CAPÍTULO 2: REDES INALÁMBRICAS DE AREA PERSONAL (WPAN)

2.1 Introducción a las WPAN

Las redes inalámbricas de área personal WPAN por sus siglas en inglés *Wireless Personal Area Network* son redes que comúnmente cubren distancias del orden de los 10 metros como máximo, normalmente utilizadas para conectar varios dispositivos portátiles personales sin la necesidad de utilizar cables [12]. Esta comunicación de dispositivos *peer-to-peer* normalmente no requiere de altos índices de transmisión de datos. La tecnología inalámbrica Bluetooth, por ejemplo, tiene un índice nominal de 10 metros con índices de datos de hasta 1Mbps. El tipo de ámbito y los relativos bajos índices de datos tienen como resultado un bajo consumo de energía haciendo a la tecnología WPAN adecuada para el uso con dispositivos móviles pequeños, que funcionan con baterías, tales como teléfonos celulares, asistentes personales PDAs o cámaras digitales.

2.1.1 Definición de las WPAN

Tradicionalmente se han utilizado cables de propósito específico para interconectar aparatos personales. Por lo que fue indispensable el desarrollo de soluciones para la interconexión de aparatos de forma inalámbrica. Es así como nació la necesidad de crear una forma eficiente, rápida y confiable de hacer transiciones de información de forma inalámbrica. Dichas soluciones se basan en el concepto de WPAN.

La característica principal de este tipo de redes es que enfocan sus sistemas de comunicaciones a un área típica de 10 metros a la redonda que envuelve a una persona o a algún dispositivo ya sea que esté en movimiento o no. A diferencia de las redes de área local (WLAN), una conexión echa a través de una WPAN involucra a muy poca o nula infraestructura o conexiones directas hacia el mundo exterior. Este tipo de tecnología también procura hacer un uso eficiente de recursos, por lo que se han diseñado protocolos simples y lo más óptimos para cada necesidad de comunicación y aplicación. En WPAN, el usuario es relacionado con los dispositivos electrónicos de su posesión, o en su proximidad en vez de a un lugar geométrico en particular o en alguna localidad de la red. El término red de área personal (PAN) se concibió para describir estos diferentes tipos de conexión en red. La versión inalámbrica o desconectada de dicho concepto es el concepto de WPAN. Una WPAN puede entenderse como una cápsula personal de comunicación alrededor de una persona. Dentro de dicha cápsula, que se mueve en la misma forma en que lo hace una persona, los dispositivos personales se pueden conectar entre ellos. Para satisfacer las diferentes necesidades de comunicación dentro de un área personal la IEEE se dividen los grupos de estudio en 4 grupos de trabajo, que se encargan del desarrollo de estándares.

2.1.2 Grupos de trabajo

Existen principalmente cuatro grupos de trabajo para la tecnología WPAN, cada uno de ellos con características e intereses específicos que generan estándares que satisfacen necesidades específicas de comunicación [13].

- 1. El grupo de trabajo 802.15.1 realiza el estándar basado en las especificaciones del SIG de Bluetooth. Este grupo de trabajo publicó el estándar IEEE 802.15.1 el 14 junio de 2002.
- **2.** El grupo de trabajo 802.15.2 desarrolló un modelo de coexistencia entre las WLAN y WPAN, así como de los aparatos que las envuelven.
- **3.** El grupo de trabajo 802.15.3. Trabaja para establecer los estatus y publicar un estándar nuevo de alta velocidad (20 Mbits/s o mayores) para WPANs. Además de ofrecer una alta velocidad de transmisión, este estándar se está diseñando para consumir poca energía y ofrecer soluciones a bajos costos así como aplicaciones multimedia.
- **4.** El grupo de trabajo T4 para el desarrollo IEEE 802.15.4, investiga y desarrolla soluciones que requieren una baja transmisión de datos y con ello una duración en las baterías de meses e incluso de años así como una complejidad relativamente baja. Dicho grupo de trabajo ha publicado el estándar que lleva su nombre; IEEE 802.15.4.

2.1.3 Aplicaciones

El IEEE 802.15 se diseña para ser ocupado en una amplia gama de aplicaciones, incluyendo el control y monitoreo industrial; seguridad pública, como la detección y determinación de la localización de personas en lugares de desastres; medición en automóviles, como el monitoreo de la presión neumática en las llantas; tarjetas o placas inteligentes; y agricultura de precisión, como medición del nivel de humedad en el suelo, pesticida, herbicida, niveles de pH. Sin embargo las mayores oportunidades de desarrollo del IEEE 802.15 están en la automatización del hogar.

En una casa, se pueden considerar varias posibilidades de mercado: periféricos de la PC, tales como ratones inalámbricos, teclados, joysticks, agendas electrónicas (PDAs) y juegos; aparatos electrónicos, como radios, televisiones, VCRs, CDs, DVDs, controles remotos, y demás, y un control universal para controlar todos los anteriores; automatización del hogar, como calefacción, ventilación, aire acondicionado, iluminación, seguridad y el control de objetos como ventanas, cortinas, puertas, y cerraduras; monitoreo de salud, incluyendo censores, monitores y diagnósticos; así como juguetes y juegos, juegos interactivos entre personas o grupos. Se espera que los requerimientos máximos de transmisión de datos para aplicaciones con periféricos de PC estén en el rango de los 115.2 kb/s a menos de 10kb/s para automatización de tareas del hogar y para algunos dispositivos electrónicos. De la misma manera se espera que los periféricos de PC acepte un rango de aproximado de 15 ms y de más de 100 m para aplicaciones de automatización del hogar.

2.1.4 Tipos de WPAN

El grupo de trabajo IEEE 802.15 ha definido tres clases de WPANs que se diferencian por su rango de datos, consumo de energía y calidad de servicio (QoS). Las WPANs con un rango de velocidad elevada (802.15.3) diseñado para aplicaciones multimedia que requieren altos niveles de QoS. WPANs de rango medio

(802.15.1/Bluetooth) que manejarán una cantidad de tareas que van de teléfonos celulares hasta comunicación entre PDAs y tienen QoS apropiado para aplicaciones de voz. La última clase de aplicaciones son las LR-WPAN (baja transmisión, *low rate*) (802.15.4).

2.1.5 Duración del enlace de red

Las WLANs no tienen un tiempo de vida inherente. Estas tienen una "existencia" independiente de los aparatos que las conforman. Si todos sus elementos emigran de la cobertura de la WLAN y llegan unidades a sustituirlas, se dice que la WLAN tiene una existencia ininterrumpida. Este concepto no es verdad para las WPANs. Si el elemento maestro no participa, la red deja de funcionar.

En una WPAN un aparato crea una conexión que dura tanto como lo requiera, por lo que dicha conexión tiene una vida finita. Por ejemplo, una aplicación de transferencia de archivos puede lograr una conexión lo suficientemente larga solo para que su propósito se lleve a cabo. Cuando esta aplicación termina, la conexión entre los dos aparatos se puede separar. No puede haber un registro de los aparatos a los que estuvo conectado un dispositivo en una WPAN o de los aparatos a los que se valla a conectar. Por ejemplo, una computadora portátil se puede conectar con una PDA en un momento, con una cámara digital en otro y a un teléfono celular en otro momento. En algunos momentos, dicha computadora, se puede conectar con cualquiera de todos los dispositivos anteriormente mencionados. La tecnología WPAN debe de ser capaz de soportar la conexión de una forma rápida y eficiente sin necesidad de tener un despliegue previo de ningún tipo.

2.1.6 Componentes de una WPAN

El propósito principal de los protocolos de comunicación es el permitir aplicaciones en diferentes dispositivos para que interactúen entre ellos. Para alcanzar esta interactividad, se necesita que los dispositivos corran comunicaciones de pila (communication stacks) compatibles. Esto implica que no solo el protocolo de comunicación de pila que corre en cada dispositivo sea compatible y funcional, sino que también las aplicaciones que corren sobre dichas pilas sean compatibles.

2.1.7 Modelo ISO-OSI vs. Modelo IEEE 802.15.

Dado que las redes actuales funcionales de comunicación tienen como modelo de referencia al ISO-OSI es prudente ver la relación por capas o niveles de comunicación que este tiene con el modelo IEEE 802.

	Modelo ISO-OSI	Modelo IEEE 802.15
7	Capa de Aplicación	
6	Capa de Presentación	
5	Capa de Sesión	Capas superiores
4	Capa de Transporte	
3	Capa de Red	
		Control de enlace lógico (LLC)
	Capa de Enlace de Datos	
2	(DLL)	Control de acceso a medios (MAC)
1	Capa Física	Capa física (PHY)

Tabla 2.1: Modelo ISO-OSI vs. Modelo IEEE 802.15

El proyecto IEEE 802 divide al DLL en dos subcapas, la subcapa 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, como el 802.3, 802.11 y la familia del 802.15. La subcapa MAC depende del hardware y varía respecto a la implementación física de esta capa como se muestra en la tabla 2.1. El protocolo de WPAN utilizado en esta tesis es el correspondiente a la tecnología Bluetooth, el802.15. En el siguiente capítulo se presentan los conceptos que definen a este protocolo.

2.1.8 Integración con las LAN's

En algunas ocasiones es necesario que las WPAN interactúen con otro tipo de redes, aunque no siempre es el caso. Una WPAN se puede unir y participar con otras LANs en la familia IEEE 802 (por ejemplo IEEE 502.3, IEEE 802.11) a través del uso de una compuerta de unión (AG, attachment gateway) IEEE 802 [13]. Una AG para una LAN IEEE 802 es un componente lógico de arquitectura que puede o no ser implementado directamente en un aparato que conforma la WPAN (por ejemplo un dispositivo Bluetooth). Por medio de una AG LAN IEEE 802, la unidad de servicios de datos MAC (MSDUs) de una LAN se puede condicionar para transportar información sobre una WPAN (ver figura 2.1).

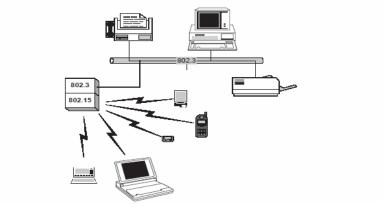


Figura 2.1 - Interconexión entre el estándar 802.3 y el 802.15

2.2 El estándar IEEE 802.15.1 – Bluetooth

Bluetooth es una tecnología utilizada para la conectividad inalámbrica de corto alcance entre dispositivos como PDAs (Personal Digital Assistance), teléfonos celulares, teclados, máquinas de fax, computadoras de escritorio y portátiles, módems, proyectores, impresoras, etc. [3][12][13][14][15].

