

ZigBee

Priscilla Piedra y Martín Flores
Escuela de Ingeniería en Computación
Tecnológico de Costa Rica. Cartago, Costa Rica
{ppiedra90, mfloresg}@gmail.com

Resumen—ZigBee es un estándar basado en IEEE 802.15.4 para redes de área personal. Este estándar permite la creación de redes de bajo costo y consumo de energía. Estas redes son creadas a partir de sensores y dispositivos de batería limitada y pueden controlar inalámbricamente muchos productos eléctricos tales como controles remotos, sensores médicos, industriales y de seguridad. En este reporte se brinda una introducción al estándar y a sus conceptos principales.

1. INTRODUCCIÓN

LAS

2. ZIGBEE

PRISCILLA

ZigBee es un estándar desarrollado por la *ZigBee Alliance* para redes de área personal (PAN por sus siglas en inglés). Conformada por más de 270 compañías, la *ZigBee Alliance* es un consorcio que promueve el estándar ZigBee para sensores inalámbricos y dispositivos de red de baja potencia y velocidad. El protocolo ZigBee está construido por encima del protocolo IEEE 802.15.4 el cual define la dirección MAC y las capas físicas para redes de área personal inalámbricas de bajo consumo (LR-WPAN). El estándar ZigBee ofrece un conjunto de perfiles que definen las capas de red, seguridad y aplicación. Los desarrolladores son responsables de crear sus propios perfiles de aplicación o de la integración con los perfiles públicos que fueron desarrollados por la *ZigBee Alliance*. La especificación ZigBee es un estándar abierto que permite a los fabricantes desarrollar sus propias aplicaciones específicas que requieran de bajo costo y consumo de energía.

La especificación ZigBee ha sufrido varias modificaciones desde la publicación de la primera especificación en el 2004:

- En el 2004, la *ZigBee Alliance* publica la primera especificación, la cual daba soporte a un perfil de iluminación de control doméstico. Sin embargo, la *ZigBee Alliance* ya no da soporte a la especificación del 2004.
- En Febrero del 2006, la *ZigBee Alliance* publicó el *ZigBee Stack 2006*, el cual contenía modificaciones del ZigBee 2004.
- En Octubre del 2007, la *ZigBee Alliance* publica dos conjuntos de funcionalidades llamados ZigBee y ZigBee PRO. El conjunto de funcionalidad ZigBee es interoperable con ZigBee PRO. Si una red está basada en el ZigBee PRO, los dispositivos de ZigBee pueden unirse a la red como dispositivos finales (*end*

devices). De la misma forma si una red está basada en ZigBee, los dispositivos ZigBee PRO pueden unirse a la red como dispositivos finales.

2.1. Características

Confianza: A pesar de que las redes wireless son poco confiables donde factores como el ambiente, altura, ubicación representan problemas de comunicación a causa de una recepción pobre. ZigBee provee mediante protocolos (IEEE 802.15.4, CSMA-CA, etc) confianza en la red. Para aumentar la misma ZigBee implementa un CSMA-CA (*Carrier Sense Multiple Access Collision Avoidance*) que establece el proceso de comunicación: antes de transmitir ZigBee escucha el canal, cuando el canal está claro ZigBee comienza a transmitir.

3. RED ZIGBEE

3.1. Estándar 802.15.4

La IEEE 802.15.4 es una tecnología wireless estándar para redes de bajo alcance moderna y robusta creada por la IEEE que utiliza O-QPSK (Offset-Quadrature Phase-Shift Keying) y DSSS (Direct Sequence Spread Spectrum) las cuales son tecnologías que proveen un buen rendimiento en ambientes de baja señal. Propone ofrecer capas fundamentales de red wireless WPAN que se basa en el bajo costo, baja velocidad ubicada entre dispositivos. Se enfoca en el bajo costo de comunicación entre dispositivos cercanos permitiendo una cobertura de 10 metros de rango con un rango de transferencia de 250 kbits/s.

