



A IEEE 802.15.4 COMO PLATAFORMA DE COMUNICAÇÃO DE DADOS

Everton Luiz Ferret dos Santos¹

Resumo: Este artigo mostra as características do protocolo 802.15.4 e o funcionamento das redes ZigBee. Começa com o histórico do surgimento do padrão IEEE 802.15.4, as razões da criação de um protocolo que se assemelha com o Bluetooth, e porque pode ser considerado mais eficiente para algumas aplicações. Serão detalhadas as principais definições do protocolo 802.15.4, sua camada física, e os pontos mais relevantes a respeito de sua camada MAC. Serão analisados os tipos de dispositivos que existem em uma rede ZigBee, as funções lógicas que esses podem exercer, bem como as topologias de rede possíveis de serem construídas com estes dispositivos. Para finalizar, apresentaremos alguns casos de aplicação do ZigBee tentando enfatizar as vantagens do uso desta tecnologia nas referidas aplicações.

Palavras-chave: Comunicação de Dados. Redes Pessoais Sem fio. Padrão IEEE 802.15.4. ZigBee.

Abstract: *This paper describes features of the protocol 802.15.4 and operation of ZigBee networks. The motivations for use the IEEE 802.15.4 standard, reasons for the creation of a protocol that is similar to Bluetooth, and causes that it is considered more efficient will be detailed. The 802.15.4 protocol settings, their physical layer, and the most relevant points about its layer MAC will be analyzed. The types of devices in a ZigBee network, your logical functions, as well as network topologies possible will be showed. Finally, some cases of application for ZigBee networks trying to emphasize the advantages of using this technology in those applications will be discussed.*

Keywords: *Data Communication. WPANs. IEEE 802.15.4 Standard. ZigBee.*

¹ Professor do Departamento Acadêmico de Eletrônica (DAELN), campus Florianópolis, IFSC <everton@ifsc.edu.br>.

1. INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas, tem-se observado uma continuidade na evolução das redes de comunicação. As redes celulares, por exemplo, são uma consequência natural das redes de telefones cabeadas, uma vez que o custo do cabeamento era cada vez mais alto e cada dia mais havia a necessidade de uma telefonia não fixada a um ponto físico.

Da mesma forma, nos anos 80, com o crescimento acelerado da Internet, era evidente a necessidade de uma comunicação sem fio voltada para esse tipo de tráfego de dados. O IEEE 802.11 cria, então, as redes locais sem fio WLAN – *Wireless Local Area Network* (ERGEN, 2004).

Enquanto os padrões IEEE 802.11 têm como objetivo ser o mais parecido possível com o Ethernet, o IEEE 802.15, padrão para redes locais pessoais WPAN – *Wireless Personal Area Network*,

por sua vez, têm seus objetivos muito diferentes sendo estes: baixo custo, baixo consumo, curto alcance e tamanho reduzido do dispositivo.

As WPANs têm uma natureza pervasiva, possibilitando a integração de computadores a diversos objetos e equipamentos, e ao ambiente, de forma geral. Por utilizarem comunicação sem fio, sua integração com dispositivos móveis é também natural.

A importância das WPANs vêm aumentando nos últimos anos. Elas têm sido usadas em diversos campos, como automação residencial, industrial e agrícola, embarcadas em veículos, para o monitoramento das condições de saúde à distância, entre outros. Algumas aplicações não eram possíveis antes do seu advento, outras se tornaram mais simples com seu uso. Esse tipo de rede é muito importante para o advento da chamada Internet das Coisas. Um dos padrões mais importantes para as WPANs na atualidade é o IEEE 802.15.4 que será

discutido neste artigo, em conjunto com o ZigBee, que especifica uma possível camada de rede para o mesmo.

2. O PADRÃO IEEE 802.15.04

O IEEE 802.15.4 é um padrão para WPANs de baixa velocidade. Elas são caracterizadas por servir a dispositivos de baixo custo, comunicando-se a distâncias curtas, geralmente alimentados por baterias e com severas restrições quanto ao processamento e memória disponíveis. A complexidade do IEEE 802.15.4 é considerada

baixa se comparada a de outros padrões semelhantes, como o Bluetooth. Ele utiliza três faixas de frequências possíveis: 868 MHz, 915 MHz e 2,4 GHz (Tabela 1), adequando-se às normas da maioria dos países. O alcance do rádio geralmente fica entre 10 e 100 m, mas pode haver dispositivos com alcances maiores (até 1.500 m com visada aberta). É utilizado o CSMA-CA (*Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance*) ou o CSMA-CA com uso de *slots*, para o acesso ao meio físico (RANJAN, 2013; MARÇAL, 2008).

TABELA 1 - Bandas de frequências e taxas de dados (ERGEN, 2004).

