

PROTOSCOLOS DE CONTROL DE ACCESO AL MEDIO EVOLUCIÓN Y ADAPTACIÓN A REDES DE SENSORES

1. ASPECTOS BÁSICOS

La subcapa MAC, que pertenece a la capa de enlace de datos, se encarga del control de acceso al medio, es la responsable de transmitir los paquetes. Validar las tramas que recibe, comprobar errores en la transmisión y confirmar la recepción de tramas al emisor, son sus funciones principales. Además se encarga de funciones como fragmentación de paquetes, control de flujo, tasa de transmisión, control de potencia y funciones relacionadas con la gestión de la batería. En definitiva, de controlar un medio de comunicación compartido por una serie de máquinas que se comunican a través de él **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia..**

Las características del medio físico suponen la base para enfrentarse al diseño de un protocolo MAC. En el caso de las redes inalámbricas existen una serie de limitaciones que el medio físico impone. El espacio radioeléctrico usado en la comunicación inalámbrica, permite anchos de banda reducidos, debido a que el medio no es libre, está regulado mediante la Ley de Telecomunicaciones 11/98 **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia..**, donde se recoge una banda de libre acceso para uso de carácter científico, industrial y médico, consecuencia de los estándares internacionales que la CEE recoge en materia de comunicaciones. La banda ISM (Industrial, Scientist and Medical) permite el uso libre de la frecuencia de 2.4-2.5 GHz. Además como consecuencia del ruido presente en el medio, característico en todas las comunicaciones inalámbricas, dificulta el desarrollo de comunicaciones con un alto ancho de banda. Los objetivos a la hora de diseñar un protocolo de enlace van encaminados a solventar dichas limitaciones.

Conseguir la máxima utilización del canal de comunicación, con el mayor ancho de banda posible, la disminución del retardo en las comunicaciones y la fiabilidad en las mismas, han sido los tres objetivos principales que se pretenden conseguir con un diseño MAC. Además surge el problema de asegurar que un medio que quiera

establecer la comunicación, tenga la posibilidad de hacerlo. Los problemas del medio se solventan mediante el control de la capa física, pero este control se debe configurar siguiendo un esquema de control de acceso, el protocolo MAC. Mientras que la capa física se encarga de la transmisión de los datos, de que los datos se transmitan, lleguen y reciban entre los nodos, la capa MAC controla de qué manera se va a establecer la comunicación.

Además, surgen otros problemas que se derivan de la posición aleatoria de los nodos, las comunicaciones en movimiento y los nuevos tipos de comunicaciones, de datos, voz e imágenes. Nos encontramos por tanto con nuevos tipos de infraestructuras que necesitan de nuevos tipos de control de acceso. Nuevas aplicaciones, nuevos protocolos, suponen la idea de que la innovación y el desarrollo se orientan al ámbito de las soluciones.

Aunque los protocolos tradicionales de medios cableados no resultan adecuados, suponen la base fundamental para el desarrollo de nuevos protocolos orientados a medios inalámbricos, por lo que vamos a ver que en realidad, la idea principal de acceso al medio se mantiene a lo largo de la evolución de estos protocolos: *Escuchar el medio y si está libre, transmitir.*

Partiendo de esta idea nos encontramos con nuevas aplicaciones que requieren sobre todo un consumo de energía reducido, debido a que las nuevas máquinas móviles, tienen más potencia de proceso y un mayor número de dispositivos con un tamaño reducido que enriquecen las aplicaciones que se les pueden dar, pero que consumen más energía, que dificulta su uso. Es tan importante este problema, que toda una familia de protocolos se ha diseñado obviando el resto de objetivos, con el fin de conseguir reducir **el consumo de energía**. En la actualidad, reducir este consumo, supone la piedra filosofal en todos los campos de investigación tecnológica.

Este objetivo será primordial a la hora de abordar el diseño de un protocolo MAC para las redes de sensores inalámbricas. Es una consecuencia de las restricciones energéticas que imponen los nodos en que basamos nuestras soluciones. Agravándose el hecho de que puede ser imposible recargar las baterías de este tipo de máquinas. Hablamos de soluciones con un tiempo de vida limitado, y necesitamos que sea el máximo posible.

Desde las perspectiva de los objetivos principales que se exigen a un protocolo MAC, aumentar la productividad, reducir el retardo, asegurar fiabilidad, conseguir mecanismos robustos de comunicación, asegurar la posibilidad de establecer enlaces de comunicación y conseguirlo con el menor gasto de consumo energético posible, afrontaremos el estudio de los estándares propuestos en la comunicación inalámbrica, el estado actual de las investigaciones en el diseño de protocolos MAC, y la visión de que

las técnicas de una sola capa no bastan para conseguir este ahorro de energía, sino que se hace necesario una perspectiva multicapa para lograr dichos objetivos.

2. FUNCIONAMIENTO

Existen dos mecanismos de control de acceso en RSI, los basados en protocolos de arbitraje y los basados en protocolos de contienda. Los primeros establecen un controlador de grupo, capaz de coordinar los periodos de envío entre nodos. Los protocolos de contienda, entienden un medio libre pero en el que pueden aparecer interferencias debido a colisiones entre envíos de nodos distintos. Existen distintas técnicas para llegar a implementar estas dos visiones distintas de entender el acceso al medio.

Para los **protocolos de arbitraje**, contamos con dos aproximaciones, FDMA (Frequency Division Multiple Access) y TDMA (Time Division Multiple Access).

La técnica de multiplexación de frecuencia -FDMA- divide el ancho de banda disponible en canales individuales, lo que permite acceso inmediato cuando uno de estos canales quede libre, pero como consecuencia, el ancho de banda es limitado. Las aplicaciones informáticas, no suelen presentar flujos constantes de datos, sino que más bien necesitan un tiempo para el procesado de datos en cada envío/recepción, lo que provoca ráfagas de envíos/recepciones que necesitan anchos de banda considerables, lo que hace de la técnica FDMA, un protocolo inadecuado para la transmisión de paquetes de datos.

El otro enfoque, multiplexación de tiempo -TDMA-, entiende que el medio debe estar disponible para el envío/recepción en exclusiva para el nodo que lo va a usar, pero que no lo necesitará durante un periodo de tiempo considerable, lo que conlleva a que el nodo que envía dispone de todo el ancho de banda pero durante un breve periodo de tiempo.

Los **protocolos de contienda** no contemplan la figura del coordinador, así que cualquier nodo puede disponer del medio para su enviar datos. Este enfoque conlleva ciertos problemas, como la posibilidad de que dos nodos transmitan al mismo tiempo, lo que conllevaría interferencias en la señal, que pueden corromper el paquete original. Para evitar este problema, contamos con otras tres técnicas de control de acceso, CSMA, CSMA/CD y CSMA/CA.

El primer mecanismo, CSMA (Code-division multiple access), se aplica cuando la capa física está configurada para realizar un uso del canal mediante la técnica DSSS (Direct Sequence Spread Spectrum), donde el transmisor dispone de todo el ancho de

banda que la frecuencia de envío permite. A cada nodo se le asigna un patrón de bits, que servirá para codificar los bits que transmita y el receptor que disponga del mismo patrón de bits podrá decodificar el mensaje, siendo éste ignorado por el resto de nodos. El mecanismo CSMA asigna una secuencia de estos bits distinta para cada nodo, conociendo todos los nodos que comparten el medio, las secuencias del resto de nodos, así el nodo que quiera transmitir a otro sólo tiene que usar la secuencia destinada al receptor. Esto permitirá que varios nodos puedan usar el canal al mismo tiempo sin que ocurran interferencias. De hecho, estos códigos permiten reconstruir los paquetes llegados con errores, haciendo de CSMA y DSSS técnicas robustas frente al ruido.

