

# SISTEMA DE LOCALIZACIÓN MEDIANTE TECNOLOGÍA ZIGBEE: APLICACIONES A DOMÓTICA

Ramón Lobillo, J. M. Maestre, E. F. Camacho  
[ramonlobillo@gmail.com](mailto:ramonlobillo@gmail.com), [pepemaestre@cartuja.us.es](mailto:pepemaestre@cartuja.us.es), [eduardo@cartuja.us.es](mailto:eduardo@cartuja.us.es)

Escuela superior de Ingenieros. Universidad de Sevilla.

## Resumen

*Este proyecto propone una solución de ahorro energético y de aumento de confortabilidad en el entorno del hogar. Se fundamenta en un sistema de localización basado en la tecnología ZigBee: el usuario interactúa con su hogar con su simple presencia. Un algoritmo estima la posición de la tarjeta coordinadora portada por el usuario respecto a unas balizas colocadas en posiciones conocidas. La interfaz UPnP configura la red domótica en función de las medidas que la aplicación proporciona: posición, temperatura, humedad y luminosidad. Es una solución domótica de fácil instalación y bajo coste.*

*This Project proposes a solution of energy saving and comfort increasing in the home environment. It is based on a location system with ZigBee technology: The user interacts with their home with their simply presence. An algorithm estimated the position of the coordinator device carried by the user in function of beacons placed in known positions. The UPnP interface configures the Smart-Home net with the measurements supplied by the application: position, temperature, humidity and light level. This is a Smart-Home solution with easy installation and low cost.*

**Palabras Clave:** ZigBee, Localización, Domótica.

## 1 INTRODUCCIÓN

A lo largo de este artículo se presentan los pasos seguidos para la creación del sistema de localización basado en ZigBee. La sección 2 presenta dicha tecnología y la tecnología UPnP para la integración de la aplicación. El apartado 3 comenta el proceso seguido para caracterizar la distancia en función de los parámetros que ZigBee proporciona. Por su parte, la sección 4 especifica el mecanismo con el que se estima la posición. El apartado número 5 explica cómo se integra la aplicación en una vivienda. Por último, la sección 6 menciona las ventajas e inconvenientes de esta aplicación.

## 2 TECNOLOGÍAS: ZIGBEE Y UPNP

**ZigBee** es un estándar basado en el estándar IEEE 802.15.4. Este importante estándar define el hardware y el software, el cual ha sido descrito en los términos de conexión de redes, como la capa física (PHY), y la capa de control de acceso al medio (MAC). La **alianza ZigBee**, conjunto de empresas promotoras del estándar, ha añadido las especificaciones de las capas red (NWK) y aplicación (APL) para completar lo que se llama la pila o stack ZigBee (imagen 1) [1][2].

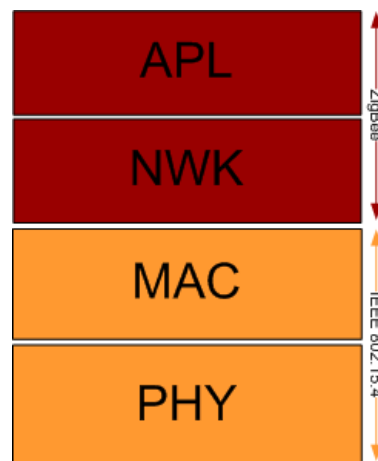


Figura 1: Torre de protocolos ZigBee.

ZigBee ha sido diseñado para soportar un diverso mercado de aplicaciones que requieren bajo coste y bajo consumo, con una conectividad más sofisticada que los anteriores sistemas inalámbricos. El estándar ZigBee enfoca a un segmento del mercado no atendido por los estándares existentes, con baja transmisión de datos, bajo ciclo de servicio de conectividad. La razón de promover un nuevo protocolo como un estándar es permitir la interoperabilidad entre dispositivos fabricados por compañías diferentes. Los mercados como la automatización de edificios y hogares, la atención sanitaria, control industrial, control de alumbrado y control comercial, son los principales campos de aplicación.