PHY	Banda de frequência (MHz)	Parâmetros de espalhamento		Parâmetros dos dados		
		Taxa de espalhamento (kchip/s)	Modulação	Taxa de bits (kb/s)	Taxa de símbolo	Símbolos
868/915	868-868,6	300	BPSK	20	20	Binário
	902-928	600	BPSK	40	40	Binário
2.450	2.400-2.483,5	2.000	O-QPSK	250	62,5	16 símbolos

O IEEE 802.15.4 define apenas as camadas 1 e 2 do modelo de referência ISO/OSI, conforme ilustrado na Figura 1.

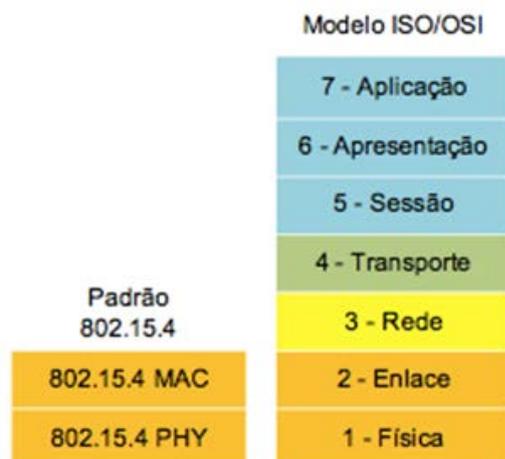


FIGURA 1 - Comparação entre o padrão 802.15.4 e o modelo ISO/OSI.

O padrão IEEE 802.15.4 ficou responsável pela criação das duas camadas mais baixas da tecnologia ZigBee, enquanto que a ZigBee Alliance trabalhava nas camadas superiores. Ao descrever o padrão, no contexto ZigBee, serão descritas as funcionalidades dessas duas camadas (RANJAN, 2013).

2.1. Camada física

A camada física (PHY) do ZigBee segue o protocolo IEEE 802.15.4 e é responsável por permitir a transmissão das PDUs (*Protocol Data Units*), unidades de dados, através de ondas de rádio. A PHY utiliza a modulação DSSS (*Direct Sequence Spread Spectrum*) que incorpora em cada

bit de dado um padrão de redundância e os espalha pela largura de banda utilizada. Essa redundância permite não só que o dado seja identificado como pertencente a um determinado nó, como facilita a detecção de erros.

Ao espalhar os dados em todas as frequências da banda, o sinal resultante se assemelha cada vez mais a um ruído, tornando-se mais robusto a interferências. Após ser feito a DSSS, o sinal é modulado em uma portadora para transmissão.

As faixas de frequência utilizadas (Figura 2) são as frequências livres de 2,4 GHz (global), 915 MHz (Américas) e 868 MHz (Europa). Cada uma das faixas implica em uma taxa de transmissão, número de canais e espectros diferentes (ERGEN, 2004; RANJAN, 2013).

Outras responsabilidades da camada física:

- **indicar qualidade de conexão:** ao receber um pacote, o nó receptor envia de volta um pacote LQ (*Link Quality*) que determina qualidade do sinal de conexão;
- **detectar potência dos canais:** a detecção e manipulação desse dado são feitas na camada de rede para definir algoritmos de escolha de canais;
- **reportar canais livres (CCA – *Clear Channel Assessment*):** a camada física determina se os canais estão ocupados de acordo com o *Carrier Sense* dos sinais em DSSS e/ou caso o parâmetro ED (*Energy Detection*) esteja acima do limite do canal.

O formato da PDU (Figura 3) após a manipulação da camada física é, basicamente, um

signal de sincronismo (SHR), um bloco de informação (PHR), e um bloco de *payload* que representa a PDU vinda da camada superior de enlace.

2.2. Camada de Controle de Acesso ao Meio (MAC)

A camada MAC do padrão IEEE 802.15.4 é responsável pelo processo do encapsulamento dos

dados vindo das camadas superiores preparando-os para serem transmitidos.

2.2.1. Modos de Operação

O método de acesso ao meio caracteriza a rede em dois modos de operação. O modo de operação define a principal característica da rede com ZigBee: baixo consumo de potência.

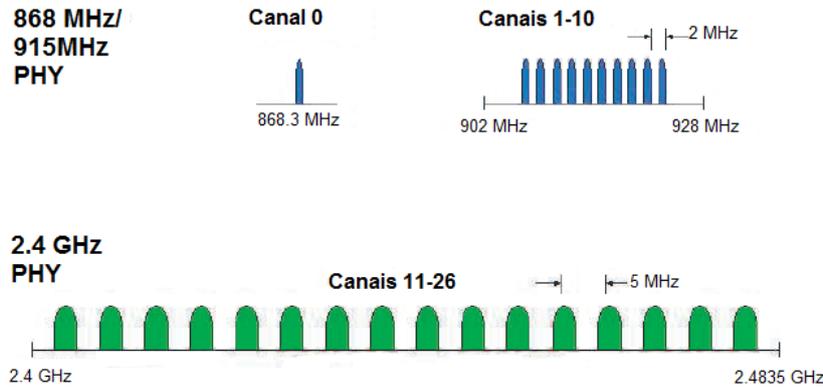


FIGURA 2 - Bandas de frequência (ERGEN, 2004).

