fabricante Texas Instruments, o MSP430, componente desenhado para atender justamente às demandas por baixas dimensões (medindo 5 mm x 5 mm) e principalmente consumo, que para o componente utilizado no KIT fica em torno de 270uA em modo ativo e 0.7uA em modo espera [20] [21].

O MSP430 consegue otimizar o uso de energia através da existência de um oscilador interno flexível (*flexible clocking system*) e também com a possibilidade de variar a tensão de alimentação da CPU, permitindo desta forma a ampliação do tempo de vida das baterias. Em relação aos demais microcontroladores convencionais, a única desvantagem, comparativa somente, é o fato que o MSP430 não possibilita o uso de memória externa, sendo limitado ao uso de memória embarcada no chip do microcontrolador (existindo modelos com até

120Kbytes de memória flash e até 10Kbytes de memória RAM). Com estas limitações de memória, a engenharia de software envolvida na criação dos programas deve ter uma atenção especial no uso de interrupções no lugar de técnicas de verificação (*polling*), e no uso de compiladores e da linguagem de programação utilizada para o desenvolvimento do código no MSP430. As linguagens utilizadas geralmente para o desenvolvimento de código no MSP430 são, na maioria dos casos, o *Assembly* ou *C*.

Para desenvolver as aplicações para rodar no KIT ez430-RF2500, o ambiente integrado de desenvolvimento (IDE) IAR Embedded Workbench foi utilizado. O IDE foi especialmente desenhado para a família de microcontroladores MSP430. Uma visão ampla sobre o IDE poderá ser avaliada em [22].

O código criado para o experimento superou o limite da versão gratuita do IDE (IAR), necessitando o uso de uma versão completa na modalidade de demonstração por 30 dias para compilar o código do experimento e avaliar algumas funcionalidades do protocolo SimpliciTI.

Na Figura 31 é mostrada a imagem do KIT ez430-RF2500.

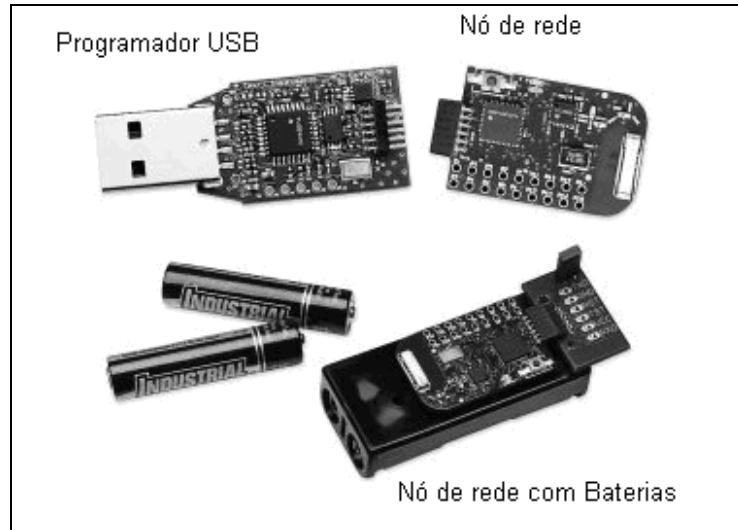


Figura 31 – KIT de desenvolvimento ez430-RF2500 [23].

O KIT possui, em cada uma das placas, um microcontrolador MSP430, um transceptor (*transceiver*) e todo o hardware necessário para realizar a configuração do KIT, sem a necessidade de dispositivos adicionais. A placa ainda fornece acesso a 18 pinos no microcontrolador para desenvolvimento. Detalhes dos pinos são fornecidos em [24].

5.1.1 Comunicação *Wireless*

A inovação chave do KIT de desenvolvimento é a possibilidade de comunicação sem fio, que permite mobilidade em tamanho compacto.

O componente utilizado para fornecer a comunicação sem fio no KIT de desenvolvimento ez430-RF2500 é o CC2500, que foi selecionado pela Texas Instruments com base em suas características de consumo de corrente, frequência de operação, mecanismos de segurança, alcance do sinal, taxa de transmissão de dados, tamanho e susceptibilidade a interferência. A corrente máxima do CC2500 é de 21.2mA em modo de transmissão, e 13.3mA em modo de recepção. O CC2500 possui capacidade de funcionar em modo de economia (*sleep mode*) podendo consumir somente 400nA neste modo. Sendo assim, o CC2500 possui baixa demanda por corrente. O CC2500 utiliza a faixa ISM de 2400-2483.5 MHz.