CSMA/CD (Carrier Sense Multiple Access with Collision Detection) usa una aproximación similar al estándar 802.3 (Ethernet), el nodo realiza la detección de la señal portadora y si el medio está libre, transmite. Para poder usarse en el medio radioeléctrico, se hace necesario definir cuando un nodo transmite y recibe, ya que al mismo tiempo no es posible.

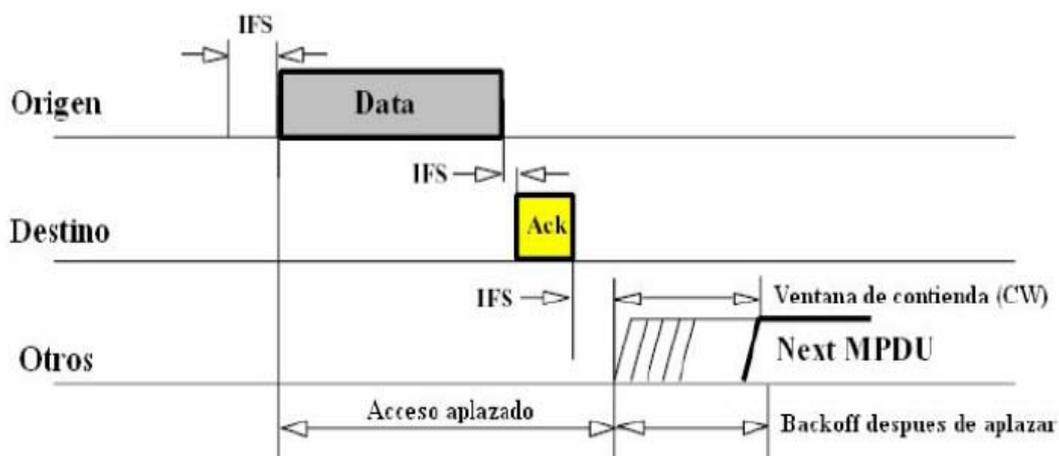


Figura 1: Mecanismo CSMA/CA y control RTS/CTS para evitar colisiones

CSMA/CA (Carrier Sense Multiple Access Collision Avoidance) supone el enfoque más utilizado en redes inalámbricas, donde en lugar de detectar las colisiones, el algoritmo trata de evitarlas. Cuando CSMA/CA detecta una transmisión, se espera a que termine y una vez que finaliza, espera un tiempo aleatorio antes de transmitir su información disminuyendo así la probabilidad de colisiones (ver figura 1). A estos periodos de tiempo se les denomina IFS (Inter. Frame Spacing). El emisor está a la escucha del canal, al comprobar que está libre, se dispone a transmitir, para ello espera un periodo de contención, IFS antes de transmitir, si pasado este periodo el medio sigue libre, transmite y espera la llega de ACK, por parte del receptor. Mediante reconocimiento con ACK evitamos problemas de pérdida de paquetes en el canal.

Además se añade el mecanismo de envío de tramas RTS/CTS (ver Figura 2) donde se indica la longitud de la trama de datos que pretende enviar. El receptor a la llegada del RTS confirma la longitud de datos que espera recibir al emisor mediante una trama CTS. El emisor al recibir la trama CTS envía los datos y espera el consiguiente ACK.

Este mecanismo evita los problemas de nodos ocultos. Asegurando la entrega de datos y mediante los tiempo aleatorios, un reparto del canal más equitativo.

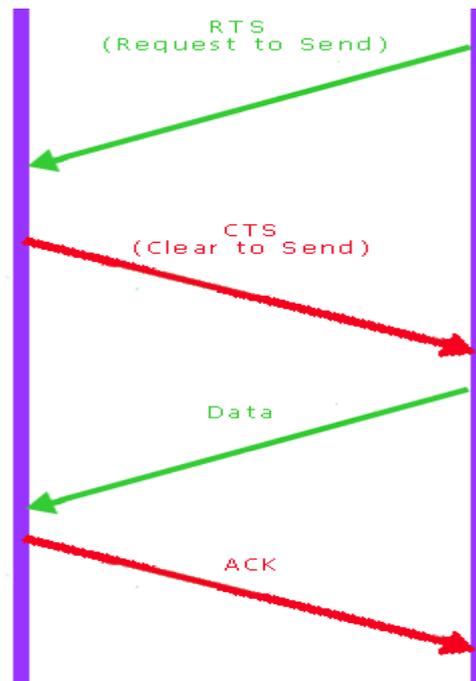


Figura 2: Intercambio de paquetes RTS/CTS

Estos algoritmos suponen los mecanismos con que el estándar 802.11.x **[¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.]** pretende manejar las dos arquitecturas posibles en el diseño de redes inalámbricas, por un lado hace posible las conexiones ad-hoc, haciendo uso del mecanismo de control CSMA/CA, para controlar el acceso a un medio donde todos los nodos pueden comunicarse con el resto de nodos y, por otro, para solventar los problemas de redes inalámbricas basadas en infraestructura, con puntos de acceso, supone un nivel más, añadiendo una subcapa en el protocolo compatible con el modo de funcionamiento anterior, pero que le da la posibilidad de establecer un nodo controlador, que mediante un mecanismo de baliza regule cuándo pueden hacer los nodos que pretendan realizar una transmisión.

De esta manera, se solventan en parte los problemas derivados de la comunicación inalámbrica, cumpliendo los objetivos de robustez, ancho de banda y calidad de servicio. Sin embargo, con la aparición de un nuevo tipo de dispositivos

móviles y unos nuevos requisitos de comunicación, vuelve a surgir la necesidad de un estándar que dé cabida a estos nuevos requisitos.

3. ZIGBEE ALIANCE

Ya hemos visto en el apartado anterior que existe un estándar IEEE que solventa los problemas derivados de la comunicación inalámbrica. No es el único, existen otros estándares que pretenden dar respuesta a los mismos problemas. Bluetooth **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** y Wi-fi **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** suponen algunos de estos ejemplos. Ambos tienen por objeto conseguir una tasa de transmisión lo más alta posible. Ambos protocolos están diseñados para dispositivos, que a pesar de tener unas restricciones energéticas bastante elevadas, cuentan con la posibilidad del recambio de pilas, y en donde la función principal del dispositivo no es la transferencia de datos, sino que ésta supone una extensión a otras funciones, como llamadas telefónicas, reproducción multimedia, etc.

Sin embargo, cuando hablamos de redes de sensores, la posibilidad de cambiar la batería puede no existir. Es más, las baterías son de menor capacidad en relación con el resto de dispositivos que se comunican a través de un medio inalámbrico. A pesar de que las características de los nodos son muy reducidas, y por tanto, el consumo que presentan es muy bajo, se hace necesario un esfuerzo mayor en conseguir ahorrar energía desde todos los puntos de vista posible, diseño hardware, protocolos de comunicación y aplicaciones basadas en esta tecnología.