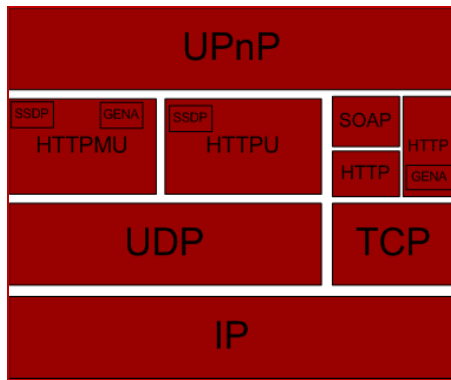


Figura 2: Torre de protocolos UPnP

**UPnP** (Universal Plug and Play) es una arquitectura propuesta por Microsoft principalmente para la interconexión de todo tipo de dispositivos electrónicos. Es una arquitectura abierta y distribuida basada en la pila de protocolos TCP/IP de Internet, que facilita el control y la transferencia de datos entre dispositivos conectados en la red del hogar. Esta arquitectura de red es promovida por el **UPnP Forum**, un grupo de compañías que tratan de tener un papel relevante en la definición y publicación de las especificaciones UPnP para dispositivos y servicios. Esta asociación se constituyó en junio de 1999 y cuenta en la actualidad con más de 720 miembros. [4]

La principal característica de la arquitectura UPnP es que soporta el trabajo de una red sin configurar, detectando automáticamente cualquier dispositivo que sea conectado, obteniendo su dirección IP, un nombre lógico e informando a los demás de su existencia y sus capacidades. UPnP se construye sobre protocolos y formatos existentes (imagen 2), utilizándose juntos para definir un marco que permita la definición, muestra en la red, y control de los dispositivos.

El sistema de localización funcionará sobre el estándar ZigBee. Gracias a UPnP, la aplicación informará al punto de control sobre la localización del usuario y actuará en consecuencia.

### 3 CARACTERIZACIÓN DE LA DISTANCIA

Para adquirir la distancia entre dos puntos se utiliza la medida de la fuerza de la señal recibida de una señal de radio entrante. Es decir, configurando el nivel de potencia de transmisión ( $P_{tx}$ ) en el dispositivo transmisor se obtiene el nivel de potencia recibido ( $P_{rx}$ ) en el nodo receptor. De acuerdo con la

ecuación de transmisión en espacio libre de Friis, la señal detectada decrece cuadráticamente con la distancia al emisor.[5][7]

$$P_{rx} = P_{tx} * G_{tx} = G_{rx} * \left(\frac{\lambda}{4\pi d}\right)^2 \quad (1)$$

La tendencia ideal que debería mostrar la potencia recibida en función de la distancia se caracteriza según la ecuación de Friis (ecuación 1) que caracteriza las pérdidas en espacio libre (imagen 3).

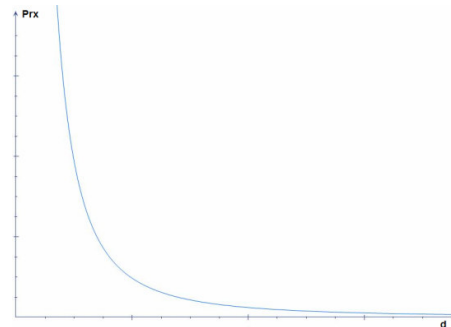


Figura 1: Relación  $P_{rx}$  y  $d$  ideal (Friis)

Sin embargo, en escenarios prácticos, la distribución ideal de  $P_{rx}$  no es aplicable, porque la propagación de la señal de radio interfiere con muchos elementos: Reflexiones en objetos metálicos, superposición de campos electromagnéticos, difracción en los bordes, refracción por media con diferentes velocidades de propagación, etc. Estos efectos degradan la calidad de la  $P_{rx}$  determinada de forma significativa. De este modo, la caracterización es experimental: Con una nube de puntos se obtiene una tendencia que será tomada como referencia.