O CC2500 trabalha com modulação FHSS em multicanais, fornecendo desta forma maior resistência a interferência eletromagnética visto que a banda ISM pode ser utilizada por outros dispositivos. O tamanho do CC2500 também é atrativo (4 mm x 4 mm) possibilitando montagens compactas e discretas.

Para a implementação do software, e para simplificar a implementação da comunicação necessária para o experimento, foi utilizado o protocolo SimpliciTI, proprietário do fabricante. O protocolo SimpliciTI foi desenvolvido para aplicações em que o consumo de energia é uma das restrições de maior impacto e onde os requisitos de taxa de transmissão de dados são mais flexíveis, parâmetros que estão alinhados com a arquitetura do experimento.

O protocolo SimpliciTI permite uma sincronização simples com o *transceiver* CC2500. Uma das vantagens do protocolo é que ele precisa de simplesmente 4Kbytes de memória Flash e de 512Bytes de memória RAM. No entanto, este protocolo permite a criação de redes compostas de dois nós até 30 nós. No experimento foram utilizados 05 nós de rede, quantidade suportada pelos limites do protocolo. Maiores informações sobre o protocolo SimpliciTI poderão ser encontradas em [25].

O protocolo SimpliciTI utilizado no KIT EZ430-RF2500 funciona rotulando os *elementos* na rede como ED (*End Devices*) ou AP (*Access Point*). Um AP hospeda uma rede

na qual os dispositivos ED podem fazer parte. O protocolo SimpliCI TI permite que dispositivos ED e AP transmitam e recebam mensagens.

Uma vez iniciada a rede, EDs e APs são associados a um endereço randômico de 4 bytes. Estes endereços permitem que EDs e APs possam ser identificados unicamente em qualquer rede. Os EDs se associam a uma rede enviando pacotes de ligação (*link packets*) para o AP. o AP poderá aceitar ou negar a associação, dependendo somente das configurações da aplicação. Se o AP aceita a associação, ele registra o endereço associado ao ED. Armazenando o endereço do ED, o AP assegura que em uma eventual falha de comunicação ou inoperância do ED, o mesmo seja inserido automaticamente como o mesmo endereço. Da mesma forma, um ED só deve registrar o endereço do AP se ele for associado.

Um esboço do pacote enviado é mostrado na Figura 32.

PREAMBLE	SYNC	LENGTH	DSTADDR	SRCADDR	PORT	DEVICE INFO	TRACTID	App Payload	CRC
4	4	1	4	4	1	1	1	<i>n</i>	2

Figura 32 – Formato de um pacote SimpliCI TI.

O número dentro das caixas na Figura 32 indica o tamanho em bytes dos campos do pacote SimpliCI TI. O parâmetro mais importante é o tamanho de dados da aplicação (*application payload*). O tamanho máximo de *n* é de 52 bytes, podendo atingir desta forma uma velocidade de 500kbps, ou seja, os dados poderão ser transmitidos em um tempo próximo de 1ms.

Para programar os transceptores utilizando o protocolo SimpliCI TI a principal tarefa é chamar as funções corretas empregadas pelo protocolo de forma a enviar ou transmitir dados com o transceptor CC2500. As funções relevantes para a comunicação são informadas na referência [25].

5.2 O PROTOCOLO SNMP

A capacidade de integração de sistemas proporcionados principalmente pelo avanço dos sistemas de telecomunicações fomentou um aumento da comunicação eletrônica. Com a criação do protocolo TCP/IP e da Internet e o uso massivo de computadores muitas soluções surgiram e junto com as novidades nasceu a necessidade de controlar a complexidade

presente, as dos dispositivos que compõem as redes de computadores, pois com o crescimento das redes TCP/IP, aumentaram consideravelmente as dificuldades de gerência.

A demora no aparecimento de soluções abertas baseadas no modelo OSI fez com que um grupo de engenheiros decidisse elaborar uma solução temporária baseada em um novo protocolo: *Simple Network Management Protocol* (SNMP). A simplicidade do SNMP facilitou sua inclusão em equipamentos de interconexão, o transformando em um padrão de fato.