Bytes	4	1	1	n
Camada Física	Sequência de Preâmbulo	Delimitador de início de quadro	Comprimento do quadro	MAC PDU
	SHR		PHR	
	6+n			
	PHY PDU			

FIGURA 3 - Formato da PDU (ERGEN, 2004).

Auxiliada pela baixa taxa de transmissão, a capacidade de reduzir seu *duty cycle* permanecendo inativo faz com que o dispositivo possa ser alimentado com baterias muito duradouras. Essa característica só pode ser estendida a todos os dispositivos utilizando o modo *beaconing* (ERGEN, 2004; MARÇAL, 2008).

2.2.1.1. Modo Beaconing

Os dispositivos com funções de roteador, transmitem de tempos em tempos, sinalizações (*beaconings*) para tentar confirmar sua presença aos outros roteadores da mesma rede.

Já os outros nós da rede só precisam estar ativos no momento da sinalização, devendo ser configurados para percebê-la, pois a maioria dos dispositivos permanece dormindo (*sleep*).

Nesse modo, o consumo de energia é o mínimo possível. O método de acesso padrão utiliza o CSMA-CA. Aplicações que necessitem de características de baixa latência devem utilizar o GTS (*Guaranteed Time Slot*), um método de QoS (*Quality of Service*) que garante um espaço de tempo para que o dispositivo faça o que for necessário, sem atrasos.

Para o funcionamento desse modo é utilizada a estrutura de *superframe* (Figura 4). Essa estrutura tem o objetivo de prover banda livre em algumas situações e de proporcionar baixa latência nas transmissões.

2.2.1.2. Modo Non-Beaconing:

Dependendo da aplicação, pode ser difícil obter a sincronia dos *beacon frames*, sendo mais interessante a eliminá-los. No modo *non-beaconing*, se os nós permanecerem desligados por muito tempo podem perder janelas de transmissão ou atualizações de eventos importantes.

O método de acesso utilizado é o CSMA *unslotted* ALOHA, que tem um tempo de espera (*backoff*) aleatório e exponencialmente decrescente, não dependente de *slots* de tempo.

A outra possibilidade é fazer com que a maioria dos nós dispositivos da rede permaneça sempre com seus receptores ativos, consumindo mais energia. Os dispositivos devem ser alimentados com fontes de energia mais potentes e duradouras que pilhas ou baterias comuns. Isso compromete a principal característica da rede: baixo consumo de potência (KINNEY, 2003).

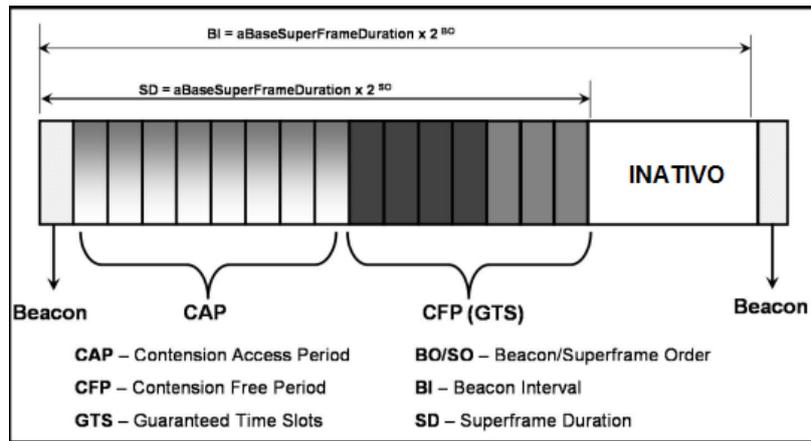


FIGURA 4 - Estrutura do *superframe* (ERGEN, 2004).

2.2.2. Endereçamento

O padrão IEEE 802.15.4 usa dois tipos diferentes de endereçamento:

- EUI-64, com 64 bits de endereço, semelhante à Ethernet;
- existe também a possibilidade de se utilizar um endereço reduzido de 16 bits, a partir do momento que a rede está configurada permitindo um total de 65.535 nós. Essa quantidade parece o suficiente para qualquer aplicação imaginável, mas caso não o seja, é possível configurar um nó *gateway*.

2.2.3. Frames

2.2.3.1. Beacon frames

Os *beacons* são importantes, pois permitem que todos os nós continuem sincronizados sem precisar ficar recebendo sincronismo por longos períodos de tempo, de forma a economizar energia.

Os dispositivos só precisam acordar quando for o momento de receber o beacon, interpretar alguma configuração diferente que tenha sido passada, e voltar a dormir até a sua próxima atividade.

A Figura 5 apresenta a visão esquemática do *beacon frame*.