El estándar define dos tipos de nodos para las redes: FFD (full-function device) el cual puede servir como coordinador de una área de network personal, implementa un modelo general de comunicación que permite establecer una relación entre otros dispositivos y RFD (reduced-function devices) el cual se implementa en dispositivos simples con recursos y requerimientos de comunicación modestos, por esta razón no pueden tener el rol de coordinadores.

El estándar establece dos formas de diseñar redes: peer-to-peer y de estrella. Toda red ocupa por lo menos un coordinador FFD. Las redes peer-to-peer pueden formar patrones arbitrarios de conexiones y la extinción es solo limitada por

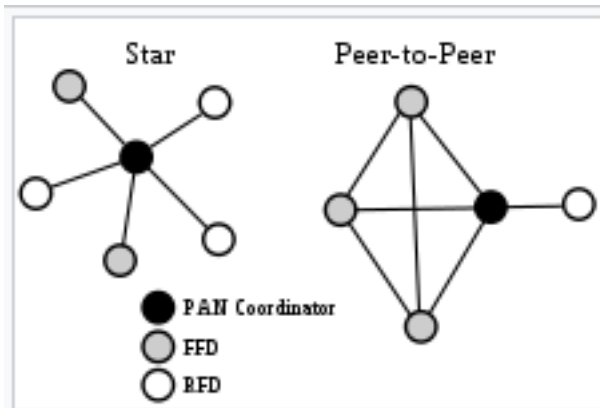


Figura 1. Diseño de redes. Fuente: Wikipedia

la distancia entre los pares de nodos. Por otro lado una red estrella es mas estructurada donde el coordinador de la red necesita ser el nodo central.

El atractivo de ZigBee es la confianza que brinda a pesar de que construye una red wireless y parte del porque es la implementación del estándar IEEE 802.15.4. Al ser un estándar hay certificaciones de dicho estándar y de ZigBee lo cual le brinda a la comunidad un ambiente robusto para el desarrollo de este tipo de redes.

También ZigBee implementa una solución de dos SAPs por capa una para la data y otra para la administración, esto según las especificaciones del protocolo 802.15.4, lo mismo ocurre en las capas inferiores MAC y PHY donde se define un radio de 2.4 GHz como base de las comunicaciones que permite, por ejemplo un nodo que controla o monitorea un grupo de interruptores solo va a necesitar un radio 802.15.4. (SAPs).

3.2. Tipos de Red

Priscilla lo hace

3.3. Tipos de dispositivos

Una red ZigBee consiste de nodos ZigBee (dispositivos). La arquitectura de un nodo se muestra en la figura 2. Un nodo consiste de un microcontrolador, un transceptor (*transceiver*) y una antena. Un nodo ZigBee usa conjuntos de perfiles los cuales son desarrollados en software. Un nodo puede ser usado para una amplia variedad de aplicaciones, por ejemplo, control de la iluminación, detectores de humo y monitoreo doméstico de seguridad. Por lo tanto, un nodo puede soportar múltiples subunidades y cada subunidad tiene un objeto de aplicación que describe la función de la subunidad. Un nodo puede operar ya sea como un *full-function device* (FFD) o como un *reduced-function device* (RFD). Un FFD puede realizar todas las tareas que están definidas por el estándar ZigBee y, opera en todo el conjunto de la capa MAC de IEEE 802.15.4. Un RFD realiza solo un número limitado de tareas.

- **Coordinador:** un coordinador es un FFD responsable de la gestión global de la red. Cada red tiene exactamente un coordinador. El coordinador realiza las siguientes funciones:

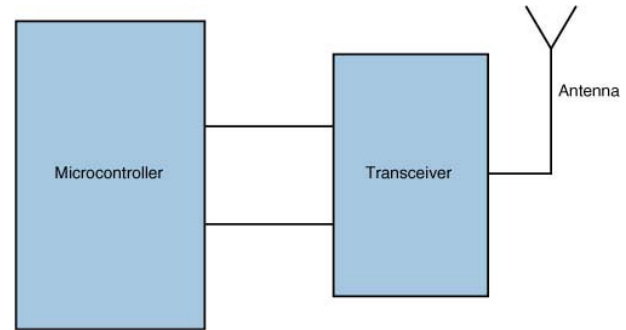


Figura 2. Arquitectura de un nodo ZigBee

- Selecciona el canal que va a ser usado por la red
 - Inicia la red
 - Asigna cómo las direcciones serán reservadas por nodos o *routers*
 - Permite a otros dispositivos unirse o dejar la red
 - Mantiene una lista de vecinos y *routers*
 - Transfiere paquetes de aplicación
- **Dispositivo final (*End device*):** un dispositivo final puede ser un RFD. Un RFD opera dentro de un conjunto limitado de la capa MAC de IEEE 802.15.4, permitiéndole consumir menor energía. El dispositivo final (*child*) se puede conectar a un *router* o a un coordinador (*parent*). También opera a una baja potencia de ciclo de trabajo, lo que significa que consume energía solo mientras transmite información. Por lo tanto, la arquitectura ZigBee está diseñada de tal forma que el tiempo de transmisión de dispositivo final sea corto. Un dispositivo final realiza las siguientes funciones:
 - Se une o deja una red
 - Transfiere paquetes de aplicación
 - **Router:** un *router* es un FFD. Un *router* es usado en un topologías de árbol y malla (*mesh*) para expandir la cobertura de la red. La función de un *router* es encontrar la mejor ruta al destino para transferir un mensaje. Un *router* realiza todas las funciones similares de un coordinador excepto el establecimiento de una red.
 - **ZigBee trust center (ZTC):** el ZTC es un dispositivo que provee gestión de seguridad, distribución segura de llaves y autenticación de dispositivos.
 - **ZigBee gateway:** El *ZigBee gateway* es usado para conectar la red ZigBee con otra red tal y como una LAN, por medio de la conversión de protocolos.

3.4. Topologías

ZigBee usa la especificación 802.15.4 para su capa física y capa MAC. IEEE 802.15.4 ofrece topologías de estrella, árbol, *cluster tree* y malla; sin embargo, ZigBee soporta solo topologías de estrella, árbol y malla.

Se utiliza una jerarquía de asociación; un dispositivo que se une a la red puede ser *router* o un dispositivo final, y los *routers* pueden aceptar más dispositivos.

- Topología de estrella:** La topología de estrella consiste de un coordinador y varios dispositivos (nodos), como se muestra en la figura 3. En esta topología, el dispositivo final se comunica solamente con el coordinador. Cualquier intercambio de paquetes entre dispositivos finales debe ir a través del coordinador. La desventaja de esta topología es que la operación de la red depende del coordinador de la red y, debido a que todos los paquetes entre los dispositivos deben de pasar a través del coordinador, el coordinador se convierte en un cuello de botella. También, no hay ruta alterna desde el origen hacia el destino. La ventaja de la topología de estrella es que es simple y que los paquetes viajan realizan a lo sumo dos saltos para llegar a su destino.

