

4

El estándar IEEE 802.15.4

4.1 Home Networking With IEEE 802.15.4.

Las características más importantes en este estándar son su flexibilidad de red, bajos costos, bajo consumo de energía; este estándar se puede utilizar para muchas aplicaciones en el hogar que requieren una tasa baja en la transmisión de datos.

No es la primera vez que se intenta establecer una red en el hogar para ofrecer soluciones a su propietario. Los intentos por lograr esta meta se pueden clasificar fácilmente en dos grupos: los que utilizan alambres y los inalámbricos.

Los principales sistemas en la parte de los alámbricos; las líneas telefónicas, módems por cable y líneas de transmisión de energía eléctrica. Cada uno de ellos ofrece

ventajas y desventajas que dependen principalmente en sus capacidades de ancho de banda, instalación, mantenimiento y costo entre otros.

La clave la de motivación para el uso de tecnología inalámbrica es la reducción en los gastos de instalación, ya que nunca es necesario cambiar el cableado. Las redes inalámbricas implican un gran intercambio de información con un mínimo de esfuerzo de instalación. Esta tendencia es impulsada por la gran capacidad de integrar componentes inalámbricos de una forma más barata y el éxito que tienen otros sistemas de comunicación inalámbrica como los celulares.

Varias aplicaciones dentro del hogar están vislumbrando la necesidad de comunicación. En términos generales, estos se pueden clasificar en conexión a Internet, conexión multi-PC, redes de audio y video, automatización del hogar, ahorro de energía y seguridad. Cada uno de ellos tiene diferentes necesidades de ancho de banda, costos y procedimientos de instalación. Con el gran crecimiento de Internet, las mayores preocupaciones de los diseñadores es el satisfacer la necesidad de compartir conexiones de alta velocidad.

En el otro lado del espectro, las aplicaciones como la automatización del hogar y aplicaciones de seguridad han relajado dichas necesidades. Estas aplicaciones no pueden manejar protocolos muy pesados ya que afectarían seriamente en el consumo de energía y requerirían de mayor poder de procesamiento. Claro que lo anterior tendría un impacto directo en los costos.

Consideremos un detector de temperatura pequeño en una ventana. Este censor no necesita reportar sus datos más que unas pocas veces por hora, es discreto y tiene un precio muy bajo. Este tipo de aplicaciones se manejarían muy bien con un link de

comunicación inalámbrica de baja potencia. El uso de cables es (de comunicaciones o de energía) es impracticable por el uso mismo de la ventana. Además, los costos de la instalación del cable excederían en varias veces el costo del sensor. Además se prefiere que los aparatos consuman muy poca energía ya que el cambio constante de las baterías se considera impráctico. La tecnología 802.11 (WLAN) resultaría sofocante ya que solo satisface los requerimientos de conexión. Bluetooth se concibió originalmente como un sustituto del cable, pero se ha llevado sobre un camino más complejo, haciéndolo impracticable para aplicaciones de bajo consumo. La tendencia a la complejidad ha incrementado los costos provistos para esta tecnología. Ambos dispositivos, bluetooth y 802.11, requerirían un cambio de baterías algunas veces al año, lo que resulta impracticable si se tienen varias ventanas en esta aplicación como es el caso de una casa típica con varias ventanas.

En el año 2000 dos grupos especialistas en estándares (ZigBee y el grupo 15 de trabajo IEEE 802) se unieron para dar a conocer la necesidad de un nuevo estándar para redes inalámbricas de bajo poder y por lo tanto bajos costos en ambientes industriales y caseros. Dando como resultado que en diciembre de ese año el comité para nuevos estándares IEEE (NesCom) designara oficialmente un nuevo grupo de trabajo para el desarrollo de un nuevo estándar de baja transmisión en redes inalámbricas para áreas personales (LR-WPAN), con lo que nació el estándar que ahora se conoce como el 802.14. Algunas características de alto nivel del 802.15.4 se resumen en la tabla (3.10).

