

2. Bluetooth

Este capítulo ofrece una descripción de la tecnología Bluetooth. Esto comenzará con una breve introducción de algunas de las comunicaciones inalámbricas usadas hoy en día. A continuación nos centraremos en la tecnología Bluetooth, donde conoceremos su especificación y arquitectura además de ver un poco de su historia. Por último veremos las operaciones básicas que llevará a cabo un dispositivo Bluetooth.

2.1. Comunicaciones inalámbricas

El rápido auge de Internet ha cambiado el mundo de la informática moderna. Nos encontramos en la Era de la Información. Este término proviene del intercambio masivo de datos entre dispositivos de todo tipo, interconectándolos de forma cableada así como inalámbrica. Hoy en día, se ha llegado a un punto que el mundo de la informática y las comunicaciones conviven casi siempre de forma conjunta.

La convergencia de la informática y las comunicaciones comenzó a principios de 1960 con el desarrollo del modem y de la Línea de Conmutador Privado (PBX). El modem permite a ordenadores comunicarse entre sí usando las líneas telefónicas, mientras que mediante PBX se puede controlar la conmutación telefónica con un ordenador. El resultado de todo esto, eran las primeras redes de ordenadores. Actualmente las redes de ordenadores, de bastante mayor velocidad, conectan servidores, ordenadores personales y otros tipos de dispositivos. La distinción entre redes de datos y de voz se hace bastante difusa, y la misma red tiende a transportar ambos tipos de datos. Fue el deseo y necesidad de comunicarse con ordenadores distantes lo que llevó a cabo la creación de Internet. Hoy en día, la compra de un ordenador personal, se justifica principalmente como una herramienta de comunicación, que da acceso a Internet para el correo electrónico o la World Wide Web.

La alta dependencia de Internet y la necesidad de estar conectado desde cualquier parte y en cualquier momento, ha conducido a grandes avances en la tecnología móvil y de las comunicaciones. Hemos estado conectados desde hace ya algún tiempo de forma inalámbrica gracias a la comunicación por satélite, teléfonos inalámbricos, teléfonos móviles, y aparatos de control remoto. Sin embargo, en los últimos años el mundo de las comunicaciones inalámbricas ha experimentado un importante crecimiento. Las comunicaciones inalámbricas de largo alcance se realizan típicamente con radiofrecuencia (RF), haciendo uso de rangos del espectro RF que requieren licencias. Por otro lado las comunicaciones de corto alcance pueden llevarse a cabo con RF o infrarrojos, y haciendo uso de zonas del espectro libre, es decir, que no requieren licencia.

Hay bastantes estándares de comunicaciones inalámbricas de corto alcance, pero se puede decir que actualmente los tres más importantes son los infrarrojos de la Asociación de Datos Infrarrojos (IrDA), Bluetooth y las redes de area local inalámbricas (WLAN). Además, una de las tecnologías que más se pueden asemejar a Bluetooth es ZigBee, siendo ambas parte del estándar 802.15, funcionando en la banda de libre de los 2,4 GHz y usando bajos niveles de potencia.

2.1.1. WLAN

WLAN también es conocido como IEEE 802.11 y existen tres variantes distintas, las 802.11b y 802.11g que operan a 2,4 GHz, y la 802.11a que funciona a 5 GHz. La 802.11b consigue una tasa de hasta 11 Mbps y un rango de hasta 100 m, aunque para conseguir la tasa máxima habrá que reducir esta distancia (10 m) al punto de acceso.

2.1.2. Infrarrojos

Consiste en un sistema de comunicaciones inalámbricas creado por la IrDA y que hace uso de la luz infrarroja. Su tasa de máxima de transferencia es de 4 Mbps y tiene un rango de hasta 1,5 m. Los dispositivos tienen que estar alineados formando como máximo un ángulo de 15° entre ellos y sin objetos entre ellos, al contrario que las ondas por radiofrecuencia que pueden penetrar la gran mayoría de los objetos.

2.1.3. ZigBee

Los protocolos de ZigBee proporcionan una especie de red de sensores, para aplicaciones industriales o para el hogar, como pueden ser control y monitorización de la iluminación, calefacción o aire acondicionado. Combina el estándar IEEE 802.15.4, que define las capas físicas y MAC, con las capas de red, seguridad y software especificados por la Alianza ZigBee.

ZigBee usa la técnica de modulación de espectro expandido de secuencia directa (DSSS). Los requerimientos de potencia son especialmente bajos, pues el dispositivo ZigBee se encuentra en un estado de muy bajo consumo mientras que no haya comunicación. La tasa binaria máxima es de unos 250 Kbps, y el alcance puede llegar hasta los 70 m.

2.1.4. Comparativa

Tanto 802.11b como la tecnología Bluetooth permiten comunicaciones en la banda de los 2,4 GHz, pero están dirigidos a sectores de mercado completamente diferentes. Así por ejemplo, 802.11b permite una comunicación de bastante más largo alcance que Bluetooth, pero eso implica también una necesidad de potencia bastante más elevada. Estas son características que hacen que Bluetooth sea una tecnología bastante más apropiada para interconectar dispositivos de pequeño tamaño y potencia limitada, como son los teléfonos móviles.

ZigBee tampoco se debe ver como una tecnología mejor o peor que Bluetooth. En general se puede decir que Bluetooth es mejor para establecer redes PAN de forma espontánea, permitiendo transmitir archivos de mayor tamaño que ZigBee, como pueden ser imágenes o gráficos, o para el uso de dispositivos de audio manos libres. Sin embargo ZigBee es más apropiado en el caso que tengamos una cantidad grande de dispositivos, que la red sea estática, que los datos a transferir no sean de gran tamaño, o que la comunicación se realice esporádicamente. Esto hace a ZigBee la tecnología adecuada para el control de sensores, pudiendo proveer a los dispositivos de baterías que pueden llegar a durar hasta dos años.

En resumen, no se puede decir que una tecnología sea mejor que otra y, en general, no se debe ver una tecnología como competidora de otra, sino que conviven, siendo cada una más apropiada que las demás para una situación particular. En cualquier caso en la Tabla 1.1 se muestra una comparación de las diferentes tecnologías.