El principal mercado es la transferencia de datos y voz entre dispositivos y computadoras personales; es una tecnología de radiofrecuencia (RF) que trabaja en la banda de 2.4 GHz y utiliza salto de frecuencia para expansión del espectro.

Muchas veces también se le confunde con el estándar IEEE 802.11, otra tecnología de RF de corto alcance.

IEEE 802.11 ofrece más velocidad de transmisión (1 Mbps o 2 Mbps) pero necesita más potencia de transmisión y ofrece menos opciones de conectividad que *Bluetooth* para el caso de aplicaciones de voz. *Bluetooth* intenta proveer ventajas sobre otras tecnologías inalámbricas similares tales como IEEE 802.11 y HomeRF, claros competidores en aplicaciones que requieren transmisión de datos.

IrDA es una tecnología muy popular para conectar periféricos, pero es limitada severamente a conexiones de cortas distancias en rangos de un metro por la línea de vista requerida para la comunicación.

Debido a que Bluetooth funciona con RF no está sujeto a tales limitaciones. La distancia de conexión en Bluetooth puede ser de hasta 10 metros o más, dependiendo del incremento de la potencia del transmisor, pero los dispositivos no necesitan estar en línea de vista ya que las señales de RF pueden atravesar paredes y otros objetos no metálicos sin problema.

Bluetooth puede ser usado para aplicaciones en redes residenciales o en pequeñas oficinas, es decir ambientes WPANs (Wireless Personal Area Network)

2.2.1 Rasgos de Bluetooth

Este estándar define una conexión inalámbrica que permite la transmisión de voz y datos entre diferentes equipos mediante un enlace por radiofrecuencia. Los principales objetivos que se pretende conseguir con esta norma son:

- Facilitar las comunicaciones entre equipos móviles y fijos.
- Eliminar cables y conectores entre éstos.
- Ofrecer la posibilidad de crear pequeñas redes inalámbricas y facilitar la sincronización de datos entre equipos personales.

La tecnología *Bluetooth* comprende *hardware*, *software* y requerimientos de interoperatibilidad, por lo que para su desarrollo ha sido necesaria la participación de los principales fabricantes de los sectores de las telecomunicaciones y la informática, tales como: **Ericsson**, **Nokia**, **Toshiba**, **IBM**, **Intel** y otros.

Dichas empresas crearon a inicios de 1998 un grupo de interés especial denominado SIG, cuyo propósito fue establecer un estándar para interfaz aérea junto con un software de control, con el fin de asegurar la interoperabilidad de los equipos entre diversos fabricantes.

Posteriormente se han ido incorporando muchas más compañías, y se prevé que próximamente los hagan también empresas de sectores tan variados como: automatización industrial, maquinaria, ocio y entretenimiento, fabricantes de juguetes,

electrodomésticos, etc., con lo que en poco tiempo se nos presentará un panorama de total conectividad de nuestros aparatos tanto en casa como en el trabajo.

2.2.1.1 Antecedentes

En 1994, Ericsson inició un estudio para investigar la viabilidad de una interfaz vía radio, de bajo coste y bajo consumo, para la interconexión entre teléfonos móviles y otros accesorios, con la intención de eliminar los cables entre los aparatos.

El estudio partía de un largo proyecto que investigaba sobre unos multicomunicadores conectados a una red celular, hasta que se llegó a un enlace de radio de corto alcance.

Conforme este proyecto avanzaba se fue viendo claramente que este tipo de enlace podía ser utilizado ampliamente en un gran número de aplicaciones, ya que tenía como principal virtud el que se basaba en un chip de radio relativamente económico.

2.2.1.2 La interfaz aérea Bluetooth

El primer objetivo para los productos *Bluetooth* eran los entornos de la gente de negocios que viaja frecuentemente. Por lo que se debería pensar en integrar el chip de radio *Bluetooth* en equipos como: PCs portátiles, teléfonos móviles, PDAs y auriculares.

Esto originaba una serie de cuestiones previas que deberían solucionarse tales como:

- El sistema debería operar en todo el mundo.
- ➤ El emisor de radio deberá consumir poca energía, ya que debe integrarse en equipos alimentados por baterías.
 - La conexión deberá soportar voz y datos, y por lo tanto aplicaciones multimedia.

2.2.2 Bluetooth aprobado por la IEEE

Durante la última semana del mes de marzo del 2002 la IEEE (http://www.ieee.org/) aprobó finalmente el estándar IEEE 802.15.1 compatible totalmente con la tecnología *Bluetooth*.

En noviembre de 2004 el SIG aprobó lo que será *Bluetooth* 2.0 EDR (*Enhanced Data Rate*), el cual presenta una velocidad de transmisión de 3 Mbps y un alcance de hasta 100 metros.

2.2.3 Características generales de Bluetooth

Sus principales características son:

- > Opera en la banda de 2,4 GHz con una tasa binaria máxima de 720 Kbps.
- ➤ Utiliza expansión del espectro con saltos en frecuencia (*Frequency Hopping*), lo cual especifica 1600 saltos por segundo entre 79 frecuencias.
 - > Utiliza modulación GFSK (modulación FSK con un filtrado gaussiano).
 - Usa duplexación en el tiempo TDD.
 - Soporta hasta ocho dispositivos en una *piconet* (un maestro y siete esclavos).

- ➤ Tiene dos tipos de transferencia de datos entre dispositivos: los orientados a conexión de tipo síncrono (SCO, *Synchronous Connection Oriented*) y los no orientados a conexión de tipo asíncrono (ACL, *Asynchronous Connectionless*).
 - Las *piconets* pueden combinarse para formar lo que se denominan *scatternets*.
- La potencia de transmisión está comprendida entre 0 dBm (dispositivos de Clase 3) y 20 dBm (dispositivos de Clase 1).
- ➤ El control de potencia es obligatorio para los dispositivos de Clase 1, y opcional para el resto.
- > Presenta un canal asíncrono, fundamentalmente utilizado para transmisión de datos.
- > canales síncronos, fundamentalmente utilizados para servicios que requieran calidad, sobre todo para servicios de voz.
- ➤ Tiene combinación de canales uno síncrono y otro asíncrono (Formato de paquete DV), formato de paquete DV: cada paquete tiene una parte de voz que no lleva corrección de errores y una de datos que sí lleva.

2.2.4 Stack Bluetooth

Uno de los principales objetivos de la tecnología *Bluetooth* es conseguir que aplicaciones de dispositivos diferentes mantengan un diálogo fluido. Para conseguirlo, ambos deben ejecutarse sobre el mismo *stack* de protocolos.

El *stack* está constituido por dos clases de protocolos. Una primera clase llamada de protocolos específicos que implementa los protocolos propios de *Bluetooth*. Y una segunda clase formada por el conjunto de protocolos adoptados de otras especificaciones. Esta división de clases en el diseño de protocolos *Bluetooth* permite aprovechar un conjunto muy amplio de ventajas.

Por otro lado, la utilización de protocolos no específicos ofrece la ventaja de la interacción de esta tecnología con protocolos comerciales ya existentes; así como la posibilidad de que *Bluetooth* esté abierto a implementaciones libres o nuevos protocolos de aplicación de uso común. El *stack* de protocolos se puede dividir en cuatro capas lógicas y según se muestra en la Figura 3.2 de la página siguente:

- Núcleo de *Bluetooth*: Radio, Banda Base, LMP, L2CAP, SDP
- Sustitución de cables: RFCOMM
- > Protocolos adoptados: PPP, UDP, TCP, IP, OBEX, WAP, IRMC, WAE
- Control de telefonía: TCS-binary, AT-Commands

El llamado núcleo de *Bluetooth* ha sido implementado en su totalidad por el SIG, no obstante otros como RFCOMM y TCS-*binary*, pese a ser desarrollados por el propio SIG, los han desarrollado siguiendo las recomendaciones de otras instituciones de telecomunicaciones.

El resto de capas lógicas de sustitución de cables, de control de telefonía y de protocolos adoptados, se agrupan en los protocolos orientados a aplicación, permitiendo así a las diferentes aplicaciones existentes o desarrolladas en el futuro poder correr sobre el núcleo de *Bluetooth*.

A partir de aquí se va a realizar una descripción detallada de los protocolos que emplea *Bluetooth* en su núcleo, y que constituyen la base de su funcionamiento.

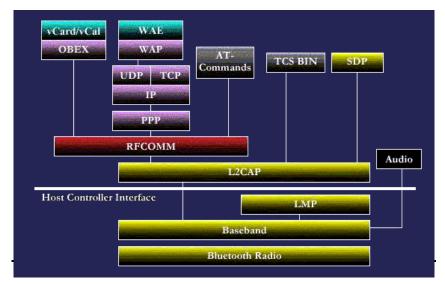


Figura 2.2: Stack de protocolos Bluetooth (http://www.tutorial-reports.com/wireless/bluetooth/protocolstack.php)

2.2.4.1 SDP (Service Discovery Protocol)

SDP proporciona un mecanismo que permite a las aplicaciones descubrir cuales son los servicios disponibles en su entorno y determinar las propiedades específicas de éstos. Los servicios disponibles cambian continuamente debido al dinamismo existente en el entorno, por lo que la búsqueda de servicios en Bluetooth difiere de la búsqueda de servicios en una red fija tradicional.

SDP debe proporcionar las siguientes funcionalidades:

- Permitir la búsqueda de servicios basados en atributos específicos.
- Debe permitir que los servicios sean descubiertos basándose en la clase de servicio.
- > Debe permitir averiguar las características de un servicio sin tener conocimiento a priori de dicho servicio.
- Debe proporcionar medios para descubrir nuevos servicios (proximidad de un nuevo dispositivo, arranque de una aplicación) así como para indicar la no disponibilidad de servicios inicialmente visibles.
- ➤ Debe permitir almacenar información sobre servicios de forma temporal para mejorar la eficiencia del protocolo.
- > Proporcionar complejidad adecuada para ser utilizado en dispositivos con prestaciones limitadas.

No obstante, SDP debe proporcionar los siguientes servicios en versiones futuras:

- > Se proporcionará acceso a los servicios, sólo acceso a la información sobre los servicios.
 - > Se proporcionarán mecanismos para la tarifación por el uso de los servicios.
- > Se proporcionará al cliente la capacidad de controlar o cambiar la operación de un servicio.

