

CPE 825 - Roteamento em Redes de Computadores  
Programa de Engenharia de Sistemas e Computação  
Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia  
Universidade Federal do Rio de Janeiro

# **Roteamento ZigBee**

Por Tiago Azevedo

## 1 - Especificação ZigBee

**ZigBee** é o nome da especificação para uma suíte de protocolos de comunicação utilizados por rádios digitais pequenos e de baixa potência, baseados no padrão IEEE 802.15.4 para “wireless personal area networks” (WPANs).

Os rádios ZigBee operam nas faixas de frequência de 868 MHz na Europa, 915 MHz nos Estados Unidos e 2.4 GHz em outros lugares do mundo, com taxa de dados que variam de 20Kbps a 250 Kbps.

### 2.1 - Dispositivos ZigBee

A especificação ZigBee define três tipos diferentes de dispositivos, com funções variadas:

- **ZigBee coordinator (Coordenador ZigBee - ZC):**

Existe exatamente um coordenador ZigBee em cada rede. Este dispositivo agrega o maior número de funções, por exemplo, o coordenador é capaz de criar uma rede tornando-se a raiz da árvore dessa rede, sendo portanto, o único dispositivo capaz de comutar dados entre redes.

Além disso, o coordenador é capaz de armazenar informação sobre a rede como por exemplo um repositório de chaves seguras e determinar parâmetros como o número máximo de filhos ( $C_m$ ) de um roteador ZigBee, o número máximo de roteadores filhos ( $R_m$ ) de um nó pai, a profundidade da rede ( $L_m$ ).

A partir desses parâmetros, os dispositivos roteadores podem computar um parâmetro denominado  $C_{skip}$ , que é utilizado para computar o tamanho do “pool” de endereços de filhos. Este parâmetro é calculado pela seguinte fórmula:

$$C_{skip}(d) = \begin{cases} 1 + C_m \cdot (L_m - d - 1), & \text{se } R_m = 1 \quad \dots\dots\dots(a) \\ \frac{1 + C_m - R_m - C_m \cdot R_m^{L_m - d - 1}}{1 - R_m}, & \text{Caso contrário} \quad \dots\dots\dots(b) \end{cases}$$

- **ZigBee Router (Roteador ZigBee - ZR):**

Os dispositivos roteadores agem como um roteador intermediário, roteando dados para outros dispositivos.

- **ZigBee End Device (Dispositivo final ZigBee - ZED):**

Contêm funções apenas para trocar informações com seu nó pai (ou um roteador ou um coordenador); não podendo encaminhar dados para outros dispositivos. Como requer menos memória, pois não precisa armazenar informações de roteamento, é mais barato que um roteador ou um coordenador ZigBee.

| ZigBee Coordinator (ZC) | ZigBee Router (ZR) | ZigBee End Device (ZED) | ZigBee Network Layer Function          |
|-------------------------|--------------------|-------------------------|--|
| •                       |                    |                         | Establish a new ZigBee network         |
| •                       | •                  |                         | Assign logical network addresses       |
| •                       | •                  |                         | Permit other devices to join/leave     |
| •                       | •                  |                         | Maintain lists of neighbors and routes |
| •                       | •                  |                         | Route network-layer packets            |
| •                       | •                  | •                       | Transfer network-layer packets         |
| •                       | •                  | •                       | Join/leave a ZigBee network            |

Figura 1 - Tipos de dispositivos e suas Funções

## 2.2 - Topologias de Redes ZigBee

A camada de rede ZigBee suporta três topologias de redes: estrela, árvore, e malha.

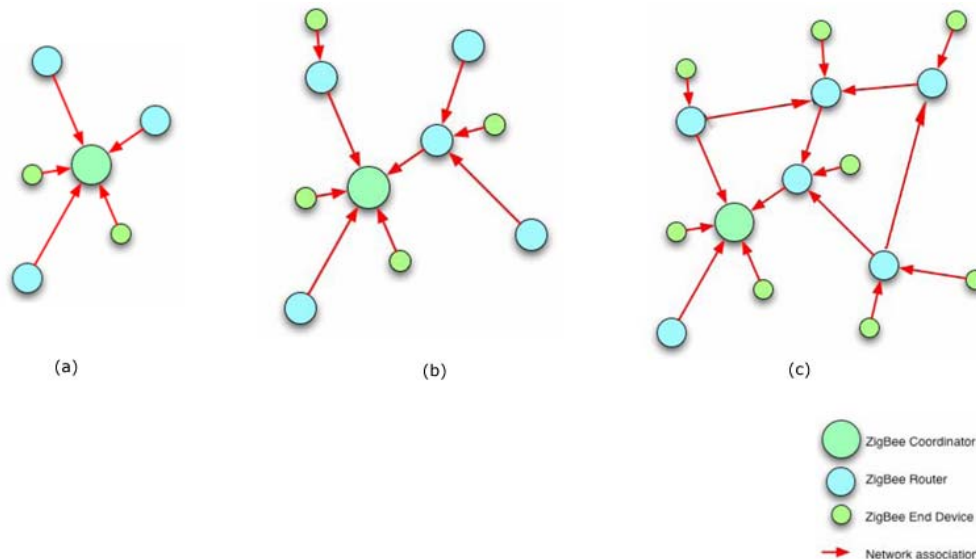


Figura 2 - Topologias em estrela(a) , árvore(b) e malha (c)