Propiedad	Rango
Rango de transmisión de datos	868 MHz: 20kb/s; 915 MHz: 40kb/s; 2.4 GHz: 250 kb/s.
Alcance	10 – 20 m.
Latency	Abajo de los 15 ms.
Canales	868/915 MHz: 11 canales. 2.4 GHz: 16 canales.
Bandas de frecuencia	Dos PHY: 868/915 MHz y 2.4 GHz.
Direccionamiento	Cortos de 8 bits o 64 bits IEEE
Canal de acceso	CSMA-CA y rasurado CSMA-CA
Temperatura	El rango de temperatura industrial: -40° a +85° C

Tabla 4.1 – Propiedades del IEEE 802.15.4

4.2 Capas de red.

En las redes tradicionales por cable, la capa de red es responsable por la topología de construcción y mantenimiento de la misma, así como de nombrarla y de los servicios de enlace que incorpora las tareas necesarias de direccionamiento y seguridad. Estos mismos servicios existen para redes inalámbricas para el hogar, sin embargo representan un reto mayor por la primicia de ahorro de energía. Las redes que se construyan dentro de esta capa del estándar IEEE 802.15.4 se espera que se auto organicen y se auto mantengan en funcionamiento con lo que se pretende reducir los costos totales para el consumidor.

El estándar IEEE 802.15.4 soporta múltiples topologías para su conexión en red, entre ellas la topología tipo estrella y la topología peer-to-peer (Fig 45). La topología a escoger es una elección de diseño y va a estar dado por la aplicación a la que se desee orientar; algunas aplicaciones como periféricos e interfases de PC, requieren de conexiones de baja potencia de tipo estrella, mientras que otros como los perímetros de seguridad requieren de una mayor área de cobertura por lo que es necesario implementar una red peer-to-peer.

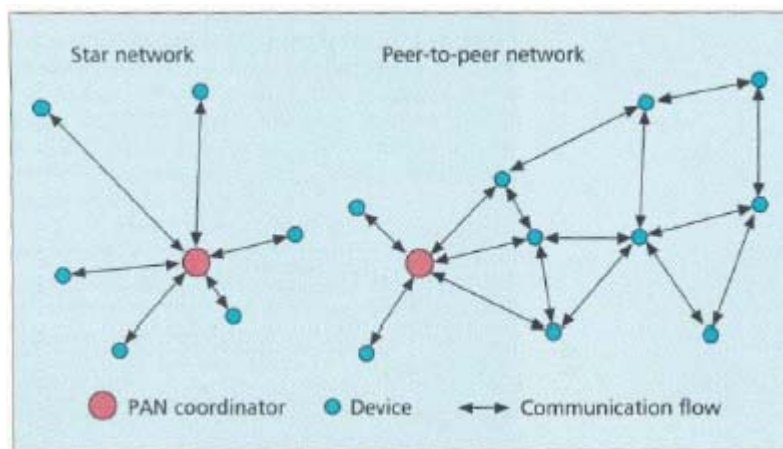


Figura 4.1 - Redes tipo estrella y peer-to-peer [3].

4.3 Capa de enlace de datos (data link layer, DLL).

El proyecto IEEE 802 divide al DLL en dos sub capas, la sub capa de enlace de acceso a medios (Medium Access Control, MAC) y la de control de enlaces lógicos (Logical link control, LLC). El LLC es común a todos estándares 802, mientras que la sub capa MAC depende del hardware y varía respecto a la implementación física de esta capa. La figura 4.2 ilustra la forma en que el estándar IEEE 802.15.4 se basa en la

organización internacional para la estandarización (ISO) del modelo de referencia para la interconexión de sistemas abiertos (OSI).