> Se proporcionará notificación de eventos para los casos en que los servicios no estén disponibles o cuando se modifican los atributos de los servicios.

2.2.4.2 **RFCOMM**

El protocolo RFCOMM permite emular el funcionamiento de los puertos serie sobre el protocolo L2CAP.

Además de emular los nueve circuitos de la norma RS-232. Soporta hasta 60 conexiones simultáneas entre dos dispositivos *Bluetooth*.

En una configuración RFCOMM se tienen básicamente dos tipos de dispositivos:

- ➤ Tipo 1: Se trata de dispositivos terminales de comunicación, como los ordenadores, las impresoras, etc.
- ➤ Tipo 2: Son aquellos que forman parte de un segmento de comunicación; como por ejemplo, los módems.

RFCOMM no hace distinción entre ambos tipos, pero el acomodarse a ellos tiene sus consecuencias en el protocolo. Por lo tanto, la transferencia de información entre dos entidades RFCOMM se define tanto para los dispositivos Tipo 1 y 2.

Debido a que un dispositivo no es consciente del tipo del otro dispositivo en el camino de comunicación, cada uno debe pasar toda la información disponible especificada por el protocolo.

2.2.4.3 L2CAP

L2CAP es un protocolo que se encarga de adaptar los protocolos superiores al protocolo de banda base. Sus tres principales funciones son:

- Multiplexación de protocolos de alto nivel.
- Segmentación y reensamblado de paquetes largos (hasta 64 *Kbytes*).
- Descubrimiento de dispositivos y calidad de servicio.

Para cumplir estas funciones la arquitectura L2CAP debe cumplir ciertos requisitos:

- a) L2CAP ofrece un servicio orientado a conexión donde un identificador de canal es utilizado en cada conexión, asumiendo que este canal es *full-duplex* y fiable; por lo que este tipo de servicio se tiene QoS.
- **b**) L2CAP ofrece un servicio no orientado a conexión donde se tiene la transmisión de datagramas y no en flujos continuos de información.

2.2.4.4 HCI (Host Controller Interface)

El HCI provee una interfaz entre el controlador de banda base y al administrador de enlace y acceso al estado del hardware y registros de control.

Esta interfaz provee un método uniforme de acceder a las capacidades de la banda base *Bluetooth*.

Cuando el *host* detecta que ha ocurrido un evento mediante una notificación del HCI, chequea el paquete recibido para poder determinar de qué evento concreto se trata.

2.2.4.5 LMP (Link Manager Protocol)

Los mensajes LMP son usados para el establecimiento, seguridad y control del enlace. Los paquetes son transferidos en el campo de carga útil del paquete de banda base y se distinguen por un valor reservado en el campo de la cabecera del payload. Los mensajes LMP son filtrados e interpretados por el LM (Administrador de Enlace) en el lado que recibe y no se propagan a las capas superiores.

Los mensajes de Administrador del Enlace tienen mayor prioridad que los datos de usuario. Esto significa que si el Administrador del Enlace necesita enviar un mensaje, éste no debe ser demorado por el tráfico L2CAP, aunque puede sufrir retrasos por muchas transmisiones de paquetes de banda bases individuales.

LC (Configuración de enlace) no garantiza ni el tiempo para entregar un mensaje al dispositivo remoto ni el retardo entre la entrega del mensaje al dispositivo remoto y la recepción del correspondiente ACK por el dispositivo transmisor.

Esto significa se debe considerar las limitaciones del mecanismo LC para sincronizar cambios de estado entre el dispositivo maestro y el dispositivo esclavo. El tiempo entre recibir un paquete de banda base que lleva un PDU LMP y enviar un paquete de banda base que lleva un PDU válido, puede ser menor que la respuesta LMP de interrupción. El valor de está respuesta de interrupción es de 30s.

2.2.4.6 Banda base

Bluetooth utiliza el esquema TDD (*Time-Division Duplex*) para la comunicación de varios dispositivos en modo full-dúplex. Se divide el canal en *slots* de 625us de duración. La información se transmite en paquetes, en saltos de frecuencia diferentes, para incrementar la protección frente a interferencias. Un paquete ocupa normalmente una único *slot* (mirar figura 2.3), pero puede ocupar hasta cinco consecutivos (mirar figura 2.4).

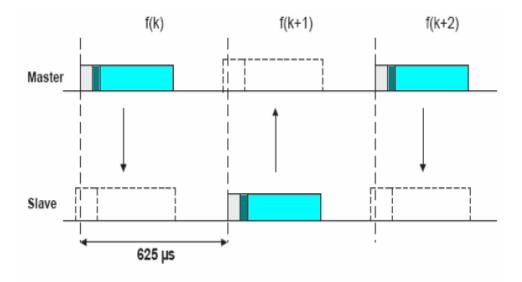


Figura 2.3: Paquetes sencillos

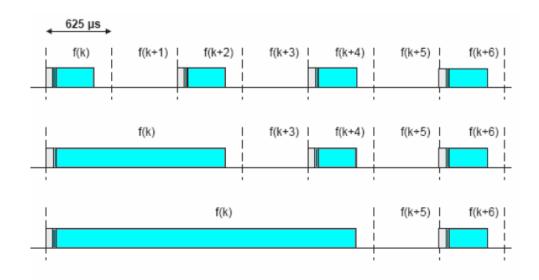


Figura 2.4: Paquetes multi-slot

Los paquetes Bluetooth poseen tres partes bien diferenciadas, como se puede apreciar en la siguiente figura:

Código de acceso (52 bits)	Datos (0-2745 bits)
----------------------------	-------------------------------

Figura 2.5: Paquete *bluetooth*

- Código de acceso: cada paquete empieza con un código de acceso que puede tener una longitud de 72 bits (en otro caso, de 68 bits). Existen tres tipos diferentes de código de acceso: Channel Access Code o código de acceso al canal (CAC), Device Access Code o Código de acceso de dispositivo (DAC) e Inquiry Access Code o Código de Acceso de Búsqueda (IAC).
- Cabecera: contiene información acerca del control del enlace (LC). Para proteger la cabecera de posibles errores en la transmisión, cada bit es repetido 3 veces en fila produciendo así un total de 54 bits.
- Carga útil (Payload): puede constar de 0 a 2745 bits y se compone de tres segmentos: cabecera (existente solo en paquetes ACL), Información y CRC (existente solo en paquetes ACL):
 - Carga útil de voz: Voz (0-2745 bits)
 - Carga útil de datos: Cabecera (8 bits), Datos (0 a 2721 bits) y CRC (16 bits).

2.2.4.7 Radio Bluetooth

La capa de radio define los requerimientos para el transmisor Bluetooth que opera en la banda de los 2.4GHz.

Las especificaciones de esta capa son las siguientes:

- ➤ Banda ISM de RF de 2,4 GHZ (2400 2483,5 MHz).
- > 79 canales de 1 MHz de ancho de banda.

- > FH/TDD con 1600 saltos/s.
- ➤ Potencia de salida: 100 mW (20 dBm), 2,5 mW (4 dBm) y 1 mW (0 dBm).
- Modulación GFSK con BT = 0,5 (índice de modulación de 0,28 a 0,35)
- Velocidad de transmisión: 1 Mbps
- Sensibilidad del receptor: -70 dBm

Bluetooth fue diseñado para operar en un entorno de radio frecuencia ruidoso y para ello utiliza un esquema de reconocimiento rápido y saltos de frecuencia para garantizar la robustez del enlace.

Este sistema opera en la banda de frecuencia de $2.4~\mathrm{GHz}$, libre para ISM (Industrial, Científica, Médica); exactamente comenzando en $2.402~\mathrm{GHz}$ y acabando en $2.4835~\mathrm{GHz}$. Con canales RF de $f = 2402 + k~\mathrm{MHz}$ siendo k = 0.78.

El espacio entre canales es de 1 MHz, no obstante es necesario tener unos márgenes de protección respecto al ancho de banda de trabajo, así pues, el límite superior de protección es de 2 MHz y un límite inferior es de 3,5 MHz.

La distancia nominal del enlace está comprendida entre 10 cm y 10 m, pero se puede aumentar a más de 100 m elevando la potencia de transmisión.

La modulación que emplea Bluetooth es GFSK (*Gaussian Frequency Shift Keying*). Este tipo de modulación permite un bajo coste. El índice de modulación debe estar entre 0.28 y 0.35. Un uno binario se representa por una desviación positiva de frecuencia y un cero binario como una desviación negativa. La desviación mínima no ha de ser menor de 115 KHz.

El aspecto más importante en el dispositivo receptor es el nivel de sensibilidad. Para poder medir una tasa de error de bit, el equipo receptor envía de vuelta la información decodificada. Para una tasa de error o BER (*Bit Error Rate*) del 0.1% se define el nivel de sensibilidad de un receptor Bluetooth mayor o igual a –70dBm.

2.2.5 Enlaces de banda base

La banda base de Bluetooth provee canales de transmisión para voz y datos, donde los enlaces SCO son empleados para transmisiones de voz y los enlaces ACL para la transmisión de datos.

La máquina de estados de banda base es controlada por el administrador de enlaces. Este micro-código provee el control del enlace basado en hardware para configuración, seguridad y control de los enlaces. Sus capacidades incluyen autentificación y servicios de seguridad, monitoreo de calidad de servicio y control del estado de banda base.

El administrador de enlaces se comunica con los demás utilizando el protocolo LMP, el cual utiliza los servicios básicos de banda base. Los paquetes LMP, los cuales son enviados sobre los enlaces ACL, son diferenciados de los paquetes L2CAP por un *bit* en el encabezado del ACL. Ellos son siempre enviados como paquetes de una ranura y una prioridad más alta que los paquetes L2CAP. Esto ayuda el aseguramiento de la integridad del enlace bajo una alta demanda de tráfico.

2.2.6 Transmisión de datos

Bluetooth está diseñado para usar acuses de recibos (acknowledgement) y saltos de frecuencias (frecuency hopping), lo cual provee conexiones robustas. Esto está

basado en paquetes, y saltarán a una nueva frecuencia después de que cada paquete es recibido, lo cual no solo ayuda a los problemas de interferencia, sino que añade seguridad.

La transmisión de los datos es a 1 Mbps. Una transmisión *full duplex* es realizado por multiplexaje de división de tiempo.