No final da década de 1990, a solução SNMP já era tão difundida que se estabeleceu como padrão de gerência de redes de computadores. Hoje, praticamente todos os equipamentos de interconexão dão suporte a SNMP, bem como muitos outros dispositivos (*UPSs*, modems e etc.), e sistemas de software (servidores, sistemas de bancos de dados e etc.). A boa experiência no gerenciamento proativo com SNMP acabou por ser utilizada em outras áreas, não sendo mais restrito o uso do SNMP em itens de configuração relacionados com rede, mas em qualquer solução de empresas tecnologia da informação e comunicação que possuam interconexão com redes TCP/IP.

Os principais objetivos do protocolo SNMP são:

- Reduzir o custo de construção de agentes que suportem o protocolo;
- O tráfego necessário para gerenciamento deveria ser reduzido;
- Número de restrições para a ferramenta de gerenciamento reduzido;
- Oferecer operações simples de serem compreendidas, e com isso conseqüentemente facilitando o desenvolvimento;
- Permitir a introdução de novas características e novos objetos não previstos ao se definir o protocolo;
- Construir uma arquitetura independente de implementações particulares.

5.2.1 Agente de Gerenciamento

O agente de gerenciamento é o componente contido nos dispositivos na qual se deseja realizar o gerenciamento, permitindo que sejam controlados pela estação de gerenciamento. O agente de gerenciamento responde à estação de gerenciamento basicamente de duas maneiras:

- *Polling* – Nesta forma a estação de gerenciamento solicita dados ao agente e o agente responde com os dados solicitados;
- Interceptação - É um método de reunião de dados projetado para reduzir o tráfego na rede e para o processamento nos dispositivos que estão sendo monitorados. Em vez de a estação de gerenciamento fazer *polling* nos agentes em intervalos determinados e contínuos, são definidos limites (superiores e inferiores) no dispositivo de gerenciamento. Se esses limites forem ultrapassados no dispositivo, o dispositivo de gerenciamento enviará uma mensagem de alerta à estação de gerenciamento. Isso elimina a necessidade de fazer *polling* em todos os dispositivos gerenciados na rede. A interceptação é muito útil em redes com muitos dispositivos que precisam ser gerenciados. Ela reduz a quantidade de tráfego SNMP na rede para fornecer mais largura de banda para a transferência de dados.

O mundo SNMP está baseado em três documentos:

- *Structure of Management Information (SMI)*. Definido pela RFC 1155, a SMI traz essencialmente, a forma pela qual a informação gerenciada é definida.
- *Management Information Base (MIB)*. Definida na RFC 1156, a MIB principal do mundo SNMP (chamada MIB-2) define as variáveis de gerência que todo elemento gerenciado deve ter, independentemente de sua função particular. Outras MIBs foram posteriormente definidas para fins particulares, tais como MIB de interfaces *Ethernet*, MIB de UPSs, MIB de repetidores e etc.
- *Simple Network Management Protocol (SNMP)*. Definido pela RFC 1157 é o protocolo usado entre gerente e agente para a gerência, principalmente trocando valores de variáveis de gerência.

Maiores informações sobre o protocolo SNMP e seu funcionamento poderão ser obtidas em [26] e [27].

No experimento efetuado foram implementados no agente somente os métodos SET (Gravar informações na MIB SNMP) e GET (Leitura das informações na MIB SNMP).

5.3 O EXPERIMENTO REALIZADO

O experimento realizado terá como foco fazer com que a rede de sensores com o protocolo SimplicidadeTI possa trocar informações com o NMS através do protocolo SNMP que funciona sobre TCP/IP.

A seguir é demonstrado na Figura 33 o modelo da solução proposta:

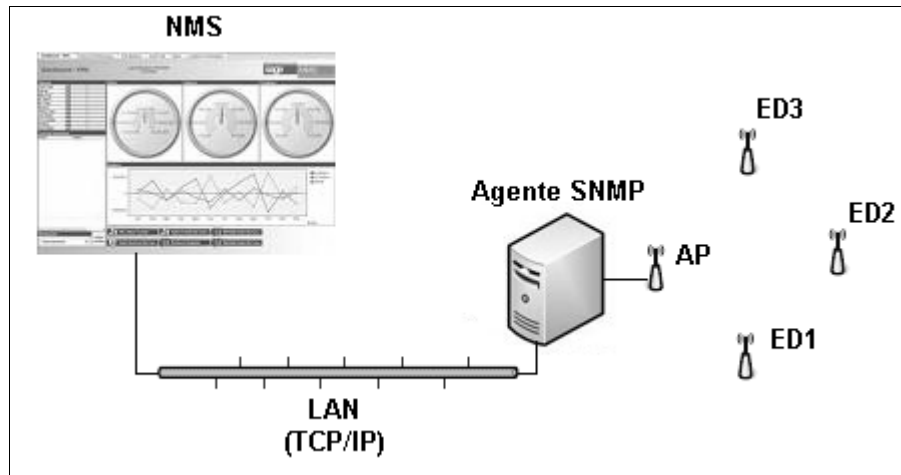


Figura 33 – Solução de gerenciamento integrada com NMS através de SNMP

Como o SNMP é um protocolo com uma arquitetura padronizada, ele pode ser implementado em qualquer linguagem. Devido à disponibilidade de bibliotecas de software, foi adotado o IDE Delphi 7 para implementação do software do agente SNMP bem como para realizar a interface com o AP cuja comunicação é através da porta serial do computador [28].

Na Figura 34 demonstramos a interface do agente SNMP desenvolvido.



Figura 34 – Agente SNMP desenvolvido.

5.3.1 NMS Utilizado e Testes Realizados com SNMP

Como NMS, foi utilizada uma versão de avaliação (*Trial*) do software ActiveXperts Network Monitor versão 7.1 que pode ser baixado para avaliação em

<http://www.activexperts.com/activmonitor/>. Existem outros pacotes de software para este propósito, no entanto, o software escolhido se mostrou adequado para o experimento, além de fornecer uma interface de monitoração padrão Windows e Web.

A seguir será apresentada a interface Windows com 05 sensores (ED – *End Devices*), para cada ED é realizada a monitoração do estado dos LEDs, 01 (Vermelho) e 02 (Verde) que estão nas placas dos sensores.

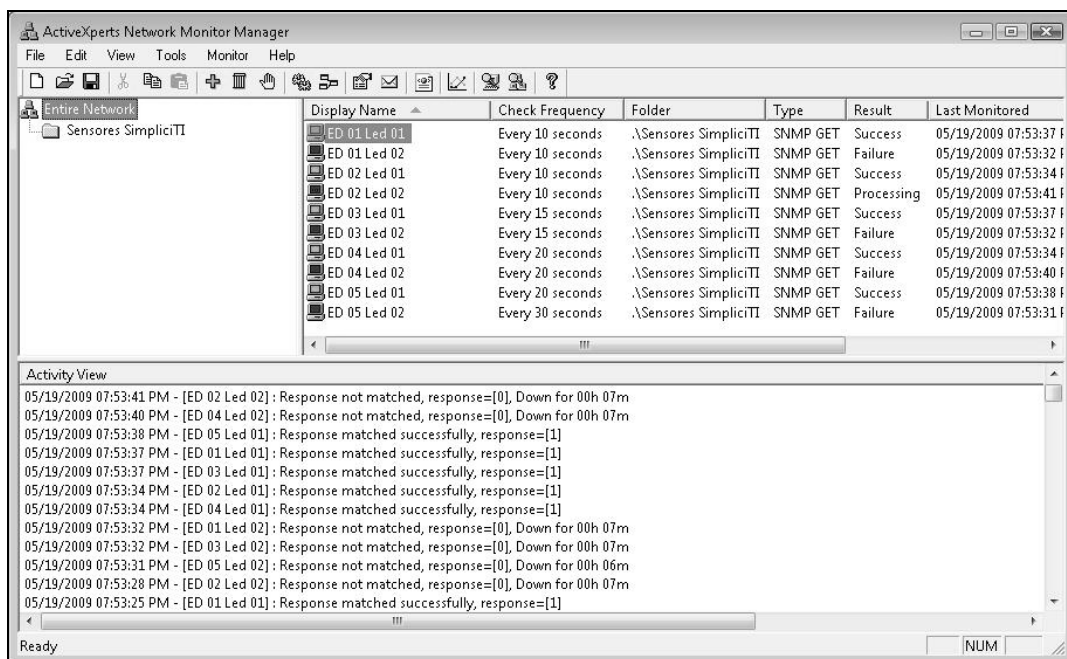


Figura 35 – Interface Windows do NMS ActiveXperts Network Monitor.

Um recurso interessante que pode ser utilizado no NMS ActiveXperts é a interface Web para disponibilização de informações acessíveis a uma rede através do uso de navegadores, seja para uma Intranet ou Internet. A seguir é demonstrada a interface Web com os sensores configurados e seus respectivos estados.