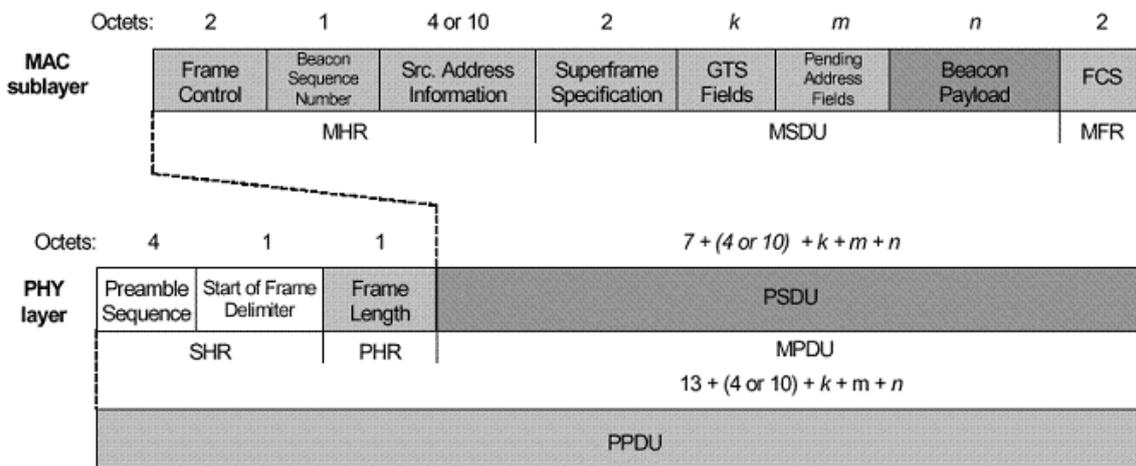


FIGURA 5 - Visão esquemática do *beacon frame* (RANJAN, 2013).

2.2.3.2. Data Frame:

O número de bytes dos dados serão de, no mínimo, 104 bytes por *frame*, conforme apresentado na Figura 6.

2.2.3.3. Acknowledgement Frame

Permite que o remetente tome conhecimento de que o destinatário recebeu sua mensagem.

A Figura 7 apresenta a visão esquemática de um *acknowledge frame*.

2.2.3.4. MAC Command Frame

Esse tipo de *frame* tem por objetivo prover um mecanismo para a configuração dos nós “clientes”. Sendo assim, ele permite que o coordenador configure os dispositivos independentes do tamanho da rede. A Figura 8 apresenta a visão esquemática do *MAC Command Frame*.

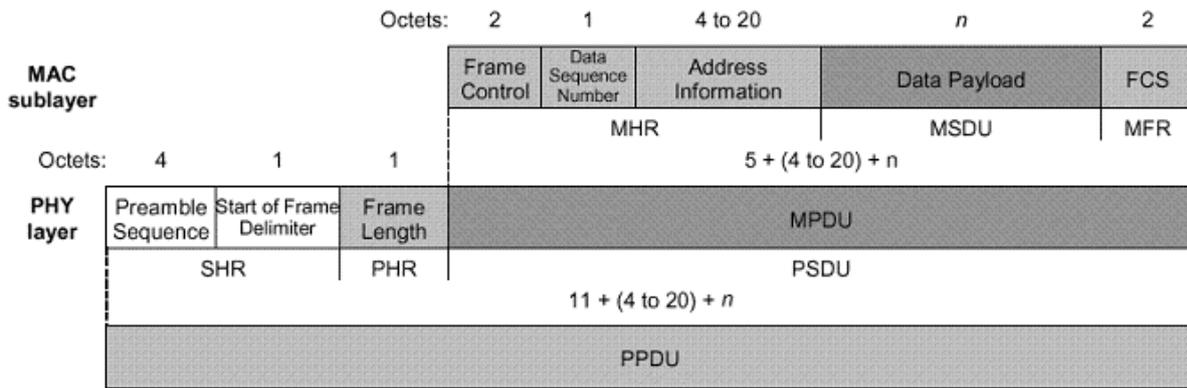


FIGURA 6 - Visão esquemática do data frame (RANJAN, 2013).

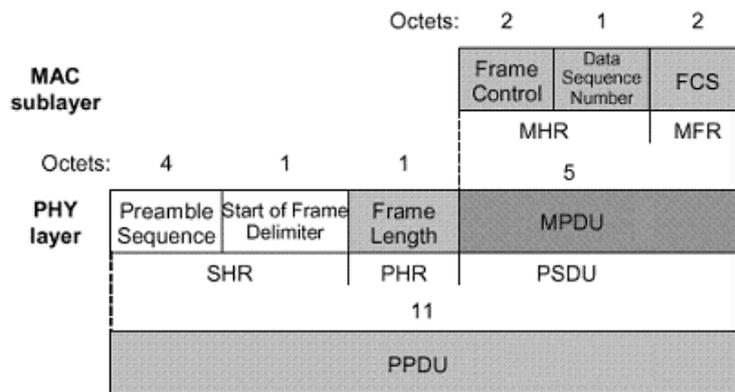


FIGURA 7 - Visão esquemática do acknowledge frame (RANJAN, 2013).

