

Capítulo 2.

Revisión del estado del arte

En este capítulo se pretende dar una visión general de las diferentes tecnologías usadas en redes inalámbricas de sensores, así como los diferentes algoritmos utilizados para la localización de un nodo en el interior de una red de sensores. Para ello, será necesario familiarizarse con el concepto de red inalámbrica de sensores (en inglés, Wireless Sensors Network, WSN). Este debe ser el punto de partida puesto que permitirá formar una idea de los requisitos necesarios para poder llevar a cabo la localización de un sujeto en el interior de edificios.

Por su parte, el desarrollo tecnológico asociado a las comunicaciones inalámbricas ha sido muy importante en los últimos años, existiendo multitud de protocolos que han sido adoptados como estándares internacionales por diversos organismos como el IEEE, ZigBee Alliance o Bluetooth. Esto hace necesario un estudio previo de cada una de las tecnologías para poder determinar las principales características de las mismas y determinar de esta manera cuál se adapta mejor a las necesidades establecidas.

Finalmente, la localización se corresponde con un tema ampliamente estudiado en la literatura científica y, en concreto, la determinación de la posición de un dispositivo en el interior de una red de sensores inalámbricos. Con esta finalidad, se encuentran diferentes algoritmos que hacen uso de propiedades tan diversas como la estimación de la distancia a un nodo baliza mediante la estimación del tiempo de propagación de un dato o del nivel de potencia recibida del terminal cuya posición queremos estimar.

2.1. WSN

Una red de sensores (en adelante WSN, Wireless Sensor Network) puede definirse como una red de dispositivos denominados nodos que pueden obtener una medida (nivel de CO₂ en el ambiente, la temperatura, la humedad o la potencia de señal recibida desde un dispositivo remoto) del entorno que los rodea y comunicar dicha información tomada *in situ* a un nodo remoto, cuyo nombre se denomina sumidero, a través de un enlace inalámbrico que puede usarla localmente o transmitirla a una estación de procesamiento ubicada en otra zona mediante el acceso a otras redes (Internet) a través de una pasarela. Es decir, una red de sensores inalámbricos, no es más que una red compuesta por una gran cantidad de equipos terminales que cooperan entre sí para medir y registrar algún parámetro del entorno que los rodea para transmitirlos de forma inalámbrica a un equipo que los procesará. Estos nodos pueden encontrarse en movimiento o estar fijados en un punto.

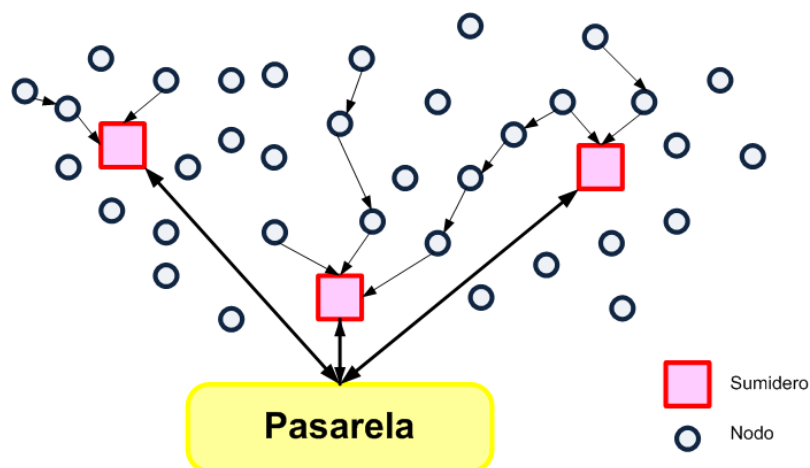


Figura 2.1.1. Representación de una red WSN multsalto típica.

2.1.1. Componentes

Los elementos básicos de las WSN son los nodos, los sumideros y las pasarelas, en orden creciente de complejidad y coste. La idea de realizar los nodos de la forma más sencilla posible radica en que el número de estos inmersos en la red de sensores puede ser muy elevado, mucho mayor que la cantidad de sumideros y pasarelas a utilizar. Por tanto, se hace necesario intentar contener el precio y tamaño de los nodos lo más bajo posible, reduciendo al mínimo su coste de producción y la circuitería necesaria en su fabricación.

En cuanto a la estructura de los nodos, estos están compuestos en la mayoría de las situaciones por un microcontrolador que se encarga de dotar de una cierta inteligencia al

dispositivo, un módulo de memoria donde almacenar los información registrada del entorno, el sensor con la electrónica necesaria para poder realizar el acondicionamiento de la señal obtenida y un transceptor de radiofrecuencia que dote de una interfaz inalámbrica que permita al nodo interactuar con su sumidero. Además de los componentes descritos, será necesaria una etapa de alimentación que suministre la energía necesaria para el correcto funcionamiento de los diferentes componentes.

2.1.2. Arquitectura de red

En cuanto a la topología de la red podemos distinguir tres casos:

- Redes en estrella
- Redes Mesh
- Redes híbridas

2.1.2.1. Redes en estrella

Las redes en estrella se corresponden con una topología de red compuesta por varios nodos y un único sumidero, también denominado estación base, cuya misión es recolectar la información procedente de los sensores. Los nodos remotos pueden solamente enviar o recibir información del nodo sumidero, prohibiendo el intercambio de mensajes entre los propios nodos. Por tanto, se corresponde con una red de un único salto, puesto que todos los nodos están comunicados directamente con la estación base.

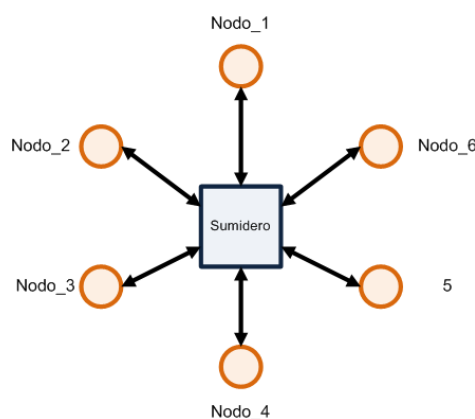


Figura 2.1.2. Representación de una topología en estrella en redes WSN.

En función de que la densidad de sensores sea elevada o no, la topología en estrella podrá ser sostenible o no. El número de nodos que pueda soportar la red se verá limitado por el ancho de banda del enlace físico disponible y el volumen de información a gestionar. Para

ello, basta realizar un pequeño cálculo que permita realizar una estimación del número de nodos que puede soportar cada red. Si se denota por N el número de nodos sensores de una red, R_b la tasa de transferencia soportada por el enlace inalámbrico establecido, T_r al tiempo que se tarda en obtener una medida del entorno y D al tamaño promedio en bytes de los paquetes generados por la capa de aplicación, se tiene que cumplir la siguiente relación para el caso de un solo salto

$$N \cdot 8D \cdot \frac{1}{T_r} \leq R_b \cdot \alpha_a \Rightarrow N \leq \frac{R_b \cdot \alpha_a \cdot T_r}{8D}$$

Ecuación 2.1.1. Número de nodos para una red de un solo salto y un sumidero.

En ella se pone de manifiesto que el volumen de datos que se genera en la red debe ser inferior a la capacidad neta del enlace, es decir, sin tener en cuenta las cabeceras añadidas por los diferentes protocolos existentes entre el nivel físico y la capa de aplicación.

Por su parte, la principal ventaja de este tipo de topologías es su simplicidad, puesto que los nodos remotos pueden ser muy simples así como el software de control y gestión de las comunicaciones. Además, otra de las ventajas que poseen estas redes son que al permitir únicamente las comunicaciones entre el nodo remoto y el sumidero, los sensores pueden encontrarse en un modo de bajo consumo hasta que sean reclamados por su estación base. Esto permite ahorrar en consumo, aspecto muy importante para las redes de sensores inalámbricas. Como desventajas cabe mencionar la difícil escalabilidad de la red debido al número limitado de nodos remotos que se pueden conectar al sumidero, así como el hecho de que todos ellos deban estar en el rango de cobertura de la estación base. Esto se debe al hecho de no permitirse la interacción entre los nodos remotos. La segunda gran desventaja que posee esta arquitectura es que no resultan tan robustas como otro tipo de redes debido a la dependencia existente del nodo sumidero. En el supuesto caso de que éste se cayese, la red no podría operar.

2.1.2.2. Redes Mesh

Una red Mesh consiste en una arquitectura de red en la que se permite que cualquier nodo que pertenezca a ésta pueda comunicarse con otro que esté a su alcance. Es decir, no existe ningún tipo de restricción en el establecimiento de las comunicaciones al igual que con el envío y recepción de información. Por tanto, en este tipo de topologías se permiten comunicaciones multisalto que permiten alcanzar el nodo sumidero aunque el nodo remoto

no se encuentre en su radio de cobertura. En esta situación, el nodo remoto debería utilizar el mínimo número posible de nodos intermedios hasta alcanzar un sumidero.