Para manejar el concepto de  $P_{rx}$  se utiliza otro, el concepto de Calidad del enlace (**LQI**: Link Quality Indicator), que viene definido en la norma de la IEEE 802.15.4 del siguiente modo [1]:

*“la medida LQI es una caracterización de la fuerza y/o la calidad del paquete recibido. La medida puede ser implementada usando una estimación de la potencia recibida, la señal a ruido o una combinación de ambos métodos. El uso de los resultados de LQI no es especificado en el estándar.”*

En el proceso de experimentación, para caracterizar la distancia, se parte de un modelo en el cual figura un nodo transmisor y un nodo receptor. El dispositivo transmisor envía tramas continuamente al nodo receptor a la potencia de transmisión que el nodo

receptor le indica. El dispositivo receptor es el encargado de estimar la distancia entre ella y el transmisor en función de los datos que adquiere de las tramas enviadas por ésta. Para ello toma varios valores de LQI y promedia un valor medio que será el considerado (ecuación 2).

$$LQI(n+1) = 0.2 \cdot LQI(n) + 0.2 \cdot LQI(n-1) + 0.2 \cdot LQI(n-2) + 0.2 \cdot LQI(n-3) + 0.2 \cdot LQI(n-4) + 0.2 \cdot LQI(n-5) \quad (2)$$

Todo esto se programa en el kit de tarjetas, proporcionado por Jennic, JN5139-EK010. El lenguaje de programación utilizado es c: y mediante las APIs (*Application Programming Interface*) realizadas por esta empresa se permite interactuar con la torre de protocolos ZigBee. [3]

Para las distintas  $P_{tx}$  (potencia de transmisión), el nivel de LQI medido en función de la distancia descende conforme aumenta la distancia entre emisor y receptor (imagen 4).

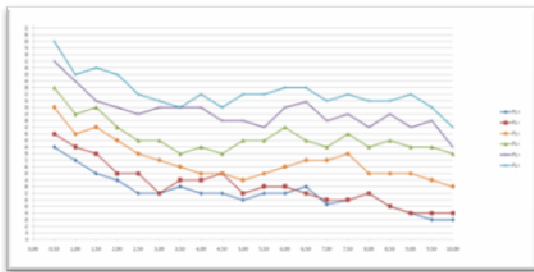


Figura 2: LQI frente a la distancia para 5 niveles de  $P_{tx}$  diferentes.

En la imagen se muestra la nube de puntos para cinco valores distintos de potencia de transmisión. Para los niveles altos los valores de LQI obtenidos son altos: la sensibilidad es menor pero el alcance es mayor. Para valores bajos ocurre lo contrario. Para cada valor de  $P_{tx}$  se estiman valores diferentes, luego para cada uno de ellos existe una tendencia que difiere de las otras en los parámetros (ecuación 3).

Al conjunto de puntos (asociados con cada nivel de  $P_{tx}$ ) se le calcula la tendencia logarítmica. Esa ecuación será la referencia a consultar por el nodo receptor (ante un valor de LQI y un valor de  $P_{tx}$  dados) para estimar la distancia. Por supuesto, el dispositivo receptor debe conocer y controlar el nivel de potencia de transmisión del otro dispositivo. Incluso ese valor se puede cambiar sobre la marcha a través de los botones que posee el nodo receptor.

$$LQI = -A \cdot \ln(d) + B \quad (3)$$

Los parámetros A y B son diferentes para cada nivel de  $P_{tx}$  y son obtenidos mediante el proceso de caracterización. Según el entorno que rodee a los dispositivos el error en la estimación varía. Cambiando la potencia de transmisión en función del entorno se puede disminuir dicho error.

### 3 ESTIMACIÓN DE LA POSICIÓN

Para estimar la posición de un nodo frente a otros existen numerosos algoritmos. Un buen algoritmo de localización debe calcular la posición tan rápido como sea posible y debe ser resistente a las influencias del entorno. El algoritmo que cumple estas condiciones es la localización del centroide ponderado (**WCL**, *Weighted Centroid Localization*) en combinación con ZigBee.[5][6][7]

Partimos de una red ZigBee de tipo estrella con un dispositivo coordinador y 'n' balizas. Las balizas están equipadas con un hardware más eficiente y un sistema de localización como puede ser GPS. De este modo, las balizas son capaces de determinar su propia posición. Además la posición se asume exacta. La tarjeta coordinadora consiste en un dispositivo con un hardware mínimo y desconoce su posición inicialmente.