Si tenemos en cuenta el factor del ahorro de energía, se plantea sacrificar parámetros como el ancho de banda, o la tasa de transmisión, que quizás no resulten de tanta importancia dado la sencillez de las aplicaciones. Surge así, la idea de crear un protocolo específico para la comunicación en redes de sensores inalámbricas, el estándar 802.15.4 **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**

Llamado ZigBee en la bibliografía, el estándar supone una alianza de compañías por adaptar sus dispositivos a un protocolo que los haga compatible entre ellos. El estándar persigue el objetivo de aumentar la autonomía de los motes, en condiciones de transmisiones a baja velocidad, ya que no se pretenden envíos de paquetes de datos grandes, sino que se pretende asegurar la llegada de estos paquetes y que lo hagan con el menor gasto energético para el nodo. A las redes que se basan en el estándar ZigBee, se les ha puesto el nombre de Low Rate Wireless Personal Area Network, LR-WPAN debido a su baja tasa de transmisión y su diseño para cubrir espacios reducidos.

Desde el punto de vista de la topología, ZigBee cuenta con tres tipos de nodos, RFD, FFD y el controlador de la red (ver figura 3). Cada uno representará una función específica dependiendo de la topología de la red.

El estándar cuenta con dos tipos de topología, en estrella (enlaces rojos, ver figura 3) y punto a punto (ver enlaces azules, figura 3). La elección de la topología dependerá de la aplicación que representa nuestra solución concreta. Cuando el área de cobertura es muy amplia, los fabricantes suelen aconsejar una topología punto a punto, mientras que si lo que se requiere es un control constante de los dispositivos (por ejemplo, control de periféricos), se suele optar por un diseño en estrella.

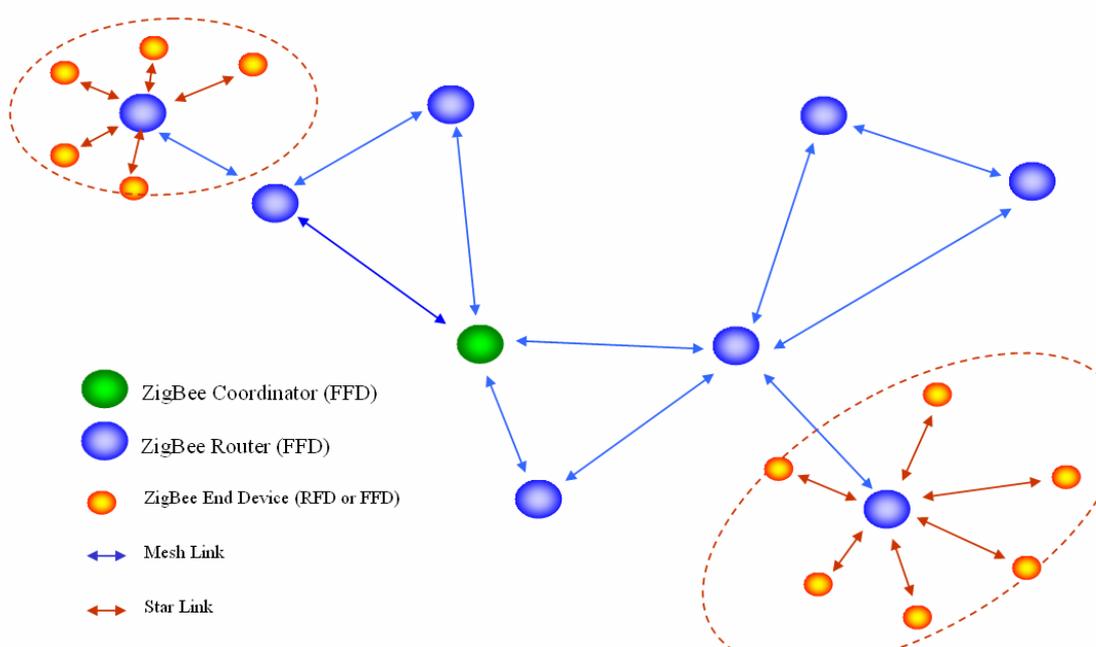


Figura 3: Topología ZigBee

En la topología en estrella, todos los nodos están coordinados por un nodo FFD (Full Function Device) que se denomina PAN coordinator (Personal Area Network Coordinator) y que controla el acceso al medio. El resto de dispositivos son RFD (Reduced Function Device), que soportan una funcionalidad reducida y son controlados por el PAN coordinator, que les indica en qué periodos pueden transmitir, mediante un mecanismo de señalización.

Cuando se establece una red punto a punto, no hay este mecanismo de señalización, por lo que se establece una situación de lucha por el acceso al medio. Todos los nodos son FFD y necesitan de un protocolo de arbitraje.

Siguiendo el modelo OSI, podemos ver la organización del estándar en dos capas. La capa física, que se encarga de los aspectos del control de la radio, selección

del canal, modulación, potencia de la señal, estimación de la calidad del enlace, etc. Todos aquellos parámetros que, en última instancia, son los responsables del envío y recepción de datos.

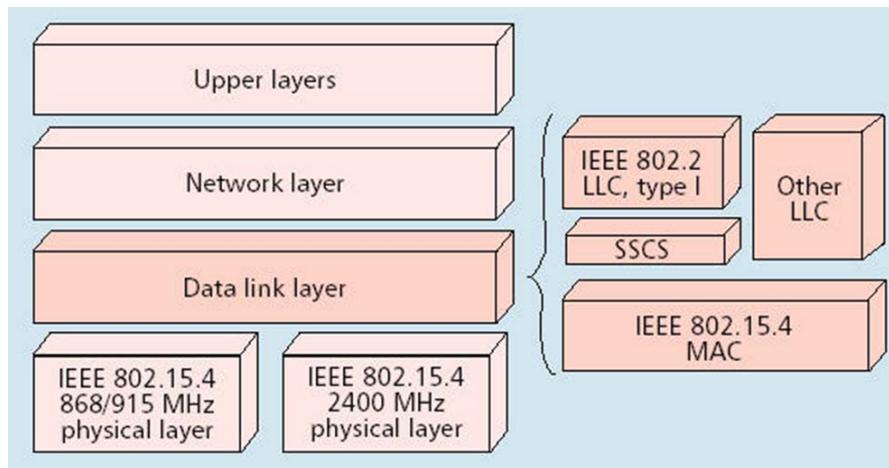


Figura 4: Modelo OSI para ZigBee

La capa MAC va a controlar el radio a través de las posibilidades de configuración de la misma que ofrece la capa física. En este caso, tratará los problemas del control de señalización en el caso de las topologías en estrella y de la asociación de nuevos nodos. Además, el control de acceso a un medio compartido, en el caso de las topologías punto a punto, mediante algún algoritmo de control de acceso, así como garantizar el acceso a los nodos que lo soliciten y asegurar la entrega de paquetes con mecanismos de reconocimiento, ACK's.

De esta manera, ZigBee establece tres posibilidades de acceso al medio:

- El mecanismo de señalizaciones (beacons) para el establecimiento de topologías en estrella.
- Un mecanismo CSMA/CA para las topologías punto a punto y, para conseguir que ciertos nodos tengan prioridad.
- Un mecanismo de contención que asegura un periodo de tiempo para estos dispositivos.

