

## 2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

### 2.1. Protocolo ZigBee

ZigBee é nome de uma tecnologia de transmissão de dados sem fio, desenvolvida sob padrões de endereçamento com o objetivo de criar redes de baixo custo e baixo consumo para comunicação de dispositivos alimentados por baterias com autonomia por anos de uso. Este padrão possui todas as vantagens e características físicas do padrão IEEE (*Institute of Electric and Electronic Engineers*) 802.15.4 somadas a funcionalidades de rede, operando em bandas livres de licença como 2.400-2.484 GHz (Global), 902-928 MHz (América) e 868,0-868,6 MHz (Europa).

O protocolo ZigBee foi desenvolvido por volta do ano de 2002 pela *ZigBee Alliance*, um consórcio criado por líderes de fabricação de semicondutores, integradores e usuários finais de tecnologia, criado e projetado para transmitir dados através de ambientes de rádio frequência hostis geralmente encontrados em aplicações industriais e comerciais com as seguintes características:

- Baixo consumo de energia elétrica;
- Suporte de diversas topologias de rede: estática, dinâmica, estrela ou *mesh*;
- Espalhamento Espectral em Seqüência Direta (*DSSS*);
- Capacidade de até 65.000 nós em uma rede;
- Encriptação de dados AES 128-bit (*Advanced Encryption Algorithm*) que garante segurança na comunicação entre dispositivos;
- Prevenção de colisão de pacotes de dados;
- Re-tentativas de transmissão e confirmações de recebimento de pacotes de dados.

Com relação aos protocolos de comunicação similares ao ZigBee, podemos citar as principais diferenças entre estes na Tabela 1 a seguir:

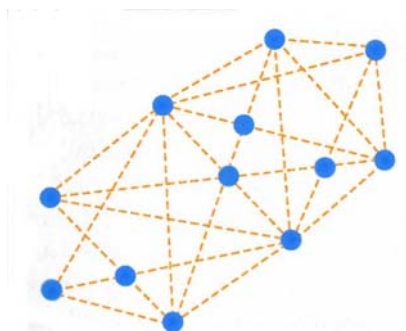
**TABELA 1 – Padrões de Comunicação IEEE**

Norma IEEE (nome de mercado)	802.15.4 (ZigBee)	802.11b (Wi-Fi)	802.15.1 (Bluetooth)
Aplicação principal	Controle e monitoração	Internet, e-mail, multimídia	Eliminar fiação atual
Frequência de operação	2,4 GHz	2,4 GHz	2,4 GHz
Taxa de comunicação (kbps)	20 – 250	11.000	1.000 – 3.000
Distâncias alcançadas com visada direta (m)	30 – 70, 100+ (com amplificador externo)	100+ (antenas direcionais)	30 (Classe 2) 100+ (Classe 1)
Número de nós em uma rede	65.000	32	7
Autonomia da bateria (dias)	100-1000+	0,5 – 5	1 –7
Consumo na transmissão	30 mA	300 mA	45mA (Classe 2) <150mA (Classe 1)
Conveniência para controle e supervisão em aplicações industriais	Boa (Bom compromisso entre taxa e custo de conexão)	Baixa (Taxa alta, mas conexão inicial lenta)	Baixa (Boa média mas conexão inicial lenta)
Tecnologia de espalhamento espectral	DSSS	DSSS	FHSS
Tamanho do Firmware	40	70+	50+
Vantagens relativas	Potência, custo	Velocidade, Flexibilidade	Custo, Flexibilidade

A principal componente do protocolo ZigBee é a habilidade suportar redes *mesh*. O que caracteriza essas redes é a capacidade que seus nós possuem de redirecionar os

pacotes de informação por diferentes caminhos pela rede, passando por outros nós, até atingirem seu destino. Se um determinado caminho (canal ou nó) é interrompido ou perde a qualidade, a rede automaticamente procura um novo caminho (canal ou nó), mais adequado para manter o tráfego.

Um nó da rede *Mesh* pode ter apenas a função de comunicação, ou ainda, ter suas funcionalidades particulares além de retransmitir os sinais dos seus nós vizinhos. A Figura 1 mostra o modelo conceitual de comunicação entre os nós de uma rede *Mesh*.