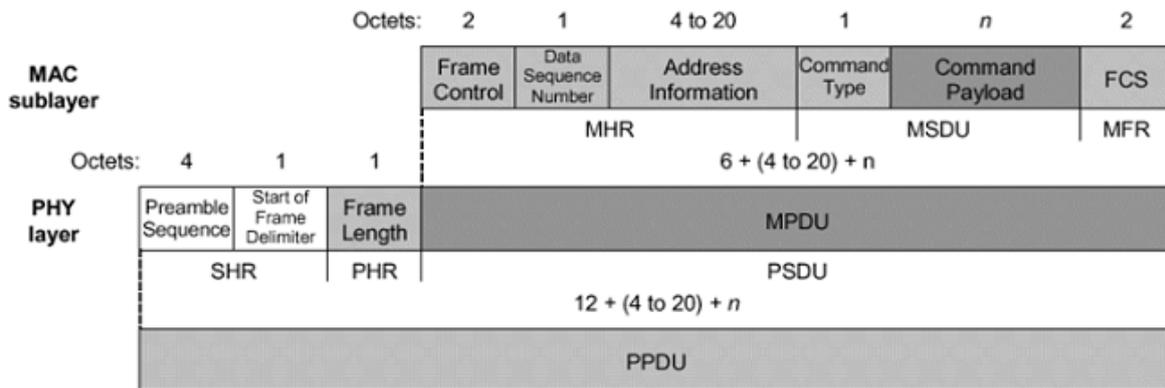


FIGURA 8 - Visão esquemática do MAC Command Frame (RANJAN, 2013).

2.2.4. Segurança

A segurança na camada MAC (Figura 9) protege os frames MAC transmitidos em um único salto na rede. Para saltos múltiplos, a segurança é feita nas camadas superiores: NWK e Aplicações (FRARE, 2009).

A segurança MAC utiliza o algoritmo AES (Advanced Encryption Standard) para criptografar e validar o dado que é enviado. A validação ou

garantia de integridade do dado é feita por MIC (Message Integrity Code).

Caso seja necessário utilizar segurança, um bit do cabeçalho MAC será setado. Com isso, é anexado ao frame o Cabeçalho Auxiliar de Segurança que determina o tipo de proteção utilizado (Security Control), o Contador de Frames (Frame Counter) que garante a sequência e autenticação dos dados e guarda referência da chave (Key Identifier) de 128 bits a ser utilizada para determinado nó.

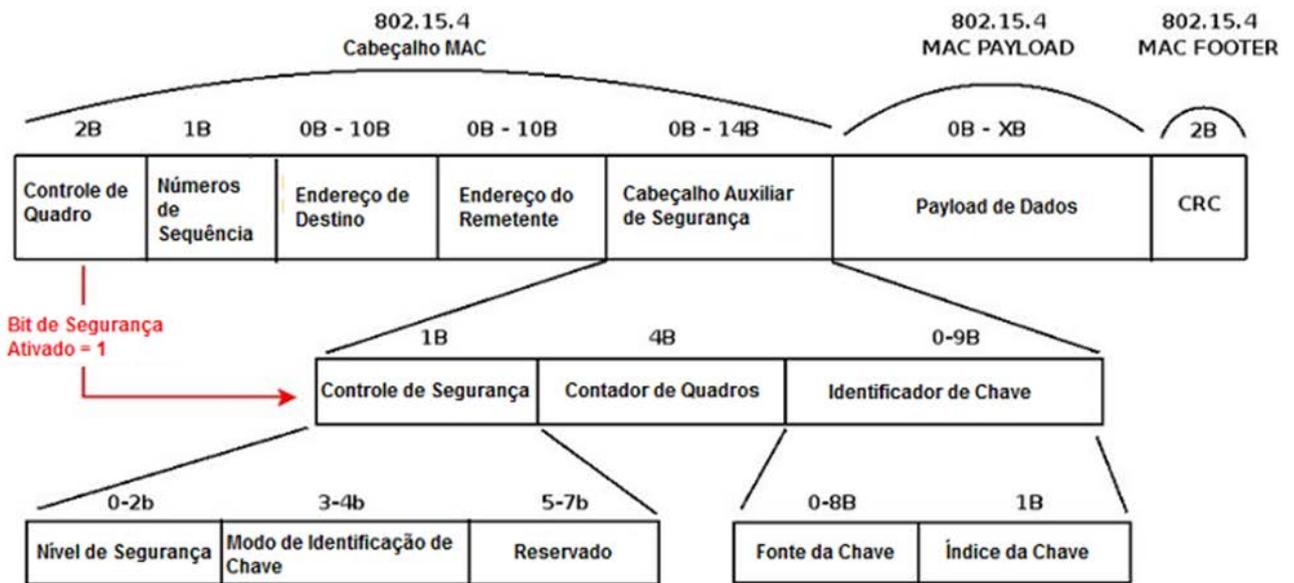


FIGURA 9 - Segurança na camada MAC (FRARE, 2009).