Característica	IrDA	WLAN	ZigBee	Bluetooth
Aplicación principal	Sustitución de cable	LAN	Control y monitorización	Sustitución de cable (PAN)
Tipo de conexión	Infrarrojo, haz estrecho, línea de vista	Espectro expandido, esférico	Espectro expandido, esférico	Espectro expandido, esférico
Espectro	Óptico 850 – 900 nm	RF 2,4 GHz (5 GHz en 802.11a)	RF 2,4 GHz	RF 2,4 GHz
Tasa de transmisión máxima	9600 bps – 16 Mbps	11 Mbps (54 Mbps en 802.11a, 802.11g)	250 Kbps	1 Mbps
Distancia	1 m	100 m	70 m	10 ó 100 m
Número de dispositivos	2	32 nodos	255 - 65000	8 (activos), 200 (pasivos)
Canales de voz	-	VoIP	-	3

Tabla 2.1 Comparación de tecnologías inalámbricas

2.2. Qué es Bluetooth

Bluetooth es una especificación abierta para una tecnología de comunicación inalámbrica de bajo coste, baja potencia y de corto alcance tanto para voz como para datos. Vamos a ver más detalladamente que es lo que quiere decir esto:

- Una especificación abierta significa que está públicamente disponible y de manera gratuita.
- La tecnología radio de corto alcance implica que los dispositivos se pueden comunicar usando ondas de radio a una distancia de 10 metros. Utilizando transmisión de alta potencia se pueden alcanzar hasta los 100 metros.
- Debido a que la comunicación es de corto alcance, es posible utilizar una potencia pequeña incluyendo por supuesto a dispositivos móviles provistos de pequeñas baterías.
- Bluetooth soporta tráfico de voz y de datos, permitiendo transmitir cualquier tipo de contenido.
- Bluetooth es una tecnología disponible en cualquier parte del mundo debido a que opera en la franja de los 2,4 GHz correspondiente a la globalmente disponible y libre banda ISM.

La tecnología inalámbrica Bluetooth fue en un principio desarrollada como un sustituto a los cables que conectan dispositivos como pueden ser teléfonos móviles, auriculares u ordenadores personales. No obstante, la conexión inalámbrica de dispositivos fijos y móviles plantea nuevos escenarios de uso además del simple reemplazamiento de cables. De este modo nace el concepto de Red de Área Personal (PAN), que no es más que la interconexión y comunicación de dispositivos cercanos. Estas redes pretenden proporcionar de una manera sencilla una conexión a impresoras, puntos de acceso a Internet y dispositivos personales como teléfonos móviles o PDA's tanto en el hogar como en el trabajo.

2.3. Historia de Bluetooth

Los orígenes de Bluetooth se remontan a 1994, año en el que Ericsson comenzó un estudio para encontrar alternativas a la hora de conectar los teléfonos móviles a sus accesorios. Los ingenieros buscaban por un lado soluciones de bajo coste y baja potencia. Pero además reconocían que para que el estándar tuviera éxito debía ser abierto en lugar de propietario. A principios de 1998 a Ericsson se le unieron las compañías Intel, IBM, Nokia y Toshiba y formaron el Bluetooth Special Interest Group (SIG), y se centraron en el desarrollo de una especificación abierta para Bluetooth. Las compañías originales, conocidas como compañías promotoras, anunciaron públicamente la creación del SIG en mayo de 1998, e invitaron a las demás compañías interesadas a unirse al SIG a cambio de ofrecer un soporte a la especificación de Bluetooth. En julio de 1999, el SIG publicó la versión 1.0 de la especificación. En diciembre de ese mismo año, 3Com, Agere, Microsoft y Motorola se unieron al SIG.

Desde entonces, la importancia de la tecnología Bluetooth se ha ido afianzando, y muchas otras compañías se han unido al SIG como adoptivos, lo que les da derecho a recibir licencias para producir dispositivos dotados de tecnología Bluetooth. Los privilegios de voto están reservados para las nueve compañías promotoras. No obstante, las compañías adoptivas pueden participar en la toma de decisiones, desarrollando grupos de trabajo con los puestos ocupados por su propio personal. Los promotores son responsables de la dirección general y la promoción de Bluetooth, comprometiendo recursos (financieros y humanos) para la administración del SIG. Las compañías promotoras también trabajan de cerca con grupos de trabajo adoptivos enfocados en especificaciones, interoperabilidad y mercadotecnia. En la actualidad hay más de 2000 miembros del SIG.

El origen del nombre de esta tecnología proviene del rey danés Harald Blatand (la traducción inglesa de Blatand sería Bluetooth), quien en el siglo X unificó Dinamarca y Noruega. En un principio éste era el nombre interno que recibía la tecnología dentro del SIG. Como el equipo de marketing del SIG no encontró un nombre mejor, éste fue el que se quedó.

2.4. Especificación de Bluetooth

La especificación de Bluetooth es el resultado de la cooperación de varias compañías en el SIG, y define el comportamiento aéreo de la tecnología para asegurar la compatibilidad entre dispositivos fabricados por distintas compañías. Describe el sistema completo, desde la interfaz radio hasta el nivel de aplicación, incluyendo también la pila de software.

La versión 1.1 se publicó en febrero de 2001 y se divide en dos volúmenes. El volumen 1 conforma la especificación del núcleo y describe la pila de protocolos y otros temas relacionados como el *testing* y requisitos de calidad. La pila de protocolos está definida como una serie de capas de forma bastante análoga a la conocida pila de protocolos del sistema OSI. Cada capa de la pila de protocolos representa un protocolo diferente y se encuentra completamente descrito de forma separada en la especificación del núcleo. El volumen 2 describe los denominados perfiles de Bluetooth. Los perfiles no son más que modelos de uso esenciales, que describen cómo deben usar las aplicaciones la pila de protocolos de Bluetooth. Un perfil es un conjunto de posibilidades de la pila de protocolos de Bluetooth que se proponen como solución por defecto para un modelo de uso determinado. Los perfiles son la base del proceso de calificación, es decir, del proceso necesario para asegurar que ningún producto salga al mercado sin cumplir plenamente todas las características que aseguran la interoperabilidad con otros dispositivos. La especificación y perfiles continuarán desarrollándose a medida que vayan encontrándose nuevos posibles usos de Bluetooth.

La versión 1.2, que existe desde noviembre de 2003 supone un cambio en el formato de la especificación respecto a las versiones anteriores. Debido al creciente número de protocolos y

perfiles publicados y adoptados, hacen que el tamaño de la especificación vaya creciendo todavía más y hay que dividirlo de una forma más estructurada, resultando una división en seis volúmenes. En la versión 1.2 se realiza una revisión de la arquitectura, además de especificar nuevas características como son una conexión más rápida, salto de frecuencia adaptable, enlaces SCO extendidos y mejoras en la detección de errores, control de flujo, capacidad de sincronización y especificación del flujo.