## 2.3 - Formação da rede ZigBee

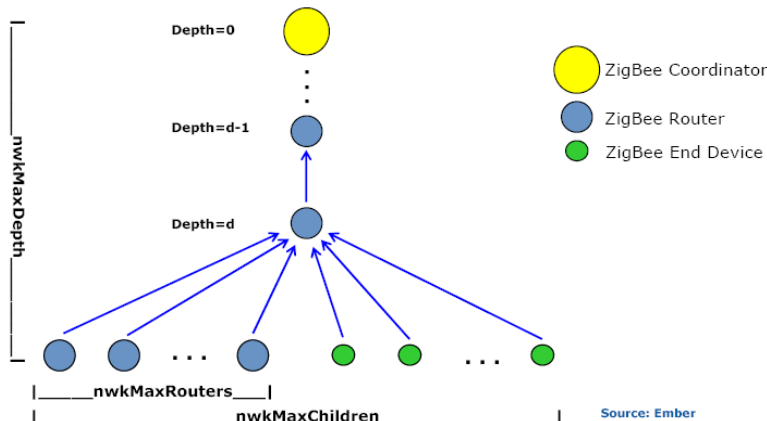
A formação de uma nova rede ZigBee é iniciada através de uma primitiva da camada de rede que é restrita ao coordenador ZigBee que não pertence a nenhuma rede. Para iniciar uma rede, um coordenador ZigBee procura por um conjunto de canais. Quando esta procura se completa, os canais são ordenados em ordem 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 (um número) que será atribuído a todo dispositivo que ingressar na rede. Finalmente o coordenador permite outros dispositivos ingressarem na rede.

### 2.3.1 - Atribuição de Endereços

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

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.



**Figura 3 - Árvore lógica de uma rede ZigBee**

Estes atributos da árvore lógica podem ser usados para computar o endereço lógico e determinar o lugar de um dispositivo na árvore. Isto simplifica a tarefa de roteamento na árvore. Como opção, a especificação ZigBee também permite que a atribuição de endereços seja realizada pela aplicação. A atribuição de endereços é feita da seguinte forma:

Se um nó pai (roteador ou coordenador) na profundidade  $d$  tem um endereço  $A_{parent}$ , então:

- ao  $n^{\text{th}}$  roteador filho é atribuído o endereço:  $A_{parent} + (n - 1) \times C_{skip}(d) + 1$
- ao  $n^{\text{th}}$  dispositivo final filho, é atribuído o endereço:  $A_{parent} + Rm \times C_{skip}(d) + n$

### 3 - O Roteamento ZigBee

O roteamento segue o procedimento da figura abaixo. É importante notar que o roteamento ZigBee executa dois roteamentos distintos, roteamento hierárquico, caso o roteador não tenha "capacidade de roteamento" e roteamento sob demanda (semelhante ao AODV). Estes procedimentos intermediários entre outros, como processo de inundação serão abordados nas seções seguintes:



Figura 4 - Roteamento ZigBee

### 3.1 - Procedimento de Inundação

Qualquer dispositivo dentro da rede pode iniciar uma transmissão broadcast para todos os outros dispositivos que fazem parte da mesma rede. A especificação ZigBee não suporta broadcast entre várias redes.

Cada dispositivo mantém um registro que qualquer nova transação broadcast que se iniciou localmente, ou foi recebida de um dispositivo vizinho. Este registro é chamado de registro de transação broadcast (broadcast transaction record - BTR) e deve conter o número de seqüência e o endereço fonte do frame de broadcast. Os registros de transação broadcast são armazenados na tabela de transações broadcast (broadcast transaction table - BTT).

Quando um dispositivo recebe um frame de broadcast de um vizinho, ele deve comparar o número de seqüência e o endereço fonte com seus registros na BTT. Se o

dispositivo tem uma BTR para este frame, ele deve atualizar a BTR marcando o registro como já encaminhado e depois deve descartar o frame. Se nenhum registro é encontrado, o dispositivo cria um novo registro na BTT. Se o campo "radius" é maior que zero o dispositivo decrementa este campo e retransmite o frame, caso contrário o frame é descartado. Antes de retransmitir o dispositivo espera por um tempo aleatório.