2.2.5. Tipos de Dispositivos

O padrão IEEE define para as redes dois tipos de dispositivos: os de função reduzida (RFD – *Reduced Function Device*), e os de função completa (FFD – *Full Function Device*).

Os dispositivos FFD são aqueles aptos a funcionarem em qualquer um dos modos de operação do padrão: coordenador, roteador ou dispositivo final. Podem se comunicar tanto com outros FFD quanto com dispositivos RFD.

Já os RFD são dispositivos que só podem se comunicar com dispositivos FFD e atuar apenas como *end-pointings* da rede. São dispositivos mais simples e de menor custo, visando um consumo de energia ainda mais reduzido.

De acordo com a disponibilidade de funções do dispositivo (FFD ou RFD) e sua posição na rede, os nós podem ser classificados como: coordenadores, roteadores ou dispositivos finais (Tabela 2).

2.2.5.1. Coordenadores

São os nós iniciais da rede. Um dispositivo ao ser ligado pela primeira vez como coordenador iniciará sua rede selecionando um identificador PAN único no seu raio de influência. Na inicialização, todos os canais da frequência de operação são rastreados até esse PAN ID único ser encontrado. O coordenador opera em estado ativo para efetuar o controle da rede e costuma ser alimentado diretamente reduzindo o risco de falha no nó centralizador da rede.

TABELA 2 – Funções dos dispositivos na camada de rede (AZEVEDO, 2013).

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

2.2.5.2. Roteadores:

São usados em topologias em malha (*mesh*) e *cluster* para dar maior robustez à rede. Possuem tabelas de roteamento e, por serem FFD, permitem encontrar o menor caminho para se chegar ao destino. Caso o roteador não possua o endereço de destino requisitado, este fará o *broadcast* de uma requisição de rota (*route request*) e receberá do destino a rota mais eficaz atualizando sua tabela. Este mecanismo dá à rede a característica de auto-

regeneração caso ocorra a queda das funcionalidades de outros nós roteadores na rede (AZEVEDO, 2013).

2.2.5.3. Dispositivos Finais

São os nós finais das topologias estrela e *cluster*. Por serem dispositivos RFD, não fazem função de roteamento nem coordenam a rede. Eles se comunicam diretamente com o roteador “pai” e podem ser implementados com microcontroladores ainda menores (memória e potência), passando

quase todo o tempo em estado inativo. Um dispositivo RFD é a localização comum de sensores, atuadores e sistemas de controle.

2.2.6. Topologias de Redes

As diferentes funcionalidades dos dispositivos permitem uma variedade de maneiras de se instalar a rede. De acordo com a necessidade da aplicação, uma rede pode ser mais robusta, mais econômica, centralizadora ou distribuída. Essas características determinarão o tipo de topologia a ser empregada.

2.2.6.1. Estrela

Na topologia estrela a conexão é realizada entre os dispositivos e um único coordenador central, que é chamado de coordenador PAN. Quando um FFD for ativado pela primeira vez, ele pode estabelecer sua própria rede e se tornar o coordenador PAN. Cada rede vai funcionar com um identificador PAN,

diferente dos usados por outras redes, que estejam dentro da região de influência das ondas de rádio, permitindo que cada uma das redes opere individualmente.

2.2.6.2. Malha

A topologia em malha (Figura 10), conhecida como *peer-to-peer* ou *mesh*, também tem apenas um coordenador PAN.

Nessa topologia todos os dispositivos podem se comunicar entre si desde que estejam dentro do alcance. Essa topologia pode ser considerada uma rede *ad hoc*, com capacidade de se auto-organizar (*self-organizing*) e de se auto-estruturar (*self-healing*). Essa configuração permite também múltiplos caminhos ligando um dispositivo aos outros dispositivos da rede, de forma a permitir uma maior robustez (DAINTREE NETWORKS, 2013).