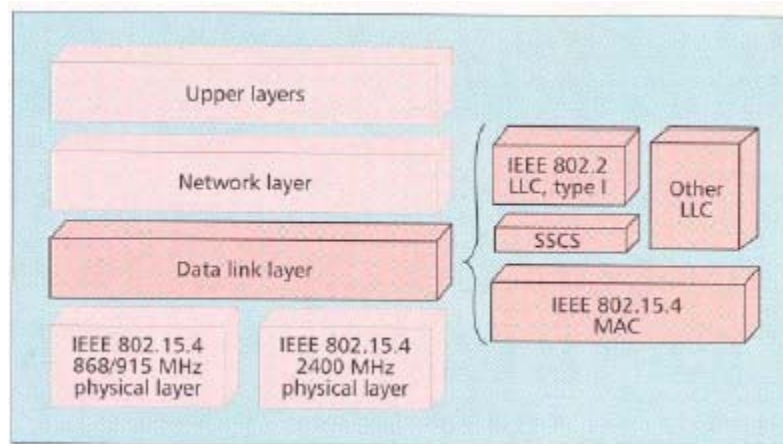


Figura 4.2 – Relación del IEEE 802.15.4 con el sistema OSI [3].

Las características del MAC IEEE 802.15.4 son; la asociación y la disociación, reconocimientos de entrega de trama, mecanismos de acceso al canal, validación de trama, garantía del manejo de las ranuras de tiempo, y manejo de guías. Las sub capas MAC proporcionan dos tipos de servicios hacia capas superiores que se acceden a través de dos puntos de acceso a servicios (SAPs). Los servicios de datos MAC se acceden por medio de la parte común de la sub capa (MCPS-SAP), y el manejo de servicios MAC se accede por medio de la capa MAC de manejo de identidades (MLME-SAP). Esos dos servicios proporcionan una interfase entre las sub capas de convergencia de servicios específicos (SSCS) u otro LLC y las capas físicas.

El administrador de servicios MAC tiene 26 primitivas. Comparadas con el 802.15.1 (bluetooth), que tiene alrededor de 131 primitivas en 32 eventos, el MAC 802.15.4 es muy simple, haciéndolo muy versátil para las aplicaciones hacia las que fue

orientado, aunque se paga el costo de tener un instrumento con características menores a las del 802.15.1 (por ejemplo el 802.15.4 no soporta enlaces sincronizados de voz).

4.4 Formato general de tramas MAC.

El formato general de las tramas MAC se diseñó para ser muy flexible y que se ajustara a las necesidades de las diferentes aplicaciones con diversas topologías de red al mismo tiempo que se mantenía un protocolo simple. El formato general de una trama MAC se muestra en la figura 4.3. “A la trama del MAC se le denomina unidad de datos de protocolos MAC (MPDU) y se compone del encabezado MAC (MHR), unidad de servicio de datos MAC (MSDU), pie de MAC (MFR). El primer campo del encabezado de trama es el campo de control. Este indica el tipo de trama MAC que se pretende transmitir, especifica el formato y la dirección de campo y controla los mensajes de enterado”[3]. En pocas palabras, la trama de control especifica como es el resto de la trama de datos y que es lo que contiene.

El tamaño de las direcciones puede variar entre 0 y 20 bytes. Por ejemplo, una trama de datos puede contener información de la fuente y del destinatario, mientras que la trama de enterado no contiene ninguna información de ninguna dirección. Por otro lado una trama de guía solo tiene información de la dirección de la fuente. Esta flexibilidad en la estructura ayuda a incrementar la eficiencia del protocolo al mantener los paquetes lo más reducido que se puede.