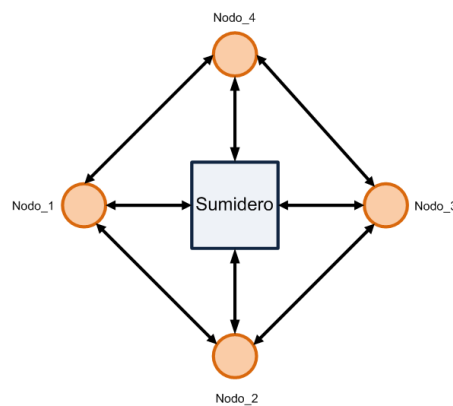


Figura 2.1.3. Representación de una topología Mesh en redes WSN

La gran ventaja de esta topología es la redundancia que se puede conseguir así como la escalabilidad de la arquitectura debido a que si un nodo intermedio falla, si el nodo remoto que desea enviar el mensaje dispone de otro nodo a su alcance podrá usar ese para enviar a un sumidero dicho mensaje. El único requisito que debe satisfacerse es que los nodos remotos tengan a su alcance a más nodos. Asimismo, el rango de la red se ve aumentado con creces como consecuencia de que ya no sólo se limita al rango alcanzable por dos nodos únicamente, sino que ahora se puede extender tanto como el administrador lo desee sin más que satisfacer el requisito anterior.

La desventaja de las redes Mesh radica en que el incremento del número de saltos provoca un aumento del tiempo de entrega del mensaje o la información a enviar, pudiéndose convertir en un problema si se deben cumplir restricciones temporales muy estrictas. En segundo lugar, se comprueba experimentalmente que el consumo de potencia de los nodos remotos aumenta en estas situaciones.

2.1.2.3. Redes Híbridas

Se corresponde con una arquitectura que mezcla las dos topologías revisadas en los epígrafes anteriores. En esta situación se disponen de varias estaciones bases o sumideros, que pueden comunicarse entre ellas, y, pendiendo de éstas con una configuración en estrella, varios nodos. En consecuencia, los nodos remotos sólo podrán interactuar con su sumidero enviándole o recibiendo información de éste. Mientras tanto, el nodo sumidero se encargará de controlar y gestionar la red para poder determinar aquellas estaciones bases que le pueden

permitir alcanzar un determinado destino, bien una pasarela que comunique la red de sensores con otra red como pueda ser Internet, por ejemplo.

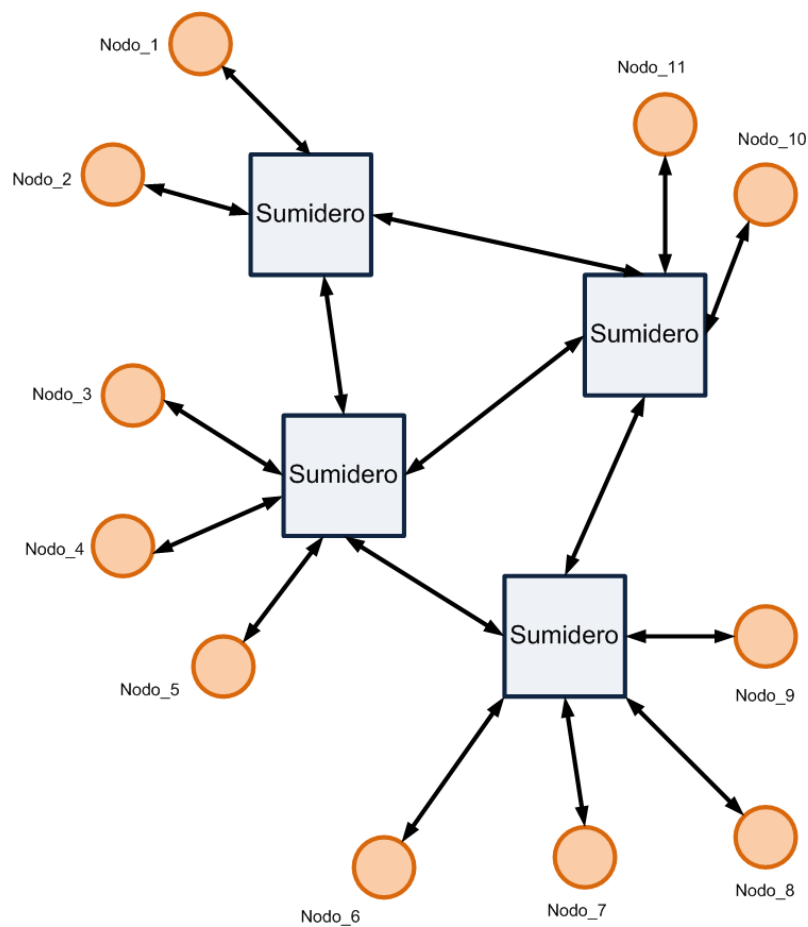


Figura 2.1.4. Representación de una topología híbrida en redes WSN

Se corresponde con un escenario más general, en el que al aumentar el número de sumideros las probabilidades de que un conjunto de nodos de la red se queden aislado del resto es más baja que en el caso anterior para una densidad de nodos dada. Esta extensión genérica presenta una gran escalabilidad puesto que la introducción de diversos sumideros permite dividir en sectores la red pudiendo dar servicio a muchos más nodos. Sin embargo, estas redes no son una extensión trivial puesto que la existencia de varios sumideros complica los protocolos utilizados para recolectar la información procedente de los nodos.

2.1.3. Área de aplicaciones

El área de aplicación de las redes WSN es muy extenso y puede ir desde aplicaciones industriales tales como dotar de inteligencia una fábrica que permita automatizar diversos procesos hasta el seguimiento de objetos en el interior de edificios o supervisión de pacientes

en sus domicilios. Por tanto, debido a la extensión de usos, se intentará agruparlos en dos grandes categorías: la detección de sucesos y en la estimación de procesos aleatorios temporales y espaciales.

Sin embargo, se hace necesario mencionar que las aplicaciones de seguimiento, bien de objetos o de personas o animales, se pueden considerar un caso especial. Dependiendo de cómo se diseñe la aplicación puede resultar un caso especial de detección de eventos o, por el contrario, de estimación de procesos aleatorios. Si se pretende monitorizar de forma periódica el entorno para localizar el objetivo y seguirlo, entonces se correspondería con una aplicación del segundo tipo, puesto que se necesita estimar la posición del objetivo en el espacio. En el supuesto caso de que el seguimiento se base únicamente en la detección del objetivo a su paso por determinados puntos específicos indicados en el sistema (una puerta, la entrada a un edificio o un determinado sector de una nave), entonces se correspondería con una aplicación de tipo detección de eventos.

2.1.3.1. Detección de eventos

En la detección de sucesos se engloban todos aquellos posibles usos que se basan en el uso de sensores para detectar un determinado suceso como puede ser un incendio, un terremoto o un escape de gas. En este caso, los nodos remotos deben estar supervisando el entorno hasta detectar un evento que puede ocurrir en cualquier instante de tiempo y en cualquier punto del espacio monitorizado por la red WSN. Esto provoca que la capacidad de computación de los nodos remotos no tenga que ser muy compleja. Su labor será comprobar los valores obtenidos por parte del sensor con los niveles de disparo, entiéndase aquellos valores definidos por el usuario como críticos, es decir, a partir de los cuales se consideraría que se ha producido el suceso, y enviarlos al sumidero correspondiente.

El diseño de la red debe garantizar que el suceso esperado podrá ser detectado con una probabilidad superior a una dada, por lo que el número de dispositivos deberá ser lo suficientemente elevado como para poder ofrecer una determinada cobertura, pudiendo variar en función del rango sensitivo de los nodos y del tipo de suceso. Además, se podrán usar algoritmos de localización distribuidas para poder determinar el punto exacto donde se ha producido el evento.

Otro asunto a tratar será la recepción de la información por parte del sumidero. En este aspecto, se deberá tener en cuenta la probabilidad de que la información reportada

llegue al destino. Se hace vital supervisar los asuntos de conectividad para mantenerlos bajo control, permitiendo a los protocolos de comunicaciones diseñados alcanzar los nodos sumideros en un tiempo especificado y con una alta probabilidad.

Por tanto, como se puede comprobar de lo descrito anteriormente, los aspectos que se deben controlar en este tipo de aplicaciones serán:

- Cobertura
- Localización distribuida
- Conectividad
- Protocolos de comunicación

En cuanto al diseño de una red WSN con el objetivo de detectar un suceso, se deberán especificar los siguientes requisitos como mínimo:

- Probabilidad de cobertura del suceso mínima
- Error de localización máximo
- Probabilidad de conectividad mínima
- Probabilidad de pérdidas de paquetes máxima
- Retraso máximo en la entrega de los paquetes

2.1.3.2. Estimación de procesos aleatorios temporales y espaciales

En este segundo caso, el objetivo consiste en estimar un fenómeno físico o cualquier otro proceso susceptible de ser modelado como un proceso aleatorio bidimensional, generalmente no estacionario. Si se considera una aplicación típica, esta estará compuesta por la recolección de datos de un determinado área de cobertura a través de los nodos remotos y su posterior envío al sumidero que será el encargado de recolectar toda la información recopilada por los nodos y estimar el proceso analizado.

A diferencia de la detección de eventos, el envío de la información se realiza de manera periódica siendo la frecuencia de muestreo establecida un parámetro crítico. Si se elige una frecuencia demasiado baja puede darse el caso de que no se pueda estimar al proceso aleatorio debido a que éste varía muy rápidamente. Por otro lado, si la frecuencia es demasiado alta, se estará sobrecargando la red WSN con un volumen de datos muy elevado.