**FIGURA 1** – Rede “Mesh”

Dentre as diversas possibilidades de aplicações de monitoramento e controle utilizando o protocolo ZigBee, destacam-se: controle de luminosidade, detectores de fumaça, telemetria, controle de temperatura, segurança doméstica, controles ambientais, automação predial, etc.

### 2.1.1. Tipos de nós

O padrão IEEE 802.15.4 define dois tipos de dispositivos conforme a Tabela 2.

**TABELA 2** – Tipos de dispositivos segundo a IEEE 802.15.4

Tipos de dispositivo	Funcionalidades oferecidas disponíveis no protocolo	Fonte de alimentação típica	Configuração típica do receptor
<i>Full Function Device (FFD)</i>	A maioria ou todas	Principal	Ligado quando em espera
<i>Reduced Function Device (RFD)</i>	Limitada	Bateria	Desligado quando em espera

O protocolo ZigBee define três tipos de dispositivos de acordo com as funcionalidades oferecidas e consumo de energia:

### Coordenador (*Coordinator*)

Também chamado de ZC (*ZigBee Coordinator*), é o único FFD responsável pela formação de uma rede ZigBee, fato que lhe confere presença obrigatória em todas as redes. O Coordenador estabelece um canal de operação e o número lógico para formar a rede. Uma vez estabelecido estes parâmetros, o coordenador pode formar uma rede permitindo que roteadores e dispositivos finais se integrem a esta. Após a formação da rede, o coordenador funciona como um roteador, podendo participar no redirecionamento de pacotes de dados e ser uma fonte ou destino de pacotes de dados.

### Roteador (*Router*)

O roteador ou ZR (*ZigBee Router*), é um nó FFD que cria e/ou mantém as informações da rede e a utiliza para determinar a melhor rota para um pacote de dados. Os roteadores podem participar no redirecionamento de pacotes de dados e devem se integrar à rede antes de permitir que outros roteadores e dispositivos finais se integrem a ele.

### Dispositivo Final (*End Device*)

Um dispositivo final ou ZEB (*ZigBee End Device*) é classificado como um RFD e deve sempre interagir com o seu nó pai (ou um roteador ou um coordenador) na rede para receber ou transmitir dados podendo ser uma fonte ou destino de dados, porém, não possuindo a capacidade de redirecionamento de informações.

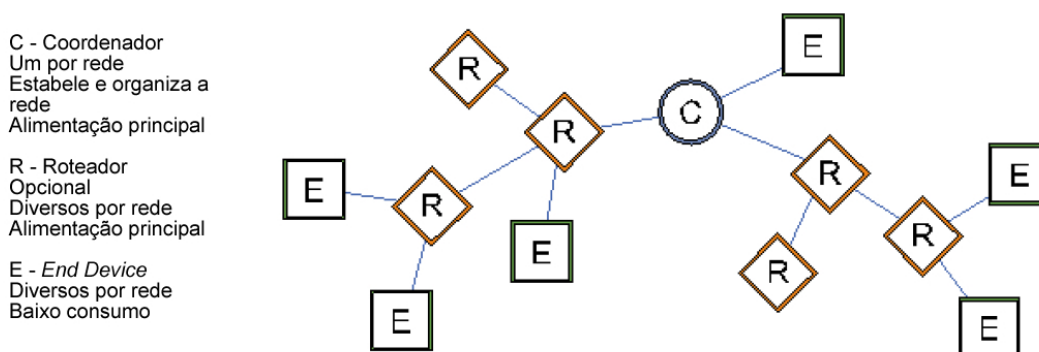


FIGURA 2 – Exemplo de rede ZigBee

#### 2.1.2. Formação da Rede ZigBee

A formação de uma nova rede ZigBee, também chamada de PAN (*Personal Area Network*) consiste em um coordenador e um mais roteadores e/ou dispositivos finais e é iniciada através de uma primitiva da camada de rede que é restrita ao coordenador ZigBee que não pertence a nenhuma rede. Para iniciar uma rede, um coordenador ZigBee procura por um conjunto de canais de frequência. Quando esta procura se completa, os canais são

ordenados em ordem decrescente de níveis de energia (os canais de níveis mais baixos são descartados).