De este modo, lo que antes era el nodo receptor ahora se convierte en la tarjeta coordinadora de posición desconocida y el nodo transmisor se convierte en las balizas de posición conocida. La aplicación desarrollada en c: forma la red ZigBee en estas condiciones. En la formación de la red, las balizas mandan un mensaje al coordinador informándoles de su posición. La tarjeta coordinadora distingue entre las balizas existentes mediante la dirección de red asociada a cada una de ellas.

Durante el despliegue sobre los ejes cartesianos las balizas están uniformemente distribuidas por el área de interés. La posición de cada baliza viene definido por  $B_j(x,y)$ . La posición del dispositivo coordinador es  $P(x,y)$  y según el algoritmo WCL viene dado por:

$$P(x,y) = \frac{\sum_{j=1}^n (w_j \cdot B_j(x,y))}{\sum_{j=1}^n w_j} \quad (4)$$

El peso  $w_j$  es una función que depende de la distancia a la baliza 'j' y de las características del receptor. Cada escenario de aplicación requiere un peso diferente debido a las cambiantes condiciones del entorno. En WCL, las distancias más cortas tienen más peso que las distancias más largas. Por tanto,  $w_j$  y  $d_j$  son inversamente proporcionales. Para dar menos

peso a las distancias más largas frente a las más bajas, la distancia es aumentada a una mayor potencia de  $g$ .

$$w_j = \frac{1}{(d_j)^g} \quad (5)$$

El grado  $g$  tiene que asegurar que las balizas remotas todavía tienen impacto en la determinación de la posición. De lo contrario en caso de una  $g$  muy alta, la posición aproximada se mueve a la posición de la baliza más cercana y el error de posicionamiento aumenta. De esta manera, el valor óptimo de ' $g$ ' existe pero depende de las condiciones del entorno. Por tanto es necesario un proceso de sintonización previo a la estimación del cálculo de la posición. Para ello, la tarjeta coordinadora puede cambiar el valor del grado sobre la marcha utilizando los botones incluidos en dicho dispositivo.

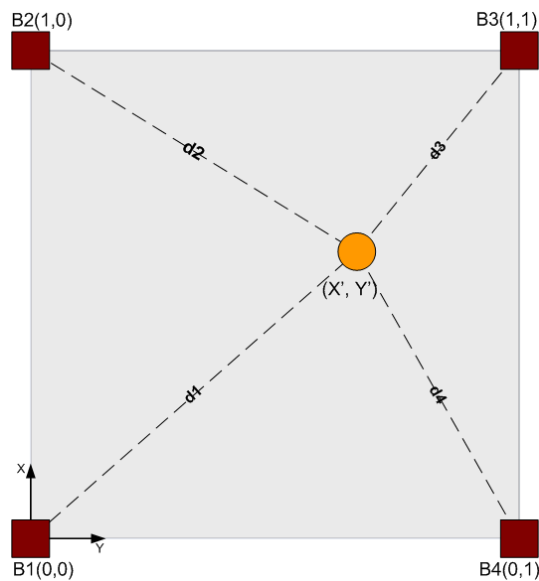


Figura 5: Experimento del cálculo de la posición.

En la imagen 5 se pueden observar las cuatro balizas denotadas por  $B_j$ , colocadas en un cuadrado de lado 1 metro. La tarjeta coordinadora se considera de posición desconocida. En una primera fase, las balizas informan de su posición a la tarjeta coordinadora. Ésta comienza a analizar las tramas recibidas desde cada baliza para estimar la distancia a cada una.

Cuando las cuatro distancias sean estimadas, gracias al algoritmo WCL, la tarjeta coordinadora calcula su propia posición  $(X', Y')$ . La tarjeta coordinadora maneja los dos parámetros sintonizables: la potencia de transmisión de las balizas (para estimar la distancia) y el grado ' $g$ ' (para ajustar el algoritmo WCL).

Aunque el cálculo de posición no proporciona resultados muy exactos, el algoritmo WCL en combinación con ZigBee ofrece muchas ventajas. La ventaja más importante es el simplificado proceso de implementación debido a la definición de funciones fundamentales dentro del protocolo ZigBee. La baja complejidad, el rápido cálculo, y los mínimos recursos requeridos recomiendan WCL como el algoritmo de localización para redes inalámbricas.