El **mecanismo de beacons**, establece que un nodo mandará unas señales, balizas, de manera periódica, estableciendo una serie de divisiones de tiempo entre dos **beacons**, los slots. En concreto, se establecen 16 ranuras o slots. Los nodos que quieran transmitir haciendo uso del algoritmo CSMA/CA, comentado en el apartado anterior, pueden hacerlo en uno de estos slots. La señal indica a un nodo que puede transmitir, si no lo desea, puede apagarse (con lo que se conseguiría ahorrar energía).

En el caso de que necesite transmitir, esperará un periodo de contención aleatorio, de varios slots (se comenta en el apartado anterior, que estos periodos ayudan a evitar colisiones innecesarias). Tras ese periodo, si el canal está libre, el nodo retransmitirá alineado con el siguiente slot de tiempo. La sincronización permite que varios nodos puedan transmitir al mismo tiempo, reduciendo las colisiones, intentos de retransmisión, etc. Consecuentemente, el gasto energético se reduce, consiguiendo el ahorro de energía.

El control MAC que propone ZigBee permite evitar el mecanismo de señalización, para poder establecer redes punto a punto, facilitando la incorporación de nuevos nodos a la red (estructuras ad-hoc). Hemos comentado que las topologías punto a punto, van a soportar un gran número de nodos y, por tanto, cubrir espacios más amplios. Recordamos que uno de los objetivos de las redes de sensores es proporcionar capacidades de macroscopio de fenómenos a gran escala, lo que requiere cubrir grandes áreas de espacio.

Es probable que las topologías en estrella no resulten adecuadas para este tipo de aplicaciones. Es necesario dotar al protocolo MAC con la posibilidad de establecer redes punto a punto, mediante un mecanismo que controle el acceso a un medio de comunicación compartido. Se opta en este caso por el algoritmo CSMA/CA, comentado en el apartado anterior. En este caso, los nodos no tienen que esperar ninguna señalización, así que cuando tienen que transmitir, escuchan el canal, si está libre espera un periodo aleatorio de contención, que evita colisiones, y si tras ese periodo el canal sigue libre, transmite.

Pudimos ver al estudiar este algoritmo, en el apartado anterior, como se podían establecer mejoras que permitieran reducir las colisiones (paquetes RTS/CTS), pero aún así, se pierde en parte la ventaja de sincronizar los nodos y tenerlos escuchando sólo a la llegada de una señal, el beacon. Este hecho, supone el punto de inicio de las investigaciones encaminadas a conseguir ahorrar energía mediante protocolos MAC. El uso eficiente de la radio conseguiría ahorrar energía. La primera idea que aparece, es usar un mecanismo parecido al de las señalizaciones, pero adaptado a un medio compartido.

Finalmente, se exigía que el estándar tuviese en cuenta la posibilidad de que algunos nodos tuvieran garantizado el envío de datos dentro de una supertrama (periodo de tiempo entre dos balizas), lo que se consiguió aprovechando parte de los slots que componían la supertrama para que sean asignados a nodos que necesiten asegurar la posibilidad de envío. A este periodo de tiempo se le llamó periodo de libre contención (ver figura 5).

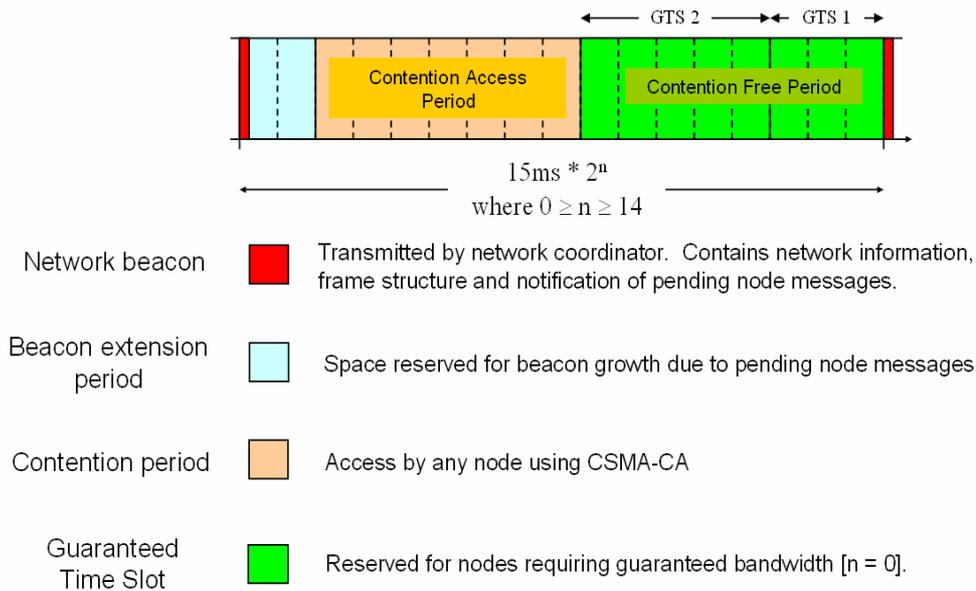


Figura 5: Estructura de supertrama ZigBee, con periodo de contención

A parte de asegurar una transmisión de pequeños flujos de datos con un mínimo consumo de energía, se pretendía dar cabida a objetivos de robustez y seguridad en la transmisión. Desde el punto de vista de la robustez, los mecanismos que ZigBee implementa son similares a los de otros estándares MAC, como envío de confirmaciones y retransmisión de paquetes. También se hacen comprobaciones con códigos de redundancia cíclica, que permite verificar los datos del paquete.

Se añade un algoritmo de encriptación, basado en el estándar AES (Advance Encryption Standar) **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, que gestiona el concepto de seguridad en redes de sensores mediante el control de claves públicas y privadas. Quizás este último aspecto, junto con la posibilidad de ahorrar energía, teniendo en cuenta la baja tasa de transmisión que exigen las aplicaciones basadas en redes de sensores inalámbricos, sean los dos puntos claves a tener en cuenta a la hora de detallar los aspectos más relevantes que supone ZigBee.

ZigBee pretende unificar una serie de objetivos para proporcionar un estándar que favoreciese el lanzamiento de dispositivos compatibles en un mercado que exige aplicaciones basadas en este tipo de dispositivos. Conexiones entre periféricos, domótica y otras aplicaciones de carácter industrial y científico necesitan de la seguridad de unos dispositivos que no se quedarán obsoletos antes de la llegada de las aplicaciones que hagan uso de ellos.

Hemos introducido el problema de tratar redes punto a punto, de manera que se haga un uso eficiente de la energía de la que disponen los nodos. Se ha dicho que la

posibilidad de que los nodos permanezcan a la escucha mientras quieren transmitir, supone un gasto de energía considerable. El mecanismo de balizas, que reduce estos periodos de escucha consiguiendo ahorrar energía, va a suponer el punto de partida para el estudio de una serie de protocolos que tendrán como objetivo conseguir reducir el consumo y alargar la duración de los nodos de la red.

4. NECESIDAD DE UN ESTÁNDAR PARA REDES DE SENSORES INALÁMBRICOS

A lo largo de este capítulo, se han introducido algunos conceptos básicos presentes en las comunicaciones inalámbricas. Los estándares 802.11.x y 802.15.4 suponen un hito en la consecución de protocolos de capa de enlace para permitir y controlar el medio radioeléctrico. En su diseño, se han tenido en cuenta aspectos como topologías de red, problemas que presenta el medio, robustez y fiabilidad en las comunicaciones, seguridad y uso eficiente de la radio para conseguir ahorrar energía.