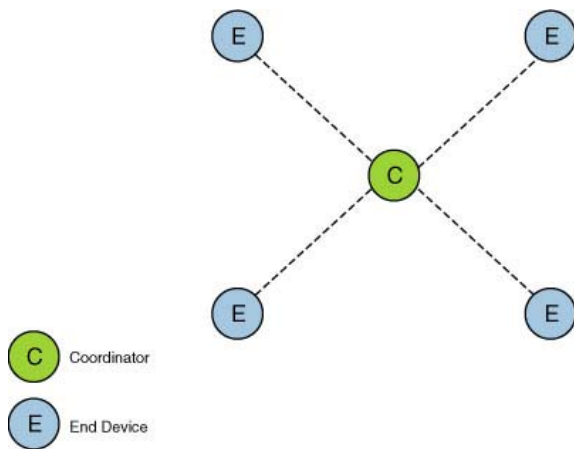


Figura 3. Topología de estrella

- Topología de árbol:** En esta topología, la red consiste de un nodo central (nodo raíz), el cual es un coordinador, varios routers y dispositivos finales tal y como se muestra en la figura 4. La función del router es la de extender la cobertura de la red. Los nodos finales que están conectados al coordinador o a los routers se les llama *children*. Solamente los routers y el coordinador pueden tener hijos *children*. Cada dispositivo final está solamente en la capacidad de comunicarse con su padre (router o coordinador). El coordinador y los routers pueden tener hijos y, por tanto, son los únicos dispositivos que pueden ser padres. Un dispositivo final no puede tener hijos y por lo tanto, no puede ser un padre. Un caso especial de topología de árbol es la llamada topología *cluster tree*. Las desventajas de una topología de árbol son:
 - Si uno de los padres está deshabilitado, los hijos del padre deshabilitado no van a poder comunicarse con otros dispositivos en la red.
 - Incluso si dos nodos están geográficamente cerca el uno del otro, estos no se van a poder comunicar directamente.
- Cluster tree topology:** Una topología *cluster tree* es un caso especial de la topología de árbol en donde a un padre con sus hijos se le llama un *cluster*, tal y como se muestra en la figura 5. Cada *cluster* se identifica

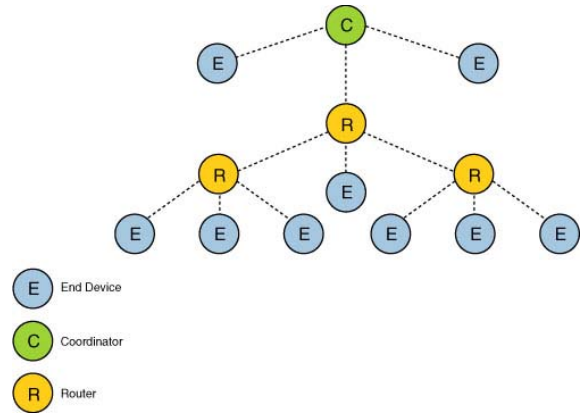
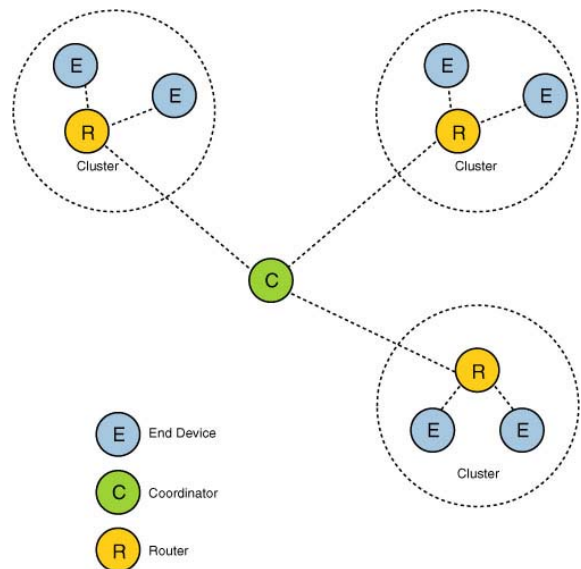


Figura 4. Topología de árbol

por un *cluster ID*. ZigBee no soporta la topología *cluster tree* pero IEEE 802.15.4 sí la soporta.

Figura 5. Topología *cluster tree*

- Topología de malla:** la topología de malla, también conocida como una red punto-a-punto, consiste de un coordinador, varios routers y dispositivos finales, como se muestra en la figura 6. Las siguientes son las características de una topología de malla:
 - Una topología de malla es una red multisalto (*multihop*), los paquetes pasan a través de varios saltos para alcanzar su destino.
 - El rango de una red puede ser incrementado al añadir más dispositivos a la red.
 - Se pueden eliminar las zonas muertas.
 - Una topología de malla previene errores, lo que significa que durante una transmisión si una ruta falla, el nodo encontrará una ruta alterna al destino.
 - Los dispositivos pueden estar cerca el uno del otro de esta forma usan menos energía.
 - Agregar o remover dispositivos es fácil.