## 5 INTEGRACIÓN EN ENTORNO DOMÓTICO

Para integrar la aplicación desarrollada en un entorno domótico es necesario apoyarse en una arquitectura de red que permita controlar los distintos dispositivos domóticos de la vivienda. Para ello utilizaremos UPnP y conectaremos una de las balizas al punto de control de dicha red.

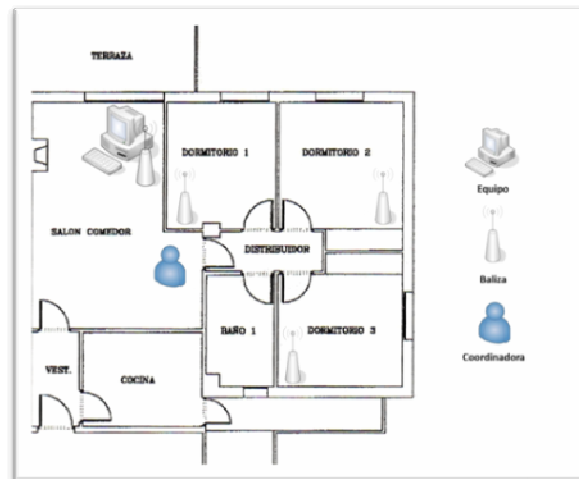


Figura 3: integración de la aplicación en una vivienda.

Cada baliza se sitúa en una habitación y tiene asociado unos parámetros que le identifican: un par  $(x,y)$ . Estos parámetros no tienen que coincidir con los valores reales de su posición: Serán parámetros que etiquetan a cada estancia. Se pueden utilizar más balizas a fin de tener controladas más habitaciones, sólo deben parametrizarse con pares  $(x,y)$  que equidisten de las demás.

Es una premisa utilizar un valor muy alto para la ' $g$ '. Con esto conseguimos que siempre prepondere la baliza que tiene menor distancia a la desconocida. Es decir, los valores de ' $x$ ' e ' $y$ ' que estime el algoritmo serán siempre los de la baliza más cercana a la tarjeta coordinadora de posición desconocida.

La aplicación ZigBee programada para integrar la aplicación es muy parecida a la utilizada en el capítulo anterior. La primera diferencia es que la

tarjeta coordinadora no solo estima su posición, sino que también toma los valores proporcionados por sus sensores para informar al punto de control. Los valores que proporcionan los sensores de la tarjeta coordinadora son la carga de la batería, la temperatura, la humedad y la luminosidad. La segunda diferencia es que la tarjeta coordinadora, una vez toma los valores de los sensores, manda junto a la posición estimada un mensaje a la baliza conectada al punto de control. Dicha baliza escribe por el puerto serie una trama que será la que lea el punto de control para actualizar sus variables UPnP. Dicha trama tiene el siguiente formato:

**XXX\_YYY\_BBBB\_TT\_HHH\_LLLL**

Figura 7: valor de x, valor de y, carga batería, temperatura, humedad y luminosidad.

Mediante una aplicación c# que se ejecuta ininterrumpidamente en el equipo, se leerá del puerto serie y se asociarán los valores leídos a un dispositivo virtual UPnP. El equipo, que es un punto de control UPnP, detecta un dispositivo virtual con variables que se actualizan periódicamente e informan de las condiciones del usuario a la red UPnP.

El conocimiento de la temperatura, la humedad y la luminosidad ambiental que el individuo que porta la tarjeta coordinadora se encuentra es muy interesante a la hora de interactuar con la casa, por ejemplo encendiendo el aparato de aire acondicionado, subiendo/bajando persianas o encendiendo/apagando luces en el lugar dónde se encuentre. Allá donde no sea necesario el consumo de recursos energéticos, se reducirá a mínimos.