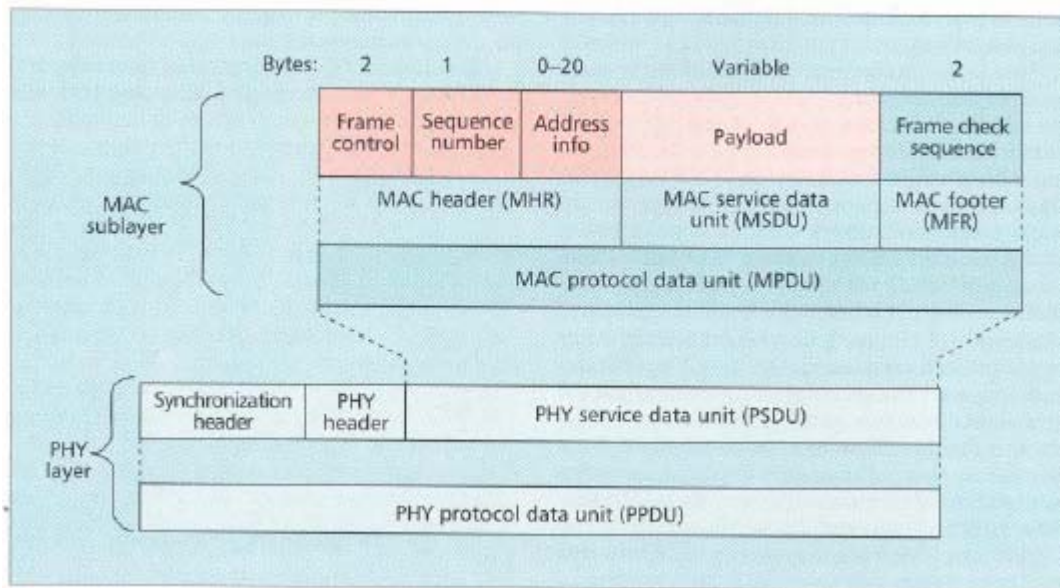


Figura 4.3 – Forma general de la trama MAC [3].

El campo llamado payload es variable en longitud; sin embargo, la trama completa de MAC no debe de exceder los 127 bytes de información. Los datos que lleva el payload depende del tipo de trama. El estándar IEEE 802.15.4 tiene cuatro diferentes tipos de tramas. Esas son la trama de guía, de datos, tramas de enterados y tramas de comandos MAC. Solo las tramas de datos y de guía contienen información provenientes de capas superiores; las tramas de mensajes de enterado y la de comandos MAC originados en el MAC son usados para comunicaciones MAC peer-to-peer.

Otros campos en la trama MAC son una secuencia de números al igual que tramas de chequeo (FCS). La secuencia de números en los encabezados enlazan a las tramas de acknowledgment con transmisiones anteriores. La transmisión se considera exitosa solo cuando la trama de enterado contiene la misma secuencia de números que la secuencia anterior transmitida. Las FCS ayudan a verificar la integridad de las tramas del MAC.

4.5 La estructura de las super-ranuras.

Algunas aplicaciones requieren anchos de banda dedicados a lograr estados latentes para un consumo de baja potencia. Para lograr dichos estados latentes el IEEE 802.15.4 se puede operar en un modo opcional llamado super-estructuras (superframes). En un superframe, un coordinador de red, denominado el coordinador PAN, transmite superframes de guía en intervalos definidos. Estos intervalos pueden ser tan cortos como unos 15 ms o tan largos como 245 s. El tiempo entre cada uno de ellos se divide en 16 ranuras de tiempo independientes a la duración de cada superframe. Un aparato o instrumento puede transmitir cuando sea durante una ranura de tiempo. Pero debe de terminar su transmisión antes de la siguiente superframes de guía. El canal de acceso en las ranuras de tiempo es una contención de base; sin embargo el coordinador de PAN puede asignar intervalos o ranuras de tiempo a un solo aparato que requiera un determinado ancho de banda permanentemente o transmisiones latentes bajas. Estas ranuras de tiempo asignadas son llamadas ranuras de garantía (GTS) y juntas forman un periodo de contención libre localizado antes de la próxima señal de guía (Figura 4.4). El tamaño del periodo de contención libre puede variar dependiendo de la demanda de los demás aparatos asociados a la red; cuando el GTS se utiliza, todos los aparatos deben de completar todas sus transacciones de contención de base antes de que el periodo de contención libre comience.