Como se especificó previamente, la transmisión de datos puede ser realizada de maneta síncrona o asíncrona. Dentro de una *piconet* cada par *master/slave* pueden usar un modo de transmisión distinto, y los modos pueden ser cambiados en algún momento. La división de tiempo *Duplex*, es usado para SCO y ACL, y ambos soportan 16 tipos de paquetes, cuatro de los cuales son paquetes de control, que son los mismos en cada tipo.

Debido a la necesidad de una excelente transmisión de datos, los paquetes SCO son entregados en intervalos reservados; esto es, los paquetes son enviados en grupos sin permitir la interrupción de otras transmisiones.

2.2.7 Topologías de red

Una de las más grandes ventajas, y en la que se demuestra la versatilidad del diseño de la tecnología *Bluetooth*, está en la fácil estructuración y arreglo de redes entre distintos dispositivos de esta misma tecnología.

Bluetooth ha sido diseñada para operar en un ambiente multi-usuario. Esta presenta dos tipos de configuraciones posibles, las cuales se pueden expandir a un número considerable de elementos para conformar así las redes y sub-redes.

La estructura que maneja esta tecnología está compuesta, en su forma más básica, por lo que se denomina una *piconet* y en una estructura un poco más compleja a la que se denomina una *scatternet*.

La *piconet* son varios dispositivos que se encuentran en el misma radio de cobertura en donde comparten un mismo canal y que está constituida entre dos y ocho de estas unidades. Cada dispositivo tiene una dirección única de 48 bits, basada en el estándar IEEE 802.11 para WLAN, mientras que la *scatternet* esta formada por la conexión de una *piconet* a otra, con un máximo de interconexiones de diez *piconets*.

2.2.8 Establecimiento de la conexión

Como los dispositivos *Bluetooth* operan en 2 modos (como maestro y como esclavo), sólo es posible la comunicación entre el maestro y los esclavos, nunca entre varios esclavos.

- Establecimiento del enlace: se lleva a cabo mediante el Link Manager Protocol (LMP). El enlace físico es una secuencia de trasmisión sobre un canal físico de timeslots alternados entre el maestro y el esclavo.
- ➤ Establecimiento del canal: después del establecimiento del enlace físico, se debe establecer un canal Bluetooth (enlace lógico) entre ambos dispositivos mediante el protocolo L2CAP.
- Establecimiento de la conexión: Finalmente, se establece la conexión entre las aplicaciones de los dos dispositivos. Por ejemplo, la conexión entre el ordenador y el móvil (una aplicación basada en el puerto serie) RFCOMM se inicializa y establece la conexión entre los dispositivos. Una vez que la conexión ya ha sido establecida, el maestro envía el primer paquete de tráfico, mientras que el esclavo responde con cualquier tipo de paquete.

2.2.9 Modos de operación

Una vez que la conexión ha sido establecida, los dispositivos entran en el estado de conexión, donde ya pueden intercambiarse paquetes entre el maestro y los esclavos.

Dentro del estado de conexión, se tienen cuatro modos de operación, que varían, sobre todo, en los niveles de consumo de potencia. En orden decreciente de consumo, dichos modos son:

- ➤ Modo **ACTIVE**: el dispositivo participa activamente en la *piconet*, escuchando continuamente los time-slot que le corresponden para ver si el maestro manda paquetes con su propia dirección.
- Modo **SNIFF**: el esclavo sólo escucha el canal en unos time-slots predeterminados. El maestro le envía paquetes en estos time-slot predefinidos, y el esclavo continuará escuchando mientras reciba paquetes con su dirección. Un esclavo puede entrar en modo sniff bien por orden expresa del maestro, o bien por petición suya.
- ➤ Modo **HOLD**: mientras que el dispositivo está en modo Hold, sólo recibe un determinado tipo de paquetes, aunque puede seguir realizando otras operaciones como *paging, inquiring o scaning*, y también sigue manteniendo su dirección como miembro activo de la *piconet*.
- Modo **PARK**: el dispositivo no participa en la *piconet*, pero permanece sincronizado con ella, aunque deja de tener su dirección como miembro activo. Igual que en los casos anteriores, la unidad se despertará al cabo de un tiempo establecido por el maestro. Este modo se usa para conectar más de 8 esclavos a un único maestro, de forma que se reduce notablemente la potencia consumida por los esclavos.

2.2.9.1 Seguridad Bluetooth

La seguridad en *Bluetooth* es requerida debido a que los datos transmitidos por los dispositivos son, en general, objetivos claros para posibles "espías". Esto se debe a que muchos de estos dispositivos tienen la característica de ser del tipo "agendas personales" en los que se almacena informaciones del tipo citas, contraseñas, teléfonos, direcciones, etc. En definitiva cosas que son susceptibles de ser espiadas.

A esto se debe añadir el hecho de que utiliza radiofrecuencia, con lo que no podemos limitar el alcance de la señal y puede haber un posible "espía" escuchando las señales emitidas por estos dispositivos. Con lo que es posible usar:

- > Técnicas de seguridad ya incluidas en el *chip*
- > Autenticación mediante desafío respuesta
- Cifrado del flujo
- Una clave distinta en cada sesión
- Seguridad opcional en capas superiores

2.3 El estándar IEEE 802.15.2 – Coexistencia

Debido al uso de la banda de 2.4Ghz para transmisiones inalámbricas por distintos dispositivos estandarizados y los que no lo están, se decidió crear normas, las cuales apoyen al desarrollo de nuevos dispositivos para que puedan transmitir en esta frecuencia sin interferirse uno al otro [16]. Para esto, se crearon mecanismos para facilitar la coexistencia entre dispositivos WLAN y WPAN.

Estos mecanismos pueden ser categorizados como: colaborativos y no colaborativos.

- ➤ <u>Colaborativos</u>: en este caso las colisiones pueden ser evitadas si los sistemas inalámbricos son capaces de compartir información en tiempo real acerca del estado de su transmisión (velocidad de transmisión, latencia, potencia).
- ➤ <u>No colaborativos</u>: en este caso las colisiones pueden ser completamente evitadas mediante técnica de censado (mirar antes de cruzar).

Con lo que se evalúa la degradación en la sensibilidad de recepción y la reducción de la velocidad efectiva ante la interferencia.

Los mecanismos de coexistencia son:

- Alternando el Acceso al Medio Inalámbrico Alternating Wireless Medium Acces (AWMA). Para transmisiones 802.11 y bluetooth desde la misma laptop o handheld. El cual está coordinado por la MAC. Sincronizando todas las unidades conectadas al mismo punto de acceso, por lo cual no existiría interferencia.
- ➤ Arbitración de Trafico de Paquetes *Packet Traffic Arbitration*. Son técnicas colaborativas que definen reglas de gestión entre los sistemas directamente.
- ➤ Selección Adaptiva de Paquetes *Adaptive Packet Selection*. Bluetooth permite seleccionar entre varios tipos de paquetes, como el tamaño de la carga.
- ➤ Programación Adaptiva de Paquetes *Adaptive Packet Scheduling*. Utilizando Estimación de interferencia y políticas de programación maestra (usar frecuencias "buenas" para transmisiones maestro/esclavo).
- ➤ Clasificación del Canal *Chanel Clasification*. El estándar provee de un algoritmo (de ejemplo) para determinar la calidad de los canales (la implementación se le deja al vendedor del dispositivo), utilizando métricas como RSSI, PER, *Carrier Sensing*, y ACK de los paquetes, Se pueden medir utilizando técnicas de "*Batch*" o con técnicas online y offline.
- ➤ Saltos de Frecuencia Adaptiva *Adaptive Frequency Hopping*. Son mecanismos para la coexistencia entre dispositivos 802.15.1 que utilizan la frecuencia la banda 2.Ghz como banda estática, como el 802.11b. Este mecanismo cambia dinámicamente la frecuencia de los saltos para evitar o mitigar las interferencias.

2.4 El estándar IEEE 802.15.3 – High Rate Wireless Personal Networks (HR-WPAN)

El estándar IEEE 802.15.3 surgió de la necesidad de formar WPANs que fueran capaces de transmitir datos de manera rápida, y eficiente [13]. Para lograr esto era necesario formar un grupo de trabajo que se encargara de desarrollar las bases para implementar este estándar. Con esto la IEEE autoriza en diciembre de 1999 la creación del grupo de trabajo IEEE 802.15.3 quien fue el encargado de publicar en Agosto de 2003 el primer borrador de dicho estándar, en el que se especifican (como en todos los estándares de la familia 802.11, 802.15, 802.16, etc.) los requerimientos en la capa física (PHY) y para el control de acceso a medios (MAC).

A principios del año 2003, con la aprobación de la FCC, para la utilización y delimitación de un gran ancho de banda para las señales de RF denominadas ultra *wide band* (UWB), la IEEE designa otro grupo de trabajo que tienen los mismos objetivos de el grupo de trabajo IEEE 802.15.3, solo que este nuevo grupo es el encargado de estandarizar el uso de las recién aprobadas UWB. Este nuevo grupo así como su estándar son conocidos como el IEEE 802.15.3a, los cuales se encuentran (noviembre

de 2003) estudiando las propuestas de las principales compañías interesadas en manufacturar y comercializar productos que utilicen este nuevo estándar.

2.4.1 Caracterísitcas principales

El grupo de trabajo IEEE 802.15.3 se preocupo en desarrollar un estándar que fuera barato en su implementación y en sus costos de operación, por lo que este estándar es poco complejo. Otra razón para que sea sencillo es que mientras más simple sean los protocolos, el formato de las tramas, la modulación, etc., de un estándar la transmisión de datos es más eficiente y por lo tanto más rápido.

La red formada con este estándar tiene características que la hacen segura ya que cuenta con encriptación compartida de información basada en el estándar *Advanced Encryption Standard*.

Es fácil de utilizarse e implementarse. Tiene un coordinador dinámico de selección y de *handover*. No depende de una red con *backbone*. Además está diseñado para trabajar en un ambiente multirutas.

2.4.2 Principales aplicaciones

El IEEE 802.15.3 tiene muchas aplicaciones potenciales. Este estándar se puede implementar prácticamente en "cualquier dispositivo que sea digno de utilizar un microprocesador". Productos tan disparatados como juguetes, termómetros, y relojes se podrían ver beneficiados con este estándar. Por medio de una modesta cuota, los usuarios podrían actualizar sus juguetes y hacerlos un poco más interesantes.

