

## Mecanismo de Acesso ao Meio: Introdução

Como visto, dependendo da configuração de rede, uma rede 802.15.4 pode usar um dos dois mecanismos de acesso ao canal de rádio. Em uma rede com *beacon* habilitado, o mecanismo *slotted CSMA-CA* é utilizado pelo MAC para transmissões dentro da porção CAP do superframe; já em redes sem *beacon*, o método de acesso padrão (“*unslotted CSMA-CA*”) é usado. Em ambos os casos, o algoritmo é implementado com base em unidades de tempo chamadas “*períodos de backoff*” ( $BP = \text{Backoff Period}$ ). Um período de *backoff* é o tempo necessário para se transmitir 20 símbolos ou  $4 \times 20 = 80$  bits, se a rede utilizar o modo de operação da camada física em 2.4GHz. O tamanho de uma unidade do período de *backoff* é dado pelo parâmetro *aUnitBackoffPeriod*.

O CSMA-CA deve ser usado antes da transmissão de quadros de dados (*data frames*) ou de quadros de comando (*command frames*) transmitidos dentro do CAP, a menos que o quadro possa ser rapidamente transmitido após o *acknowledgment* de um quadro de comando de *data request*. O CSMA-CA não deve ser usado na transmissão de quadros *beacon* em uma rede *beacon-enabled*, de quadros de *acknowledgment* (nesse caso, muda-se apenas o modo de operação de RX para TX e transmite-se imediatamente o Ack) ou quadros de dados transmitidos dentro do CFP.

O funcionamento nesses dois métodos é o seguinte. Quando um dispositivo deseja transmitir em uma rede com *beacon* desabilitado, ele primeiro verifica se um outro dispositivo está transmitindo no mesmo canal. Se assim for, ele espera por um período aleatório (isto é, realiza o procedimento de *backoff*) ou indica uma falha de transmissão depois de alguns tentativas sem sucesso. Como mencionado, quadros de *Ack* que estejam confirmando uma transmissão anterior não usam o mecanismo CSMA-CA uma vez que eles são enviados imediatamente após o pacote anterior recebido (ou seja, o nó que recebeu o pacote simplesmente executa o procedimento de troca de recepção para transmissão e envia imediatamente a confirmação).

Já em uma rede com *beacon* habilitado, qualquer dispositivo que pretenda transmitir durante o período de contenção espera pelo início do próximo *slot* de tempo e, então, determina se um outro dispositivo está transmitindo no mesmo *slot*. Se um outro já está transmitindo, o dispositivo recua por um número aleatório de *slots* ou então indica uma falha na transmissão depois de algumas tentativas.

No *slotted CSMA-CA*, as fronteiras dos períodos de *backoff* de cada dispositivo da PAN devem estar alinhadas com as fronteiras dos *slots* do superframe do coordenador PAN, isto é, o início do primeiro período de *backoff* de cada dispositivo é alinhado com o início da transmissão do *beacon*. A subcamada MAC deve assegurar que a camada física inicie todas as suas transmissões no limite de um período de *backoff*. No *unslotted CSMA-CA*, os períodos de *backoff* de um dispositivo não estão relacionados no tempo aos períodos de *backoff* de qualquer outro dispositivo da PAN.

## Mecanismo de Acesso ao Meio: os Parâmetros da MAC PIB

Como visto, no modo de operação com *beacon* desabilitado, o padrão IEEE 802.15.4 utiliza a técnica *unslotted CSMA/CA* para controle de acesso ao meio. Em tal técnica, uma transmissão se inicia com a espera por um tempo aleatório de períodos de *backoff* entre 0 e  $2^{BE} - 1$ , onde  $BE = \text{Backoff Exponential}$ , podendo  $BE$  assumir um valor entre 3 (*macMinBE*) e 5 (*macMaxBE*). O parâmetro *macMinBE* é uma constante cujo intervalo de valores está entre 0 e *macMaxBE*, com valor *default* igual a 3. Por sua vez, o intervalo de *macMaxBE* é de 3 a 8, com valor *default* igual a 5. Logo, *macMinBE* pode assumir valores entre 0 e 8, com valor *default* 3.