Check Name, Folder	Type	Result	Last Update	Last Response	Comments
ED 04 Led 02 Folder: \Sensores SimplicIO	SNMP GET	Error	05/19/2009 07:55:25 PM	Response not matched, response=[0]	Will be considered as failure after 1 more errors
ED 01 Led 02 Folder: \Sensores SimplicIO	SNMP GET	Failure	05/19/2009 07:55:32 PM	Response not matched, response=[0]	Down for 00h 09m
ED 02 Led 02 Folder: \Sensores SimplicIO	SNMP GET	Failure	05/19/2009 07:55:28 PM	Response not matched, response=[0]	Down for 00h 09m
ED 03 Led 02 Folder: \Sensores SimplicIO	SNMP GET	Failure	05/19/2009 07:55:26 PM	Response not matched, response=[0]	Down for 00h 00m
ED 05 Led 02 Folder: \Sensores SimplicIO	SNMP GET	Failure	05/19/2009 07:55:31 PM	Response not matched, response=[0]	Down for 00h 08m
ED 01 Led 01 Folder: \Sensores SimplicIO	SNMP GET	Success	05/19/2009 07:55:37 PM	Response matched successfully, response=[1]	
ED 02 Led 01 Folder: \Sensores SimplicIO	SNMP GET	Success	05/19/2009 07:55:34 PM	Response matched successfully, response=[1]	
ED 03 Led 01 Folder: \Sensores SimplicIO	SNMP GET	Success	05/19/2009 07:55:25 PM	Response matched successfully, response=[1]	
ED 04 Led 01 Folder: \Sensores SimplicIO	SNMP GET	Success	05/19/2009 07:55:19 PM	Response matched successfully, response=[1]	
ED 05 Led 01 Folder: \Sensores SimplicIO	SNMP GET	Success	05/19/2009 07:55:22 PM	Response matched successfully, response=[1]	

Note: Contact your Administrator to make changes to sorting, columns, colors, HTML refresh rate, etc. This can be done by editing the XSL template.

Figura 36 – Interface Web do NMS ActiveXperts Network Monitor.

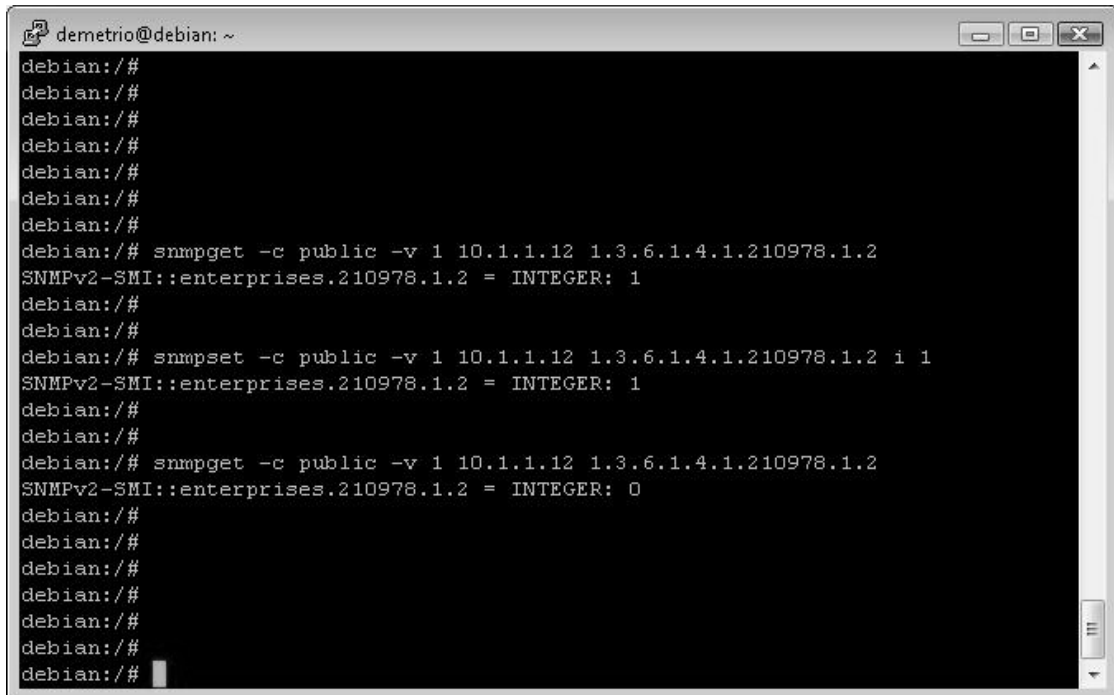
Na implementação da MIB SNMP, foi utilizada a seguinte raiz privada (*private*) da MIB para a configuração do acesso aos sensores: 1.3.6.1.4.1.210978. Este parâmetro está relacionado com a estrutura da base de dados de informações (MIB – *Management Information Base*) para itens proprietários.