Los parámetros que caracterizarán estas aplicaciones serán:

- Procesamiento de señal
- Conectividad
- Tiempo de sincronización
- Protocolos de comunicaciones que deben minimizar el error en la estimación del proceso aleatorio.

En consecuencia, algunos de los requisitos básicos de la estimación de procesos aleatorios serán:

- Error estimado máximo
- Error de localización máximo
- Probabilidad de conectividad
- Probabilidad de pérdidas de paquetes máxima

2.1.3.3. Ejemplos de usos

A continuación se presentarán algunas posibles aplicaciones de las redes WSN.

a) Detección de incendios en bosques

Se trataría de una aplicación de tipo detección de eventos. En este posible uso, el objetivo de la red sería detectar un incendio en una determinada área cubierta por los nodos y dar una alarma que permita actuar a los cuerpos de seguridad pertinentes antes de que el incendio sea incontrolable. La red WSN debe cubrir todas aquellas zonas susceptibles de poder sufrir un incendio: áreas de descansos o zonas de tránsito. Cuando se registre el disparo de una alarma en un sensor el centro de control debe ser alertado inmediatamente con los datos obtenidos del proceso de monitorización y de la zona aproximada donde se ha generado la alarma.

b) Monitorización de la integridad estructural

Se correspondería con un uso de tipo detección de eventos. El objetivo de la red es estimar el estado estructural de edificios, puentes o cualquier estructura. Una red de sensores podría detectar aquellos cambios en la estructura que puedan desencadenar una alteración de la estructura. Desde el punto de vista del usuario, el sistema podría valorar el intervalo de tiempo transcurrido y la gravedad de los cambios. El intervalo de tiempo daría una idea de

cómo de rápido suceden los cambios en la estructura y la gravedad, representaría cómo de severos resultan dichos cambios.

c) Salud

En esta situación se podrían tener aplicaciones como la monitorización de pacientes graves o el dotar de un sistema de cuidados continuos. En ambas situaciones se estaría en una aplicación de estimación de procesos aleatorios. La idea sería medir periódicamente las constantes vitales del paciente o algún parámetro de análisis como el azúcar y transmitirlos a una estación base para generar una acción en función de los resultados obtenidos tras el procesamiento de la información recibida.

2.2. Tecnología

En la actualidad, el número de tecnologías inalámbricas a utilizar en un sistema de localización en entornos interiores es muy elevado a diferencia de lo que sucede en la localización y el posicionamiento en exteriores. Para esta finalidad, el sistema de posicionamiento global, conocido por sus siglas en inglés GPS (Global Posicionament System), se ha establecido como el estándar de referencia debido a la precisión que es capaz de conseguir cuando el receptor tiene visión directa con varios satélites de forma simultánea.

No obstante, para localización y posicionamiento en interiores, la señal GPS carece de utilidad; puesto que el techo de los edificios así como las paredes consiguen apantallar la señal y, por tanto, el receptor no es capaz de sincronizarse con la red. Por esta razón es necesario recurrir a otras tecnologías inalámbricas como puede ser ZigBee, Bluetooth o Wifi. Cada una de ellas presenta una serie de ventajas e inconvenientes que las hacen tener mayor o menor validez. En consecuencia, la elección tecnológica deberá depender de los requisitos de la aplicación en concreto, es decir, del grado de precisión que se necesite conocer la situación de un determinado objetivo. En general, cuanto mayor sea el grado de precisión que se requiera, mayor deberá ser el gasto en infraestructura, puesto que se requerirá un mayor despliegue de sensores.

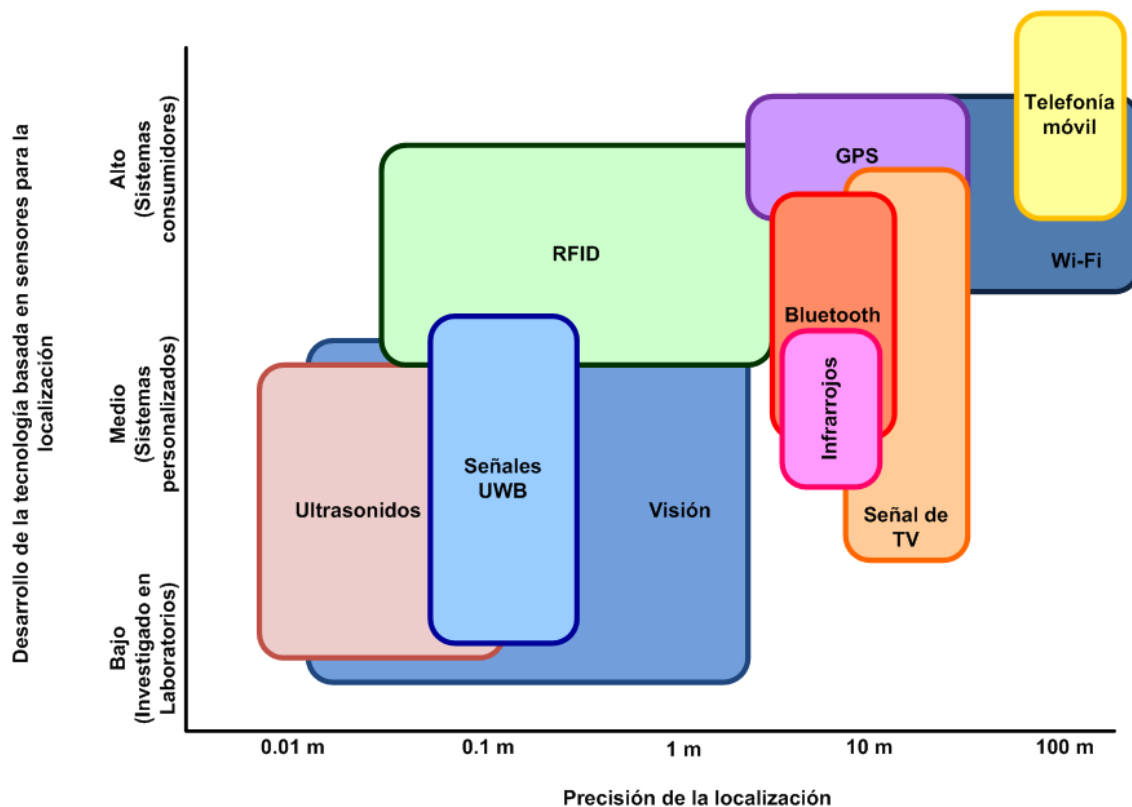


Figura 2.2.1. Representación de las diferentes tecnologías en cuanto a precisión y estado de desarrollo.

2.2.1. Bluetooth

Se corresponde con un estándar de comunicaciones inalámbricas basado en radiofrecuencia, de bajo coste y bajo consumo energético. Originariamente, en 1994, Ericsson lo desarrolló como un mecanismo alternativo que permitiese sustituir paulatinamente los enlaces cableados de diversos periféricos. No obstante, las características y versatilidad que presenta Bluetooth han hecho que se pueda utilizar en una gran cantidad de situaciones diferentes, como pueden ser el establecimiento de conexiones entre dos terminales móviles inteligentes como puedan ser una PDA o un teléfono móvil, conexionado de periféricos o dispositivos de audio.

Como se ha mencionado anteriormente, Bluetooth nace de la mano de Ericsson en 1994 junto con otras grandes compañías del sector tecnológico como son Intel, IBM, Nokia y Toshiba. Este conjunto de multinacionales constituyeron en 1998 el Bluetooth Special Interest Group, organismo que se encarga de gestionar y desarrollar las distintas versiones del núcleo de Bluetooth. Más tarde, en 1999, se unirían empresas de la talla de Microsoft, 3Com o Agilent. El trabajo conjunto de los diferentes miembros del Bluetooth SIG permitió una rápida aceptación por parte de los fabricantes; así como la compatibilidad entre dispositivos de los

diferentes fabricantes. Este hecho, provocó que las redes Wireless Personal Area Network (WPAN) basadas en Bluetooth estuviesen reguladas por el IEEE bajo la denominación 802.15.

Las principales características de esta forma de comunicación son:

- Opera en la banda libre de los 2,4 GHz por lo que no necesitamos adquirir ninguna licencia de emisión.
- Tiene una capacidad máxima de transmisión de hasta 3 Mbps.
- Implementa diversos mecanismos de ahorro energético de forma que el dispositivo no siempre va a consumir la misma potencia con el consiguiente ahorro energético en la batería del dispositivo.
- Posee un precio económico que permite implementarlo en casi cualquier dispositivo sin encarecerlo desmesuradamente. Un sistema Bluetooth empotrado tiene un precio cercano a 20€ la unidad.
- Alcance de hasta 100 metros en función de la potencia de emisión que posea el transmisor Bluetooth.
- No obstante, se corresponde con protocolo de comunicaciones cuyo uso queda restringido para enlaces punto a punto, puesto que el sistema de establecimiento de conexiones hace difícil poder realizar redes punto-multipunto. Esto se debe a que en un principio estaba destinado para sustituir a los enlaces establecidos mediante un cable físico.