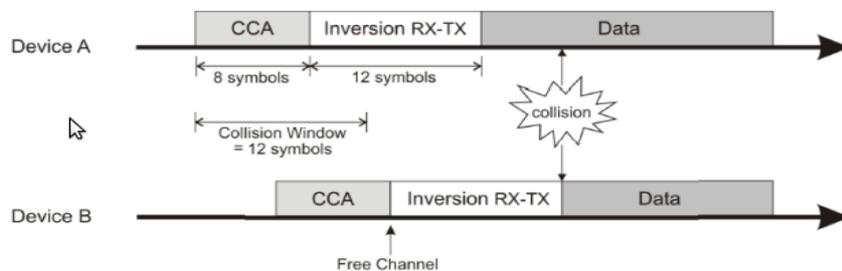
Uma vez que o tempo selecionado expira, o nó verifica se o canal está disponível para transmissão,

procedimento denominado de *Clear Channel Assessment (CCA)*. Esse procedimento é executado no tempo de 8 símbolos. Se o canal estiver ocupado, o nó incrementa BE (limitado a *macMaxBE*) e repete o processo de espera. O limite de tentativas de acesso ao canal é determinado por *macMaxCSMABackoffs* (4 tentativas, por *default*). Se, após essas tentativas, o nó não conseguir ter acesso ao canal, é declarada uma falha de acesso ao canal. Se o canal estiver livre, executa-se o procedimento de troca de modo do rádio – de recepção para transmissão – e transmite-se o pacote. O tempo de execução da troca de modo do rádio é de 12 símbolos.

Na transmissão de um pacote, pode ser solicitada a confirmação de recebimento (*ACK - acknowledgement*). O procedimento de acesso ao canal não é realizado para envio do *ACK*, ou seja, o nó que recebeu o pacote simplesmente executa a troca de recepção para transmissão e envia imediatamente a confirmação. Se ocorrer uma falha na recepção do *ACK*, o nó que enviou o pacote tentará transmiti-lo novamente, após a espera de um *macAckWaitDuration* (54 símbolos no modo 2.4GHz). É declarada uma falha de transmissão por colisão se o reconhecimento não for recebido após um número de tentativas determinado por *macMaxFrameRetries* (3 tentativas por *default*).

Verifica-se que as características da *unslotted CSMA/CA* tornam a rede mais susceptível a colisões e incita uma maior disputa pela utilização do meio do que em modos que utilizam *beacons* para sincronização. Além disso, dispositivos IEEE 802.15.4 operando em *unslotted CSMA/CA* deixam de escutar o canal durante a inversão do rádio, havendo riscos de colisões. Estas colisões podem ocorrer no início da transmissão de um pacote ou na transmissão do pacote de reconhecimento.

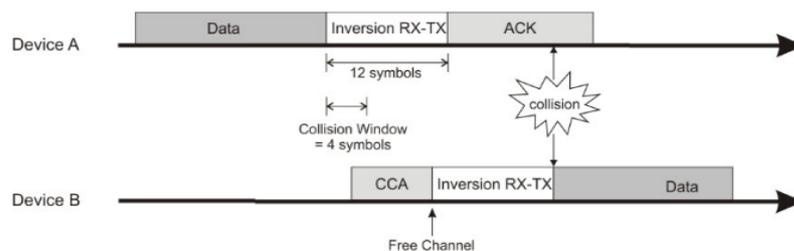
Como apresentado na Figura 8, o tempo de verificação de atividade no canal somado ao tempo de inversão de rádio é de 20 símbolos. A colisão no início da transmissão ocorre se outro dispositivo iniciar o procedimento de *CCA* durante os 12 primeiros símbolos deste processo, pois, se isto ocorrer, o procedimento de *CCA* será completado com o canal ainda livre.