Junto à raiz privada foram criados mais dois níveis, um para simbolizar o endereço do ED e o segundo nível para simbolizar os LEDs 1 e 2. Como exemplo, para acessar informações do ED de endereço 3 e o LED 2 (Verde) o seguinte objeto deverá ser utilizado: 1.3.6.1.4.1.210978.3.2

Efetuando-se o comando GET (`snmpget`) no agente SNMP nos objetos dos LEDs, teremos como resultado 0 caso o LED esteja desligado e 1 caso o LED esteja ligado. O NMS foi configurado para que quando o resultado da leitura retornasse 1, a situação estaria normal, do contrário foi configurado para alertar sobre problemas com o objeto [27].

Já efetuando o comando SET (`snmpset`) no agente SNMP o estado o LED é alterado (*toggled*), de forma a demonstrar que o recurso de escrita está disponível [27].

Não foram encontrados recursos no NMS escolhido para utilizar os comandos SET do protocolo SNMP, sendo assim, foi utilizado um pacote de utilitários em uma distribuição do sistema operacional Linux Debian versão 5.0 para validar a funcionalidade. A Figura 37 demonstra os testes realizados, dos comandos GET e SET [29] [30].



```
demetrio@debian: ~
debian:/#
debian:/#
debian:/#
debian:/#
debian:/#
debian:/#
debian:/# snmpget -c public -v 1 10.1.1.12 1.3.6.1.4.1.210978.1.2
SNMPv2-SMI::enterprises.210978.1.2 = INTEGER: 1
debian:/#
debian:/#
debian:/# snmpset -c public -v 1 10.1.1.12 1.3.6.1.4.1.210978.1.2 i 1
SNMPv2-SMI::enterprises.210978.1.2 = INTEGER: 1
debian:/#
debian:/#
debian:/# snmpget -c public -v 1 10.1.1.12 1.3.6.1.4.1.210978.1.2
SNMPv2-SMI::enterprises.210978.1.2 = INTEGER: 0
debian:/#
debian:/#
debian:/#
debian:/#
debian:/#
debian:/#
debian:/#
```

Figura 37 – Avaliando o comando SET do SNMP no SO Debian.

Na Figura 37 é executado um GET no ED 1 LED 2 e constatado que o estado do mesmo é ligado (1) após o SET no objeto efetuamos novamente o GET sobre o mesmo objeto e constatamos o mesmo após o SET está desligado (0), pois o como informado anteriormente o SET inverte o estado o objeto informado.

Não obstante a simplicidade dos métodos implementados, eles não se limitam a tais, podendo ser implementadas muitas outras funcionalidades de leitura e escrita junto à rede de sensores e atuação dela com qualquer NMS que faça uso do protocolo SNMP.

Todo o código fonte desenvolvido, para o agente e para o KIT ez430-RF2500 poderão ser fornecidos pelo autor por meio de correio eletrônico no endereço sdemetrio@ieee.org.

6 CONCLUSÃO

Com a realização do trabalho se constatou a possibilidade de agregação de valor com a convergência de áreas de conhecimentos não tão íntimas. De um lado utilizamos soluções de Tecnologia da Informação e Comunicação (TIC), como no caso do NMS e o protocolo SNMP. Por outro utilizamos dispositivos microcontrolados sem fio, que figuram mais freqüentemente na área de eletroeletrônica.

O uso de sensores sem fio chegou não só para suprir uma demanda que não estavam sendo atendidas, como também para a criação de múltiplas oportunidades, pois passamos a contar com um contexto de comunicação móvel e de pequeno tamanho para inúmeras aplicações. Os sensores sem fio também abrem condições para que soluções até então caracterizadas como estanques possam se integrar facilmente a outras soluções, possibilitando emergir soluções que não eram antes vislumbradas.

Um item identificado como potencial para o uso dos sensores sem fio está relacionado com características emergentes da economia mundial, cujos custos indiretos (geralmente associado a serviços) estão a cada dia compondo mais os custos dos produtos e serviços. O uso de sensores sem fio pode ajudar de múltiplas formas na redução do tempo de serviços de instalação, mudanças e manutenção de inúmeras soluções.