2.2.2. ZigBee

ZigBee se corresponde con una especificación global creada por un consorcio de múltiples marcas destinadas a la venta de sistemas de control inalámbrico denominados ZigBee Alliance. Dicha especificación se basa en el estándar 802.15.4 definido por el IEEE donde se especifica la capa física y de enlace del protocolo. En cuanto a los niveles superiores, la ZigBee Alliance se encarga de establecer el conjunto de reglas que deben cumplir las capas de red, aplicación, el framework de aplicación, los perfiles y los mecanismos de seguridad.

La idea principal sobre la que se ha desarrollado ZigBee ha sido la facilidad a la hora de implementarlo en un sistema de control, o lo que es lo mismo, se busca que de una manera sencilla y rápida se pueda desarrollar un sistema robusto y duradero fácilmente integrable en una red inalámbrica destinada a la supervisión y el control. Por este motivo, ZigBee pretende cumplir los siguientes requisitos:

- Alta fiabilidad.
- Bajo coste.
- Muy bajo consumo.
- Altamente seguro.
- Estándar abierto.

En consecuencia, para poder satisfacer todos estos puntos, ZigBee se va a caracterizar por las siguientes características:

- Baja capacidad de transmisión, en torno a 250 Kbps, que nos permitirá desarrollar sistemas de muy bajo coste.
- Protocolo sencillo, pudiendo ser implementado sin ningún tipo de limitación en sistemas microcontroladores de 8 bits.
- Muy bajo consumo energético permitiendo que la fuente de alimentación del sistema pueda durar años.

Como gran desventaja, podemos mencionar la baja capacidad de transmisión adoptada lo que restringe el uso de esta especificación para usos muy concretos y actividades que requieran poco intercambio de datos, como accionar un interruptor de la luz o monitorizar un sensor de temperatura o luminosidad.

2.2.3. RFID

La tecnología RFID (RadioFrequency Identification) corresponde con un método de almacenamiento y recuperación remota de información, basado en el empleo de etiquetas (en adelante se referenciarán como tags o transpondedores) en las que se almacenan los datos. De forma que cuando dichos transpondedores entran en el área de cobertura de un lector RFID, éste envía una señal para que la etiqueta le transmita la información almacenada en su memoria. Por tanto, una de las principales características de esta tecnología es la posibilidad de recibir información de las etiquetas dispersas por el entorno a través de radiofrecuencia y sin necesidad de que exista contacto físico entre el dispositivo lector y el transpondedor. No obstante, la distancia no podrá superar un cierto valor máximo impuesto por la potencia de transmisión máxima y la potencia de recepción mínima detectable.

El rango típico de las señales de radiofrecuencia empleadas en RFID son típicamente 125 KHz., 13,56 MHz., 433-860-960 MHz. y 2,45 GHz.

Por su parte, los sistemas de identificación por radiofrecuencia están compuestos por cuatro elementos principalmente:

- **Una etiqueta RFID:** se denomina también tag (procede de la nomenclatura inglesa) o transpondedor, puesto que combina en un mismo dispositivo el transmisor y el receptor. La etiqueta se utilizaría para ser distribuida por el entorno donde el objetivo a localizar se vaya a desplazar. Se compone de tres elementos: chip, antena y sustrato. El chip y la antena están contenidos en el sustrato que puede ser un material rígido (por ejemplo el sustrato de fibra de vidrio FR4 de los circuitos impresos) o flexible (película de poliamida DuPont's Kapton). En cuanto a la realización de la antena, se realiza de un material metálico como el cobre; mientras que el integrado se realiza sobre silicio que se une eléctricamente a la antena. Se distinguen dos tipos de tags:
 - **Pasivos:** no poseen ninguna fuente de alimentación, ésta la reciben directamente del lector. Por este motivo, tan sólo podrán transmitir información cuando son activados por el lector.
 - **Activos:** contienen una fuente de alimentación que les suministra la energía necesaria como para poder transmitir la señal de información.
- **Un lector:** es el encargado de transmitir la energía suficiente a la etiqueta para que ésta le pueda enviar la información que contiene almacenada. Consta de un módulo de radiofrecuencia (transmisor y receptor), una unidad de control y una antena para interrogar los tags vía radiofrecuencia. Para el intercambio de información, los lectores suelen incorporar algún tipo de protocolo específico, como puede ser NFC, que permita enviar los datos recibidos de la etiqueta a un sistema de procesamiento de datos.
- **Un dispositivo controlador:** se corresponderá con un dispositivo móvil o un ordenador que ejecute la aplicación encargada de procesar los datos procedentes de uno o varios lectores RFID se las transmita al sistema de información. También puede ser capaz de transmitir órdenes al lector
- **Middleware:** se tratará del software desarrollado para poder recoger, filtrar y manejar la información procedente de los diferentes controladores.

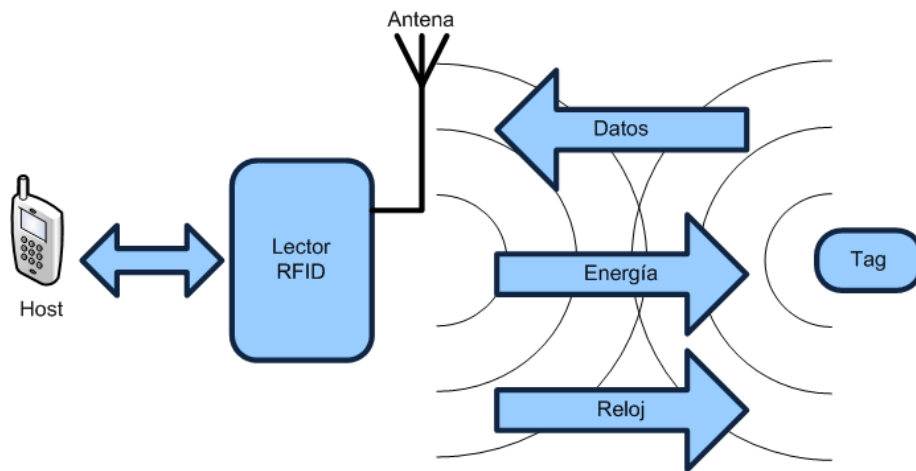


Figura 2.2.2. Funcionamiento de un sistema RFID con etiqueta pasiva.

2.2.4. Ultra Wide Band

Se corresponde con una tecnología de comunicación inalámbrica conocida hace más de 45 años en el mundo de la investigación y militar. La principal característica de las redes Ultra Wide Band (UWB) es que permite obtener enlaces con una gran capacidad de transmisión, consumiendo muy poca potencia. Esto se consigue transmitiendo señales en el dominio del tiempo de muy corta duración. El periodo de estas señales será del orden de unos pocos nanosegundos. Esto permite tener grandes anchos de bandas en las señales transmitidas lo que conlleva considerables beneficios en cuanto al consumo y a la capacidad de transmisión.

Por su parte, el despegue de esta tecnología se produjo en 2002 cuando el organismo estadounidense Federal Communications Commission (FCC) permitió el uso de la banda ubicada entre 3.6GHz y 10.1 GHz. Este acontecimiento provocó que numerosos centros de investigación, gobiernos, la industria de las telecomunicaciones,... investigasen posibles aplicaciones. Entre ellas, cabe citar:

- Acceso a Internet de banda ancha a muy alta velocidad.
- Localización con precisión de centímetros.
- Imágenes de radar de alta resolución.
- Obtención de imágenes a través de paredes.
- Navegación y seguimiento de objetos de forma precisa.

Finalmente, el principal inconveniente de esta tecnología es que sólo se puede utilizar en un corto rango de espacio, cercano a los 10 metros de cobertura. Esto está motivado por los niveles tan bajo de potencia que la FCC estableció para UWB. En concreto, la máxima potencia de salida de un transmisor UWB es de 0.0001 mW/MHz lo que supone que para un ancho de banda típico de 500 Mhz se tenga una potencia de salida de 0.05 mW, valor que se encuentra muy por debajo de la máxima potencia permitida, por ejemplo, en el estándar 802.11b que es 100 mW. Esto supone 2000 veces menos potencia.

2.2.5. Wi-fi

Se trata de un estándar internacional que implementa los niveles inferiores del modelo OSI, en concreto, el nivel físico y el de enlace, sobre un canal inalámbrico. En su concepción se pensó para sustituir a Ethernet (estándar 802.3) en aquellas zonas o puntos donde difícilmente podríamos llegar con un cable. De ahí que los métodos de acceso al medio físico sean similares a los usados en Ethernet. Por otro lado, se trata de un estándar que desde que apareciera en 1997 ha sufrido una constante evolución, encontrando varias versiones del mismo:

2.2.5.1. 802.11a

Esta versión del estándar se corresponde con la tercera generación de redes inalámbricas debido a que apareció en el mercado después de las redes 802.11 y 802.11b. Aunque en un principio, su desarrollo se había iniciado antes que el estándar 802.11b. A pesar de ello, se retrasó debido a los requisitos tecnológicos necesarios para poder llevarlo a cabo.

En concreto, las redes inalámbricas 802.11a se caracterizan por operar a una frecuencia de 5 Ghz. en los EEUU, en la banda de frecuencia conocida como UNII (Universal Networking Information Infraestructure). Sin embargo, esta forma de comunicación inalámbrica no está autorizada para su utilización en Europa porque la banda que usa para operar se encuentra ocupada por el estándar HyperLAN2.