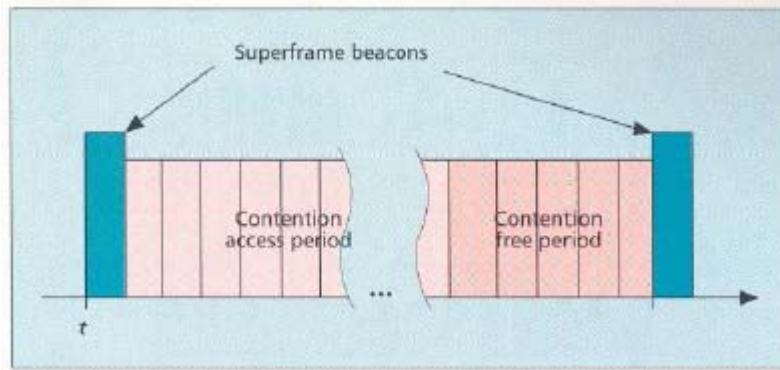


Figura 4.4 – Estructura de las supertramas [3].

4.6 Otras características MAC.

Dependiendo de la configuración de red, una WPAN de baja transmisión (LR-WPAN) puede utilizar uno de los dos mecanismos de acceso a canales. En una red de guía con superframes, una portadora fragmentada en varios intervalos de tiempo permite múltiples accesos con un mecanismo que evita las colisiones de información (CSMA-CA). En redes sin faros o señales de guía, se utiliza el estándar CSMA-CA. Estas redes trabajan de la siguiente forma. Cuando algún aparato desea transmitir en una red que no permite señales de guía, la red primero revisa si otro aparato se encuentra transmitiendo sobre el mismo canal. Si es el caso, el intento de acceso al canal se tiene que hacer en ocasiones posteriores, o indica una falla de conexión después de varios intentos fallidos. La trama de acknowledgment confirma si una transmisión previa no utiliza los mecanismos de CSMA dado que estos se mandan inmediatamente después de cada paquete de información.

En una red beacon-enabled, cualquier dispositivo, que desee transmitir durante el periodo de acceso de contención, espera a que empiece la siguiente ranura de tiempo y

después determina si algún otro dispositivo se encuentra transmitiendo en la misma ranura de tiempo. Si algún otro dispositivo se encuentra transmitiendo en dicho spot, el dispositivo se repliega a un número aleatorio de slots o indica un fallo en la conexión después de varios intentos. Además en una red beacon-enabled, las tramas de acknowledgment no utilizan CSMA.

Una función importante del MAC es la confirmación de recepciones exitosas de frames de algún dispositivo. Las recepciones exitosas y las validaciones de datos o comandos MAC se confirman por medio de acknowledgment. Si el dispositivo de recepción no es capaz de recibir la información en ese momento por algún motivo, el receptor no manda ningún acknowledgment. El campo de control en el frame indica si se espera un acknowledgment o no. El frame que contiene al acknowledgment se manda de regreso inmediatamente después de que se hace una validación exitosa del frame de entrada. Los frames de guía (beacon frames) mandados por el coordinador del PAN y los frames de acknowledgments nunca son respondidos con algún acknowledgment.

El estándar IEEE 802.15.4 proporciona tres niveles de seguridad: sin seguridad (por ejemplo, aplicaciones de publicidad); control de acceso a listas (sin seguridad criptográfica); y seguridad con clave simétrica. Para minimizar costos para dispositivos que no lo requieran, el método de distribución de clave no se especifica en el estándar pero se debe de incluir en capas superiores de las aplicaciones apropiadas.