Actualmente la última versión es la 2.0, que se publicó en Noviembre de 2004. Esta especificación pretende ser una especificación completamente nueva, añadiendo la nueva característica EDR. Así se consigue una tasa de datos hasta tres veces más alta que la especificada en la versión 1.1, se proporciona un mejor soporte a las conexiones múltiples, y se trabaja a su vez con un nivel de potencia mucho menor.

En cualquier caso, este proyecto se basa en la versión 1.1, que es la que implementan actualmente la gran mayoría de los dispositivos del mercado, pero sin dejar de tener en cuenta las nuevas características que han añadido las especificaciones posteriormente publicadas.

2.5. Arquitectura del sistema Bluetooth

La pila de protocolos de Bluetooth se puede dividir en dos componentes: el *host* y el controlador Bluetooth (o módulo radio). La *Host Controller Interface* (HCI) proporciona una interfaz estándar entre el *host* y el controlador Bluetooth.

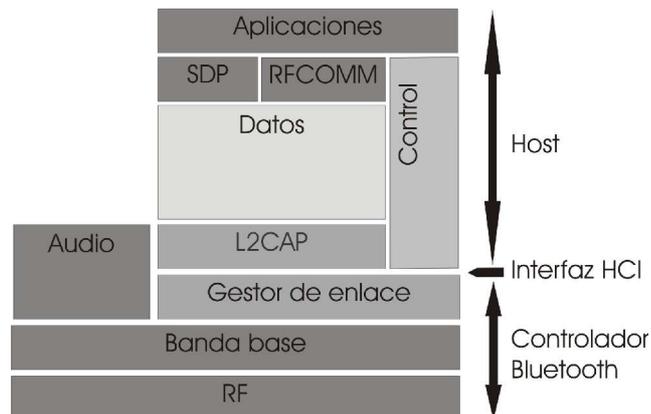


Figura 2.1 Host y controlador Bluetooth

El *host* también es conocido como la capa alta de la pila de protocolos y normalmente está implementado en *software*. Generalmente se encuentra integrado con el *software* del sistema o sistema operativo del dispositivo. Los perfiles están contruídos por encima de los protocolos, generalmente en *software*.

El módulo radio o controlador de Bluetooth normalmente es un módulo *hardware*, como podría ser una *PC card* conectada al dispositivo en cuestión, aunque lo normal es que éste módulo vaya ya integrado en el *hardware* del dispositivo. Las capas altas pueden hacer uso del módulo radio a través de la interfaz HCI. A su vez, el módulo radio interactúa con el sistema *host* mediante un sistema estándar de entrada/salida, como puede ser PCMCIA, UART, o USB. Aunque en realidad el *host* y el controlador se encuentran implementados en la mayoría de los dispositivos de forma conjunta y no es necesario hacer uso de la HCI.

2.5.1. Protocolos

La figura 2.2 muestra un diagrama de la pila de protocolos de Bluetooth. Varios son los protocolos definidos en la especificación, pero en la figura se muestran los más importantes. La pila se compone de protocolos específicos de Bluetooth como tecnología inalámbrica, así como del protocolo de búsqueda de servicios SDP, u otros protocolos adoptados como el protocolo de intercambio de objetos OBEX.

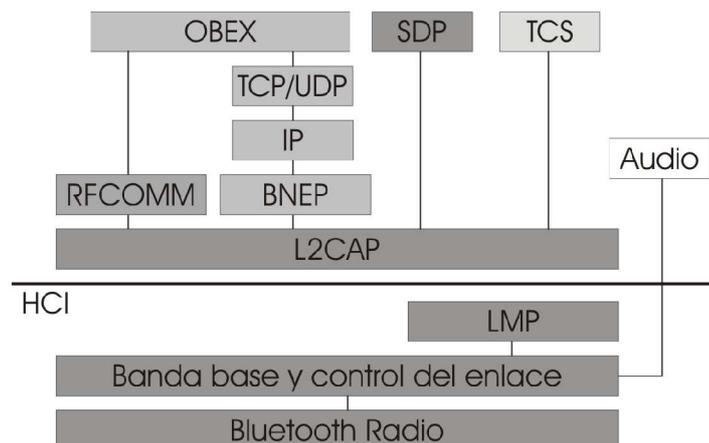


Figura 2.2 Pila de protocolos

- La capa radio es la capa más baja de las definidas en la especificación. Define los requisitos que debe seguir el transceptor del dispositivo que opera en la banda de los 2,4 GHz.
- Las capas de banda base y control del enlace permiten el enlace físico de RF entre las unidades Bluetooth. La capa de banda base se encarga de la gestión de los canales y temporización, mientras que la de control del enlace controla el acceso a los canales. Hay dos tipos diferentes de enlaces físicos: síncrono orientado a conexión (SCO) y asíncrono sin conexión (ACL). Un enlace ACL está orientado al tráfico de paquetes de datos, mientras que un SCO soporta el tráfico de audio en tiempo real.
- *Audio* no es en realidad una capa de la pila de protocolos, pero se muestra en el diagrama porque es tratado de forma exclusiva en la comunicación Bluetooth. El tráfico de audio es

dirigido desde y hacia la banda base a través de un enlace SCO. Por supuesto, si se está usando un canal de datos (como en aplicaciones de VoIP), el tráfico de audio se transmitirá sobre un enlace ACL.