Las principales características que aporta son:

- Una capacidad de enlace de 54 Mbps.
- Al trabajar en la banda UNII, posee mayor inmunidad frente a las interferencias por solapamiento puesto que dicha banda contempla el uso de 4 canales para este fin.
- Uso de un rango de frecuencias relativamente libre como son los 5 Ghz.

2.2.5.2. 802.11b

Este estándar apareció en 1999 con la idea de permitir a los usuarios comunicarse con sus dispositivos con redes Ethernet a través de transmisores/receptores de radiofrecuencia. Por este motivo, la institución IEEE se vio obligada a cambiar los mecanismos de acceso a las redes Ethernet para añadir el soporte de las nuevas capas físicas y de enlace introducidas por 802.11b. En concreto, se optó por usar CSMA/CA (Carrier-Sense Multiple Access with Collision Avoidance) en la capa de enlace y para la capa física se eligieron tres técnicas:

- DSSS (Direct-Sequence Spread Spectrum) usando la banda de los 2,4 GHz.
- FHSS (Frequency-Hopping Spread Spectrum) operando en el rango de los 2,4GHz.
- Infrarrojos.

La principal ventaja de este estándar es que ha sido ampliamente usado en todo el mundo para establecer redes inalámbricas por ser el primero que salió de forma comercial. No obstante, presenta una serie de inconvenientes que en revisiones posteriores se han intentado corregir. Entre estas se pueden citar:

- Problemas de interferencias debido a que el rango de frecuencias en el que opera se encuentra saturado al tratarse de una banda libre.
- Capacidad de transmisión reducida, admite hasta 11 Mbps.
- Requiere de modulaciones que contrarresten los efectos de multitrayectos.
- Sensible a la distancia de tal forma que a una distancia a más de 75 metros, la capacidad del enlace cae a 2 Mbps.

2.2.5.3. 802.11g

Este estándar surgió como una extensión del 802.11b con el que se pretendía mejorar la capacidad de transmisión del enlace usando el mismo rango de frecuencias, es decir, la banda de 2,4 Ghz. Para ello, lo que se hizo fue introducir un segundo modo de acceso basado en OFDM usado ya en las redes 802.11a que permitió aumentar la capacidad del enlace hasta los 54 Mbps. De esta forma, al disponer de las dos técnicas de modulación, las usadas en 802.11b y la usada en 802.11a, este estándar podía dar servicio a dispositivos que cumplieren la normativa 802.11b y a la vez a los nuevos dispositivos compatibles con el estándar 802.11g.

Por tanto, la principal ventaja de las redes 802.11g es el aumento considerable de la capacidad de transmisión, hasta 54 MBPS. No obstante, al compartir la misma banda que 802.11b presenta las mismas desventajas.

2.2.5.4. 802.11n

Se corresponde con una norma todavía en fase de propuesta, es decir, sigue siendo evaluado por los grupos de trabajo del IEEE. En Junio de 2.009 estaba prevista su publicación como estándar, pasando a constituir de esta forma la última revisión del estándar 802.11. Se caracteriza principalmente por conseguir un aumento de la capacidad de transmisión muy superior a la proporcionada por 802.11a/b/g. Se podrían alcanzar hasta 600 Mbps. Para poderlo conseguir ha sido necesario emplear dos conceptos claves en la definición de la capa física: el uso de sistemas MIMO (Multiple In Multiple Out) y un ancho de banda de 40 Mhz. para los diversos canales existentes. La unión de estas dos decisiones de diseño ha originado ese aumento de la capacidad de transmisión.

Por su parte, durante la formulación de este estándar se ha mantenido siempre el carácter compatible del mismo con las revisiones anteriores de 802.11 por lo que permite el uso de modulaciones OFDM para poder usar dispositivos compatibles con 802.11a/b y las técnicas de acceso vistas en 802.11b. De esta forma, pueden usarse los más de 250 millones de dispositivos existentes en el mercado actual de las comunicaciones inalámbricas en este tipo de redes. Esta característica supone una gran ventaja comercial puesto que el usar un nuevo estándar de comunicaciones inalámbricas no supone tener que cambiar los dispositivos que el usuario pueda ya haber adquirido.

En consecuencia, entre las principales ventajas de 802.11n podemos citar:

- Mayor capacidad de transmisión, hasta 600 Mbps.
- Retrocompatibilidad con los dispositivos 802.11a/b/g.
- Uso de modos para ahorrar consumo y mejorar la utilización de los canales.
- Aprovechamiento de los rayos multitrayectos para mejorar la capacidad de transmisión.

	802.11b	802.11g	802.11a	802.11n
Tasa máxima de datos (Mbps)	11	54	54	300
Tasa real de datos (Mbps)	5	20	22	146
Nº de canales disponibles	3	3	12	3 en 2,4 GHz. 12 en 5 GHz.
Probabilidad de interferencia	Alta	Alta	Baja	Baja
Comportamiento en entornos difíciles	Pobre	Medio	Bueno	Muy bueno
Compatibilidad	802.11b	802.11b/n	802.11a	802.11a/b/g/n
Frecuencias (GHz.)	2,4	2,4	5	2,4 y 5
Seguridad	WEP/WPA/WPA 2	WEP/WPA/WPA 2	WEP/WPA/WPA 2	WEP/WPA/WPA 2

Tabla 2.2.1. Comparativa entre las diferentes versiones de la especificación Wi-fi.

2.2.6. WiMAX

Se trata de una estándar de comunicaciones cuyo principal objetivo consiste en dar servicios de banda ancha de una forma inalámbrica a áreas metropolitanas, es decir, está pensado para ser usados en redes MAN. Por este motivo, se desarrolló para cubrir distancias de hasta 50 Kms. y permitir una capacidad de transmisión de hasta 100 Mbps. Con estas características, esta tecnología podría hacer frente a otras como DSL y las líneas T1 tendidas en el bucle de abonado.

WiMAX se corresponde con el nombre con el que se comercializa el estándar 802.16 del IEEE, organismo encargado del desarrollo y mantenimiento del mismo desde que fuese transferido por el NIST (National Institute of Standards and Technologies) en 1998 a este organismo.

La idea fundamental de WiMAX se centra en poder dar una gran variedad de servicios, motivado por el bajo coste de los enlaces, que pueden ir desde actuar como *backbone* para redes 802.11, dar servicios de conexión a dispositivos móviles sin hacer uso del estándar 802.11, como red de respaldo de las redes cableadas,...

- Entre las principales características de WiMAX, podemos mencionar:
- Dos rangos de frecuencias para operar:

- 10GHz-66GHz: se corresponde con la banda asignada en la primera versión del estándar. El principal problema de este rango es que requiere visión directa entre las distintas estaciones para poder llevar a cabo la comunicación, provocando el encarecimiento de la instalación al tener que aumentar el número de estaciones que coloquemos.
- 2GHz-11GHz: en esta banda se establecen dos rangos, uno en los 3,5 GHz que requiere de licencia para poder transmitir y otro en los 5,8 GHz que se halla en la banda libre y, por tanto, no necesitaríamos ningún tipo de licencia.
- Uso de selección dinámica de la frecuencia de utilización. Esta técnica permite seleccionar la frecuencia de transmisión en base a las interferencias generadas por otros sistemas en la banda usada y por la interferencia cocanal y ajustar la potencia de transmisión en base a estos parámetros. De esta forma, consigue mejorar el rendimiento de la comunicación.
- Útil en redes punto-multipunto.
- Asignación de una determinada calidad de servicio a cada conexión, lo que permite poder transportar sobre la capa de enlace de WiMAX protocolos como ATM, Ipv4, Ipv6, ...

Finalmente, cabe mencionar que en 2005, el IEEE aprobó el estándar 802.16e en el que se definen redes de banda ancha móviles usando WiMAX como capa física y de enlace. Se prevé que mediante estas redes se pueda dar servicio a vehículos que circulen hasta 120 km/h.

2.2.7. Comparativa

A modo de resumen, se presenta una breve comparativa entre las diversas tecnologías estudiadas previamente, destacando lo mejor de cada una de ellas a un nivel tecnológico y cualitativo.

	Bluetooth	ZigBee	RFID	UWB	802.11b	802.11a	802.11g	802.11n	WiMAX
Tasa de transferencia [Mbps]	1-3	0.25-0.02	0.2-10 ⁻³ -0.1	200	11	54	54	200	70
Alcance máximo [m]	22.86	10-100	0.1-200	9.144	60.96	45.72	60.96	45.72	50·10 ³
Potencia [mW]	100	30	500	400	750	1500	1000	2000	20000

Ancho de banda [MHz]	1	0.6	500	22	20	20	40	5-10	
Eficiencia espectral [b/Hz]	1	0.05	0.4	0.5	2.7	2.7	5	3.7	
Eficiencia en potencia [mW/Mbps]	100	1000	2	68	27	19	10	2000	
Precio [€]	2.20	1.47	0.25-25	5.14	3.67	8.82	6.61	14.70	40

Tabla 2.2.2. Tabla comparativa de las diferentes tecnologías inalámbricas.