4.7 Capa física.

El IEEE 802.15.4 ofrece dos opciones de PHY que combinan con el MAC para permitir un amplio rango de aplicaciones en red. Ambas PHYs se basan en métodos de

secuencia directa de espectro extendido (DSSS) que resultan en bajos costos de implementación digital en IC, y ambas comparten la misma estructura básica de paquetes low-duty-cycle con operaciones de bajo consumo de energía. La principal diferencia entre ambas PHYs radica en la banda de frecuencias. La PHY de los 2.4 GHz, especifica operación en la banda industrial, médica y científica (ISM), que prácticamente está disponible a nivel mundial, mientras que la PHY de los 868/915 MHz especifica operaciones en la banda de 865 MHz en Europa y 915 MHz en la banda ISM en Estados Unidos. Mientras que la movilidad entre países no se anticipa para la mayoría de las aplicaciones de redes en las casas, la disponibilidad internacional de la banda de los 2.4 GHz ofrece ventajas en términos de mercados más amplios y costos de manufactura más bajos. Por otro lado las bandas de 868 MHz y 915 MHz ofrecen una alternativa a la congestión creciente y demás interferencias (hornos de microondas, etc) asociadas a la banda de 2.4 GHz. Y mayores rangos por enlace debido a que existe menores pérdidas de propagación.

Existe una segunda distinción de las características de la PHY es el rango de transmisión. La PHY de 2.4 GHz permite un rango de transmisión de 250 kb/s, mientras que la PHY de los 868/915 MHz ofrece rangos de transmisión de 20 kb/s y 40 kb/s respectivamente. Este rango superior de transmisión en la PHY de los 2.4 GHz se atribuye principalmente a un mayor orden en la modulación, en la cual cada símbolo representa múltiples bits. Los diferentes rangos de transmisión se pueden explotar para lograr un variedad de objetivos o aplicaciones. Por ejemplo la baja densidad de datos en la PHY de los 868/915 MHz se puede ocupar para lograr mayor sensibilidad y mayores áreas de cobertura, con lo que se reduce el número de nodos requeridos para cubrir un

área geográfica, mientras que el rango superior de transmisión en la PHY de los 2.4 GHz se puede utilizar para conseguir salidas superiores y de poca latencia. Se espera que en cada PHY se encuentren aplicaciones adecuadas a ellas y a sus rangos de transmisión.

4.8 Canalización.

En el IEEE 802.15.4 se definen 27 canales de frecuencia entre las tres bandas (ver figura 4.5 y tabla 4.2). La PHY de los 868/915 MHz soporta un solo canal entre los 868 y los 868.6 MHz , y diez canales entre los 902.0 y 928.0 MHz. Debido al soporte regional de esas dos bandas de frecuencias, es muy improbable que una sola red utilice los 11 canales. Sin embargo, las dos bandas se consideran lo suficientemente cercanas en frecuencia que se puede utilizar el mismo hardware para ambos y así reducir costos de manufactura. La PHY de los 2.4 GHz soporta 16 canales entre los 2.4 y los 2.4835 GHz con un amplio espacio entre canales (5 MHz) esto con el objetivo de facilitar los requerimientos de filtrado en la transmisión y en la recepción.

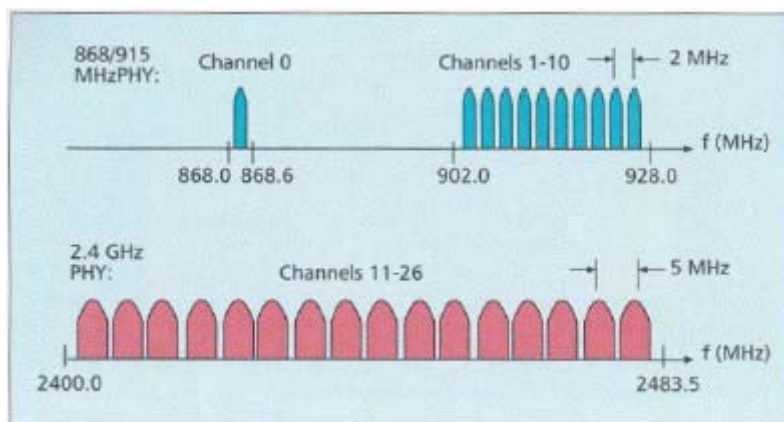


Figura 4.5 – Estructura de canales del IEEE 802.15.4 [3].