O coordenador então procura em cada canal por dispositivos ou redes ZigBee. Baseado neste resultado, o coordenador escolhe o melhor canal para criar uma nova rede, dando preferência para canais nos quais não foram encontradas outras redes. Então o coordenador escolhe um identificador de rede lógico (*PAN ID* – Identificador da rede) que será atribuído a todo dispositivo que ingressar na rede. Finalmente o coordenador permite outros dispositivos ingressarem na rede.

Como parte do processo de ingressar em uma rede, cada dispositivo recebe um endereço de rede lógico de 16 bits. Em redes ZigBee, os endereços de rede são atribuídos ou por um coordenador ou por um roteador, usando um algoritmo de árvore estruturada.

Quando um roteador é inicializado pela primeira vez, este localiza e se junta a uma rede ZigBee. Para fazer isso, este emite um comando de requisição denominado *802.15.4 beacon request* em múltiplos canais para localizar as redes mais próximas. Roteadores e coordenadores próximos que já se integraram a uma rede respondem à requisição com uma outra *beacon request*, indicando qual canal e PAN ID estão operando. O roteador escuta todos os canais aguardando uma resposta. Se uma rede válida é encontrada, o roteador emite uma requisição de integração (*joining request*) para o dispositivo que respondeu à sua solicitação. Se a integração é inicializada, o roteador irá receber uma confirmação de integração deste dispositivo, indicando que a integração está completa.

Uma vez que o roteador se juntou à rede, este pode se comunicar com outros dispositivos da rede e permitir que outros dispositivos se juntem a esta. Esta junção estabelece uma relação pai/filho entre dois nós da rede. O nó que permitiu a junção/integração é o pai e o nó que foi incorporado à rede é denominado filho.

Dispositivos finais seguem o mesmo processo dos roteadores para se integrar a uma rede. Uma vez que o dispositivo final se integrou com sucesso a uma rede, este pode comunicar-se com outros dispositivos da rede. Entretanto, uma vez que dispositivos finais não podem redirecionar dados, eles devem sempre se comunicar diretamente com seus pais e permitir que estes redirecionem os dados para si.

No mais alto nível da estrutura (no dispositivo coordenador) da rede está definida uma entidade conhecida como "*stack profile*". O *stack profile* é um conjunto de parâmetros que incluem definições da profundidade máxima da rede, o número máximo de filhos roteadores em uma profundidade e o número máximo de filhos (dispositivos finais) que podem comunicar-se com um roteador individual. Estes parâmetros determinam a forma da árvore da rede. Por exemplo, a profundidade da rede determina o número máximo de saltos entre qualquer dispositivo e o coordenador de rede.

O algoritmo de roteamento ZigBee utiliza uma métrica de cálculo de custo de caminho para comparação de rota durante a descoberta e manutenção de rotas. Para computar esta métrica, um custo de enlace, é associado a cada enlace no caminho entre fonte e destino, e estes valores são somados para produzir o custo do caminho inteiro. Este procedimento de descoberta de rota é baseado no protocolo de roteamento AODV (*Ad hoc On Demand Distance Vector*) e é utilizado caso o roteador não esteja diretamente ligado ao dispositivo de destino, mas possui “capacidade de roteamento”.

### **2.1.3. Endereçamento de dispositivos**

O protocolo 802.15.4, o qual o protocolo ZigBee é baseado, especifica dois tipos de endereços:

- Endereços de rede de 16 bits (*16-bit network addresses*)

É atribuído a um nó quando se integra à rede e é único para cada nó na rede. Entretanto, podem se alterar devido às seguintes condições:

1. Se um dispositivo final não pode se comunicar com o seu pai e deve deixar a rede e se reintegrar para encontrar um novo pai.
2. Se o tipo de dispositivo é alterado de roteador para dispositivo final, ou vice-versa, o dispositivo irá deixar a rede e se reintegrar como um novo dispositivo.