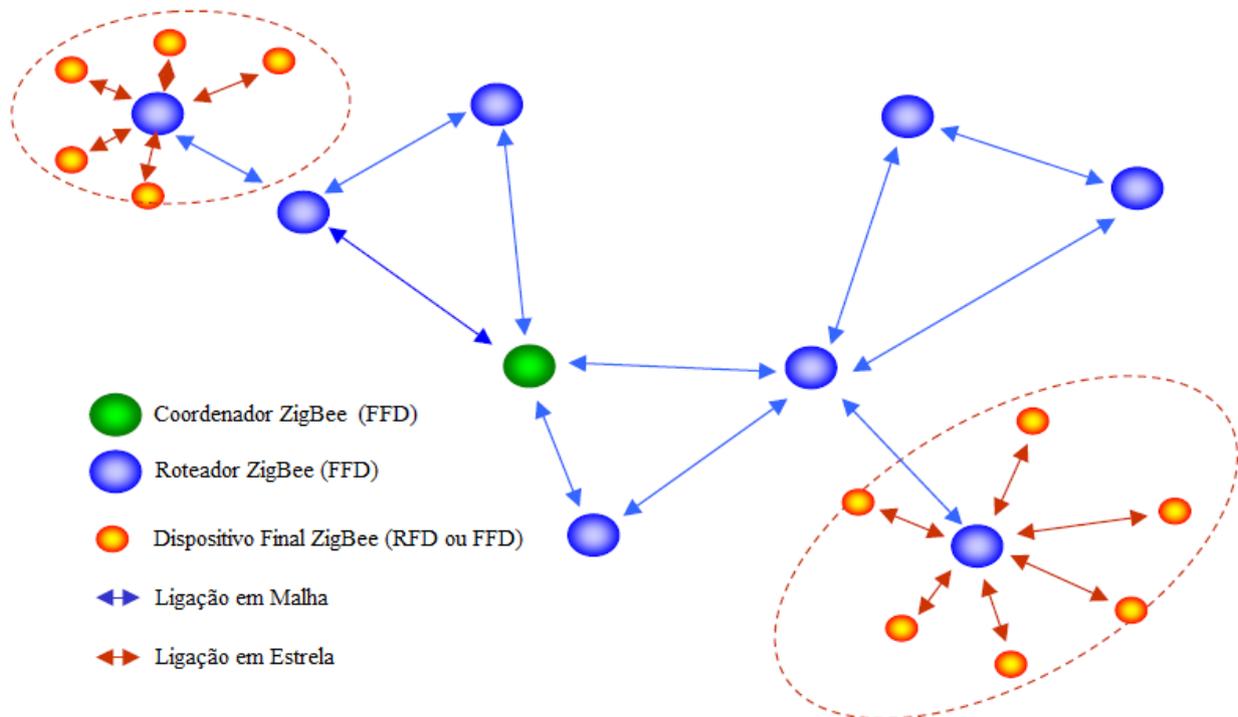


FIGURA 10 - Modelo de rede ZigBee.

2.2.6.3. Árvore

Essa topologia é um aglomerado de redes com topologia malha, ligados por um coordenador PAN, que ficará responsável pela rede. O coordenador PAN fará o *broadcast* do *beacon frame*, anunciando a existência da rede.

Os dispositivos recém adicionados irão se estabelecer, e, assim como seus “pais”, enviarão *beacon frames* buscando novos candidatos a se juntarem a rede.

A principal vantagem dessa estrutura em árvore é aumentar a área de cobertura, ao custo de aumentar o atraso da mensagem.

3. REDES ZIGBEE

O nome ZigBee foi criado a partir da analogia entre o funcionamento de uma rede em malha, e o modo como as abelhas trabalham e se locomovem.

As abelhas que vivem em colméia voam em Zig ... Zag, e dessa forma, durante um vôo a trabalho em busca de néctar, trocam informações com outros membros da colméia sobre distância, direção e localização de onde encontrar alimentos (DAINTREE NETWORKS, 2013).

Uma malha ZigBee dispõe de vários caminhos possíveis entre cada nó da rede para a passagem da informação, assim, é possível eliminar falhas se um

nó estiver inoperante, simplesmente mudando o percurso da informação.

A versão proprietária do ZigBee foi criada para ser utilizada em conjunto com o IEEE 802.15.4. Muitas vezes ambos são confundidos ou descritos como um só padrão, o que, conceitualmente, não corresponde à realidade. O ZigBee implementa as camadas de rede (Figura 11), não presentes no IEEE 802.15.4.

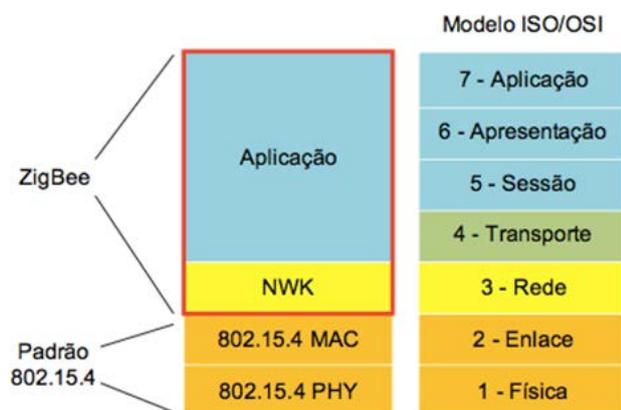


FIGURA 11 - Comparação entre o padrão ZigBee e o modelo ISO/OSI.

3.1. Camada de Rede

A camada de rede é necessária para prover funcionalidade, garantir a correta operação da subcamada IEEE 802.15.4 MAC e oferecer uma interface de serviço para a camada de aplicação. O protocolo define duas entidades de serviços que fornece a interface com a camada de aplicação:

3.1.1. Network Layer Data Entity (NLDE):

O NLDE oferece serviços de dados permitindo à aplicação transportar unidades de dados do protocolo de comunicação (APDU) entre dois ou mais dispositivos:

- **geração do PDU em nível de rede (NPDU):** Gera um NPDU a partir do PDU da subcamada de apoio a aplicação adicionando um cabeçalho apropriado;
- **roteamento específico da topologia:** Transmite um NPDU para um dispositivo destino final da comunicação ou o próximo passo ao destino na camada de cadeia;
- **segurança:** Permite a habilidade de garantir a autenticação e confidencialidade da transmissão.