- El protocolo de gestión del enlace LMP se responsabiliza del establecimiento y configuración del enlace entre los dispositivos, gestionando y negociando el tamaño de los paquetes de banda base. El protocolo LMP se encarga también de los aspectos de seguridad, como la autenticación y encriptado, generando, intercambiando y comprobando claves.
- La HCI proporciona una interfaz con el módulo radio, el controlador de la banda base y el gestor de enlace. De este modo ofrece una interfaz estándar que permite acceder a las posibilidades de la banda base, al estado del *hardware*, y los registros de control.
- El protocolo de control del enlace lógico y adaptación L2CAP abstrae a las capas superiores de los detalles de los protocolos de capas inferiores. Además realiza la multiplexión entre los distintos canales lógicos creados por las capas superiores.
- SDP proporciona a las aplicaciones un medio para realizar búsquedas de servicios y de sus características. Al contrario de como se procede en una LAN, en la que el dispositivo se conecta a la red y seguidamente busca al resto de dispositivos, en Bluetooth primero se encuentra el dispositivo remoto y después se buscan los servicios. Además el conjunto de servicios disponibles puede cambiar mientras el dispositivo está en marcha. De ahí que SDP sea bastante diferente de la búsqueda de servicios de las redes tradicionales.
- Una de las interfaces más comunes en los dispositivos de comunicación e informática son los puertos serie. El protocolo RFCOMM ofrece una emulación de un puerto serie sobre L2CAP. RFCOMM proporciona el mecanismo de transporte a servicios de capas más altas, permitiendo realizar múltiples conexiones con un dispositivo al mismo tiempo.
- Los dispositivos habilitados con Bluetooth tienen la capacidad de formar redes e intercambiar información. Para que puedan llevar esto a cabo se hace necesario el uso de un formato de paquete común para encapsular los protocolos de nivel 3. El protocolo de encapsulación de red Bluetooth BNEP encapsula paquetes de varios protocolos de red para ser después transportados directamente sobre L2CAP. BNEP es un protocolo opcional desarrollado después de la versión 1.1 de la especificación de Bluetooth pero basada en ésta.
- La especificación del protocolo de control telefónico, TCS binary, define la señalización de control de llamadas para el establecimiento de llamadas de voz y datos entre dispositivos Bluetooth.
- Los protocolos adoptados como OBEX o IP están contruidos sobre protocolos anteriormente mencionados. De este modo OBEX iría sobre RFCOMM e IP sobre BNEP.

- Además de éstos, el SIG está definiendo nuevos protocolos, pero siempre sobre algunos de los ya mencionados y, en la mayor parte de los casos, sobre L2CAP. Algunos ejemplos de estos protocolos más recientes son: *Hardcopy Control Channel*, *Hardcopy Notification Channel*, *Audio/Video Control Transport Protocol* y *Audio/Video Distribution Transport Protocol*.

La figura 2.3 muestra una comparación del tradicional modelo OSI con la pila de protocolos de Bluetooth. Aunque vemos que no se corresponden el uno con el otro exactamente, nos será bastante útil relacionar las diferentes capas del Bluetooth con el modelo OSI.

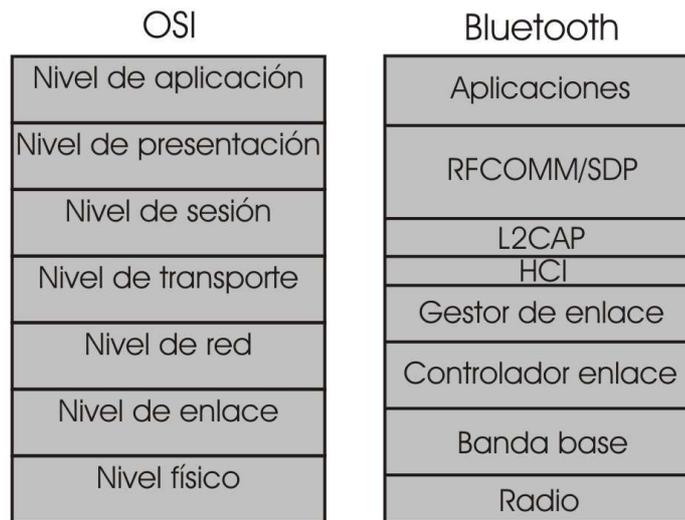


Figura 2.3 Comparación modelo OSI y pila Bluetooth

La capa física es responsable de la interfaz eléctrica con el medio de comunicaciones, incluyendo la modulación y codificación del canal. Esto cubre parte de la capa radio y de la banda base de Bluetooth.

La capa de enlace es responsable de la transmisión, tramas y control de errores sobre un enlace particular. Éstas serían las tareas realizadas por el controlador del enlace y la parte de control de la banda base, incluyendo comprobación y corrección de errores.

El resto es bastante más difuso. La capa de red es responsable de la transferencia de datos a través de la red, independientemente del medio y de la topología específica de la red. Esto engloba la parte alta del controlador del enlace, estableciendo y manteniendo múltiples enlaces, y cubre además la mayoría de las tareas del gestor del enlace (LM). La capa de transporte es responsable de la fiabilidad y multiplexión de datos a través de la red, cosa de que se encarga la parte más alta del gestor del enlace así como la HCI, que provee los mecanismos de transporte de datos.

La capa de sesión proporciona los servicios de control del flujo de datos, que son cubiertos en Bluetooth por L2CAP y la parte baja de RFCOMM y SDP. La capa de presentación provee una

representación común para la capa de aplicación añadiendo estructura de servicios a las unidades de datos, cosa que realizan los protocolos RFCOMM y SDP. Finalmente, la capa de aplicación sería la responsable de gestionar la comunicación entre las aplicaciones finales.

2.5.2. Capa Física

Los dispositivos Bluetooth operan en la frecuencia de 2,4 GHz, perteneciente a la banda globalmente libre ISM. Esta banda está reservada para el uso general de aplicaciones industriales, científicas y médicas, que deben seguir unas especificaciones particulares de emisión de potencia, espectral y de interferencias. Esto implica que Bluetooth deba ser bastante robusto, ya que funciona en una banda compartida por gran cantidad de usuarios y aplicaciones.

La banda de operación se divide en canales de 1 MHz, cada uno señalizando datos a 1 Megasímbolo por segundo, obteniendo así el mayor ancho de banda del canal disponible. Con la modulación GFSK esto implica una tasa binaria de 1 Mbps. Usando GFSK, el 1 binario se consigue con una desviación positiva de frecuencia respecto a la frecuencia nominal de portadora, mientras que el 0 se obtiene con una desviación negativa de la misma.

Después de cada paquete, ambos dispositivos resintonizan a una frecuencia distinta, saltando de un canal radio a otro, utilizando la técnica de espectro expandido por salto de frecuencia (FHSS). De este modo, los dispositivos Bluetooth usan la totalidad de la banda ISM disponible y, si una transmisión se ve afectada por una interferencia, la retransmisión se realizará en otro canal que con un poco de suerte estará libre. El canal se divide en intervalos de tiempo, denominados *slots*, que duran 625 μ s. Generalmente se realiza un salto de frecuencia por paquete, lo que equivale a un salto por cada *slot*, cada 3 *slots* o cada 5.