Las lecturas de los termómetros en un hospital se podrían recoger automáticamente por medio de este tipo de redes y ser guardadas para tener una historia clínica detallada de la evolución de algún paciente.

Sin embargo alguna de las aplicaciones más interesantes dentro del hogar es la distribución de video. Con este estándar se puede implementar fácilmente una transferencia de alta velocidad de video digital de una cámara aun dispositivo de televisión, sistemas de teatro en casa, conexiones de una PC a un proyector, juegos de video interactivo. De igual forma se pueden hacer transferencias de datos de alta velocidad, para conectar reproductores de mp3, impresoras, escáners, productos personales y cámaras digitales a una computadora.

2.4.3 Características MAC

Este estándar tiene una topología centralizada en una conexión orientada tipo adhoc.

El dispositivo coordinador (PNC) mantienen la sincronía y el tiempo dentro de la red, controla el ingreso de nuevos dispositivos a la red, asigna los tiempos para conexiones entre los dispositivos 802.15.3, etc.

El tipo de comunicación entre dispositivos es peer to peer y soporta QoS multimedia; con una arquitectura TDMA de super-tramas con GTS (*Guaranteed Time Slots*), además tiene técnicas de autentificación y encriptación.

Una parte importante de este estándar es que cuenta con varios modos de ahorro de energía (asíncronos y sincronizados). De igual forma para el ahorro de energía se

busca la simplicidad; todas las negociaciones de QoS y de control de flujo se hacen en la capa 3; el PNC solo maneja solicitudes de tiempo en el canal.

El estándar se caracteriza por ser robusto. La selección de canales es dinámica y existe un control de energía de transmisión por link. Otra característica que le da fuerza al estándar es el protocolo de *handover*.

2.4.4 Capacidades de seguridad

Una característica importante en este estándar es que los niveles de seguridad pueden variar, de acuerdo a las necesidades del usuario.

- El modo 0 significa que no existe seguridad.
- ➤ El modo 1 permite al usuario restringir el acceso a la pirocred. El usuario puede especificar, de forma externa, que dispositivos pueden formar parte de la conexión asíncrona.
- ➤ El modo 2 proporciona autentificación por criptografía, protección de la información del usuario e integración de comandos.
- ➤ El modo 3 ofrece protección de la información del usuario, integridad de los datos y los comandos así como autentificación por criptografía.

2.4.5 Estructura de Superframe

Las estructuras de superframe consisten en 3 secciones de tiempo, como se contempla en la siguiente figura:

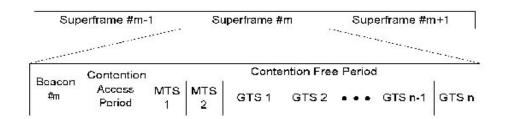


Figura 2.6 Estructura en el tiempo de las Superframes

- 1. **Beacon**; transmite información de control a toda la picored, localización de recursos (GTS) por trama y proporciona sincronización en tiempo.
- 2. **Periodo opcional de acceso a contención** (CAP) (CSMA/CA); utilizado en la autentificación, solicitud y respuesta de asociación, parámetros de flujo, negociación y demás comandos del frame.
- 3. **Periodo libre de contención** (CFP); formado por ranuras de tiempo unidireccionales (GTS) que son asignadas por el dispositivo maestro, para transmisión datos de forma asíncrona o sincronizada; de manera opcional se encuentra el Management Time Slots (MTS) en lugar del CAP para frames de comandos.

2.4.6 Calidad de servicios (QoS)

"Qos es típicamente definido como el estado latente requerido para saltar la inestabilidad de una corriente continua de datos a una tasa deseada".

El estado latente puede ser utilizado para almacenar una trama de datos para que los efectos no determinados de la transmisión se puedan reducir. Pequeñas cantidades de inestabilidad se pueden manejar sin consecuencias por el dispositivo receptor.

Es necesario sincronizar los requerimientos adicionales puestos en sistemas en donde hay tramas de datos múltiples, como en la distribución de audio en sistemas de teatro en casa de múltiples bocinas.

2.4.7 La capa física (PHY)

El IEEE 802.15.3 trabaja en la banda libre ISM (*industrial, scientific, medical*) de los 2.4 GHz.

El grupo de trabajo definió cinco rangos de velocidad de transmisión: 11, 22, 33, 44 y 55 Mb/s.

El tipo de modulación utilizada por este estándar es BPSK (o PSK), y QPSK (cuando se transmite sin codificación de datos).

Los canales tienen un acho de banda de 15 MHz. Con 3 o 4 canales libres de traslape (3 canales alineados con el IEEE 802.11b, para su coexistencia). El IEEE 802.15.3 trabaja en la misma banda libre que el 802.11, pero pueden coexistir en un mismo ambiente dado que los sistemas 802.15.3 causan menos interferencia ya que ocupan un ancho de banda menor y transmite con menos potencia.

2.4.8 Variantes del IEEE 802.15.3

Dentro del IEEE 802.15.3 hay definidos una serie de sub-grupos de trabajo que se encargan de mejorar diferentes temas relacionados con la 802.15. 3. En los siguientes apartados se explicarán brevemente los más importantes.

2.4.8.1 El estándar IEEE 802.15.3a

En general, los dispositivos electrónicos aumentan sus capacidades de procesamiento y de almacenamiento conforme avanza la tecnología. De la misma forma que sus capacidades, sus necesidades de comunicación con otros dispositivos crece todos los días. Dado que la tecnología es cada vez más común, es necesario que esta sea económica y eficiente, de la misma manera los canales de comunicación deben de tener dichas características. De aquí la importancia de contar con bandas libres en el espectro electromagnético.

Muchos GHz de ancho de banda han sido autorizados para ser trabajados sin licencia para redes inalámbricas de área personal (WPANS) en lo que se conoce como UWB (*ultra wideband*) o banda ultra ancha. Esta tecnología tiene el potencial de proporcionar altas velocidades de conexión como nunca antes en productos para el hogar, tales como video conferencias, sistemas inalámbricos de distribución de audio y video, nuevas aplicaciones de entretenimiento para el hogar, computadoras sin disquetes así como aplicaciones de localización y posicionamiento en la navegación.

El concepto de comunicaciones UWB se originaron con Marconi, en los años 1900s, cuando los transmisores de "chispas" inducían pulsos de señales que tenían anchos de banda muy grandes. Los transmisores de chispas creaban interferencia en la banda transmitida y no permitían compartir el espectro, así que el mundo de las telecomunicaciones abandonó la idea de los anchos de banda grandes para dar paso a los anchos de banda más angostos, con lo que nacieron los radio transmisores que eran fáciles de regular y coordinar.

A mediados de la década de los 1980's, la FCC propició un concepto totalmente nuevo de comunicaciones por medio de anchos de banda grandes, con lo que nacieron las bandas para la industria la ciencia y la medicina (ISM) para uso libre (sin licencia) de comunicaciones de espectro extendido (wideband communications). "Este revolucionario espectro, es responsable del sorprendente crecimiento en redes inalámbricas de área local (WLAN), así como de alentar a la industria de la comunicaciones a estudiar los méritos y las implicaciones del ancho en las bandas anchas de comunicación que han sido utilizadas anteriormente en aplicaciones comerciales". La teoría de Shannon-Hartley dice que la capacidad del canal crece linealmente con el ancho de banda y decrece de forma logarítmica en la forma en la relación señal a ruido (SNR) disminuye. Esta relación sugiere que la capacidad del canal se puede mejorar al incrementar el ancho de banda utilizado, en mayor proporción que la relación señal a ruido. Por lo tanto, para WPANS que solo transmiten sobre pequeñas distancias, en donde las pérdidas por propagación de señal es pequeña y poco variable, se pueden lograr grandes capacidades utilizando grandes anchos de banda.

Muchas compañías (como *Xtreme Spectrum y Time Domain*) argumentaron que deberían permitirles transmitir de manera intencional sobre los límites de radiación puestos por la FCC (mientras que algunos usuarios de otras bandas cercanas ya se les permitía transmitir de manera accidental), sobre una UWB. El argumento de que los servicios inalámbricos de baja potencia podía operar por debajo de los límites autorizados de emisiones y ofrecer comunicaciones efectivas, fue la principal motivación para la FCC aprobara las UWB. Este concepto tan importante se sigue discutiendo por la FCC y su concejo tecnológico.

2.4.8.1.1 Las UWB

UWB promete revolucionar las redes caseras en los hogares, teniendo aplicaciones tales como bajar imágenes de una cámara digital hacia una computadora, distribuir señales de alta densidad de televisión (HDTV) de un receptor a múltiples aparatos de televisión a lo largo de una casa, conectar impresoras a una computadora, remplazar cualquier cable de información (no de energía) en el perímetro de un cuarto de una casa, oficina, escuela, hospital, industria, etc.

El 14 de febrero de 2002, la FCC emitió 15 reglas que gobernarán los dispositivos que trabajen en bandas libres entre ellas los dispositivos para las UWB. El uso de UWB baja la supervisión de la FCC ofrece capacidades con un potencial muy grande (algunos *Gbps*) sobre pequeñas distancias (menos de 10 metros) con baja potencia de radiación (-43 dBm/MHz). La FCC define la señales de UWB como aquellas que tienen un fracción de ancho de banda (una proporción de banda base y ancho de banda en una portadora de

RF) de a lo más 0.20, o una UWB con ancho de banda de al menos 500 MHz. La definición precisa de UWB es "la banda de frecuencias delimitada por los puntos que son 10 dB menores a la mayor radiación de emisiones".

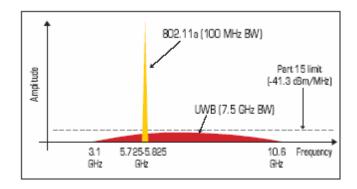


Figura 2.7 Espectro de una señal UWB comparada con el espectro de 802.11a

Las reglas de la FCC permiten a los dispositivos UWB operar en potencias bajas, un EIRP (*Effective Isotropic Radiated Power*) de -41.3 dBm/MHz, en un espectro libre de 3.1 a 10.6 GHz (ver figura 2.7), con máscaras de emisión fuera de banda, que tienen niveles de energía muy bajos. Los límites de las emisiones bajas en banda y fuera de banda, tienen el objetivo de asegurar que los dispositivos que trabajan con UWB no causen interferencia destructiva con servicios licitados y otras operaciones importantes de radio, entre las que se encuentran la telefonía celular, PCS, GPS, 802.11.a, frecuencias satelitales, y canales de radio terrestre.