A nivel cualitativo, cada una de las tecnologías propuestas aporta las siguientes características:

- Bluetooth
 - Está orientada a aplicaciones de voz y datos
 - Opera en el espectro de 2,4 GHz.
 - Puede operar a una distancia de entre 10 y 100 metros dependiendo de la clase del dispositivo.
 - La tasa máxima de transferencia es de 3 Mbps.
 - Puede penetrar objetos sólidos
 - Es omnidireccional y no requiere de visión directa para poder trabajar
 - Permite hasta tres modos de seguridad.
- ZigBee
 - Posee una capacidad de hasta 250 Kbps usando las frecuencias de 2,4 GHz., 40 Kbps en 915 MHz. y 20 Kbps en 868 MHz., variando su alcance de los 10 a los 100 metros.
 - Pretende ser un estándar en comunicaciones inalámbricas para las aplicaciones de control remoto en la industria.
 - Debido a su objetivo, se explica su bajo consumo, bajo coste, fácil uso y escasa capacidad de transmisión.
 - En la actualidad, existen tres niveles de seguridad aunque en la primera especificación liberada no se contemplaban mecanismos de seguridad.
- RFID

- Existen aproximadamente 140 estándares ISO para RFID que regulan un amplio rango de aplicaciones.
- En RFID, las etiquetas pasivas se deben poder alimentar a distancias por el lector. Por este motivo, el receptor debe encontrarse relativamente cerca, a pocos centímetros.
- Las etiquetas activas, por el contrario, se pueden leer a distancias de varios metros puesto que éstas se encuentran alimentadas y no requieren que el receptor les aporte energía para su funcionamiento.
- RFID puede operar a bajas frecuencias, por debajo de 100 MHz., y a altas frecuencias, banda UHF o en la banda libre de los 2,4 GHz. Y 5,8 GHz.
- UWB
 - Posee un bajo ratio de consumo ($\sim 1\text{mW/Mbps}$) unido a una gran capacidad de transferencia.
 - Idealmente, tendrá un bajo consumo de energía, bajos precios, alta capacidad de transferencia de datos, podrá atravesar los obstáculos y usará una amplia franja del espectro radioeléctrico.
 - Existen dos organismos de estandarización compitiendo por regular esta tecnología: UWB Forum, que apuestan por el uso de una interfaz radio basada en la secuencia directa (DS-UWB), y la WiMedia Alliance, que promueven un sistema basado en la modulación OFDM.
 - Para las redes WSN, el estándar ha propuesto que se use la recomendación IEEE 812.15.4^a basada en IR-UWB, es decir, hacer uso de la tecnología UWB en el espectro infrarrojo. Esta técnica permite alcanzar hasta 850 Kbps en un rango de 10 a 50 metros.
- Wi-Fi
 - Su coste y consumo de potencia son superiores al resto de las tecnologías inalámbricas presentadas a excepción de WiMAX.
 - Existen multitud de especificaciones que regulan los distintos aspectos de este estándar.
 - 802.11a: utiliza OFDM como modulación y opera en el rango de los 5 GHz. Posee una velocidad máxima de 54 Mbps.
 - 802.11b: funciona en el rango de los 2,4 GHz., tiene una tasa máxima de transferencia de 11 Mbps y usa DSSS. Se corresponde con la primera versión del estándar Wi-Fi.

- 802.11g: funciona en el rango de los 2,4 GHz., tiene una tasa máxima de transferencia de 54 Mbps y usa OFDM. Es compatible con la versión 802.11b.
- 802.11e: regula la calidad de servicio.
- 802.11h: se corresponde con un complemento de la norma 802.11a en Europa y proporciona el control de potencia y la gestión del espectro.
- 802.11i: Aumenta la seguridad incluyendo el estándar de cifrado avanzado (AES). Esta norma no es totalmente compatible con versiones anteriores.
- 802.11k: se encuentra en desarrollo y permitirá una mayor gestión de los recursos radios en redes 802.11x.
- 802.11n: Se espera que opere en el rango de los 5 GHz. Y ofrecerá una velocidad máxima de datos de más de 100 Mbps. Está orientada para aplicaciones multimedia.
- 802.11p: estándar desarrollado para el sector de la automoción. Será la base para las comunicaciones de corto alcance en EEUU.
- 802.11r: mejora la capacidad de los usuarios para moverse entre los puntos de acceso o estaciones base.
- 802.11s: se encuentra en desarrollo y se espera que permita la creación de redes 802.11x con una topología en forma de malla.
- **WiMAX**
 - Se trata de una red inalámbrica de área metropolitana.
 - Posee un alcance de 50 Km. con tasas de transferencias de hasta 70 Mbps.
 - La primera versión del estándar, 802.16, operaba en el rango de frecuencias que van desde los 10 GHz. Hasta los 66 GHz. Lo que implicaba que debía existir visión directa entre el transmisor y el receptor.
 - El último estándar, 802.16a, opera entre los 2 y 11 GHz. y no necesita línea de visión.
 - Contempla el uso de receptores en vehículos móviles siempre cuando no superen la velocidad de 100 Km/h.
 - Ha sido creado para competir con la tecnología xDSL y el acceso por módem de cable.

2.3. Estimación de la posición

La estimación de la posición a partir de una red de sensores inalámbricos es un área de conocimiento importante en la actualidad, se involucran diferentes áreas de estudio como el

procesamiento de señal, algoritmia o desarrollo de protocolos, y de gran atractivo investigador, debido al amplio desarrollo tecnológico existente que ha permitido acelerar el crecimiento de este tipo de redes rápidamente.

La capacidad de poder localizar un objetivo dentro de una red WSN es una característica altamente deseable puesto que en aquellos entornos susceptibles de ser monitorizados o vigilados, puede permitir generar una acción de control o una actuación con una mayor rapidez, precisión y eficacia ya que se pueden centrar todas estas medidas en un punto concreto y no en un área de terreno.

Por su parte, los algoritmos de localización en las redes de sensores, generalmente, infieren la posición del objetivo a partir del conocimiento de las posiciones absolutas de unos pocos nodos y de ciertas medidas tomadas entre dichos nodos. Algunas de estas medidas pueden ser la diferencia de tiempos existente entre que se envía un tren de pulsos al objetivo y éste lo devuelve, o el nivel de potencia de la señal recibida. En este punto, cabe mencionar que aquellos nodos cuya información de localización es conocida se denominan balizas, en la literatura inglesa se puede encontrar bajo el nombre de *anchors*, haciendo referencia a que se corresponden con nodos anclados en el sistema de referencia y cuya posición no varía. El mecanismo para determinar la información de localización puede ser tan variado como el uso de sistemas GPS, siempre y cuando la baliza se encuentre en un punto ubicado en el exterior, o mediante la instalación de las mismas en puntos ubicados en un sistema de coordenadas definido por el usuario.

2.3.1. Parámetros relacionados

La señal recibida presenta una serie de parámetros característicos que pueden ser susceptibles de utilizarse para extraer información sobre la localización del nodo cuya posición se desconoce. Estos parámetros están relacionados con la energía, el retardo o la dirección de la señal.

Se describirán los siguientes parámetros:

- Potencia de señal recibida
- Ángulo de llegada
- Tiempo de llegada
- Diferencia de tiempos de llegada

2.3.1.1. Potencia de señal recibida

La potencia de señal recibida o, por sus siglas inglesas, RSS (Received Signal Strength) se corresponde con una medida de la potencia de señal presente en el receptor tras la correspondiente emisión del transmisor. Por tanto, conocida la potencia de transmisión y la potencia de recepción se puede realizar una estimación de la distancia existente entre ambos a través del modelo de propagación. Éste modela las pérdidas sufridas por la señal al viajar por el medio.

En el espacio libre, el RSS varía con el inverso al cuadrado de la distancia que separa el transmisor del receptor. Si se denota por $P_r(d)$ a la potencia recibida, ésta se puede relacionar con la distancia d a través de la ecuación de Friis

$$P_r(d) = \frac{P_t G_t G_r \lambda^2}{(4\pi)^2 d^2}$$

Ecuación 2.3.1. Ecuación de Friis.

Donde P_t es la potencia transmitida, G_t es la ganancia de la antena de transmisión, G_r es la ganancia de la antena de recepción y λ es la longitud de onda de la señal transmitida en metros.

No obstante, este cálculo supone una idealización debido a que la señal transmitida se ve afectada por reflexiones, difracciones, desvanecimientos, multitrayectos, atenuaciones y dispersiones. Por tanto, el valor RSS de la señal se hace dependiente del entorno por donde se propaga. No obstante, en la comunidad científica está aceptado en base a evidencias empíricas que parece razonable modelar el RSS para cualquier valor de la distancia en una localización particular como una variable aleatoria distribuida logarítmico-normal con un valor medio dependiente de la distancia. En base a este modelo, la ecuación de propagación resultante quedaría como:

$$P_r(d)[dBm] = P_0(d_0)[dBm] - 10 \cdot n_p \log_{10} \left(\frac{d}{d_0} \right) + X_\sigma$$

Ecuación 2.3.2. Ecuación de propagación que contempla el canal de propagación

Donde $P_0(d_0)[dBm]$ es un valor de potencia de referencia conocida en dBm a una distancia d_0 desde el transmisor, n_p es el exponente de pérdidas en el trayecto que mide el ratio en el que el RSS disminuye con la distancia y su valor depende del entorno de

propagación específico, X_σ es una variable aleatoria gaussiana con media acero y desviación σ y registra el efecto aleatorio de las zonas sombreadas, es decir, de las zonas carentes de cobertura.