El uso de los nodos que forman las redes de sensores inalámbricas en condiciones límite, puede llegar a extremos donde el despliegue sea aleatorio y en lugares inaccesibles (por ejemplo, realizar despliegues lanzando motes desde un avión). Este hecho, acabaría con la posibilidad de cambiar las baterías a los nodos. El funcionamiento de la red y el tiempo de vida de la misma quedan, por tanto, subyugados a la duración de la batería.

El diseño hardware de los dispositivos que configuran el mote tiene en cuenta estas restricciones. Muchas investigaciones tratan de reducir el consumo de energía por parte de los dispositivos. El manejo del microprocesador y la radio, son claves en este nivel, dado que el consumo que presentan los mismos supone la mayor parte del gasto energético que realiza el mote. Reducir el consumo de ellos va a suponer reducir el consumo del mote en general. Pero, dado que el consumo no sólo dependerá del diseño del dispositivo en concreto, sino del manejo que de él se haga, las investigaciones derivan hacia un software que haga un uso eficiente de los mismos.

Como primera aproximación, se podía tener en cuenta a la hora de programar los motes, ir apagando componentes conforme estos ejecutaban alguna función. Pero dado que cada dispositivo funciona de manera independiente y se controla a través de un código diseñado para él, resultaría complicado controlar cuanto tiempo va a estar apagado y cuando hay que encenderlo. Haciendo uso de esta idea, surgen las primeras interfaces de control de los estados de encendido y apagado de los dispositivos que configuran el micro. Dentro de la estructura que TinyOS ofrece, podemos encontrar una

descripción de ella, como la interfaz `HPLPowerManagement.nc`, que ofrece funciones que se encargarían de ajustar estos periodos de encendido y apagado de los dispositivos de un mote.

Esta idea de encender y apagar los dispositivos del mote se aplica también a la radio, y, por extensión, a los protocolos de control de acceso al medio, que podrían hacer uso de ella para controlar cuando la radio está encendida. Las pruebas demuestran que los periodos de escucha de la radio consumían mucha energía. Además, el protocolo ZibBee, conseguía reducir el consumo haciendo que la radio escuchara sólo cuando llegaba una baliza de señalización. Ocurre que cuando el protocolo no trabaja con balizas, por ejemplo en la topología punto a punto, el consumo de energía aumentaba, dado que los nodos tienen que estar constantemente a la escucha.

Las investigaciones en este campo llevan a la primera aproximación de un protocolo diseñado específicamente para redes de sensores inalámbricas, **S-MAC** (Sensor Medium Access Control) **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia..** Analizando los requisitos de las redes de sensores, en el diseño de S-MAC, se sacrificaron aspectos como la latencia y productividad, en beneficio de un uso eficiente de la energía. S-MAC entiende que existen unos periodos en los que la radio permanece en escucha de eventos que no van a ocurrir, pues las aplicaciones que hacen uso de él están diseñadas para transmisiones periódicas de bajas cantidades de datos. La radio escucha durante largos periodos de tiempo y supone la mayor fuente de gasto energético para el mote. S-MAC se basa en la idea de ZigBee, de que hay que evitar colisiones que producen un uso ineficiente del canal. Así, S-MAC propone una combinación de las dos aproximaciones, sincronización y periodos de contención presentes en CSMA/CA.

Comentaremos con más detalle S-MAC en el apartado 2.3. Pero adelantamos que, mediante el establecimiento de periodos concretos de escucha y mecanismos de sincronización de nodos ad-hoc, S-MAC es capaz de ahorrar energía. Su elección, como técnica de ahorro de energía a nivel MAC, queda avalada por numerosos estudios que aseguran la consecución de este ahorro. Distribuciones de TinyOS a partir de la versión 1.15 contaban con la **contribución de S-MAC (s-mac v1.2)**. A lo largo del capítulo se detallará cómo S-MAC desarrolla una serie de componentes software capaces de ahorrar energía.

S-MAC supone la primera aproximación, pero no es la única. Otros grupos de investigación realizan sus aproximaciones sobre cómo conseguir reducir la energía mediante el control de la radio. **T-MAC** –Timeout MAC - **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** supone una nueva aproximación basada en la idea de mantener unos ciclos de dormido y actividad de la radio, pero añade que mantener periodos fijos puede no ser del todo óptimo, por lo que plantea la idea de establecer periodos de

dormido variable. En concreto, T-MAC tiene en cuenta que durante el periodo de actividad pueden ocurrir diversos eventos de radio, que sería mejor atender antes de que la radio se duerma, porque si no podrían causar un aumento de las retransmisiones y en definitiva, un aumento del tráfico en la red. Por ejemplo, se tiene en cuenta que al completar una recepción de paquete es mejor mandar el ACK correspondiente, antes de que el periodo de dormido acabe, pues en caso contrario, el transmisor va a considerar que el paquete se perdió y retransmite.

T-MAC establece un periodo de actividad mínimo, en el cual se espera la llegada de eventos de radio (terminación de transmisiones, terminación de recepciones, envío de confirmaciones, etc.). Si no ocurre ningún evento, pasado este tiempo de actividad mínima, la radio pasa a modo de dormido. La aproximación T-MAC supone además, que existen unos patrones en la comunicación, (comunicación entre vecinos, enrutado hacia un sumidero, etc.), que influyen en la productividad y el ancho de banda según el algoritmo MAC seleccionado. En fase experimental, encuentra en sus aproximaciones algunos problemas, pero no llega a una implementación concreta para su resolución. Sin embargo, la idea de un ciclo de dormido variable, supone una evolución del protocolo S-MAC, que se modifica para incluir la idea de periodos adaptativos de dormido mediante un estudio de la latencia que produce el tráfico de red.

Existen alternativas que se alejan de la perspectiva puramente inalámbrica **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia..** Por tanto, nuevos protocolos MAC aparecen para dar respuesta a aplicaciones de sensores basadas en redes semicableadas o de un número reducido de nodos. Distribuir redes de sensores en un edificio, con un backbone (cableado vertical) entre puntos de acceso situados en las distintas plantas. En cada planta, se establece una red de sensores reducida con una topología en estrella dirigida por el punto de acceso. En situaciones como esta, solo los nodos presentan restricciones energéticas relevantes (aunque en principio los nodos son accesibles y se podría sustituir las baterías) y la importancia recae en la contienda por el medio desde el nodo hasta el punto de acceso. Se considera que las aplicaciones de sensores se caracterizan por un tráfico reducido y periódico, por lo tanto, es necesario tener en cuenta estas características a la hora de diseñar un protocolo MAC. El instituto Suizo de Electrónica y Microtecnología (CSEM) registra WiseMAC **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** como el primer protocolo MAC, diseñado para redes de sensores basadas en infraestructura. Dado que la radio supone un gasto muy considerable en el consumo total de energía que realiza cada mote, WiseMAC propone el diseño de una nueva radio y un nuevo protocolo MAC. Este nuevo protocolo entiende dos modos de comunicación, desde el nodo al punto de acceso y al revés. Además, explota las características de cada modo de comunicación para conseguir un protocolo MAC que usa dos canales para cada modo de operación, lo que se tiene en cuenta a la hora de diseñar la radio. Los nodos escuchan el medio durante un tiempo aleatorio, pero

de desviación reducida, y si el medio está ocupado, deben esperar por si llegan paquetes para ellos o bien el medio se desocupa. El punto de acceso que solicita los datos, debe asegurarse que el nodo esté en modo de recepción cuando quiera transmitir, por lo que añade un preámbulo a sus tramas que alarga la duración hasta igualarla al periodo de muestreo del nodo receptor. La clave está en reducir este periodo haciendo que el punto de acceso conozca exactamente cuánto dura, y por tanto, cuándo ocurrirá el siguiente periodo de escucha. Se disminuyen las colisiones al duplicar el canal. El canal de bajada sólo lo utiliza el punto de acceso, por tanto, las colisiones desaparecen. El canal de subida reduce las colisiones con intervalos de muestreo aleatorios (en torno a una media), y las tramas se reducen, dado que el punto de acceso conoce exactamente cuando se despertará el nodo al que envía, lo que reduce el uso de la radio reduciendo el consumo de energía.