La tabla 2.2 resume algunas de las características más importantes en el uso de la tecnología UWB en dispositivos para una WPAN.

Rango de operación de frecuencias: 3.1 GHz a 10.6 GHz.				
Promedio límite de emisiones radiadas				
Rango de Frecuencias (MHz)	EIRP en dBm/Mhz			
960 – 1610	(interior / portátil)			
1610 – 1900	-75.3 / -75.3			
1900 – 3100	-53.3 / -63.3			
3100 – 10600	-51.3 / -61.3			
Sobre los 10600	-41.3 / 41.3			
	-51.3 / -61.3			
Emisiones pico en banda	60 dB sobre el promedio de			
•	emisores de nivel			
Periodo máximo de transmisión para un unacknowledged	10 segundos			

Tabla 2.2: Características de las UWB

Dado que dichos pulsos ocupan un gran ancho de banda, su energía es regada sobre una gran parte del espectro electromagnético. Estas frecuencias son tan altas que pueden ser transmitidas sin ser primero moduladas sobre una portadora, como se hace con las transmisiones normales FM, AM, teléfonos celulares y Wi-Fi.

Las ventajas de las UWB son muchas. Por ejemplo, estas trabajan adecuadamente en ambientes ruidosos. La resistencia de estas señales radica en su gran

ancho de banda, ya que si hay ruido en alguna banda específica esta solo afectará a un pequeña parte de la señal. También es importante señalar que estas señales tienen niveles de potencia tan bajos que prácticamente no causan interferencia a otros dispositivos que trabajen dentro del mismo rango de frecuencias.

2.4.8.2 El estándar IEEE 802.15.3b

El IEEE 802.15.3b trabaja en una enmienda de la 802.15.3 para mejorar la implementación y la interoperabilidad del MAC (*Medium Access Control*). Esto incluye las optimizaciones menores con la preservación de la compatibilidad con versiones anteriores.

2.4.8.3 El estándar IEEE 802.15.3c

Este grupo de trabajo se formó en marzo de 2005 y trabaja en el desarrollo de una PHY alternativa basada en ondas milimétricas para el estándar 802.15.3

Esta WPAN operará en la nueva banda no regulada que se extiende en el rango de 57-64 GHz, que además no ha sido utilizada hasta la fecha, definida por FCC 47 CFR 15.255. Permitirá una coexistencia muy alta con todos los sistemas de microondas en la familia 802.15.

Además, exhibirá tasas de transmisión muy elevadas, de más de 2 Gbps, de forma que aplicaciones tales como acceso a Internet de banda ancha y streaming (televisión digital, cine en casa, etc.) en tiempo real y proporcionará un bus de datos inalámbrico como alternativa a los cables. También se ofrecerán tasas de transferencia alternativas por encima de 3 Gbps.

2.5 El estándar IEEE 802.15.4 – Low Rate Wireless Personal Networks (LR-WPAN)

El estándar IEEE 802.15.4 define las características de la capa física y de la capa de control de acceso al medio (MAC) para redes inalámbricas de área personales (WPAN, *Wireless Personal Area Networks*) de baja tasa de transmisión. Las ventajas de utilizar el estándar IEEE 802.15.4 es que permite la utilización de dispositivos de fácil instalación que proveen transmisiones confiables a distancias cortas a un precio muy bajo. Por otro lado, el estándar IEEE 802.15.4 permite proporcionar un tiempo de vida razonable al utilizar fuentes de energía limitada (por ejemplo, las baterías alcalinas) y al mismo tiempo proporciona una pila de protocolo que es simple y sencilla [3][13][15].

Las características generales del estándar de comunicación IEEE 802.15.4, son:

- Tasas de transferencias de 250Kb/S, 40Kb/S y 20Kb/S.
- Manejo de redes en estrella y malla (peer-to-peer).
- Direccionamiento corto con 16 bits y extendido con 64 bits.
- > Garantía del manejo de las ranuras de tiempo (GTS, guaranteed time slot).
- Detección de los niveles de energía recibidos (ED, *energy detection*).
- ➤ Indicadores de calidad en el enlace así como de conmutación de canales para recibir paquetes (LQI, link *quality indication*).
- Acceso al canal por CSMACA (CCA, clear channel assessment).

El estándar de comunicaciones IEEE 802.15.4 tiene dos tipos de dispositivos que participan en la red: dispositivo con todas las funciones (FFD, *Full Function Device*) y dispositivo con funciones reducidas (RFD, *Reduced Function Device*).

Dependiendo de la aplicación el estándar permite operar en una de dos topologías: la estrella (Star) o la peer-to-peer, estas se presentan en la figura 2.8.

En la topología estrella la comunicación es establecida entre los dispositivos y un único coordinador de red, llamado coordinador PAN.

La topología peer-to-peer solo tiene un coordinador PAN, sin embargo, es diferente de la topología estrella debido a que cualquier dispositivo puede comunicarse con cualquier otro mientras la distancia entre ellos esté en el rango de comunicación directa. La topología peer-to-peer permite formaciones de redes más complejas, tales como las topologías tipo *mesh* o la *clustertree*.

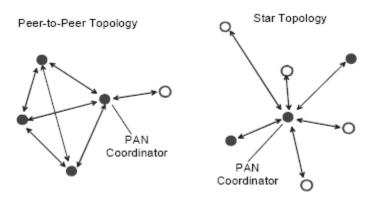


Figura 2.8: Topologías del protocolo 802.15.4

Éste estándar no establece un nivel de red pero si plantea parámetros para su implementación. El funcionamiento de la red depende de su configuración, debido a que una LRWPAN puede utilizar uno de los dos mecanismos de acceso a los canales: sin *Beacon* y con *Beacon*.

En redes sin Beacon, se utiliza el estándar CSMACA y trabajan de la siguiente forma: Cuando algún dispositivo desea transmitir en la red, primero revisa si otro dispositivo se encuentra transmitiendo sobre el canal. Si otro dispositivo esta transmitiendo, el dispositivo intentará después para acceder al canal, o indica una falla de conexión después de varios intentos fallidos. La trama ACK confirma si una transmisión fue exitosa y esta se envía inmediatamente después de que cada paquete de información es recibido, como se presenta en la siguiente figura:

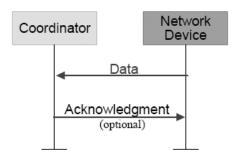


Figura 2.9: Transferencia de datos sin Beacon

En una red *Beacon* con supertramas, la trama se fragmenta en varios intervalos de tiempo lo cual permite múltiples accesos con un mecanismo que evita colisiones de información (CSMACA, *Carrier Sense, Multiple Access, Colision Avoidance*).

En una red con beacon, cualquier dispositivo que desee transmitir durante el periodo de acceso de contención (CAP), espera a que empiece el siguiente time slot y después determina si algún otro dispositivo se encuentra transmitiendo en el mismo time slot. Si algún otro dispositivo se encuentra transmitiendo en dicho momento, el dispositivo se repliega a un número aleatorio de slots o indica un fallo en la conexión después de varios intentos.

Para aplicaciones de baja latencia o aplicaciones que requieran un ancho de banda especifico, el coordinador PAN puede dedicar porciones de la supertrama a esta aplicación. Estas porciones son llamadas ranuras de tiempo de garantía (GTS, guaranteed time slots). Los GTS forman el periodo libre de contención (CFP, contentionfree period), el cual siempre aparece al final de la supertrama.

El coordinador PAN puede ubicar siete de estos GTS, y un GTS puede ocupar más de un periodo slot.

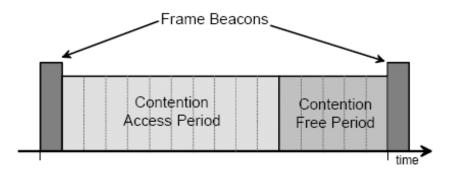


Figura 2.10: Estructura de una supertrama

2.5.1 El estándar Zigbee

El término *ZigBee* describe un protocolo inalámbrico normalizado para la conexión de una Red de Área Personal Inalámbrico o WPAN.

ZigBee es diferente de los otros estándares inalámbricos, ha sido diseñado para soportar un diverso mercado de aplicaciones con una conectividad más sofisticada que los anteriores sistemas inalámbricos. El estándar enfoca un segmento del mercado no atendido por los estándares existentes, con baja tasa de transmisión de datos, bajo ciclo de servicio de conectividad y bajo costo.

La razón de promover un nuevo estándar, es para permitir la interoperabilidad entre dispositivos fabricados por compañías diferentes. *ZigBee* es un estándar donde el estándar IEEE 802.15.4 solo contempla las capas PHY (*Physical Layer*) y MAC (*Médium Access Control*); las capa NWK (*Network Layer*) y APS (*Application Layer*) han sido establecidas por la Alianza *ZigBee*.

2.5.1.1 Caracterísitcas de Zigbee

Las características más importantes del estándar Zigbee son:

- Bajo consumo de energía.
- ➤ Los dispositivos que conforman la red deben estar consientes de la cantidad de energía existente.
- Los dispositivos de *ZigBee* serán más ecológicos que sus predecesores, ahorrando megavatios de energía a despliegue total.
 - ➤ Bajo costo en los dispositivos, la instalación y el mantenimiento.
- Los dispositivos ZigBee extenderán la vida de las baterías, las mismas que no necesitarán recarga sino hasta varios años después. La simplicidad de ZigBee permite la creación de redes que requieren poco mantenimiento.
- ➤ Redes de alta densidad de nodos. *ZigBee* permite que las redes manejen hasta 2^16 dispositivos. Este atributo es fundamental para la creación de series masivas de sensores y redes de mando.
- ➤ Presenta un *stack* de protocolos simple. Se estima que el *stack de ZigBee* es aproximadamente 1/4 del *stack* de protocolos de Bluetooth y de 802.11. Siendo esta simplicidad esencial para el costo, interoperatibilidad, y mantenimiento.
- ➤ Implementación global. La capa física del IEEE 802.15.4 adoptada por ZigBee se ha diseñado para la banda de 868 MHz en Europa, la banda de 915 MHz en Norte América, Australia, etc.; y la banda de 2.4 GHz que es reconocida como una banda global aceptada en casi todos los países.