2.3.1.2. Ángulo de Llegada

Este parámetro expresa el ángulo con el que el nodo receptor recibe la señal procedente del emisor. Para poder utilizarlo con el fin de localizar algún objetivo, es necesario disponer de un array de antenas que permitan determinar los diferentes ángulos con los que la señal se recibe. Este hecho permitirá trazar las líneas rectas indicadoras de la dirección de procedencia de la señal. De tal forma que el punto de intersección de todas ellas darán el punto del nodo a localizar.

Para ello, es necesario realizar una observación de la diferencia en los tiempos de llegada en los diferentes elementos de la antena de geometría conocida para hallar el ángulo.

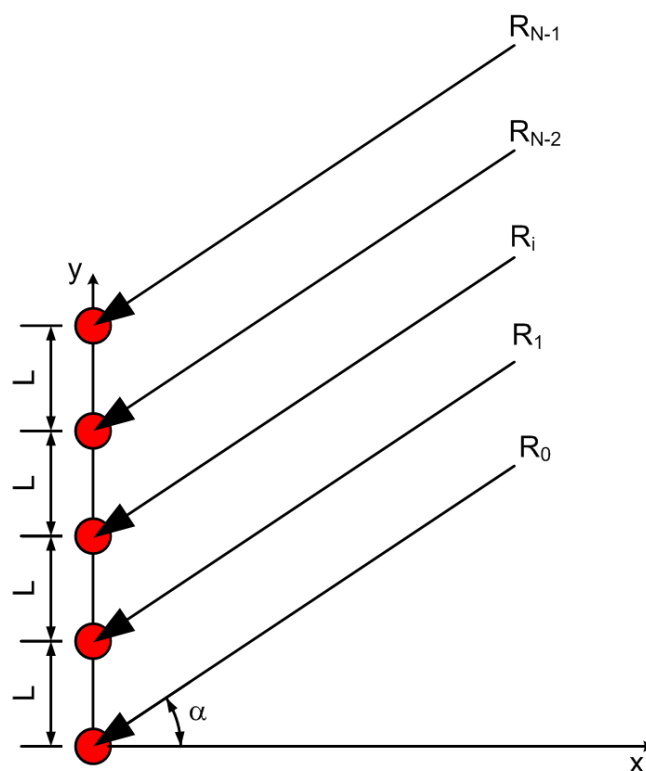


Figura 2.3.1. Representación de una array de antenas que determinan el ángulo de llegada.

La señal incidente en cada uno de los elementos del array de antenas recorre una distancia diferente y, por lo tanto, el tiempo de llegada será distinto permitiendo determinar el ángulo de llegada. Analíticamente supone aplicar una sencilla regla de trigonometría:

$$\cos\left(\frac{\pi}{2} - \alpha\right) = \frac{d}{L}$$

$$d = l \cdot \text{sen}(\alpha)$$

Ecuación 2.3.3. Expresiones para determinar la distancia en función del ángulo de llegada.

Donde d es la distancia adicional que recorre la señal al llegar a cada elemento del array. Puesto que la diferencia de tiempos existente entre una antena y su vecina se corresponde con $t = \frac{L \cdot \text{sen}(\alpha)}{c}$, siendo c la velocidad de la luz. Por tanto, el ángulo de llegada será $\alpha = \text{asen}\left(\frac{t \cdot c}{L}\right)$.

2.3.1.3. Tiempo de llegada

Se corresponde con el tiempo que tarda una señal, generada en el transmisor, en alcanzar el receptor y viceversa. Este tiempo se puede usar para realizar una estimación de la distancia existente entre ambos dispositivos.

Un factor importante a tener en cuenta en este tipo de parámetros, es la necesidad de mantener una base de tiempos común que permita conocer el instante en el que se inició la transmisión. Por este motivo, un requisito imprescindible es la sincronización de la red, de tal forma que todos los nodos estén perfectamente sincronizados con el nodo emisor, o bien, sean capaces de intercambiar la información de temporización pertinente mediante algún protocolo.

A la hora de implementar este tipo de técnicas se hace uso de correladores o filtros adaptativos. Si se considera una señal transmitida $s(t)$, la señal que llegará al receptor será:

$$r(t) = s(t - \tau) + n(t)$$

Ecuación 2.3.4. Expresión de la señal recibida.

Donde τ es el tiempo de llegada, es decir, el tiempo que ha tarda en propagarse la señal desde el transmisor hasta el receptor, y $n(t)$ es el ruido asociado al canal que puede modelarse como un ruido blanco y gaussiano. En el caso del correlador, el receptor hace la correlación de la señal $r(t)$ con una señal patrón local $s(t - \hat{\tau})$ para diversos retardos $\hat{\tau}$, seleccionando el que provoca el valor máximo de ésta.

Por su parte, hay que considerar que al tratar entornos reales existe el problema del multitrayecto y, por tanto, el patrón a usar debería considerar todos los caminos de señal incidentes en el receptor. Al no ser posible conocer a priori todos ellos, los resultados para determinados entornos pueden ser muy imprecisos. Para conseguir aumentar la precisión de este tipo de medidas, se usa lo que se denomina detección del primer camino, que consisten en usar la señal que antes llega al nodo destino, en vez de la que llega con mayor potencia.

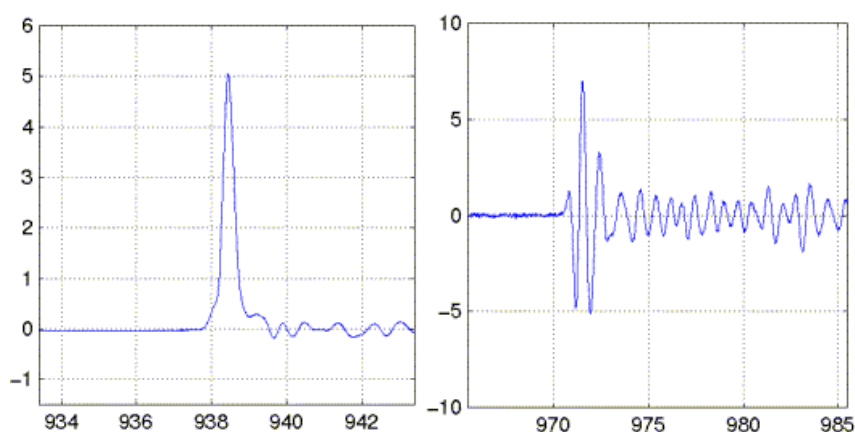


Figura 2.3.2. Efectos del multitrayecto sobre la transmisión de una señal

2.3.1.4. Diferencia de tiempos de llegada

Este parámetro se basa en la medida de la diferencia entre los tiempos de llegada de la señal procedente del objetivo a localizar las diferentes balizas estáticas que permiten calcular la posición (o el tiempo de llegada de la señal emitida por las estaciones fijas al dispositivo móvil, en el caso de que la localización esté asistida por terminal). Puesto que la curva cuyos puntos satisfacen la condición de que su distancia a dos referencias es una constante es una hipérbola, si se calcula esta correlación para varios pares de estaciones, la intersección de las hipérbolas resultantes muestra el punto donde se encuentra el terminal móvil.

Al igual que en el tiempo de llegada, la sincronización entre las balizas es muy importante puesto que una falta de sincronía puede traducirse en errores de precisión considerables. No obstante, la principal ventaja de usar este parámetro es que elimina la necesidad de sincronizar el objetivo con la red de balizas.

2.3.2. Técnicas para estimar la posición

La finalidad de los algoritmos de posicionamiento es, dado un conjunto de medidas como pueden ser distancias, ángulos de llegada o tiempos de llegada, localizar la posición de

los nodos cuya situación es desconocida. En consecuencia, el posicionamiento ocurre en dos etapas. En un primer momento se obtienen las medidas, en ese instante, éstas son combinadas usando técnicas de posicionamiento para deducir la posición de los nodos a localizar.

Las técnicas de localización se clasifican habitualmente en la literatura en cuatro grupos:

- **Basadas en balizas.** Algunos nodos conocen sus posiciones absolutas, de tal forma que la distancia estimada a las balizas puede obtenerse por interacción directa con éstas, un solo salto puesto que interviene una única baliza, o indirectamente, denominada multisalto debido a la colaboración de diversas balizas intermedias.
- **Balizas libres.** Ninguno de los nodos conoce su posición. Por este motivo, sólo se puede hablar de coordenadas relativas o virtuales, debido a que se desconoce las posiciones absolutas de las mismas.
- **Basadas en el rango.** Las medidas proporcionan una especie de información sobre la distancia o ángulo de los nodos.
- **Rango libre.** Sólo aportan información sobre la conectividad.

En este proyecto se analizarán únicamente las técnicas basadas en nodos de localización de un único salto.

2.3.2.1. Triangulación

La técnica de localización por triangulación se basa en las propiedades geométricas de los triángulos para calcular la posición de los objetos. Los diferentes algoritmos usados para efectuar la triangulación pueden ser divididos en tres categorías: lateración, uso de medidas de distancias, y angulación, utilización de la medida de los ángulos.