El diseño conjunto de un dispositivo de radio (wiseNET) y un protocolo de control de acceso (WiseMAC), teniendo en cuenta las características de las soluciones basadas en redes de sensores inalámbricas, supone el primer ejemplo de metodología cross-layer orientada a mejorar las prestaciones de este tipo de aplicaciones. WiseMAC es la primera aproximación europea orientada al diseño de soluciones basadas en redes wireless, encaminada a conseguir nuevos motes para las redes de sensores que controlarán los edificios del futuro.

Comentábamos en el apartado anterior, la necesidad de establecer un estándar que unifique el problema de la comunicación en redes de sensores inalámbricas. Este hecho pasa por diseñar protocolos de comunicación flexibles, que permitan su adaptación a las diferentes plataformas hardware, y su efectiva inclusión con diferentes protocolos de capas superiores. **B-MAC** (Berkeley Medium Access Control) **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** parte de un estudio de los diferentes tipos de aplicaciones y sus requisitos, para construir una interfaz que pueda adaptar el protocolo a cada una de estas necesidades. B-MAC supone un paso más permitiendo el acceso a través de él a configuraciones directas de la capa física para adaptarse a los requisitos de la aplicación. Supone una perspectiva transparente de un protocolo MAC, que cambia las visiones monolíticas de los protocolos de acceso conocidas hasta ahora. B-MAC es una apuesta por la sencillez y la transparencia. Con la llegada de B-MAC, S-MAC pasa a ser un complicado protocolo en bloque, diseñado para una función concreta: aumentar el tiempo de vida de la red disminuyendo el consumo de energía. Sin embargo, los mecanismos implementados por S-MAC, lo acercan al nivel de mantenimiento de red. Las ideas subyacentes en S-MAC hacen de él un protocolo computacionalmente más costoso, que incluye las funciones típicas de enlace y algunas más.

Qué pasa si el objetivo de una aplicación va más allá del ahorro de energía. B-MAC tiene en cuenta las nuevas aplicaciones que están apareciendo, localización, enrutado de paquetes, etc., y construye un protocolo adaptable a ellas. B-MAC parte de un sencillo núcleo de control de acceso y establecimiento de canales, establece el canal mediante el muestreo de señales y ruido, y establece un protocolo de contenciones con backoff similar al del estándar ZigBee. Una vez establecido el canal, puede entrar en un modo de escucha a bajo consumo, con periodos de dormido, similar al S-MAC, pero que no se basa en el establecimiento de tablas de planificación, sino en este establecimiento limpio del canal (CCA) que permite un acceso evitando colisiones. Lo que reduce el gasto energético y la latencia que suponen las actualizaciones de las tablas de vecinos.

B-MAC no sólo consigue un uso eficiente de la energía, sino que su diseño modular permite su configuración para adaptarse a las distintas aplicaciones. Es el primer protocolo que ofrece una interfaz configurable para que las aplicaciones hagan un uso eficiente de él de un modo transparente. Podemos decir que B-MAC es el primer protocolo que implementa la filosofía cross-layer de manera directa.

5. S-MAC (SENSOR MEDIUM ACCESS CONTROL)

5.1. DISEÑO, OBJETIVOS Y EVOLUCIÓN

Comentados los aspectos básicos de diseño de un protocolo de control de acceso para redes inalámbricas, los diseñadores de S-MAC afrontan el reto de acotar las características deseables para una red inalámbrica adaptándose a los requisitos de una red de sensores.

Ya hemos comentado que el objetivo fundamental es aumentar el tiempo de vida de la red. Para ello, se debe reducir el consumo de energía. Por tanto, se pueden sacrificar otros aspectos como el uso eficiente del canal, la latencia, la productividad, etc. importantes a la hora de afrontar el diseño de un protocolo de comunicaciones, pero que desde la perspectiva de una red de sensores, quizás no merezca la pena conseguirlos si podemos conseguir reducir el consumo de energía.

Insistimos nuevamente en los objetivos que S-MAC persigue, y qué soluciones se aportan para lograrlas. El ahorro energético es fundamental. También nos encontramos con aspectos como la escalabilidad y adaptatividad, deseables en redes inalámbricas con una infraestructura ad-hoc, donde el número de nodos es variable (no se tiene por qué conocer a la hora de establecer la red), y los parámetros de densidad de nodos y tiempo de vida de los mismos se desconocen. Dado el objetivo fundamental de una red de sensores, funcionar como macroscopio del mundo real, quizás estos dos

objetivos suponen la primera barrera a franquear desde todos los puntos de vista que pretenden mejorar el diseño de soluciones basadas en RSI.

Latencia, productividad, uso eficiente del canal, reparto equitativo del mismo para todos los nodos, pueden llegar a ser objetivos secundarios a la hora de afrontar un diseño MAC.

Así, el primer paso a la hora de afrontar el diseño de un MAC para RSI, será el estudio de las fuentes de gasto de energía por parte de la radio.

Las colisiones, son el resultado de que dos nodos transmitan al mismo tiempo. Hemos estudiado que, la evolución de la mayoría de protocolo de acceso al medio para redes inalámbricas, tienen en cuenta este problema. Existen diferentes enfoques para disminuirlo, pero cuando las colisiones se producen, la productividad y la latencia de la red caen, lo que conlleva además, un aumento del número de retransmisiones. Un mayor uso de la radio, conlleva un mayor consumo de energía.

La radio, cuando no transmite, espera a que le lleguen datos. La escucha en un medio inalámbrico es un problema complejo, que entre otros inconvenientes conlleva un mayor uso de la radio, por lo que termina con un consumo de energía elevado. Este derroche, puede ser inútil, dado que en las soluciones basadas en redes de sensores, no se suelen exigir grandes volúmenes de datos, sino transmisiones periódicas de unos pocos bytes, y transmisiones que pueden llegar a ser muy espaciadas en el tiempo. En el diseño de S-MAC, la pregunta clave fue, ¿es necesario que la radio permanezca a la escucha todo el tiempo?

La mayoría de protocolos de control de acceso diseñados para hacer frente al medio radioeléctrico suponen una serie de tramas de control que arbitren el acceso. Ahora bien, en un medio ad-hoc, con muchas posibilidades de variación en la infraestructura original, podemos saturar el canal con este tipo de tramas de control. Además, se incrementa la probabilidad de tener que procesar paquetes que no estaban destinados al nodo que permanece a la escucha. Esto supone dos fuentes más de consumo de energía.

Para afrontar reducir el número de colisiones, evitar escuchas innecesarias y reducir el número de paquetes de control, S-MAC sacrifica aspectos como latencia o reparto equitativo de la carga. Pero quizás sean cuestiones menores cuando hablamos de aumentar el tiempo de vida de la red.