Exemplo de colisão durante CCA na técnica de controle de acesso ao meio CSMA/CA sem janela de tempo

Figura 8 – Colisão no início da transmissão

Uma colisão na transmissão do pacote *ACK* é exemplificada na Figura 9. Como a duração de um *CCA* (8 símbolos) é inferior ao tempo de inversão do rádio (12 símbolos), existe uma janela de colisão de 4 símbolos. Assim, se um nó iniciar o procedimento de *CCA* nesta janela para transmissão de um *ACK*, ocorrerá uma colisão.



Exemplo de colisão durante transmissão de ACK na técnica de controle de acesso ao meio CSMA/CA sem janela de tempo

Figura 9 – Colisão durante a transmissão do quadro ACK

Um outra situação de colisão é mostrada na Figura 10.

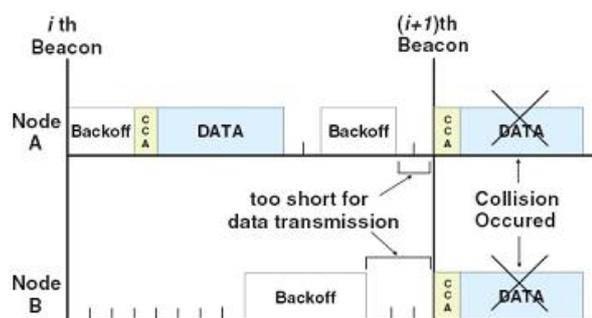


Figura 10 – Outro exemplo de colisão

### Acesso ao Meio: *Batery Life Extension*

Em aplicações com baixas taxas de dados, a atividade associada ao monitoramento resulta em um ciclo de trabalho (“*duty cycle*”) pequeno, com consumo de energia mais reduzido. Entretanto, em cenários de altas taxas de dados, em que longos períodos de monitoramento (*polling*) são necessários, existe um consumo de energia muito mais acentuado.

O IEEE 802.15.4 suporta um modo de operação denominado “*Life Batery Extension (BLE)*”, em que o parâmetro *Backoff Expoent (BE)* do CSMA-CA é limitado ao intervalo 0-2, permitindo reduzir muito o ciclo de trabalho em aplicações de baixo tráfego. No entanto, em condições de redes densas, este modo pode resultar em uma taxa de colisões excessiva.

### Mecanismo de Acesso ao Meio: o Algoritmo *Slotted CSMA/CA*

O algoritmo *slotted CSMA/CA* também tem a sua operação baseada nos períodos de *backoff* (*BP - Backoff Periods*). O algoritmo depende fundamentalmente de três variáveis:

1. O *Backoff Exponent (BE)*, parâmetro que está relacionado a quantos períodos de *backoff* o dispositivo deve esperar antes de tentar acessar o canal;
2. A *Contention Window (CW)*, que representa o tamanho da janela de contenção medida em número de períodos de *backoff* durante o qual o canal deve ser sentido inativo antes dele ser efetivamente acessado pelo dispositivo, e
3. O *Number of Backoff (NB)*, que representa o número tentativas de acesso ao canal.

A Figura 11 apresenta o fluxograma do CSMA/CA em suas versões *slotted* e *unslotted*.