3.1.2. Network Layer Management Entity (NLME)

O NLME gerencia serviços permitindo uma iteração da aplicação com a pilha, através dos seguintes serviços:

- **configurar um novo dispositivo:** Permite configurar a pilha de operações de forma que apenas o coordenador ZigBee pode iniciar uma nova operação ou juntar-se a uma rede existente;
- **iniciar uma rede:** Estabelece uma nova rede;
- **entrar, reentrar e sair de uma rede:** Apenas o coordenador e o roteador ZigBee pode entrar, reentrar e sair de uma rede;
- **endereçamento:** Permite que o coordenador e o roteador ZigBee atribuam endereços para os dispositivos que entram na rede;
- **descoberta de vizinhos:** Permite descobrir, gravar e reportar informações sobre o vizinho a um salto de um dispositivo;
- **descoberta de rotas:** Descobre e reporta os caminhos através da rede de forma que as mensagens podem ser eficientemente roteadas;
- **controle de recepção:** Permite controlar quando e por quanto tempo um dispositivo é ativo, habilitando a sincronização da subcamada MAC ou recepção direta;
- **roteamento:** Permite utilizar diferentes mecanismos de roteamento tais como: *unicast*, *broadcast*, *multicast* ou muitos outros para troca de dados eficientemente na rede.

3.2. Aplicações das redes ZigBee

Existem diversas aplicações (Figura 12) que podem se aproveitar das características do ZigBee. Aplicações que necessitem de longa duração das baterias, baixo custo, pequenos circuitos, suporte à topologia malha, e possa pagar o custo de uma baixa taxa de transferência, poderá se valer das características do ZigBee para ser implementada (ZIGBEE, 2013).

O ZigBee é de grande valia em situações como (ROGERCON, 2013):

- ambiente já existente, o qual não é cabeado;
- a rede é necessária para medidas e experimentos temporários;
- quando baixo custo de manutenção for uma das principais preocupações do projeto.



FIGURA 12 – Setores de aplicação da tecnologia ZigBee. Adaptado de Rogercom (2013).

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A partir das informações apresentadas, pode-se afirmar que as redes com tecnologia ZigBee apresentam características importantes como: longa duração das baterias devido ao baixo consumo e pequenos circuitos.

Qualquer aplicação que tenha essas características como um dos fatores críticos do projeto, pode se aproveitar do Zigbee para sua execução.

Apesar de não ser recente, o protocolo ainda é pouco documentado, o que pode ser uma desvantagem na sua utilização.

Comparada a outras redes sem fio, o custo não é muito sedutor, porém seu uso é muito interessante em redes particulares como edifícios, empresas, hospitais e universidades.

Em redes sem fio para sistemas de controle e automação o ZigBee é uma opção bem conveniente. Ele apresenta bom potencial para trabalhos acadêmicos e de pesquisa por possuir excelentes propostas, mas a tecnologia ainda não está totalmente desenvolvida. Além disto, a rede ZigBee se mostra adaptável a vários tipos de aplicação e proporciona maior comodidade às pessoas, otimizando a rotina de cada indivíduo.

Ainda há características a serem melhoradas, tais como diminuição do consumo de energia, aumento da segurança, aumento da confiabilidade e integridade dos dados.

REFERÊNCIAS

- AZEVEDO, T. **Roteamento ZigBee**. Disponível em <<http://www.gta.ufrj.br/ensino/CPE825/2006/resumos/TrabalhoZigbee.pdf>>. Acessado em 03 dez. 2013.
- DAINTREE NETWORKS. *What's so good about mesh networks?* Disponível em <<http://backup.daintree.net/downloads/whitepapers/mesh-networking.pdf>>. Acessado em 03 dez. 2013.
- ERGEN, S. C. *ZigBee/IEEE 802.15.4 Summary*. 2004.
- FRARE, B.P.; XAVIER, M. F. **Aplicação do ZigBee na Segurança**, 2009.
- KINNEY, P. *ZigBee Technology: Wireless Control that Simply Works*, 2003.
- MARÇAL, I.S. **Bluetooth e Zigbee Padrões para Redes Pessoais Sem Fio**, 2008.
- RANJAN, A. *Wireless Communication using Zigbee*. Disponível em <<http://intranet.daiict.ac.in/~ranjan/sn/presentations/Wireless%20Communication%20using%20Zigbee.pdf>>. Acessado em 03 dez. 2013.
- ROGERCON. Disponível em <<http://www.rogercom.com/ZigBee/ZigBee.htm>>. Acessado em 03 dez. 2013.
- ZIGBEE. Disponível em <<http://www.zigbee.org/>>. Acessado em 03 dez. 2013.