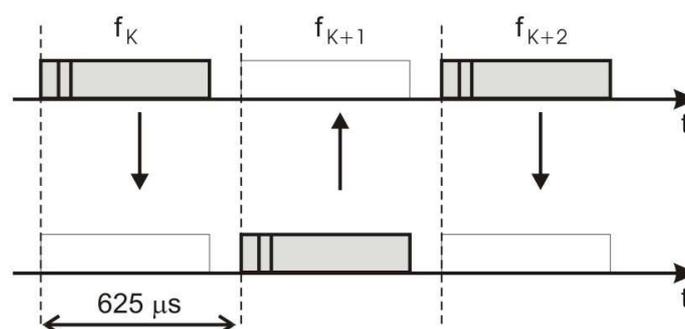


Figura 2.4 Slots

2.5.3. Maestros y esclavos

Para poder cambiar de frecuencia después de transmitir cada paquete, los dispositivos se tienen que poner de acuerdo en la siguiente frecuencia que van a utilizar. Los dispositivos pueden operar en dos modos distintos: como maestro o como esclavo. El maestro es el que establece la secuencia de frecuencias a utilizar. Los esclavos a su vez se sincronizan en tiempo y frecuencia con el maestro siguiendo la secuencia de salto establecida por éste.

Cada dispositivo Bluetooth posee una dirección y un reloj únicos. La parte de banda base de la especificación describe un algoritmo para calcular una secuencia de saltos de frecuencia a partir de la dirección y reloj del dispositivo. Cuando los dispositivos esclavos se conectan al maestro obtienen la dirección y reloj de éste, a partir de los cuales pueden calcular la secuencia de salto. Debido a que todos los esclavos usan la dirección y reloj del maestro, todos están sincronizados con la misma secuencia de saltos de frecuencia.

Además de controlar la secuencia de saltos de frecuencia, el maestro se encarga de controlar cuando los dispositivos pueden transmitir y cuando no. El maestro permite a los esclavos transmitir asignándoles *slots* para tráfico de datos o de voz. En los *slots* de datos, los esclavos sólo pueden transmitir cuando sea respondiendo a una transmisión realizada anteriormente por el maestro. En los de voz, los esclavos tienen que transmitir regularmente en *slots* reservados siendo o no una respuesta al maestro.

El maestro se encarga de dividir el ancho de banda total entre los diferentes esclavos decidiendo cuándo y con qué frecuencia se comunica con cada uno. La cantidad de *slots* de tiempo de cada dispositivo dependerá de la cantidad de datos que tengan que transmitir. El sistema de división del tiempo en *slots* entre los diferentes dispositivos se denomina multiplexión por división en el tiempo (TDM).

2.5.4. Piconets y Scatternets

Un grupo de dispositivos esclavos operando con un maestro se conoce con el nombre de *piconet*. Todos los dispositivos de una *piconet* siguen la secuencia de saltos de frecuencia y tiempo del Master.

Como muestra la Figura 2.5 una piconet puede estar formada por el maestro y un esclavo (punto a punto), o por el maestro y varios esclavos (punto a multipunto). En una *piconet* los esclavos sólo están conectados al maestro, es decir, no existen enlaces directos entre esclavos.

La especificación limita el número de esclavos en una *piconet* a siete, estando cada uno conectado únicamente al maestro. No obstante, es posible realizar redes de mayor tamaño, de forma que se pueda cubrir un mayor espacio y conectar a un mayor número de miembros,

enlazando varias *piconets* y formando lo que se denomina una *scatternet*, donde algunos de los dispositivos forman parte de más de una *piconet*.

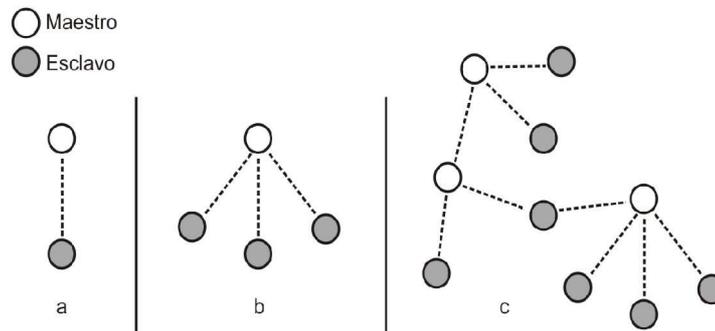


Figura 2.5 Piconet punto a punto (a), Piconet punto a multipunto (b) y Scatternet (c)

Además de las fuentes de interferencia correspondientes a otros protocolos que usan la banda de frecuencia ISM como ya hemos mencionado, la mayor fuente de interferencia puede provenir de otros dispositivos Bluetooth. Aunque los dispositivos pertenecientes a una misma *piconet* se sincronizan para evitarse los unos a los otros, pueden existir otras *piconets* que colisionen por encontrarse a la misma frecuencia sin sincronizarse. Si existe una colisión de este tipo en un canal particular, los paquetes se perderán y tendrán que ser retransmitidos si son de datos, o ignorados si son de voz. Esto implica que a mayor número de *piconets* en un área, mayor será también el número de retransmisiones, con lo que disminuirá la tasa de transmisión. Este efecto tendrá lugar si hay muchas *piconets* independientemente, así como en el caso de las *scatternets*, puesto que las *piconets* que las forman no coordinan sus secuencias de salto de frecuencia.

2.5.5. Potencia

La especificación de Bluetooth permite tres tipos diferentes de potencia:

- Clase 1 = 100 mW (20 dBm)
- Clase 2 = 2,5 mW (4 dBm)
- Clase 3 = 1 mW (0 dBm)

Estas tres clases permiten a los dispositivos tener tres tipos de alcances diferentes. La Clase 3, que es la que más se suele emplear, es de unos 10 m, si bien este valor puede disminuir un poco, pues los objetos y cuerpos absorben las microondas, haciendo que la recepción en el límite de estos alcances no sea muy fiable. Por lo tanto, para una potencia de 1 mW, una figura bastante

más realista y fiable es usar distancias de hasta 5 m. Esto proporciona una solución de bajo coste, baja potencia con un alcance bastante amplio como tecnología de sustitución de cables.

Como es obvio, usando potencias mayores se consiguen mayores alcances. El máximo alcance para la Clase 1 es 100 m. También existe una distancia mínima para la conexión, pues si los dispositivos están excesivamente cercanos el uno del otro, el receptor satura. Este límite de distancia mínima ronda los 10 cm.