Channel number	Channel center frequency (MHz)
$k = 0$	868.3
$k = 1, 2, \dots, 10$	$906 + 2(k - 1)$
$k = 11, 12, \dots, 26$	$2405 + 5(k - 11)$

Tabla 4.2 – Frecuencia de los canales IEEE 802.15.4 [3].

Dado que el hogar es propenso a tener múltiples redes inalámbricas trabajando en las mismas bandas de frecuencias, así como una interferencia no intencionada de las diferentes aplicaciones, la capacidad de relocalización dentro del espectro será un factor importante en el éxito de las redes inalámbricas dentro del hogar. El estándar fue diseñado para implementar una selección dinámica de canales, a través de una selección específica de algoritmos la cual es responsabilidad de la capa de red. La capa MAC incluye funciones de búsqueda que sigue paso a paso a través de una lista de canales permitidos en busca de una señal de guía, mientras que la PHY contiene varias funciones de bajo nivel, tales como la detección de los niveles de energía recibidos, indicadores de calidad en el enlace así como de conmutación de canales, lo que permite asignación de canales y agilidad en la selección de frecuencias. Esas funciones son utilizadas por la red para establecer su canal inicial de operación y para cambiar canales en respuesta a una pausa muy prolongada.

4.9 Estructura de paquetes de información.

Para mantener un una interfaz común y simple con el MAC, ambas capas PHY comparten una estructura simple del paquete (figura 4.5). Cada paquete, o unidad de

datos del protocolo PHY (PPDU), contiene un encabezado de sincronización, un encabezado de PHY para indicar la longitud del paquete, y la carga de información, o la unidad de secuencia PHY (PSDU). El preámbulo de 32 bits está diseñado para la adquisición de símbolos y para los tiempos de chip, y en algunos casos se utiliza para ajustes bruscos en la frecuencia. No se requiere una ecualización en el canal de la PHY debido a la combinación de áreas de cobertura pequeñas con rangos bajos de transmisión. “Típicamente el retraso RMS (root mean square) de propagación en casas residenciales es de 25ns, que corresponde únicamente al 2.5 % del periodo del spread spectrum utilizado en el IEEE 802.15.4” [4].

Dentro del encabezado del PHY, se utilizan 7 bits para especificar la longitud de la carga de datos (en bytes). La longitud de paquetes va de 0 a 127 bytes, a través del overhead de la capa MAC, paquetes con longitud cero no ocurren en la práctica. El tamaño típico de los paquetes para la mayoría de las aplicaciones caseras tales como el monitoreo y control de dispositivos de seguridad, iluminación, aire acondicionado, y otras aplicaciones va de 30 a 60 bytes, mientras que las aplicaciones más demandantes tales como juegos interactivos y periféricos de computadora, requerirán paquetes más largos. La duración máxima de paquetes es de 4.25 ms para la banda de los 2.4 GHz, y de 26.6 ms para la banda de los 915 MHz, y de 53.2 ms para la banda de 868 MHz.

4.10 Modulación.

La PHY en los 868/915 MHz utiliza una aproximación simple DSSS en la cual cada bit transmitido se representa por un chip-15 de máxima longitud de secuencia

(secuencia m). Los datos binarios son codificados al multiplicar cada secuencia m por +1 o -1, y la secuencia de chip que resulta se modula dentro de la portadora utilizando BPSK (binary phase shift keying). Antes de la modulación se utiliza una codificación de datos diferencial para permitir una recepción diferencial coherente de baja complejidad.