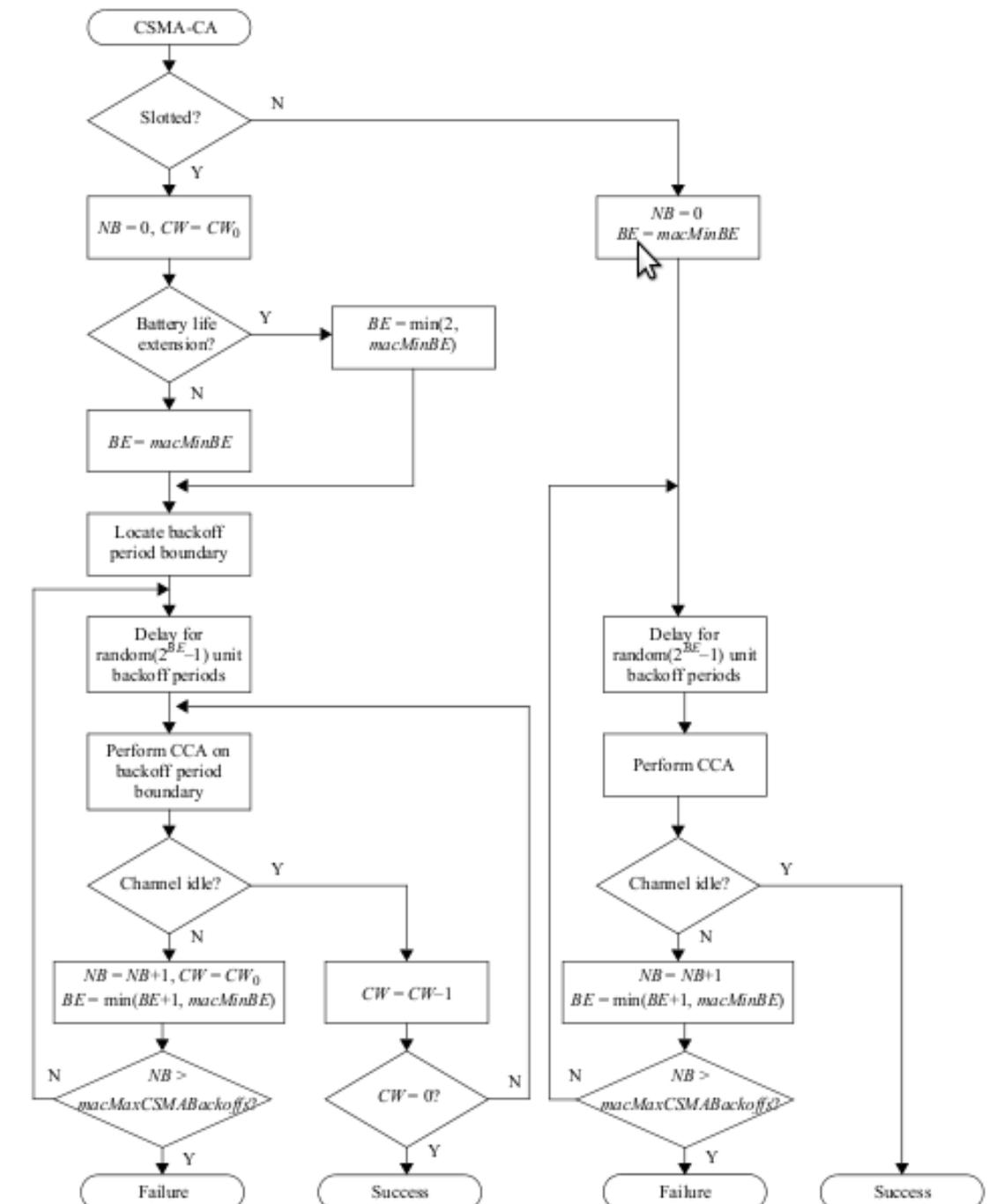


Figura 11 – O Método de Acesso CSMA/CA

Primeiramente, o *Number of Backoff* e a *Contention Window* são inicializados com os valores  $NB = 0$  e  $CW = 2$ . Em redes *unslotted* ou em redes *slotted* nas quais o campo do superframe “*Battery Life Extension (BLE)*” é igual a 0,  $BE$  deve ser inicializado com o valor  $macMinBE$  (*default* = 3). Em redes *slotted* nas quais o campo *Battery Life Extension* = 1,  $BE$  deve ser inicializado com o menor valor entre 2 e  $macMinBE$ . Note que se  $macMinBE$  for igual a zero, a característica de “*collision avoidance*” do algoritmo ficará desabilitada durante a primeira iteração.