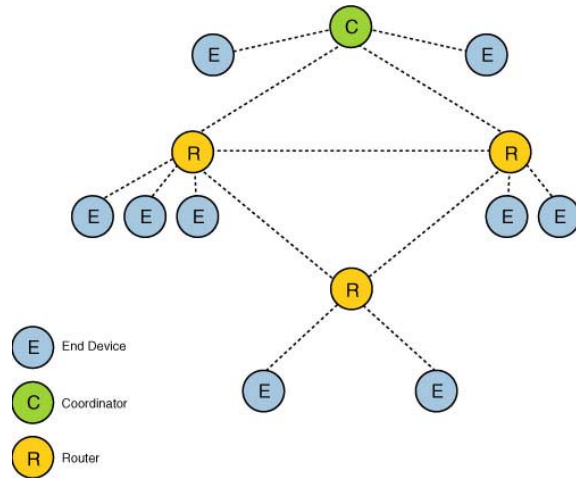


Figura 6. Topología de malla

- Un dispositivo se puede comunicar con cualquier otro en la red.
- Comparado con la topología de estrella, la topología de malla requiere mayor sobrecarga (*overhead*).
- El enrutamiento en malla usa un protocolo de enrutamiento más complejo que una topología de estrella.

3.5. Direccionamiento de dispositivos finales (nodos)

Cuando un dispositivo se une a una red ZigBee, el coordinador ZigBee o el *router* asigna una dirección lógica de 16 bits al dispositivo. También, cada dispositivo tiene una dirección IEEE de 64 bits y no hay dos dispositivos que tengan la misma dirección IEEE en el mundo entero. Las direcciones cortas (16 bits) pueden ser utilizadas por los dispositivos en la red. La ventaja de usar direcciones de 16 bits es la de extender la vida de la batería. Una dirección de 16 bits reduce el tamaño del marco (*frame*). Un tamaño de marco menor da como resultado un tiempo de transmisión más corto. Un tiempo de transmisión menor significa un mayor tiempo de batería. La desventaja de usar una dirección de 16 bits es que dos nodos en redes diferentes pueden tener la misma dirección.

3.6. Profundidad de una red, número de hijos y asignación de direcciones en la red

Profundidad de una red: La profundidad de una red está determinada por el número de *routers* (saltos – *hops*) desde el coordinador hacia el dispositivo más lejano, en donde la lejanía se define por el número de saltos. En una topología de estrella, la profundidad de la red es uno.

Número de hijos: El número de dispositivos finales (hijos) que están conectados al *router* o coordinador. El coordinador establece el número máximo de hijos conectados al *router*.

Asignación de direcciones: En una topología estrella, cada coordinador mantiene información acerca de la red, tal y como el número máximo de hijos, el número máximo de *routers* y usa esta información para asignar una dirección a cada *router*. Los *routers*, entonces, asignan las direcciones a

sus dispositivos respectivos. Sin embargo, en una topología de malla, cada *router* asigna una dirección aleatoria a sus respectivos dispositivos finales.

3.7. Arquitectura del protocolo ZigBee

La figura 7 muestra la arquitectura del protocolo ZigBee. La *ZigBee Alliance* desarrolló el *ZigBee device object* (ZDO), la subcapa de soporte de aplicación (APS por sus siglas en inglés), la capa de red y la gestión de la seguridad. IEEE 802.15.4 es utilizada para la capa MAC y la capa física.

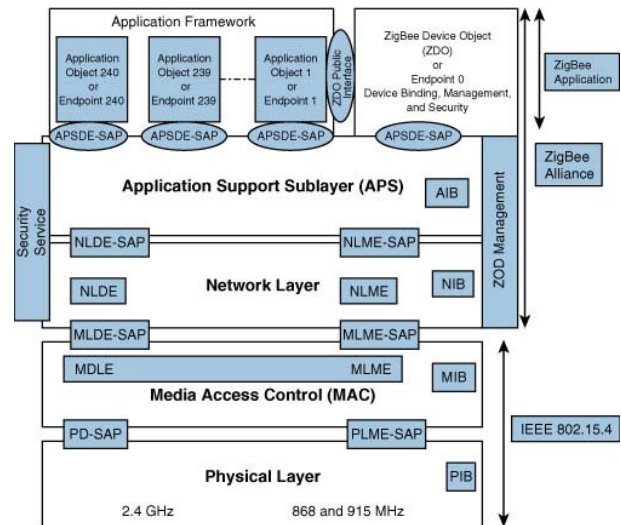


Figura 7. Arquitectura del protocolo ZigBee

La arquitectura del protocolo ZigBee está dividida en tres secciones:

1. IEEE 802.15.4, que consiste de las capas MAC y física.
2. Capas ZigBee, que consiste de la capa de red, el ZDO, la subcapa de aplicación y la gestión de la seguridad.
3. Aplicación del fabricante: fabricantes de dispositivos ZigBee pueden usar el perfil de aplicación ZigBee o desarrollar su propio perfil de aplicación.

3.7.1. La capa física

La capa física realiza modulación de las señales salientes y desmodulación de las señales entrantes. Transmite y recibe información desde una fuente. La tabla 1 muestra la banda de frecuencia de la capa física, tasa de banda (*band rate*) y el número de canal.

Banda frecuencia	País	Tasa de banda	Números de canal
868.3 MHz	Países europeos	20Kbps	0
902-928 MHz	USA	40 Kbps	1 - 10
2.405 MHz	Global	250 Kbps	11 - 26

Cuadro 1
Banda de frecuencia de la capa física

3.7.2. Capa Media Access Control (MAC)

Las funciones de la capa MAC son acceder a la red usando *carrier-sense multiple access with collision avoidance* (CSMA/CA), para transmisión de marcos *beacon* (*beacon frames*) para sincronización, y proveer una transmisión confiable.

3.7.3. Capa de red

La capa de red está localizada entre la capa MAC y la subcapa de soporte de aplicación. Provee las siguientes funciones:

- Iniciar una red
- Gestión de los dispositivos finales que se unen o dejan la red
- Descubrimiento de rutas
- Descubrimiento de vecinos

3.7.4. Subcapa de soporte de aplicación (APS)

La subcapa de soporte de aplicación (APS) proporciona los servicios necesarios para los objetos de aplicación (*end-points*) y el *ZigBee device object* (ZDO) para interactuar con la capa de red para datos y gestión de servicios. Algunos de los servicios proporcionados por la APS a los objetos de aplicación para transferencia de datos son *request*, *confirm* y *response*. Además, la APS provee comunicación para las aplicaciones al definir una estructura de comunicación unificada (por ejemplo, un perfil, *cluster*, o *endpoint*).

3.7.5. Objeto de aplicación (endpoint)

Un objeto de aplicación define la entrada y salida del APS. Por ejemplo, un *switch* que controla una luz es la entrada para el objeto de aplicación, y la salida es la condición de la bombilla. Cada nodo puede tener 240 objetos de aplicación separados. Un objeto de aplicación también puede ser conocido también como un *endpoint* (EP). La figura ?? muestra un ejemplo de control de iluminación doméstico.

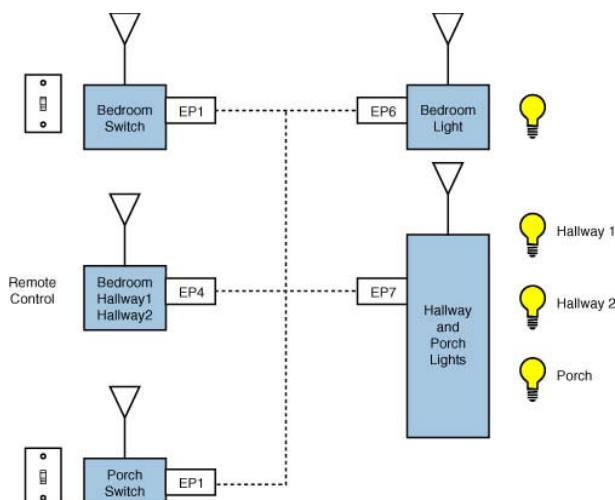


Figura 8. Control de iluminación doméstico

3.7.5.1. *ZigBee device object* (ZDO): un dispositivo ZigBee realiza control y administración de objetos de aplicación. El ZDO realiza tareas de gestión global de dispositivos:

- Determina el tipo de dispositivo en una red (por ejemplo, un dispositivo final, *router* o coordinador).
- Inicializa el APS, la capa de red, y el proveedor de servicios de seguridad.
- Realiza descubrimiento de dispositivos y servicios.
- Inicializa el coordinador para el establecimiento de una red.
- Gestión de seguridad.
- Gestión de la red.