PHY.	Banda.	Parámetro de Datos.			Parámetros de riego.	
		Velocidad de bits (kb/s)	Velocidad de símbolos (kbaud)	Modulación	Velocidad de chip (Mchips/s)	Modulación
868/915 MHz PHY.	868.0-868.6 MHz.	20.	20.	BPSK	0.3	BPSK
	902.0-928.0 MHz.	40.	40.	BPSK	0.6	BPSK
2.4 GHz PHY.	2.4-4.4835 GHz.	250.	62.5	16-ary ortogonal.	2.0	O-QPSK

Tabla 4.3 – Parámetros de modulación.

La PHY de los 2.4 GHz emplea una técnica de modulación semi-ortogonal basada en métodos de DSSS (con propiedades similares). Los datos binarios son agrupados en símbolos de 4 bits, y cada símbolo especifica una de las 16 secuencias de transmisión

semi-ortogonales de código de pseudo-ruido (PN). Las secuencias de PN son concatenadas para que sean datos de símbolos exitosos, y la secuencia agregada al chip es modulada en la portadora utilizando MSK (minimum shift keying). El uso de símbolos “casi ortogonales” simplifica la implementación a cambio de un desempeño ligeramente menor (< 0.5 dB). Los parámetros de modulación para ambas PHY se resumen en la tabla 4.3.

En términos de eficiencia (energía requerida por bit), la señalización ortogonal mejora su desempeño en 2 dB que BPSK diferencial. Sin embargo, en términos de sensibilidad de recepción, la PHY 868/915 MHz tiene una ventaja de 6-8 dB debido a que tiene velocidades de transmisión más bajas. Por supuesto, que en ambos casos las pérdidas de implementación debido a la sincronización, forma del pulso, simplificaciones en el detector, y demás resultan en desviaciones en sus curvas óptimas de detección.

4.11 Sensitividad y rango.

Las especificaciones actuales de sensibilidad del IEEE 802.15.4 especifican -85 dBm para la PHY de los 2.4 GHz y de -92 dBm para la PHY de los 868-915 MHz. Dichos valores incluyen suficiente margen para las tolerancias que se requieren debido a las imperfecciones en la manufactura de la misma manera que permite implementar aplicaciones de bajo costo. En cada caso, los mejores artículos deben de ser del orden de 10 dB mejores que las especificaciones.

Naturalmente el rango deseado estará en función de la sensibilidad del receptor así como de la potencia del transmisor. El estándar especifica que cada dispositivo debe de

ser capaz de transmitir al menos 1 mW, pero dependiendo de las necesidades de la aplicación, la potencia de transmisión puede ser mayor o menor, la potencia actual de transmisión puede ser menor o mayor (dentro de los límites de regulación establecidos). Los dispositivos típicos (1mW) se espera que cubran un rango de entre 10-20 m; sin embargo, con una buena sensibilidad y un incremento moderado en la potencia de transmisión, una red con topología tipo estrella puede proporcionar una cobertura total para una casa. Para aplicaciones que requieran mayor tiempo de latencia, la topología tipo mesh ofrecen una alternativa atractiva con coberturas caseras dado que cada dispositivo solo necesita suficiente energía para comunicarse con su vecino más cercano.

4.12 Interferencia de y para otros dispositivos.

Los dispositivos que operan en la banda de los 2.4 GHz pueden recibir interferencia causada por otros servicios que operan en dicha banda. Esta situación es aceptable en las aplicaciones que utilizan el estándar IEEE 802.15.4, las cuales requieren una baja calidad de servicio (QoS), no requieren comunicación asíncrona, y se espera que realice varios intentos para completar la transmisión de paquetes. Por el contrario, un requerimiento primario de las aplicaciones del IEEE 802.15.4 es una larga duración en baterías; esto se logra con poca energía de transmisión y muy pocos ciclos de servicio. Dado que los dispositivos IEEE 802.15.4 se la pasan dormidos el 99.9 por ciento del tiempo, y ocupan transmisiones de baja energía en el spread spectrum, deben de estar trabajando en las vecindades de la banda de los 2.4 GHz.