Para ello, S-MAC propone una serie de mecanismos que lograrán reducir el consumo de energía:

- Establecer periodos de dormido, conocidos como *Low Duty Cycles*, donde se establecen periodos mínimos de escucha.
- Coordinar los periodos de dormidos estableciendo cluster de vecinos.
- Permitir el paso de mensajes entre vecinos, para establecer entre qué vecinos se establece la comunicación mediante el sistema de mensajes RTS/CTS modificados (similar al algoritmo CSMA/CA), lo que evita saturación de mensajes de control en el canal.
- Procesar operaciones dentro de la red, lo que conlleva una disminución de las transmisiones.

Se ha comentado que S-MAC conlleva algunos problemas de latencia, y que otros protocolos como T-MAC los evidencian **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** y aportan nuevas ideas y soluciones. Una nueva versión del protocolo S-MAC (*S-MAC ver 1.2*) plantea alguna nueva solución al problema de la latencia. Hay veces que un nodo se duerme instantes antes de que el nodo receptor se duerma, hecho que provoca un incremento de la latencia y de las retransmisiones.

Se opta por la idea de transmisión en modo ráfaga, los vecinos que tengan paquetes que transmitir, se aseguran la transmisión del paquete que será dividido en paquetes más pequeños. En cada paquete se recuerda cuánto falta para terminar la transmisión, y por tanto, cuánto más pueden dormir los nodos que intervienen en la misma. Aseguramos que terminamos las transmisiones, lo que conllevará una mejora en la latencia y una disminución de las retransmisiones, con el consecuente ahorro de energía.

5.2. CUESTIONES SOBRE EL FUNCIONAMIENTO

Vistos los problemas que conlleva el diseño de un algoritmo MAC para redes de sensores inalámbricas y los aspectos a los que se enfrenta S-MAC, nos proponemos aclarar de qué manera solventa el problema del ahorro de energía S-MAC, qué aspectos novedosos presenta y las ideas claves de su funcionamiento.

En un principio, cuando se habla de técnicas de ahorro de energía, aparece la idea de apagar los dispositivos en cuanto terminan sus funciones **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** Este punto de vista se aplica entonces a la radio y al algoritmo que controla la radio, apagando el dispositivo cuando no se use. Pero aún más, hacer que sea el propio algoritmo quien en función del estado de la comunicación, apague la radio, estableciendo periodos de dormido.

Low duty cycle (ver figura 6) hace referencia a esta idea. Un periodo de actividad de la radio corto, en el que sea posible transmitir los datos necesarios y esperar durante un cierto periodo de tiempo la llegada de nuevos datos. Los periodos de escucha y dormido van a reducir de manera notable el gasto energético del nodo, reduciendo los periodos de inactividad.

Si no ocurre ningún evento de monitorización (llegada de datos desde los sensores y envío del dato a través de la radio), supondría un gasto energético el hecho de tener la radio encendida. La radio se debe apagar. Cada nodo duerme su radio durante algún tiempo, después la enciende y escucha el medio por si recibe algún mensaje.



Figura 6: S-MAC establece una serie de periodos de dormido de la radio, con lo que se llega a conseguir ahorro de energía

Se pueden ajustar estos periodos según los requerimientos de la aplicación. Se puede pensar, en un primer momento, en establecer un periodo para cada nodo, pero claro, un nodo transmite a un receptor y escucha de un transmisor. No es un nodo lo que conlleva a pensar en un diseño MAC, sino un grupo de nodos. Por tanto, es común que varios nodos compartan los mismos tiempos de actividad y dormido. Esta aproximación, en principio, reduce el consumo de energía, puesto que los nodos permanecen dormidos durante largos periodos de tiempo. Sin embargo, ocurre que aumenta la latencia que se acumula en cada periodo de dormido. Si un nodo transmite a otro que está dormido no tendrá respuesta (ACK), lo que conlleva un aumento de las retransmisiones. Si se conoce cuando se despierta el nodo vecino, no envío mensajes inútiles, y no saturó el canal. Pero si no existe una sincronización entre nodos, aumentará la latencia debido a que hay que esperar a que el nodo se despierte.

Por tanto, el mecanismo de *Low duty cycle* necesita de los periodos de establecimiento de la planificación y mantenimiento de las mismas. Se establecen grupos de vecinos que comparten la misma planificación, lo que se conoce como **sincronización de planificaciones**.

Cada nodo guarda una copia de la tabla de planificaciones. Los nodos, al iniciar la aplicación de comunicación, inician una fase de intercambio de mensajes de sincronización. En este periodo los nodos, o bien seleccionan una planificación propia, o bien escogen una planificación de un vecino que está siendo difundida en el medio.

Una vez que el nodo establece su planificación, la difunde a través de la red. A este proceso se le denomina periodo de descubrimiento de vecinos.

Una vez establecida la planificación para todos los nodos, hacen uso de ella estableciendo un nuevo periodo de contención. No sólo hay que detectar la portadora y esperar a que el medio esté libre (Detección de la portadora). Una vez que el medio sea accesible, tenemos que mirar la planificación y si el nodo al que envío está libre, comenzaré la transmisión, si no, el nodo puede ir a dormir. Este nuevo periodo, se le conoce como detección de portadora virtual. El tiempo de contención será un periodo calculado de manera mixta entre la detección de la portadora real y esta nueva **detección de la portadora virtual**.

La sincronización entre los relojes de los distintos motes es clave en el funcionamiento de este algoritmo. Sin embargo, con su funcionamiento, los relojes tienden a perder la sincronización. Por tanto, es necesario actualizar de manera periódica las tablas de planificación de los nodos, proceso que se conoce como mantenimiento de la planificación. Existe un tipo de mensajes de sincronización que actualizan estas tablas. Los mensajes SYNC incluyen la dirección origen y el tiempo que falta para el siguiente periodo de dormido, relativo al momento en el que el transmisor comienza a transmitir el mensaje SYNC. Con este dato, el receptor puede ajustar sus tablas de planificación. Existen otros mecanismos de actualización, en concreto, establecer periodos de escucha considerablemente más largo que las posibles desviaciones del reloj. También, la inclusión de mecanismos de *TimeStamps*, que indique cuanto falta para terminar el mensaje. Sin embargo, llega un momento en el que las desviaciones de los relojes de los distintos nodos hace necesario una nueva actualización de las tablas.

Un análisis de la latencia **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** descubre que ésta se acumula en cada nodo de dormido. Adelantábamos este problema al anotar la idea principal de establecer periodos de actividad y dormido. Si un nodo quiere transmitir, y detecta, a través de su planificación que no puede porque el receptor está dormido, se produce una latencia. En redes multisalto, la latencia se acumula en cada salto, siendo la latencia total proporcional al número de saltos. Una nueva aproximación sugiere periodos de dormido variables **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, que es lo que se denomina *Adaptive Listen*. Este mecanismo implementa esta idea de periodos de dormido variables. Con más detalle, sabemos que un nodo que escucha el medio y detecta una comunicación, sabe cuanto queda para que ésta termine y se pone a dormir. Pero podría despertarse justo cuando la otra comunicación termine, pues él, que detectó la transmisión de un vecino, podría formar parte de un salto (cosa probable en redes multisalto). Esto disminuirá la latencia en cada salto (ver figura 7).