3.7.5.2. *Nodo final*: Cada nodo o dispositivo final puede tener múltiples EPs. Cada EP contiene un perfil de aplicación, tal y como automatización del hogar, y puede ser usado para controlar varios dispositivos o uno solo. Cada EP define funciones de comunicación dentro de un dispositivo. Como se muestra en la figura 8, el *switch* de la habitación controla la iluminación de la habitación y el control remoto es utilizado para controlar tres luces: habitación, pasillo1 y pasillo2.

3.7.5.3. *Modo de direccionamiento ZigBee*: ZigBee usa direccionamiento directo, agrupado y de emisión (*broadcast*) para la transmisión de información. En direccionamiento directo, dos dispositivos se comunican directamente entre sí. Esto requiere que el dispositivo fuente tenga ambos, la dirección y el *endpoint* del dispositivo destino. El direccionamiento agrupado requiere que la aplicación asigne un grupo de miembros a uno o más dispositivos. Un paquete es transmitido al grupo de direcciones en donde el dispositivo destino reside. La dirección *broadcast* es usada para enviar un paquete a todos los dispositivos de la red.

4. OTRAS TECNOLOGÍAS WIRELESS

ZigBee está bien posicionado en el área de sensores wireless y control de redes pero existen otras soluciones wireless que al igual que ZigBee utilizan el protocolo 802.15.4:

- **Wireless USB**: es una tecnología emergente de dispositivos operados por batería. Es una tecnología poco costosa, genial para las baterías pero no funciona bien en gran escala y no provee seguridad. Está basada en Ultra Wideband (UWB) utilizada mayormente en baterías de dispositivos periféricos para PC.
- **WiFi**: se utiliza en sensores y control de redes, es una tecnología que comenzó con el mercado de PCs pero comienza a ganar terreno en el área de los dispositivos. Es más cara que ZigBee donde WiFi requiere de un equipo mayor para correr todo el protocolo.
- **Bluetooth**: Es un protocolo seguro, utilizado en celulares, wearables como relojes, audífonos y demás, no es una tecnología cara pero no tiene la misma capacidad de batería que un dispositivo ZigBee. Bluetooth tiene otra limitante: no escala bien en redes amplias, siendo solo aplicable en redes de no más de siete dispositivos.
- **Wibree**: Utilizado en relojes y sensores de movimiento para el cuerpo. Está diseñada para ser de

bajo consumo de poder pero, esta limitada por el numero de nodos que pueden haber en una red. Es una tecnología que sigue en desarrollo.

- **Z-Wave:** Tecnología utilizada para la automatización de casas, no posee un estándar pues la compañía Zensys es la única que manufactura componentes Z-Wave. Es el competidor directo de ZigBee.

5. CONCLUSION

[La Conclusion]

REFERENCIAS

- [1] D. Gislason. *Zigbee Wireless Networking*. Elsevier. ISBN: 978-0-7506-85979. 2008.
- [2] A. Gschwendner, A. Elahi. *Zigbee Wireless Sensor and Control Network*. Prentice Hall. ISBN: 9780137134854. 2009.



Priscilla Piedra es Ingeniera de Computación del Tecnológico de Costa Rica. Actualmente es estudiante del programa de Maestría en Ciencias de la Computación en la misma universidad. Sus principales intereses son: *cloud computing* y automatización.



Martín Flores es Ingeniero en Informática de la Universidad Nacional. Actualmente, realiza sus estudios de Maestría en Ciencias de la Computación del Tecnológico de Costa Rica. Sus principales intereses son: lenguajes de programación, ingeniería de software y *DevOps*.