2.5.1.2 Funciones de Zigbee

Las funciones del estándar Zigbee son las siguientes:

- ➤ **Búsqueda de red** (*Network Scan*): Es la capacidad de un dispositivo de sondear canales dentro de su rango de comunicaciones. Este rango es llamado a menudo POS (*Personal Operating Space*).
- > Creación de una red PAN (*Creating*): Es la capacidad de constituir una red sobre canales sin utilizar, en el POS.
- ➤ **Descubrimiento de dispositivos** (*Device Discovery*): Es la capacidad de identificar los dispositivos en una PAN.
- ➤ **Descubrimiento de servicio** (*Service Discovery*): Es la capacidad de determinar que características o servicios son soportados en los dispositivos dentro de una red.
- ➤ **Unión** (*Binding*): Es la capacidad de comunicarse a nivel de capa aplicación con otros dispositivos en la red.
- Asociación y Disociación de dispositivos (*Joining and leaving a network*): Es la habilidad de ganar nuevos miembros para la red y el proceso para que los miembros dejen la red.
- ➤ Configuración de un nuevo dispositivo (Configuring a new device): La habilidad de configurar el stack para operaciones requeridas.
- ➤ **Direccionamiento** (*Addressing*): La habilidad de un coordinador ZigBee para asignar direcciones a dispositivos nuevos en la red.
- ➤ Sincronización en una red (*Synchronization within a network*): La habilidad de un dispositivo para lograr la sincronización con otro dispositivo a través del envío de tramas beacon o mediante poleo (*polling*).

- > Seguridad (Security): Aplicando seguridad a las tramas transmitidas y retirando la seguridad a las tramas recibidas.
- > Asignación de ruta (Routing): Enrutamiento de tramas a sus direcciones establecidas.

2.5.1.3 Objetivos de Zigbee

La arquitectura *ZigBee* debe permitir el diseño fácil y el desarrollo de los dispositivos baratos y de baja potencia prometidos. La interoperabilidad debe ser considerada como una de las razones principales para la estandarización por lo que la arquitectura debe definir el *stack* de tal manera de que la terminología esté normalizada. La arquitectura también debe permitir versiones actualizadas y extensiones en el futuro.

ZigBee se ha implementado en la banda mundial de 2.4 GHz, sin necesidad de licencias, o en una de las bandas regionales de 868/915 MHz. El espectro de radio sin licencia, está designado por un acuerdo internacional y pone la carga de adhesión de la especificación sobre el fabricante del equipo.

La banda de 2.4 GHz es la preferida porque es una banda libre de licencias, y porque su uso es a nivel internacional. Hay muchas bandas sin licencia en las frecuencias más altas y más bajas. Las bandas de 2.4 GHz y 868/915 MHz fueron escogidas por el estándar IEEE 802.15.4 debido a sus características de propagación.

Las frecuencias 868/915 MHz y 2.4 GHz tienen buena penetración tanto a través de paredes como de techos, pero tienen un rango limitado. La limitación de rango es realmente deseable para reducir las interferencias. Volviendo a las características deseables de sistemas basados en *ZigBee*, la instalación debe ser automática o semiautomática, con el propósito de que los consumidores puedan instalar redes inalámbricas fácilmente.

Además, añadir nuevo hardware a un sistema existente debe ser sencillo. Debido a que *ZigBee* reemplaza cables y otros sistemas inalámbricos, el costo debe ser bajo para hacer el cambio a *ZigBee* más ventajoso.

El estándar *ZigBee* debe permitir una transferencia de datos de 250 Kbps y de 20 Kbps. Esto representa la cantidad de datos que puede ser transferida cuando la cabecera de la trama de datos se ha retirado. El hardware *ZigBee* debe poder comunicarse sobre un rango entre 10 a 75 metros. Un hardware típico a 2.4 GHz presenta una distancia de trabajo hasta 30 metros dentro de un edificio y más de 100 metros en campo abierto.

Se pueden poner hasta 216 dispositivos de *ZigBee* y todavía funcionar. Los dispositivos finales de la red pueden funcionar hasta 2 años con baterías del tipo

AA y AAA. Los dispositivos finales pueden ser sensores inalámbricos, monitores o controladores.

2.5.1.4 El Stack Zigbee

A partir de aquí se va a realizar una descripción detallada de los protocolos que emplea Zigbee en su núcleo, tomando como referencia la siguiente figura:

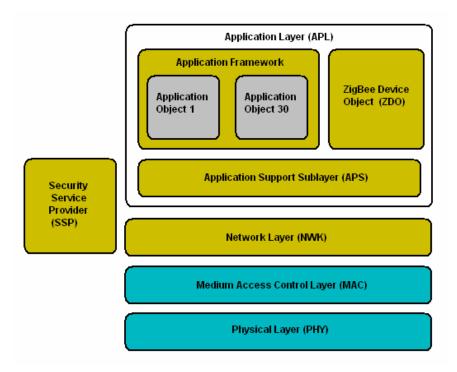


Figura 2.11: Stack de protocolos

2.5.1.4.1 Aplication Layer (APL)

La capa aplicación ZigBee consiste de la subcapa *Applications Supports* (APS), *ZigBee Device Object* (ZDO) y la *Application Object* (objeto aplicación) definidos por el fabricante:

- ➤ **Application framework:** es el ambiente en el cual se encuentran los objetos aplicación, mismos que envían y reciben datos a través del APSDE service access point (APSDE-SAP).
- ➤ Application supports (APS): provee un interfaz entre NWK y APL a través de servicios utilizados por ZDO y objetos aplicación.
- ➤ Zigbee decive object (ZDO): La función de esta subcapa es definir el rol del dispositivo dentro de la red (ya sea de coordinador o de dispositivo final), iniciando o respondiendo a las peticiones y estableciendo una conexión segura entre los dispositivos de la red.

2.5.1.4.2 Network Layer (NWK)

La capa red se construye sobre las características de la capa MAC del estándar IEEE 802.15.4, para permitir una mayor cobertura de la red con lo que nuevas redes podrán ser adicionadas para consolidarse o dividirse según la aplicación que se requiera. Debido a que el *stack* de protocolos de ZigBee es relativamente simple comparado con otros *stacks* de protocolos de comunicaciones.

Tipos de dispositivos:

> Full function device (FFD): es un dispositivo que posee una funcionalidad completa y se apoya e las funciones y características del estándar IEEE 802.15.4. puede

soportar los siguientes modos de operación: un coordinador PAN y un simple dispositivo.

➤ Reduced function device (RFD): es un dispositivo que opera con la mínima implementación del protocolo IEEE 802.15.4. Estos dispositivos no tienen la necesidad de enviar grandes cantidades de información ya que solo está previsto para aplicaciones extremadamente simples. Además solo pueden asociarse a un FFD a la vez.

La arquitectura de red en *ZigBee d*efine tres topologías de red. El máximo números de dispositivos que se puede tener es de 264 (más del que probablemente se necesite), y se puede configurar una red con un máximo de 65.000 (2^16) dispositivos. La formación y la asociación de la red están basadas en algunas suposiciones. Los dispositivos son preprogramados para su función de red. Los dispositivos finales siempre tratarán de asociarse a una red existente. Los coordinadores siempre tratarán de encontrar un canal sin usar de una red. Los dispositivos descubren otros dispositivos y se asociarán a la red para proveer servicios complementarios. Por ejemplo, un dispositivo de control de luz ZigBee descubrirá solamente una red *ZigBee* de alumbrado, porque esto es lo que comprende. Sin embargo, los dispositivos pueden ser programados para funcionar en diferentes tipos de red.

Lo mismo sirve para la unión. Los dispositivos solamente pueden comunicarse a dispositivos de una red complementaria.

Las especificaciones de este estándar permiten tres diferentes topologías de red que pueden ser implementadas dependiendo de la aplicación, y éstas son:

- ➤ Topología en estrella: se tiene un único nodo trabajando como coordinador PAN.
- ➤ **Topología** cluster tree: se tiene la asociación de varias en donde el coordinador PAN forma el primer cluster y se establece a si mismo como Cluster Head (CH) con su respectivo Cluster Identifier (CID) igual a cero, elije un identificador PAN y envía tramas beacons a todos los dispositivos vecinos.
- ➤ **Topología** *mesh:* en esta configuración hay conectividad total de todos los FFDs que conforman la red con el FFD que actúa como coordinador PAN. Los RFDs pueden también participar en la red pero hay solamente conectividad con los FFD y no puede participar en enrutamiento.

2.5.1.4.3 MAC (Medium Access Control)

La subcapa MAC del protocolo IEEE 802.15.4 provee un interfaz entre la capa física y las capas superiores de los LR-WPANs. Presenta las siguientes características:

- Asociación/disociación
- ➤ Acuse de recibo (ACK)
- Mecanismos de acceso al canal
- Validación de trama
- Control de garantía de ranuras de tiempo (*Slot Time*)
- Control de guías (Beacon)
- Sondeo del canal (*Scan*)

MAC proporciona dos tipos de servicios hacia las capas superiores, a través de dos Puntos de Acceso a Servicios (*Service Access Points, SAPs*):

➤ A los servicios de datos MAC se acceden por medio de la parte común de la subcapa MCPS-SAP (MAC Common Part Sublayer-Service Access Point).

➤ Al manejo de servicios MAC se accede por medio de la capa MAC de manejo de identidades MLME-SAP (MAC Layer Management Entity-Service Access Point).

Se caracteriza por una baja complejidad; el administrador de servicios MAC tiene 26 primitivas, que comparadas con 802.15.1 (*Bluetooth*), que tiene alrededor de 131 primitivas para 32 tipos de eventos, el MAC de 802.15.4 es muy simple, haciéndolo muy versátil para las aplicaciones hacia las que fue orientado, aunque se pague el costo de tener un instrumento con características menores a las de 802.15.1.

Los modos de operación en Zigbee/ IEEE 802.15.4 son:

- ➤ Modo Beacon-habilitado: Cuando el coordinador PAN selecciona el modo de beacon-habilitado, usa la estructura de superframe para manejar la comunicación entre dispositivos. El formato de la superframe está definido por el coordinador PAN, y dicho formato se lo envía periódicamente dentro de una trama beacon al resto de dispositivos.
- ➤ Modo Beacon-no habilitado: Cuando el coordinador PAN selecciona el modo de beacon-no habilitado los dispositivos simplemente pueden enviar sus datos mediante el mecanismo CSMA/CA no ranurado. En este tipo de modo no se utilizan superframes.