## 6 CONCLUSIONES

Este proyecto se ha fundamentado en el manejo de la arquitectura ZigBee. Mediante una configuración estrella, el coordinador recibe tramas de sus esclavos incesantemente, evaluando la calidad de enlace recibida. Gracias a esta información, la tarjeta coordinadora estima la distancia a cada una de las balizas. La relación entre la calidad de enlace y la distancia se ha realizado de forma experimental, esto es, mediante mediciones en las mismas condiciones se estima una tendencia.

Que la tarjeta coordinadora sea capaz de estimar la distancia a cada una de las balizas es fundamental para poder aplicar el algoritmo de localización WCL. Además, suponiendo las posiciones de las balizas fijas y exactas, éstas informan a la coordinadora de su propia posición en el proceso de formación de la red. Así, la coordinadora es capaz de estimar su posición dentro de un área cerrada y sin obstáculos.

Todo el desarrollo comentado carece de aplicación práctica hasta ahora. Por eso, y con intención de darle

funcionalidad y practicidad a nuestro trabajo, se ha pretendido integrar la aplicación en un entorno domótico. Para ello nos hemos ayudado de una vivienda controlada por UPnP. Observando las características del algoritmo WCL, se puede observar que existe un parámetro que lo configura que consigue que los valores de posición estimados puedan asociarse a una habitación dentro de la vivienda. Además, las paredes que separan la habitación atenúan la señal recibida por la coordinadora, siendo la distancia estimada a las balizas de otra habitación desorbitadamente grande. De ese modo, se acentúa la identificación de la habitación donde se encuentra el usuario.

Como muestra de la funcionalidad real, se ha realizado una hipótesis simplificada del ahorro que se podría alcanzar. El resultado lanza un valor de disminución de consumo del orden del 30 % lo cual hace aconsejable el uso de la aplicación y satisface los propósitos de este proyecto.

Las medidas que se realizan son muy dependientes del entorno. Por tanto, es fundamental realizar un proceso de **sintonización** para que la aplicación funcione convenientemente: prueba y chequeo de las distintas configuraciones de la aplicación, es decir, variar la potencia de transmisión de las balizas y el grado del algoritmo WCL, hasta conseguir un rendimiento óptimo.

Aun así, las estimaciones no son muy exactas. Sin embargo, aprovechando las características del algoritmo se pueden conseguir funcionalidades prácticas: saber **en qué estancia se encuentra el usuario**.

La integración de la aplicación en el entorno de un hogar inteligente implica un ahorro energético. Se estima una **reducción** del consumo medio familiar alrededor **del 30%**, reduciendo el gasto en luminosidad y aumentando el rendimiento del sistema de climatización de la vivienda. Todo esto supone un ahorro económico y una mayor eficiencia energética.

Por otra parte, la aplicación aumenta la confortabilidad del usuario sobre todo para personas mayores y discapacitados. El comportamiento inteligente del hogar ante la mera presencia evita la necesidad de interactuar con ella a través de mandos de control o interruptores.

El sistema es fácilmente instalable, sólo requiere colocar en lugares estratégicos cada baliza y que el usuario porte la tarjeta, siempre que haya una red UPnP instalada en la vivienda. El sistema también tiene precios muy competitivos, de lo cual se encarga la alianza ZigBee.

El sistema es ampliable al control de tantas estancias como se quiera. Sólo se requiere una correcta configuración de las balizas. De este modo, se trata de una aplicación barata, simple, ampliable y práctica.

## Referencias

- [1] Especificación IEEE 802.15.4.
- [2] Especificación ZigBee  
(<http://www.zigbee.org>)
- [3] Documentación de soporte de Jennic, kit JN5139-EK010. ([www.jennic.com/support](http://www.jennic.com/support))
- [4] Foro UPnP ([www.upnp.org](http://www.upnp.org))
- [5] “Localization in Zigbee-based Sensor Networks” - Ralf Grossmann, Jan Blumenthal, Frank Golasowski, Dirk Timmermann.
- [6] “Weighted Centroid Localization in Zigbee-based Sensor Networks” - Jan Blumenthal, Ralf Grossmann, Frank Golasowski, Dirk Timmermann.
- [7] “ZigBee Based Location Estimation in Home Networking Environments” - Hyunggi CHO, Myungseok KANG, Jonghoon KIM, and Hagbae KIM.