Un enlace de 100 m necesita dispositivos de alta potencia (Clase 1) en ambos extremos, pero también es posible crear *piconets* utilizando dispositivos tanto de baja como de alta potencia. Esto se muestra en la figura 2.6. En este caso, se ve como unas *piconets* solapan a otras, formando una *scatternet*. Esto es posible, porque cada maestro utiliza su propia secuencia de salto de frecuencia, por lo que dos *piconets* distintas no estarán utilizando la misma frecuencia al mismo tiempo. Si por casualidad coincidieran en la misma frecuencia, se perderían los datos transmitidos, pero lo que sí se puede asegurar es que tras el siguiente salto estarán en frecuencias diferentes, y los datos podrán ser reenviados sin problemas.

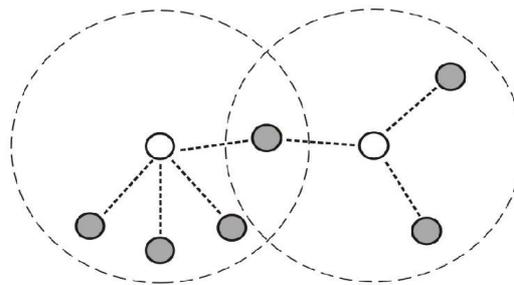


Figura 2.6 Potencia en scatternets

2.5.6. Enlaces SCO y ACL

Bluetooth permite tanto tráfico con requerimientos críticos de tiempo como ocurre en el caso de comunicaciones de voz o audio, como tráfico de paquetes de datos. Para cubrir ambos tipos de tráfico, existen dos tipos de enlaces diferentes que se pueden establecer entre dos dispositivos. Para la comunicación de voz se emplea el enlace síncrono orientado a conexión (SCO) y para el tráfico de paquetes de datos el asíncrono sin conexión (ACL).

Los paquetes ACL están contruidos con una cabecera que comienza con un código de acceso de 72 bits, que se deriva de la identidad maestra, seguido de un paquete de datos de cabecera de 54 bits, y un código de redundancia CRC de 16 bits. Finalmente, el paquete que contiene la información, es un paquete DH5 que ocupa hasta 5 *slots* y que puede contener hasta 2712 bits (339 bytes). Esto significa que para 2712 bits de información hay que transmitir 2858 bits.

Un paquete DH5 necesita hasta 5 *slots* de tiempo, y la respuesta requiere como mínimo uno. De esta manera la tasa binaria en banda base en una dirección sería de 723,2 Kbps. Pero en la otra dirección, en la que se transmite el paquete de 1 *slot*, se tiene una velocidad de 57,6 Kbps. Es decir, se tiene un enlace asimétrico, con más datos en una dirección que en otra. Si se transmiten paquetes de 5 *slots* en ambas direcciones, se obtiene una tasa de 433,9 Kbps, lo que implica una considerable reducción de la tasa de 1 Mbps en el aire.

Es necesario realizar todo este proceso de codificación y salto de frecuencia estableciendo así un enlace bastante robusto, ya que la banda ISM es un espectro compartido utilizado por una gran cantidad de dispositivos y estándares diferentes. Además para reducir todavía más el problema de las interferencias, existen regulaciones por las que se limita la emisión de potencia en la banda ISM por unidad de tiempo, con lo que se hace necesario el uso de un esquema de saltos de frecuencia para extender las transmisiones a lo largo del espectro y el tiempo.

Además las capas altas de la pila de protocolo utilizan también parte del ancho de banda en el nivel de aplicación, quedando la máxima tasa binaria alrededor de los 650 Kbps.

Los enlaces SCO funcionan con una tasa de 64 Kbps, y es posible utilizar hasta tres enlaces de voz full-duplex simultáneamente, o dos enlaces de voz y datos. Estos enlaces de voz ofrecen una calidad de la comunicación equivalente a la de un sistema de teléfono móvil, como puede ser GSM. Por esto, los canales SCO no están optimizados para el tráfico de audio de calidad como el requerido en la reproducción de música. No obstante también existen algunos perfiles para la transmisión de audio estéreo y video, como son A2DP y AVDTP, pero que hacen uso de enlaces ACL.

2.5.7. Perfiles

Además de los protocolos el SIG ha definido los perfiles. Éstos son maneras estándares de usar los protocolos y sus características habilitando un modelo particular de uso. En otras palabras, define como se deben usar las diferentes partes que marca la especificación en cada caso particular. Se definen las opciones de cada protocolo que son necesarias para cada perfil. Las dependencias de protocolos y características varían según los perfiles. Dos perfiles pueden usar un conjunto de protocolos y características diferentes aún encontrándose en la misma capa de la pila de protocolos.

Un dispositivo Bluetooth puede soportar uno o más perfiles. Hay cuatro perfiles básicos que son el perfil de acceso genérico (GAP), el perfil de puerto serie (SPP), el perfil de aplicación de descubrimiento de servicios (SDAP), y el perfil de intercambio de objetos genérico (GOEP).

- GAP es la base de todos los perfiles, ya que todos los demás se basan en él. GAP define el procedimiento general a llevar a cabo para establecer una conexión entre dos dispositivos,

incluyendo el descubrimiento de dispositivos, gestión y configuración del enlace, y procedimientos relacionados con el uso de los diferentes niveles de seguridad.

- SDAP describe las operaciones fundamentales necesarias para realizar un descubrimiento de servicios. Este perfil define los protocolos y procedimientos necesarios para llevar a cabo una búsqueda de servicios en otros dispositivos Bluetooth.
- SPP define los requisitos necesarios para un dispositivo que pretende establecer una conexión con otro dispositivo por emulación de cable serie usando RFCOMM. SPP lo que hace es mapear directamente la comunicación al protocolo RFCOMM permitiendo a las aplicaciones usar Bluetooth como un sustituto al cable.
- GOEP es un perfil abstracto sobre el que se pueden construir modelos de uso más concretos. Todos éstos modelos serán perfiles que usen el protocolo OBEX. El perfil GOEP define todos los elementos necesarios para el soporte de modelos de uso marcados por el OBEX, como pueden ser transferencia de archivos, sincronización u *object push*.