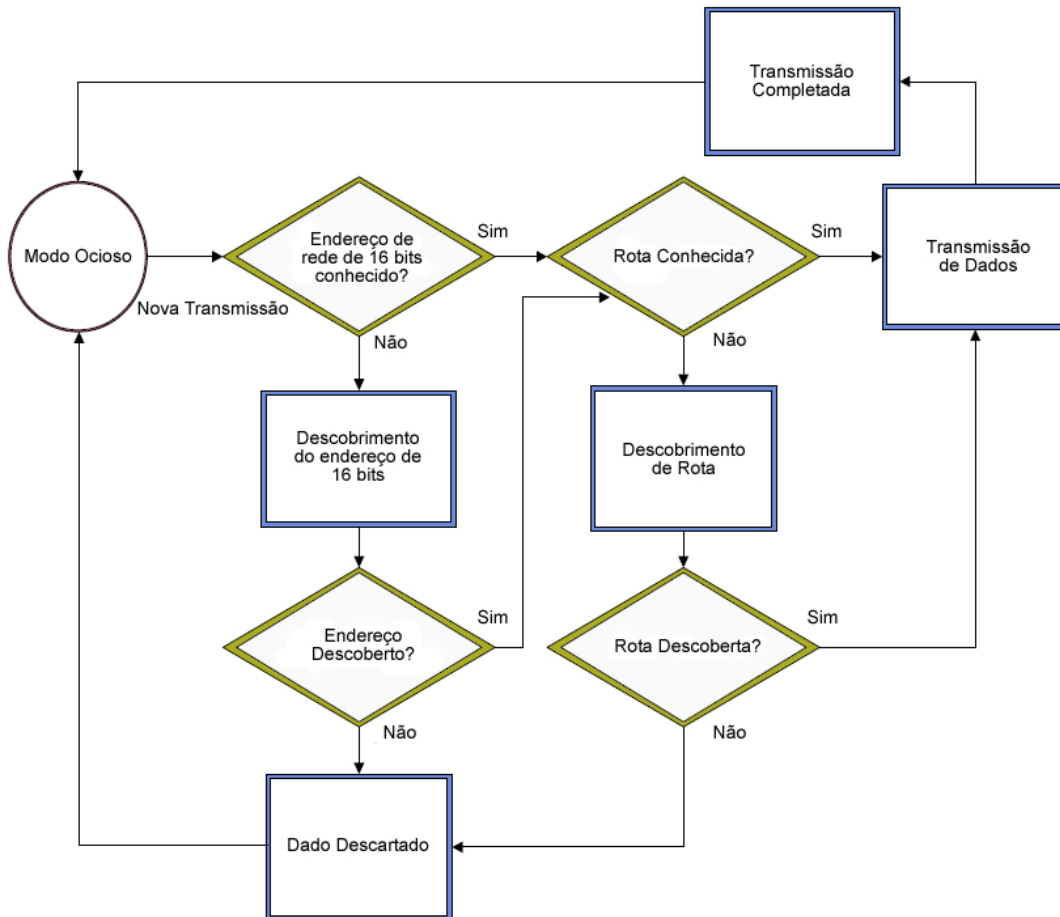
- Endereços de 64 bits (*64-bit Addresses*)

Cada nó contém um endereço único de 64 bits que o identifica na rede e é permanente.

### **2.1.4. Modo de Transmissão**

Quando um dado é enviado ao módulo RF (radiofrequência) que contém o protocolo ZigBee, este módulo sai do modo ocioso (*Idle Mode*) para iniciar a transmissão de dados. O endereço de destino determina qual nó receberá a informação.

Antes que inicie a transmissão, o módulo certifica-se que o endereço de 16 bits e a rota para nó de destino tenha se estabelecido. Caso este endereço de destino ou a rota não seja conhecido, procedimentos de descoberta de endereço ou rota respectivamente são acionados. Caso, ainda assim, o endereço ou a rota não seja descoberto, o pacote de dados é descartado.



**FIGURA 3** – *Modo de transmissão em uma rede ZigBee*