Em seguida, o algoritmo inicia um contador de número randômico de períodos de *backoff* ( $BP$  – *Backoff Periods*), uniformemente gerado entre  $0$  e  $2^{BE} - 1$ . O contador deve se iniciar na fronteira do  $BP$  para garantir sincronismo. Quando os períodos de *backoff* expiram, o algoritmo executa a operação CCA nos limites dos  $BPs$  para avaliar a atividade do canal. Se o canal estiver ocupado,  $CW$  é reinicializado para  $CW_{ini} = 2$ , e os parâmetros número de tentativas de acesso ao canal ( $NB$ ) e expoente de *backoff* ( $BE$ ) são incrementados, observando-se que  $BE$  não deve exceder  $macMaxBE$ .

Se o número máximo de *backoffs* é alcançado (ou seja, se  $NB = macMaxCSMABackoffs = 5$ ), o algoritmo informa uma falha para a camada acima; caso contrário, a operação de *backoff* é reiniciada. Na verdade, o protocolo permite um número de tentativas depois de cada fracasso, que corresponde ao valor do parâmetro  $aMaxFrameRetries$  (valor *default* = 3).

Uma vez que o canal estiver ocioso,  $CW$  é decrementado. A operação CCA é repetida se  $CW$  for diferente de 0. Se o canal é sentido novamente como inativo, o nó tenta transmitir desde que o restante do  $BPs$  no atual  $CAP$  seja suficiente para transmitir o quadro e o reconhecimento subsequente. Caso contrário, o CCA e o quadro de transmissão são ambos deferidos para o próximo superframe. Isto é chamado de “*deferência de CCA*”.

Mediante isso, em redes com quadros de sinalização para sincronismo, o mecanismo *slotted CSMA/CA* deve ser criteriosamente avaliado, uma vez que seu comportamento é afetado por seus parâmetros de inicialização, quais sejam: (i) o mínimo *backoff exponent* ( $macMinBE$ ); (ii) o máximo *backoff exponent* ( $aMaxBE$ ); o (iii) valor inicial do  $CW$  ( $Cwinit$ ); e (iv) o número de máximo de *backoffs* ( $macMaxCSMABackoffs$ ).

**Resumo.** In  $CAP$ , each node performs the  $CSMA/CA$  algorithm before transmitting data frame or MAC command frame. Each device maintains three parameters: the number of backoff ( $NB$ ), contention window ( $CW$ ), and backoff exponent ( $BE$ ).  $NB$  denotes the required  $NB$  while attempting to transmit data;  $CW$  denotes the number of backoff periods that need to be clear before committing transmission; and  $BE$  denotes how many backoff periods a device need to wait before trying to access the channel. The initial value of  $NB$ ,  $CW$ , and  $BE$  are equal to 0, 2, and  $macMinBE$ , respectively, where  $macMinBE$  is equal to 3. In the located boundary of the next  $CAP$  backoff period, a device takes delay for random backoff between 0 and  $2^{BE} - 1$  unit backoff period ( $UBP$ ), where  $UBP$  is equal to 20 symbols (or 80 bits). A device performs clear channel assessment ( $CCA$ ) to make sure whether the channel is idle or busy, when the number of random backoff periods is decreased to 0. The value of  $CW$  will be decreased by one if the channel is idle; and the second  $CCA$  will be performed if the value of  $CW$  is not equal to 0. If the value of  $CW$  is equal to 0, it means that the channel is idle after twice  $CCA$ ; then a device is committed the data transmission. However, if the  $CCA$  is busy, the value of  $CW$  will reset to 2; the value of  $NB$  is increased by 1; and the value of  $BE$  is increased by 1 up to the maximum  $BE$  ( $macMaxBE$ ), where the value  $macMaxBE$  is equal to 5. The device will repeatedly take random delay if the value of  $NB$  is less than the value of  $macMaxCSMABackoff$ , where the value of  $macMaxCSMABackoff$  is equal to 4; and the transmission attempt is decided to be failure if the value of  $NB$  is greater than the value of  $macMaxCSMABackoff$ .