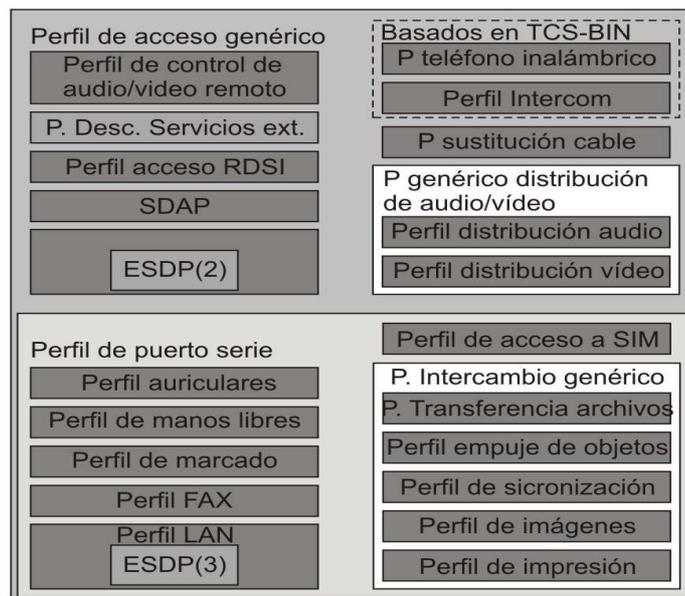


Figura 2.7 Jerarquía de perfiles Bluetooth

La figura 2.7 muestra las relaciones entre los diferentes perfiles de Bluetooth. Están organizados de forma jerárquica. Por ejemplo, FTP se encuentra en la parte más alta de GOEP, que depende a su vez de SPP, que está construido sobre GAP. Por lo tanto, los perfiles de Bluetooth pueden ser organizados desde el punto de vista funcional o de servicios, pero en cuanto a programación se refiere, la jerarquía de perfiles es lo que hay que aplicar. Los cuatro perfiles básicos -GAP, SDAP, SPP y GOEP- son conocidos como perfiles de transporte, y son sobre los que se construyen los demás perfiles conocidos como perfiles de aplicación.

2.5.8. Calificación

Es el proceso por el cual los equipos son testeados siguiendo las especificaciones oficiales. Este proceso es necesario para asegurar que ningún producto salga al mercado sin cumplir plenamente todas las características que aseguran la interoperabilidad. Solamente los productos calificados están autorizados a utilizar la banda libre de frecuencia asignada, la marca y el logotipo Bluetooth. Básicamente hay tres niveles de tests de calificación:

- Cumplimiento de la especificación del núcleo.
- Test de interoperabilidad para asegurar el funcionamiento con otro dispositivo al nivel del perfil.
- Cumplimiento de la marca Bluetooth.

2.6. Operaciones básicas

Bluetooth se diferencia principalmente del resto de las redes, en que no es necesaria la conexión física de un cable entre los dispositivos que se comunican. Además no hay por que conocer desde un principio los dispositivos con los que se va a conectar y los servicios que van a ser capaz de ofrecer cada uno. Lo que provee Bluetooth para hacer que todo esto no sea necesario son los mecanismos de *inquiry* y *paging*, y el protocolo de descubrimiento de servicios (SDP). Esta sección explica como se usan estos mecanismos para permitir a los dispositivos Bluetooth conectarse a otros y utilizar los servicios que éstos ofrecen.

2.6.1. Descubrimiento de dispositivos

Un dispositivo que ofrece un servicio determinado realiza periódicamente una exploración a ver si algún otro dispositivo quiere utilizarlo. Pongamos como ejemplo que un ordenador utiliza una aplicación que requiere de un modem de marcado o *Dial Up Modem Networking* (DUN), y que hay un teléfono móvil capaz de actuar como modem usando el perfil de modem de marcado.

Cuando un dispositivo necesita utilizar un servicio, en este caso el ordenador quiere usar el servicio DUN que el teléfono ofrece, lo primero que realiza es buscar los dispositivos con Bluetooth habilitado que hay en el entorno. Este procedimiento se denomina *inquiry*, que se comienza transmitiendo una serie de paquetes, llamados paquetes de *inquiry*, mediante los que se solicita información. Estos paquetes serán recibidos por el teléfono, que responderá finalmente con un paquete de sincronización de salto de frecuencia (FHS), como muestra la figura 2.8. El paquete FHS contiene toda la información que el ordenador necesita para establecer una conexión con el teléfono. Además contiene la clase de dispositivo del teléfono, que consta de una parte principal

(*major*) y una secundaria (*minor*). La parte principal le indica al ordenador que lo que ha encontrado es un teléfono, y la secundaria le detalla que es un teléfono móvil.

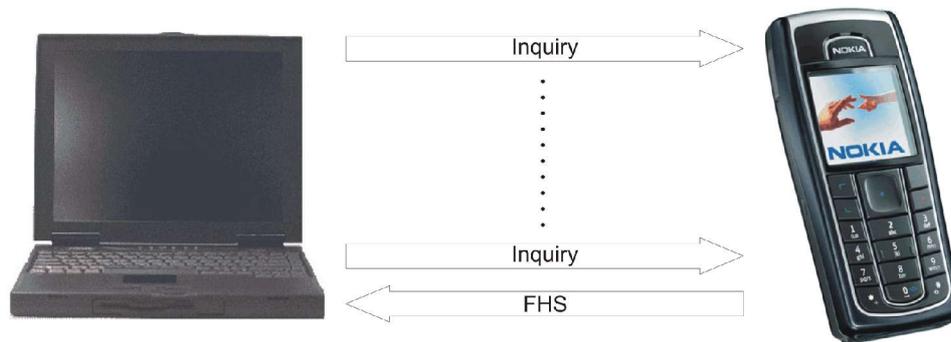


Figura 2.8 Descubrimiento de dispositivos

Del mismo modo todos los dispositivos además del teléfono que estén esperando por procesos de *inquiry* responderá con su paquete FHS, con lo que el ordenador obtendrá al final una lista de dispositivos. Lo que ocurre a continuación dependerá de cada implementación en particular. Por ejemplo, se puede mostrar al usuario una lista con los dispositivos encontrados dejando al usuario elegir que debe ser lo próximo a realizar. Pero de este modo sólo podría mostrar los tipos de dispositivos encontrados, sin conocer los servicios de cada uno. Así que otra alternativa sería la de seguir un poco más adelante, explorando cuales de los dispositivos ofrece el servicio deseado, para mostrar sólo éstos.

2.6.2. Base de Datos de Descubrimiento de Servicios

Para saber si un dispositivo soporta un servicio particular es necesario conectarse al dispositivo y usar el protocolo de descubrimiento de servicios (SDP). En la figura 2.9 se muestra como se realiza esto. Primeramente el ordenador llama (*page*) al teléfono, usando la información que obtuvo durante el proceso de *inquiry*. Si el teléfono está esperando, responderá y una conexión ACL podrá ser creada para transmitir datos entre sendos dispositivos.