### 3.2 - Cálculo do Custo do Enlace

O algoritmo de roteamento ZigBee utilize uma métrica 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.

Mais formalmente, se definirmos um caminho P de tamanho L, como um conjunto ordenado de dispositivos  $[D_1, D_2, \dots, D_L]$  e enlaces  $[D_i, D_{i+1}]$  como um sub caminho de tamanho 2, então o custo total do caminho será:

$$C\{P\} = \sum_{i=1}^{L-1} C\{[D_i, D_{i+1}]\}$$

onde cada um dos valores  $C\{[D_i, D_{i+1}]\}$  é denominado custo do enlace. O custo do enlace  $C\{l\}$  para o enlace L varia no intervalo de  $[0,7]$  e é definido por:

$$C\{l\} = \begin{cases} 7, \\ \min\left(7, \text{round}\left(\frac{1}{P_l^4}\right)\right) \end{cases}$$

onde  $P_l$  é a probabilidade da entrega com sucesso de um pacote no enlace.

### 3.3 - Capacidade de Roteamento

Um dispositivo tem capacidade de tabela de rota se:

- é um coordenador ou roteador ZigBee;
- possui uma tabela de rotas;
- possui registro livre em sua tabela de rota ou um registro correspondente ao endereço destino na tabela de rotas;

Um dispositivo tem capacidade de tabela de descoberta de rota se:

- possui uma tabela de descoberta de rota
- possui um registro livre em sua has a free entry in its route discovery table.

Se um dispositivo tem ambos, capacidade de tabela de descoberta de rota e capacidade de tabela de rota então dizemos que ele possui Capacidade de Roteamento.

### 3.4 - Roteamento em Árvore ou Roteamento Hierárquico

Caso o dispositivo roteador ZigBee não tenha "capacidade de roteamento", ele irá rotear os frames segundo o procedimento: um dispositivo roteador com endereço An em uma profundidade d, se a seguinte expressão lógica é verdadeira, então o endereço de destino D é um descendente deste roteador:

$$A < D < A + Cskip(d-1)$$

Se for determinado que o destino é um descendente do dispositivo que recebeu o frame, o endereço N do próximo salto é dado por:  $N = D$  para dispositivos finais ZigBee onde

$$D > A + Rm \times Cskip(d) \quad e \quad N = A + 1 + \left\lfloor \frac{D - (A + 1)}{Cskip(d)} \right\rfloor \times Cskip(d) \quad \text{caso contrário.}$$

### 3.5 - Descoberta de rota (Roteamento sob Demanda)

Este procedimento de descoberta de rota é baseado no roteamento AODV (Ad hoc On Demand Distance Vector) e é utilizado caso o roteador não esteja diretamente ligado ao dispositivo destino, mas possui "capacidade de roteamento".

Se o dispositivo não tem um registro na tabela de rotas para o destino, ele deve estabelecer um registro na tabela com o campo "status" igual a constante DISCOVERY\_UNDERWAY. Depois ele enviará um frame com o comando de descoberta de rota em broadcast. Cada dispositivo que emite um frame de requisição de rota deve manter um contador usado para gerar identificadores destas requisições.

O procedimento de recepção de um frame de requisição de rota pode ser visto na figura abaixo:

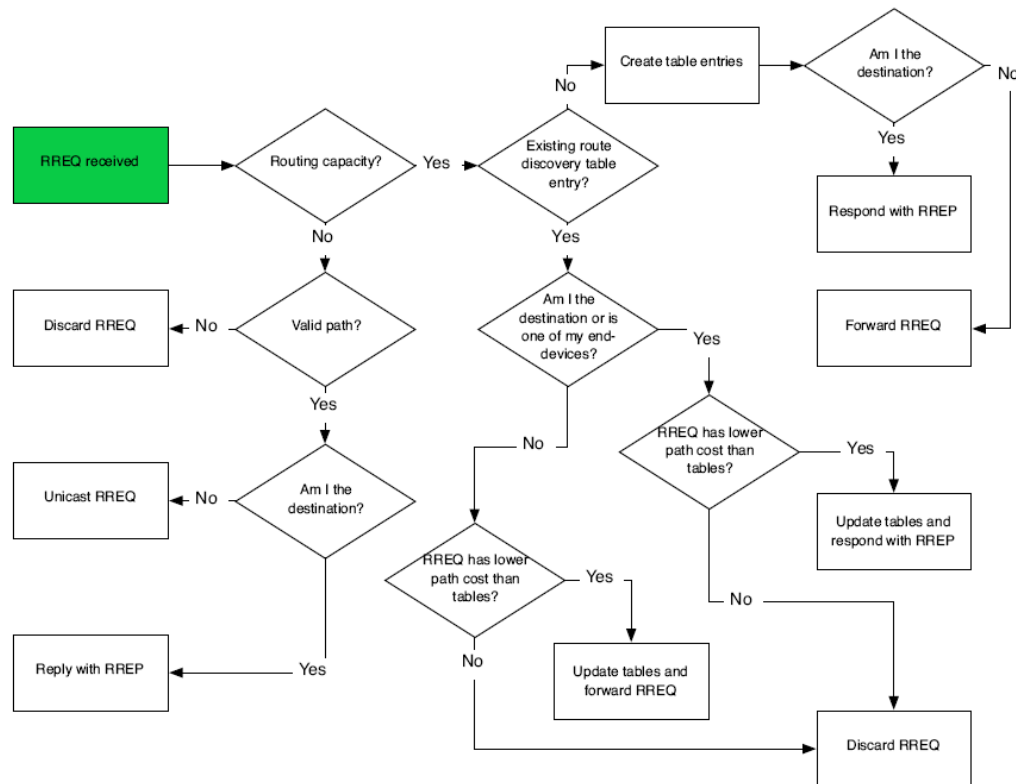
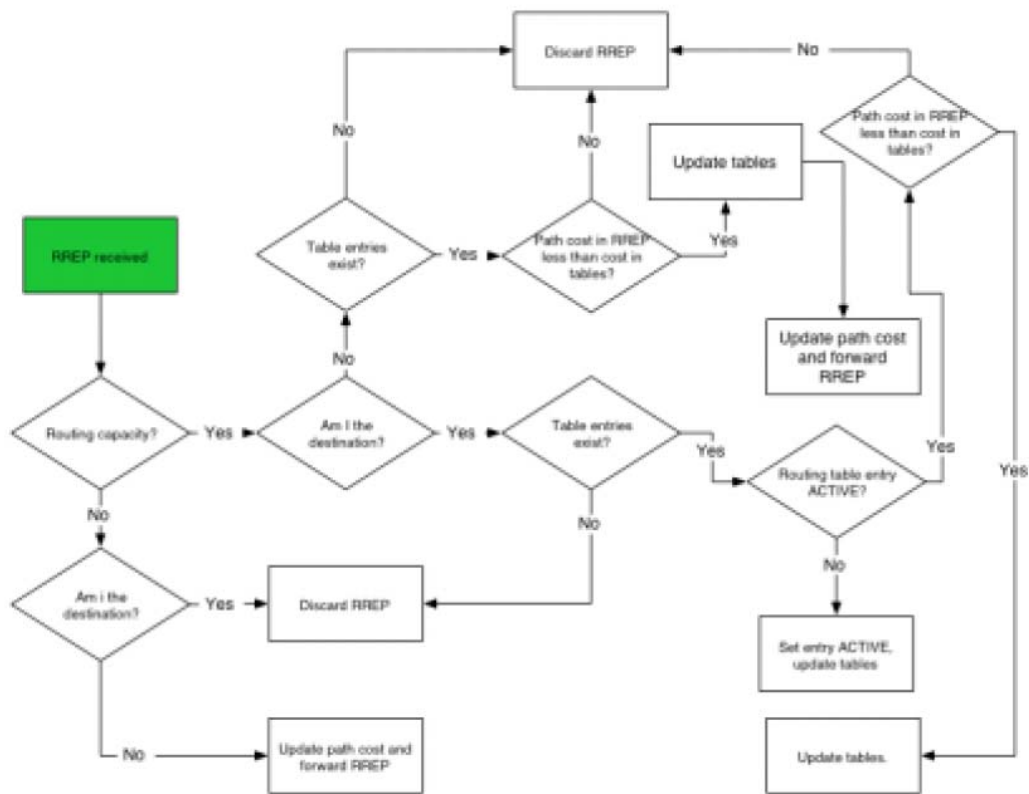


Figura 5 - Procedimento de recepção de uma requisição de rota

Podemos ver pela figura que um dispositivo ao receber uma requisição de um de seus vizinhos, pode eventualmente responder a esta requisição, com um frame de

resposta de requisição (Request Replay - RREP). A recepção destes frames de resposta de requisição segue o procedimento apresentado na figura abaixo:



**Figura 6 - Procedimento de recepção de um frame de resposta de requisição**

É importante notar que se um dispositivo não tem capacidade de roteamento, e possui o atributo *nwkUseTreeRouting* com valor **TRUE**, ele deve encaminhar o frame utilizando roteamento pela árvore. Se o dispositivo receptor não tem capacidade de rota e seu atributo *nwkUseTreeRouting* tem valor **FALSE**, ele deve descartar o frame.