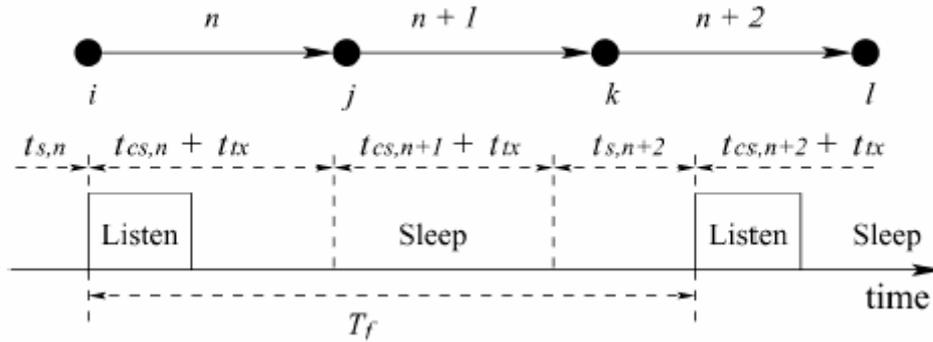


Figura 7: Acumulación de la latencia, introducida en cada salto debido al periodo de dormido

Veamos ahora el problema de las colisiones. Si todos los nodos duermen el mismo periodo de tiempo, existe un ahorro de energía, pero si todos despiertan al mismo tiempo y acceden al medio al mismo tiempo, se producirá un aumento de las colisiones. S-MAC aprovecha la base de un protocolo CSMA/CA, con periodos de contención aleatorios, para que todos los nodos transmitan al mismo tiempo. Para establecer estos grupos, aparece entonces una serie de periodos de intercambio de mensajes de sincronización que permiten establecer planificaciones compartidas entre un grupo de nodos. Así, cada nodo guarda el estado de sus vecinos, la planificación de sus vecinos y así se pueden sincronizar. Esto reduce en parte la latencia evitando saturar el canal con mensajes de control y retransmisiones innecesarias. Los mensajes de sincronización, además, sirven de señalización para establecer las planificaciones de nuevos nodos que se incorporen a la red (caso de las estructuras ad-hoc).

Pero insistimos, el que todos los nodos se despierten al mismo tiempo, provoca un aumento de las colisiones. S-MAC cuenta con mecanismos encaminados a evitar colisiones, los paquetes RTS/CTS y los periodos de contención.

Ya hemos dicho que existe un periodo en el que el nodo tiene que escuchar al medio para detectar la portadora. En un medio inalámbrico es una operación compleja, que requiere tomar muestras de las distintas señales que llegan al nodo a través de un canal. Al periodo de escucha del canal para detectar la portadora, se le llama tiempo de contención y se establece de forma aleatoria, de manera que disminuye la probabilidad de que dos nodos accedan al medio al mismo tiempo. Este mecanismo, similar al del algoritmo CSMA/CA para los dos protocolos de redes inalámbricas existentes, evita colisiones. Cuando un nodo se despierta, escucha durante un tiempo de contención el canal, si está libre accede al medio, si no, debe esperar un nuevo tiempo aleatorio de contención.

Recordamos como CSMA/CA implementaba el mecanismo de mensajes RTS/CTS, donde se indicaba la duración del paquete, lo que permitía asegurar que un nodo que detectaba un paquete RTS que no era para él, conocía cuanto tiempo debía esperar hasta que el medio estuviese libre. La respuesta CTS confirmaba al nodo transmisor la disponibilidad del canal para transmitir.

S-MAC aprovecha este mecanismo de paso de mensajes RTS/CTS con los ACK de confirmación para indicar la duración de la transmisión al resto de nodos. Es además, el mecanismo que evitará el problema de las **sobreescuchas** (cuando un nodo escucha mensajes que no son para él). Los mensajes RTS/CTS indican cuanto queda de mensaje por transmitir, esta información permite a un nodo ponerse a dormir actualizando su tabla de planificaciones.

El mecanismo de paso de mensajes RTS/CTS difiere del mecanismo que propone CSMA/CD. Los paquetes de datos se dividen en paquetes más pequeños, y S-MAC reserva tiempo de transmisión para todos ellos. Es lo que se denomina transmisión en modo ráfaga. Los mensajes RTS/CTS llevan la cuenta de lo que queda por transmitir de todo el mensaje (datos y reconocimientos), y no de una unidad de paquete, por lo que en caso de retransmisión, el resto de nodos que compiten por el medio no pueden acceder porque S-MAC reservó espacio para todos ellos (para todas las unidades del paquete original). Esto impide el acceso al medio de otros nodos, pero garantiza la llegada de todo el paquete y reduce problemas de colisiones y sobreescucha consiguiendo un uso eficiente del consumo energético.

La nueva versión de S-MAC va a permitir ahorrar energía, reduciendo el consumo, mediante un estudio de las fuentes que lo producen. Es el primer protocolo que va encaminado a conseguir el objetivo de reducir el consumo de energía teniendo en cuenta las características de la comunicación en redes inalámbricas.

REFERENCIAS

- [1] William Stallings **Comunicaciones y Redes de Computadoras** Prentice Hall, 6^a Ed. 2001. ISBN: 84-205-2986-9
- [10] José Manuel Huidobro Moya **Comunicaciones Inalámbricas** Thomsom Editores Spain Paraninfo, 2002. ISBN: 84-283-2844-7
- [3] The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc. **Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications** , 1999
- [4] www.bluetooth.org **The Official Bluetooth MemberShip Site.**
- [5] The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc. **Part 11.b: Wireless LAN Medium Access Control & Physical Layer Specifications: Higher Speed Physical Layer Extension in the 2.4 GHz Band**, 1999
- [6] The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc. **Part 15.4: Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications for Low-Rate Wireless Personal Area Networks (LR-WPANs)**, 2003.
- [7] J. Nechvatal, E. Barker, L. Bassham, W. Burr, M. Dworkin, J.Foti, E. Roback, **Advanced Encryption Standard (AES)** Computer Security Division Information Technology Laboratory National Institute of Standards and Technology Technology Administration U.S, 2000
- [8] Wei Ye, John Heidemann, and Deborah Estrin. **Medium Access Control with Coordinate, Adaptive Sleeping for Wireless Sensor Networks.** ACM/IEEE Transactions and Networking,12(3):493-506, New York, 2004.
- [9] Tijs van Dam and Koen Langendoen, **An Adaptive Energy-Efficient Mac Protocol for Wireless Sensor Networks.** In Proceedings of ACM Conference on Embedded Networked Sensor Systems SenSys'03, Los Angeles, 2003.
- [10] A. El-Hoiydi, J.-D. Decotignie and J.Hernandez **Low Power MAC Protocols for Infrastructure Wireless Sensor Networks**, In Proceedings of the Fifth European Wireless Conference, Barcelona, 2004
- [11] Joseph Polastre, Jason Hill and David Culler. **Versatile Low Power Media Access for Wireless Sensor Networks.** In Proceedings of ACM Conference on Embedded Networked Sensor Systems (SenSys'04), Baltimore,2004
- [12] Jonathan Hui, Zhiyuan Ren, and Bruce H. Krogh **Sentry-Based Power Management in Wireless Sensor Networks.** In Proceedings of Information Processing in Sensor Networks, Second International Workshop, (IPSN 2003), Palo Alto, 2003.