6.1 TRABALHOS FUTUROS

Durante a execução do trabalho foram detectadas oportunidades e melhorias a serem tratadas, sendo assim, seguem algumas indicações de trabalhos futuros:

- Desenvolvimento de estudos sobre transferência de dados com segurança: Não obstante a oportunidade de fazer uso de sensores sem fio existem aplicações que possuem requisitos de segurança da transmissão dos dados, por exemplo, sistema de segurança residencial. Sistemas com essas necessidade se implementados sem os controle adequados poderão ficar susceptíveis aos mesmos problemas que encontramos nas redes convencionais, no entanto, no escopo de redes de sensores os nós de rede possuem capacidade de processamento limitada, sendo assim, implementar características de segurança acabam por se tornar um desafio;
- Avaliação sobre robustez do protocolo SimplicíTI: Não obstante o protocolo funcionar a contento para o experimento, foram encontrados problemas de sincronismo inerentes ao ambiente de rede sem fio. Nós de redes que porventura

deixam de se comunicar perdiam associação com o AP e era necessário reiniciar os mesmos;

- Ampliação do alcance dos nós de redes: Uma das características detectadas nos testes foi à limitação do alcance dos nós de rede, causado talvez pelo modelo de antena adotado nos módulo ez430-RF2500 (chip antena). A avaliação de antenas alternativas e métodos de roteamento com o uso de nós intermediários para ampliar o alcance é pertinente de forma a ampliar o escopo do uso dos sensores sem fio;
- Teste de interferência de outros geradores de interferência eletromagnética: Como os sensores utilizam por padrão a banda ISM, eles acabam por ficar sujeitos à interferência de outros dispositivos que utilizam a mesma banda. Sendo assim, a realização de estudos para avaliar a interferência de outros dispositivos nas redes de sensores se torna interessante;
- Desenvolvimento de técnicas para redução de consumo de energia: Um dos itens críticos em soluções com sensores é o tempo de vida das baterias em dispositivos finais. Como mencionado anteriormente isso está relacionado diretamente com a aplicação, no entanto, para contextos na qual exista comunicação bidirecional entre os EDs e os APs, deixar o ED em *power save* pode limitar a recepção de dados e com isso limitar funcionalidades na aplicação, principalmente as que possuem requisitos de tempo real.

7 REFERÊNCIAS

- [01] **Redes de Computadores.** Disponível em:
<http://pt.wikipedia.org/wiki/Redes_de_computadores>. Acesso em: 25 Out. 2008.
- [02] SILVA, Adailton J. S. **As tecnologias de redes wireless.** Disponível em:
<<http://www.rnp.br/newsgen/9805/wireless.html#ng-introducao>>. Acesso em: 25 Out. 2008.
- [03] **Data Communication Electronics Pages.** Disponível em
<http://www.epanorama.net/links/tele_datacom.html>. Acesso em: 20 Out. 2008.
- [04] TANENBAUM, Andrew S. **Redes de Computadores.** São Paulo: Editora Campus, 2003.
- [05] PRADO, Eduardo. **Redes Ad Hoc.** Disponível em
<http://www.wirelessbrasil.org/wirelessbr/secoes/sec_adhoc.html>. Acesso em: 15 Nov. 2008.
- [06] PINHEIRO, José M. S. **As redes com Zigbee.** Disponível em:
<http://www.projetoderedes.com.br/artigos/artigo_zigbee.php>. Acesso em: 29 Nov. 2008.
- [07] PRADO, Eduardo. **O wireless personal area network (WPAN).** Disponível em:
<<http://www.aliceramos.com/conver/0021.asp>>. Acesso em: 29 Nov. 2008.
- [08] ANDY, Norman. **Wireless Communications.** O guia essencial da comunicação sem fio. São Paulo: Editora Campus, 2001.
- [09] GEIER, Jim. **Making the choice: 802.11a or 802.11g.** Disponível em <<http://www.Wi-Fiplanet.com/tutorials/article.php/1009431>>. Acesso em: 02 Dez. 2008.
- [10] ZYREN Jim. **802.11g spec: Covering the basics.** Disponível em:
<http://www.commsdesign.com/design_corner/OEG20020201S0035>. Acesso em: 15 Nov. 2008.
- [11] FILHO, Alberto Mesquita. **A natureza da luz e o princípio da superposição.** Disponível em: <<http://www.ecientificocultural.com/ECC2/artigos/polar03.htm>>. Acesso em: 24 Dez. 2008.
- [12] LOUREIRO, Antonio A. F. **Redes de sensores sem fio. XXI Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores. DCC – UFMG.** Disponível em:
<http://www.inf.pucrs.br/~eduardob/disciplinas/ProgPerif/WirelessSensorNetworks/RedesSensores_MiniCurso_179_Loureiro_Nogueira_Ruiz_Mini_Nakamura_Figueiredo.pdf>. Acesso em: 15 Out. 2008.
- [13] GUTIERREZ, José A. **IEEE 802.15.4: A developing standard for low-power low-cost wireless personal area networks.** Disponível em:
<<http://www.cs.ucla.edu/classes/winter04/cs117/zigbee1.pdf>> Acesso em: 19 Out. 2008.