Estructura de superframes

La supertrama está limitada por dos tramas beacon y tiene un período activo y uno inactivo como muestra la siguiente figura:

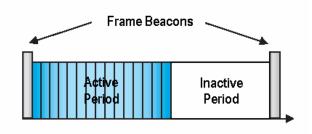


Figura 2.12: Partes de una superframe

La porción activa, independiente de la duración de cada superframe siempre está dividida en 16 slots, y todos los slots tienen igual duración

Mecanismos de acceso al medio

El estándar 802.15.4 define dos versiones del mecanismo CSMA/CA:

- EL CSMA/CA ranurado, usado en el modo de operación beacon-habilitado.
- ➤ EL CSMA/CA no ranurado, usado en el modo de operación beacon-no habilitado.

En ambos casos, el dispositivo escucha el canal, si éste está ocupado, entonces el algoritmo CSMA/CA le asigna un número de períodos de backoff (cada periodo igual a 20 símbolos) que deberá esperar antes de sondear nuevamente el canal.

En CSMA/CA ranurado, cada dispositivo debe esperar para sondear el canal y esto debe coincidir con el comienzo de un nuevo slot de la superframe.

Separación entre tramas

El período IFS (*Inter Frame Spacing*) define la cantidad de tiempo que separa dos tramas consecutivas. La subcapa MAC necesita una cantidad de tiempo para procesar los datos recibidos por la capa física.

El largo del IFS depende del tamaño de la trama emitida. Las tramas de tamaño menor a 18 bytes estarán seguidas de un período IFS igual a 12 símbolos, mientras que las tramas mayores a 18 bytes estarán seguidas por un período IFS igual a 40 símbolos.

Sondeo de canales

El sondeo de canales es utilizado para identificar la existencia de redes PAN antes de la asociación o para crear una nueva PAN. El estándar define cuatro tipos de sondeo de canal:

- ➤ **Sondeo de canal ED** (*Energy Detection*): permite a un FFD obtener una medida de la señal en el canal.
- ➤ **Sondeo de canal activo:** permite a un FFD localizar alguna trama beacon transmitida por un coordinador dentro de su rango de operación.
- > Sondeo de canal pasivo: permite a un dispositivo localizar alguna trama beacon transmitida por un coordinador pero sin que el dispositivo envíe tramas de petición de beacon.
- > Sondeo de canal *Orphan*: permite a un dispositivo intentar relocalizar a su coordinador después de una pérdida de sincronización.

Creación de una red

Una PAN puede ser creada solamente por un dispositivo FFD después de realizado un sondeo de canal (ED o activo), procedimiento en el cual el dispositivo ha elegido un canal y un identificador PAN.

Una vez creada la PAN, el coordinador genera y envía tramas beacon para manejar la asociación y disociación de otros dispositivos proveyendo servicios de sincronización permitiendo la asignación y el manejo de GTSs.

Estructura de las 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 mantenga un protocolo simple.

- Data Frame: usado para todas las transferencias de datos.
- Acknowledgment Frame: usado para confirmar la recepción exitosa de la trama.
- MAC Command Frame: usado para manejar todo el control de entidad MAC.
- ➤ Beacon Frame: usado por un Coordinador para transmitir beacons

2.5.1.4.4 Capa física

La capa física es la responsable de la transmisión y la recepción de datos en un canal de radio y acorde con las técnicas de modulación y spreading. La IEEE 802.15.4 ofrece tres bandas de frecuencia en las cuales operar: 2.4 GHz, 915MHz y 868 MHz.

La frecuencia de 2.4 GHz, específica la operación en la banda Industrial, Médica y Científica (ISM), que prácticamente está disponible en todo el mundo, mientras que la frecuencia de 865 MHz opera en Europa y 915 MHz en Estados Unidos. El estándar

IEEE 802.15.4 utiliza la técnica DSSS (*Direct Secuence Spread Spectrum*) para transmitir la información a través del medio. Además, las velocidades de transmisión son de 250 Kbps en la banda de 2.4 GHz, 40 Kbps en la banda de 915 MHz y 20 Kbps en la banda de 868 MHz.

Las características de cada frecuencia están resumidas en la siguiente Tabla:

Banda de frecuencias (MHz)	Parámetr Velocidad de bits (kbps)	os de datos Modulación
868	20	BPSK
915	40	BPSK
2400	250	O-QPSK

Tabla 2.3: Parámetros técnicos según las frecuencias

Los diferentes rangos de transmisión se pueden explotar para lograr una variedad de aplicaciones con una velocidad efectiva. Por ejemplo, la capa física a 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 una área geográfica, mientras que el rango superior de transmisión en la capa física a 2.4 GHz se puede utilizar para conseguir mayor velocidad de transmisión.

Las características de la capa física son:

- Activación y desactivación del radio transceiver: El radio transceiver puede operar en uno de estos tres estados: transmitiendo, recibiendo o en modo sleeping. El tiempo que el dispositivo tarda de transmitir a recibir o viceversa no debe exceder los 12 símbolos de acuerdo al estándar.
- ➤ Detección de energía (ED) en el canal: Es una estimación de la señal recibida, y ese valor es analizado con respecto a un valor umbral predeterminado (umbral ED). Esta medida es usada para la selección de canal, y por CCA (*Clear Channel Assessment*) para determinar si el canal está libre u ocupado.
- ➤ Indicador de calidad del enlace: LQI (*Link Quality Indication*) indica la medida de fuerza/calidad del paquete recibido, esta medida puede ser implementada usando detección de energía (ED).
- ➤ Clear Channel Assessment (CCA): Esta operación es responsable de reportar el estado de actividad en el medio (libre u ocupado). EL CCA tiene tres modos de operación: Modo de detección de energía, Modo de sondeo de carrier y Sondeo de carrier con detección de energía.
- ➤ Selección de la frecuencia del canal: IEEE 802.15.4 define 27 canales diferentes; por lo tanto, la capa física debe sintonizar al dispositivo dentro del canal a utilizarse.

Estructura de las tramas de la capa física

Están formadas por los siguientes campos:

- > Synchronization HeadeR (SHR): Este campo es usado la para la sincronización de la trama.
 - **Phy HeadeR** (PHR): Especifica el largo de la PSDU.
- ➤ *Phy Service Data Unit* (PSDU): En el campo de datos de la capa física se encapsula a la trama MAC cuyo valor máximo debe ser de 127 bytes. Así que el paquete máximo de capa física será de 133 bytes.

Canales IEEE 802.15.4

IEEE 802.15.4 define 27 canales de frecuencia entre las tres bandas, como lo muestra la siguiente figura:

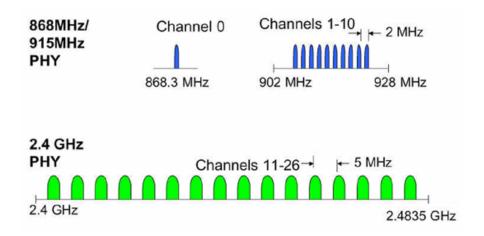


Figura 2.13: Estructura de canales de IEEE 802.15.4

- La banda 868 MHz soporta un solo canal entre los 868 y los 868.6 MHz
- ➤ La banda 915 MHz soporta diez canales entre los 902.0 y 928.0 MHz, con un espacio entre canales de 2 MHz.
- ➤ La banda de 2.4 GHz soporta 16 canales entre 2.4 y los 2.4835 GHz, con un espacio entre canales de 5 MHz.

En la siguiente tabla se muestra el cálculo de las frecuencias centrales de los diferentes canales:

Número de canales	Frecuencia central del canal (MHz)
k = 0	868.3
K = 1,2,10	906 + 2 (k - 1)
K = 11,12,26	2405 + 5 (k –11)

Tabla 2.4: Frecuencias de canales IEEE 802.15.4

Modulación

Si se emplean las frecuencias de 915 MHz y 868 MHz la señal es modulada con BPSK (*Binary Phase Shift Keying*). Mientras que a la frecuencia 2.4 GHz se emplea una técnica de modulación O-QPSK.

En términos de eficiencia (energía requerida por bit), la modulación ortogonal mejora su funcionamiento en 2 dB que BPSK. Sin embargo, en términos de sensibilidad de recepción, a las frecuencias 868MHz y 915 MHz se tiene una ventaja de 6-8 dB debido a que tiene velocidades de transmisión más bajas.

Sensibilidad y potencia

Las especificaciones de sensibilidad de IEEE 802.15.4 especifican -85 dBm para la frecuencia de 2.4 GHz y de -92 dBm para las frecuencias de 868 y 915 MHz. Dichos valores incluyen suficiente margen para las tolerancias que se requieren debido a las imperfecciones en la fabricación, de la misma manera que permite implementar aplicaciones de bajo costo.

El estándar IEEE 802.15.4 especifica que cada dispositivo debe de ser capaz de transmitir al menos a 1 mW, pero dependiendo de las necesidades de la aplicación, la potencia de transmisión puede variar.

Los dispositivos típicos (1mW) se espera que cubran un rango de entre 10 y 75 m; sin embargo, con una buena sensibilidad y un incremento moderado en la potencia de transmisión, se obtiene mayores coberturas.

Interferencia con otros dispositivos

Los dispositivos que operan en la banda de 2.4 GHz pueden recibir interferencias causadas por otros servicios que operan en dicha banda. Esta situación es aceptable en las aplicaciones que utilizan el estándar IEEE 802.15.4, pues éstas no requieren una alta calidad de servicio (QoS), y además se espera que realicen varios intentos para completar la transmisión de información.

2.5.1.4.5 Tipo de tráfico

Estos tipos de tráfico son atributos diferentes de la subcapa MAC, siendo esta lo suficientemente flexible para manejar a cada uno de estos:

- ➤ Datos periódicos: Este tipo de tráfico se maneja usando el modo de beaconhabilitado donde el sensor se despertará debido a la recepción de una trama beacon, momento que utilizara para verificar cualquier tipo de mensaje y luego volverá a dormir nuevamente (por ejemplo, los sensores).
- ➤ Datos intermitentes: Esta información se maneja usando el modo de beacon-no habilitado. En este modo el dispositivo sólo se comunicará con la red cuando necesite informar la cantidad de energía sobrante en el mismo (por ejemplo, los interruptores de luz).
- ➤ Datos repetitivos de baja velocidad: Para estos datos de baja latencia se usa el modo de beacon-habilitado y se utilizan los GTSs, que permiten que cada dispositivo transmita datos sin realizar contención (por ejemplo, el ratón de un PC).