2.3.2.1.1. Lateración

Se define la lateración como el cálculo de la posición a partir de las medidas de distancias efectuadas. Es necesario tener en cuenta que para poder llevar a cabo la localización en una superficie de dos dimensiones, se necesitan al menos tres medidas de distancias no colineares. Para el caso de tres dimensiones, los requisitos se incrementan en una medida más, es decir, se requerirán, al menos, cuatro medidas no coplanares. No obstante, el

conocimiento del dominio específico donde se va a efectuar la localización puede reducir el número de medidas de distancias requeridas.

El dispositivo a localizar envía una señal a todos los nodos fijos a su alcance, comunicando estos, al sistema que se encarga de ejecutar el algoritmo, las medidas de la potencia de señal recibida o la diferencia de tiempos de llegada para poder trazar unas circunferencias con centra en cada uno de los nodos y así, mediante la intersección de dichas circunferencias, poder hallar la ubicación del objetivo.

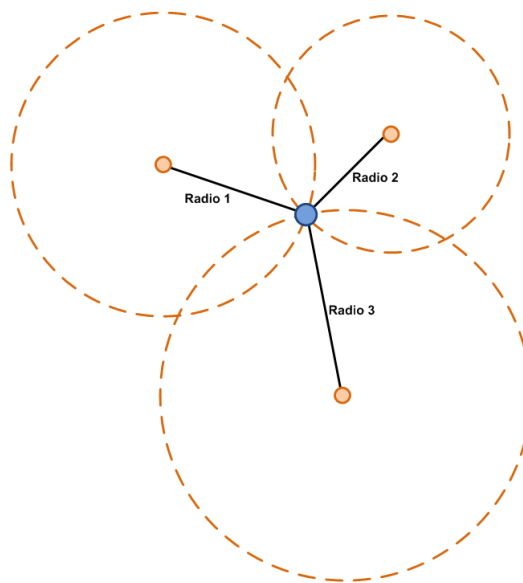


Figura 2.3.3. Ejemplo de triangulación por lateración en una superficie de 2D

Hay tres aproximaciones para medir la distancia requerida por la técnica de la lateración:

- **Directa.** En esta situación la medida de la distancia requiere de un movimiento o una acción física.
- **Tiempo de llegada.** La medición de la distancia de un objeto a un punto $P(x,y)$ donde se ubica una baliza se efectúa mediante el cálculo del tiempo que tarda en viajar la señal emitida, es decir, mediante el tiempo de llegada. Este método permite que el objeto a localizar se encuentre en movimiento o permanezca en una posición fija.
- **Atenuación.** La intensidad de una señal emitida decrece a medida que la distancia con respecto la fuente emisora se incrementa. Este decrecimiento con respecto a la intensidad original es lo que se denomina atenuación. En consecuencia, dada una función de correlación entre la atenuación y la distancia para un tipo de emisión y la potencia de transmisión, es posible estimar la distancia de un objeto a un punto $P(x,y)$

sin más que aplicar la ecuación propagación. En entornos con muchos obstáculos, como puede ser el interior de un edificio, las medidas de distancia utilizando atenuación son menos precisas que las obtenidas por tiempo de llegada. Esto se debe a que la señal emitida se ve afectada por fenómenos físicos como la reflexión o la refracción y por el multitrayecto.

2.3.2.1.2. Angulación

La angulación es un proceso similar al de la lateración salvo que en vez de usar distancias, se utilizan ángulos para determinar la posición de un objeto. En general, para poder localizar un objetivo en una superficie de dos dimensiones, la angulación requiere de dos medidas de ángulos y una medida de longitud, como puede ser la distancia entre los nodos de referencia. En tres dimensiones, se requiere una medida de longitud, una medida de azimuth y dos ángulos para especificar una posición. En determinadas ocasiones, se decide elegir un vector de referencia constante como el ángulo de cero grados.

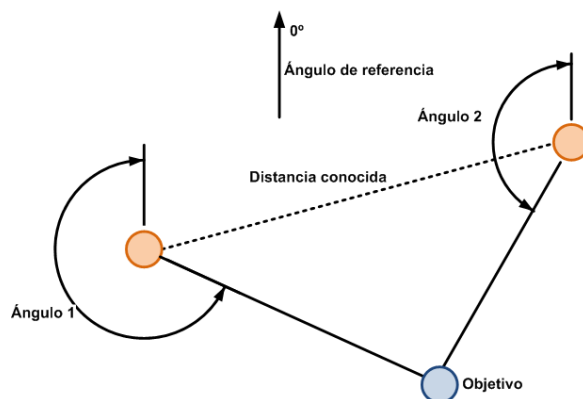


Figura 2.3.4. Ejemplo de triangulación por angulación en una superficie de 2D

Para esta técnica, los arrays de antenas sincronizadas son una excelente tecnología. Al disponer de múltiples antenas con una separación conocida, el tiempo de llegada puede ser calculado. Teniendo en cuenta las diferencias en el tiempo de llegada y la geometría del array receptor, es posible calcular el ángulo del segmento que une el receptor con la fuente de transmisión. Si hay suficientes elementos en el array y la separación entre ellos es lo suficientemente grande, los valores obtenidos por el mecanismo de angulación pueden ser muy precisos.

2.3.2.1.3. Proximidad

La técnica de localización basada en proximidad se caracteriza por determinar la posición del objetivo en base a la cercanía del mismo a la posición conocida de una baliza del sistema. La presencia del objeto se detecta por algún fenómeno físico con alcance limitado. Hay tres aproximaciones para determinar la proximidad del objetivo:

Detección por contacto físico directo. Se corresponde con el mecanismo más simple de todos, puesto que requiere una interacción física del objetivo con el sistema. La tecnología para detectar dicha interacción puede ser muy variada, utilizando desde sensores de presión hasta detectores de campos capacitivos.

Monitorización de un punto de acceso en redes inalámbricas organizadas en celdas. En esta técnica, se monitorizan cada una de las celdas correspondientes a un punto de acceso. De forma que cuando el objetivo penetre en una celda, se conocerá su posición por la cercanía a dicho punto de acceso.

Observación de sistemas de identificación automáticos. La tercera implementación usa sistemas de identificación automática como pueden ser tarjetas electrónicas con una etiqueta identificadora o registros de acceso en ordenadores. Por tanto, observando al sistema de identificación, se puede inferir la posición del objetivo sin más que asociar cada punto de control a una posición.

2.3.2.2. Análisis de escenas

La técnica de análisis de la escena utiliza las características de una escena observada desde un punto de vista en particular, para extraer conclusiones sobre la posición relativa de los objetos. Habitualmente las escenas observadas se simplifican para obtener características que son fáciles de representar y comparar. Cuando se produce una diferencia en la escena observada, podemos determinar el movimiento de un objeto.

Una escena podría ser una o imagen visual (obtenida con una cámara) o cualquier otro parámetro físico susceptible de ser medido, tal como las características electromagnéticas que existen cuando un objeto se encuentra en una posición y orientación determinadas.

2.4. Elección tecnológica

El análisis realizado en las subsecciones previas de las diferentes tecnologías inalámbricas utilizadas y de las diferentes técnicas de localización y de posicionamiento

permite al lector hacerse una idea de la gran variedad de elecciones que se pueden efectuar para tal objetivo. La elección de la tecnología inalámbrica se ha efectuado en base a dos criterios:

- Bajo consumo y gran capacidad de transmisión de datos.
- Amplia difusión del estándar.

El primer criterio de decisión viene impuesto por las características que se le presuponen a una red de sensores inalámbricos, puesto que los nodos que la componen deberán tener una gran autonomía debido a que en su mayoría son alimentados mediante baterías cuya capacidad es limitada. Por este motivo, la tecnología inalámbrica utilizada debe caracterizarse por su bajo consumo. No obstante, se deberá buscar un compromiso entre eficiencia energética y capacidad de transmisión, debido a que cuanto menor sea el consumo, menor será la tasa de transferencia.

Con respecto al segundo factor, se ha impuesto como un requisito fundamental el crear un sistema de localización que pueda ser utilizado por cualquier usuario sin necesidad de adquirir un terminal electrónico específico que interactúe con el sistema. Esto provoca que la elección tecnológica se centre en tecnologías inalámbricas ampliamente utilizadas y que se hayan establecido como un estándar en la industria.

Con el fin de satisfacer dichos criterios, se ha optado por elegir como soporte de la comunicación la especificación Bluetooth. Como se ha podido comprobar previamente, Bluetooth es un estándar ampliamente utilizado en la industria y en el sector multimedia. Cualquier dispositivo comercial moderno dispone de un transceptor Bluetooth, lo que permite al usuario poder utilizar dicho sistema de localización mediante el uso de una aplicación software. Por tanto, se evita al usuario el desembolso económico en un dispositivo específico, además del transporte y uso del mismo. Por otro lado, Bluetooth es un sistema de transmisión de datos con una gran capacidad y con un consumo muy reducido en comparación con tecnologías que ofrecen un rendimiento similar. Otra característica de Bluetooth, es que se corresponde con una especificación que posee un gran apoyo de la industria electrónica, está continuamente en desarrollo y los transceptores poseen un precio muy asequible, aproximadamente 10€.