Una vez que se ha establecido la conexión ACL, se podrá crear una conexión L2CAP sobre ésta. La conexión L2CAP se creará siempre que se vayan a transmitir datos entre los dos dispositivos. L2CAP permite a varios protocolos o servicios usar un enlace ACL añadiendo un multiplexor de protocolos y servicios (PSM) a cada paquete L2CAP. El PSM será diferente para cada protocolo o servicio que use el enlace. Debido a que esta conexión se va a utilizar para realizar un descubrimiento de servicios, el PSM adoptará el valor asignado a este protocolo (0x0001).

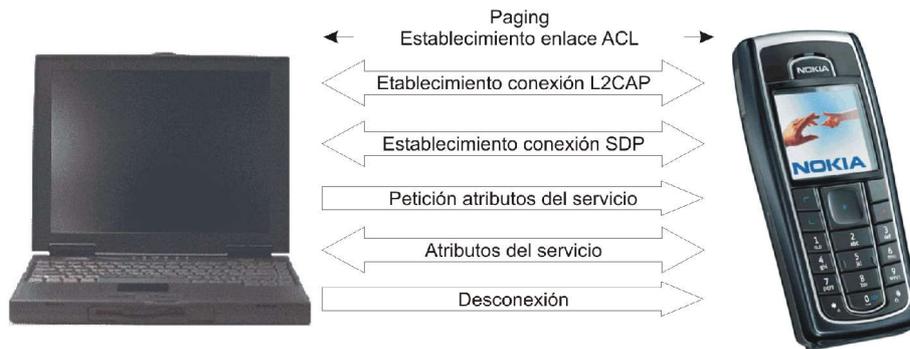


Figura 2.9 Obtención de información del servicio

El ordenador usa en nuestro caso el canal L2CAP para establecer una conexión con el servidor de descubrimiento de servicios del teléfono. El cliente de descubrimiento de servicios del ordenador podrá solicitar a partir de este momento al servidor del teléfono toda la información relacionada con el perfil DUN del teléfono. El servidor de descubrimiento de servicios consultará entonces su base de datos (SDDB) y devolverá los atributos correspondientes al perfil solicitado.

Una vez que ha sido obtenida la información correspondiente al servicio, puede que el ordenador decida acabar la conexión con el teléfono. Esto tendría sentido si el ordenador va a repetir la operación de descubrimiento de servicios con varios dispositivos del entorno, ya que el número de enlaces simultáneos está limitado, además de que mantener los enlaces consume batería innecesariamente.

Lo que ocurre después de que el ordenador haya recuperado la información correspondiente a los servicios de los dispositivos del entorno depende de la aplicación en particular. Puede mostrar todos los dispositivos que soportan el perfil requerido para que el usuario elija cuál desea usar, aunque podría ser la aplicación la que decida a que dispositivo conectarse sin tener en cuenta al usuario. En cualquier caso, la información de descubrimiento de servicios le indica al ordenador como conectarse al servicio DUN proporcionado por el teléfono.

2.6.3. Conexión a un servicio

La figura 2.10 muestra como se desarrolla realmente el proceso de conexión. El proceso de *paging* que realiza un enlace ACL es el mismo que se utilizó en la conexión para el descubrimiento de servicios. Pero esta vez el enlace se establece para un protocolo que puede tener unos requisitos de calidad de servicio particulares, pudiendo la aplicación del ordenador configurar el enlace para cumplir estos requisitos. Esto lo hace la aplicación enviando sus requisitos al módulo Bluetooth usando la interfaz HCI. A continuación, el gestor del enlace (LM) configurará el enlace utilizando el protocolo de gestión del enlace (LMP).

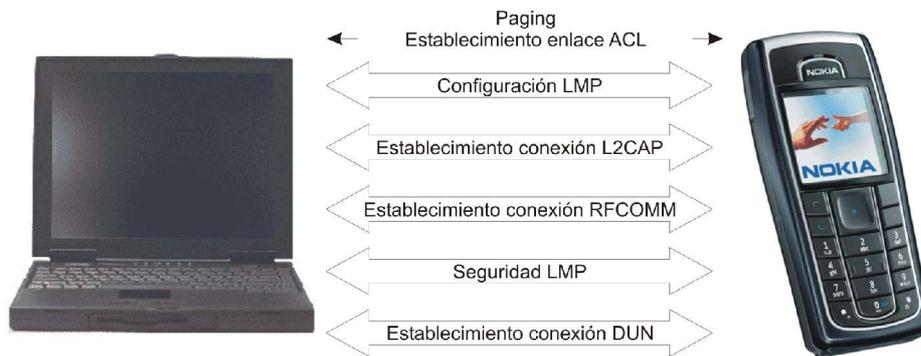


Figura 2.10 Conexión al servicio

Una vez que la conexión ACL ha sido establecida según los requerimientos del ordenador, se establece la conexión L2CAP. El perfil de modem de marcado utiliza el protocolo RFCOMM, por lo que la conexión L2CAP tendrá que usar el multiplexor de protocolos y servicios para RFCOMM (0x0003).

Una vez que existe el enlace L2CAP se podrá crear la conexión RFCOMM sobre ésta. Igual que L2CAP, RFCOMM puede multiplexar varios protocolos y servicios usando una sola conexión, dándole a cada protocolo o servicio su propio número de canal. El teléfono envió al ordenador su número de canal durante el proceso de descubrimiento de servicios, por lo que el ordenador sabrá ahora que número deberá utilizar ahora para la conexión RFCOMM.

Finalmente la conexión DUN puede ser creada usando el enlace RFCOMM, y el ordenador podrá empezar a utilizar los servicios DUN que ofrece el teléfono. Si el teléfono se saca del rango del ordenador, éste se verá obligado a conectarse a otro dispositivo que le ofrezca el servicio. Además durante la conexión, el teléfono seguirá esperando a ver si hay otros dispositivos que se quieran conectar a él.

2.6.4. Modos de visibilidad y conectabilidad

Hay que destacar que para que se pueda crear una conexión Bluetooth ambos dispositivos tienen que quererlo. Algunos dispositivos pueden estar en un estado en el que no exploren a ver si algún dispositivo quiere conectarse a ellos. En este caso, el resto de los dispositivos no podrán encontrarlo, y el dispositivo estará realmente invisible.

Además el dispositivo podrá estar o no conectable. En el modo no conectable el dispositivo estará visible, pero no escuchará intentos de iniciar una conexión (*pages*) de un dispositivo remoto.

Las aplicaciones elegirán el modo en el que se encuentra el dispositivo. Una conexión no puede ser forzada en un dispositivo que no esté en un modo apropiado para aceptarla.