- [14] The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc. **IEEE Standards 802.15.4**. New York, 2003. Disponível em: <<http://standards.ieee.org/getieee802/download/802.15.4-2003.pdf>>. Acesso em: 01 Out. 2008
- [15] FRIAS, Renato Nogueira. **Tutorial Zigbee**. Disponível em: <<http://www.teleco.com.br/tutoriais/tutorialzigbee/default.asp>>. Acesso em: 10 Dez. 2008.
- [16] **Introdução ao Mundo Wireless**. Disponível em: <<http://mobilelife.com.br/textos/artigos/introducao-ao-mundo-wireless/>>. Acesso em: 04 Jan. 2009.
- [17] ZELENOVSKY, Ricardo. **Arquitetura de microcontroladores modernos**. Disponível em : <http://www.mzeditora.com.br/artigos/mic_modernos.htm> . Acesso em: 10 Dez 2008.
- [18] MATHIAS, C. J. **A Brief History of wireless technology**. Disponível em: <http://wireless.itworld.com/4244/040322histowireless/page_1.html>. Acesso em: 24 Dez. 2008.
- [19] LIAO, Raymond e outros. **Demystifyng IEEE 802.11 for Industrial Wireless LANs**. Disponível em: <<http://Ethernet.industrial-networking.com/wireless/articledisplay.asp?id=225>>. Acesso em: 24 Dez. 2008.
- [20] **Texas Instruments Flash Programmer User Manual (Rev. D)**. Disponível em: <<http://www.ti.com/litv/pdf/swru069d>>. Acesso em: 04 Apr. 2009.
- [21] **MSP430F22x2, MSP430F22x4 Mixed Signal Microcontroller (Rev. C)**. Disponível em: <<http://www.ti.com/lit/gpn/msp430f2274>>. Acesso em: 04 Apr. 2009.
- [22] **IAR Embedded Workbench Kick Start - Free IDE**. Disponível em: <<http://focus.ti.com/docs/toolsw/folders/print/iar-kickstart.html>>. Acesso em: 04 Apr. 2009.
- [23] **ez430-RF2500 MSP Wireless Development Tool**. Disponível em: <<http://focus.ti.com/docs/toolsw/folders/print/ez430-rf2500.html>>. Acesso em: 04 Mar. 2009.
- [24] **eZ430-RF2500 Development Tool User's Guide (Rev. E)**. Disponível em: <<http://www.ti.com/litv/pdf/slau227e>> . Acesso em: 04 Apr. 2009.
- [25] **SimpliciTI Network Protocol**. Disponível em: <<http://focus.ti.com/docs/toolsw/folders/print/simpliciti.html>>. Acesso em: 04 Mar. 2009.
- [26] STALLINGS, William. **SNMP, SNMPv2, SNMPv3, and RMON 1 and 2**. Boston. Editora Addison Wesley. 2005.
- [27] MAURO, Douglas; SCHMIDT, Kevin; SCHMIDT, Kevin J. **Essential SNMP**. Califórnia. O'Reilly. 2001.
- [28] CANTU, Marco. **Dominando o Delphi 7: A Bíblia**. São Paulo. Makron Books. 2003.
- [29] SILVA, Glaydson Mazioli da. **Guia Foca GNU/Linux: Iniciante e Intermediário**. Disponível em: <http://focalinux.cipsga.org.br/download/inic_interm/focalinux12-pdf.zip>. Acesso em: 01 Fev. 2009.

[30] AOKI, Osamu; ORMENESE, Paulo Rogério. **Referência Debian**. Disponível em: <<http://www.debian.org/doc/manuals/reference/reference.pt-br.pdf>>. Acesso em: 10 Fev. 2009.