

# La Tecnología ZigBee estudio de las características de la capa física

## ZigBee Technology study of the characteristics of the physical layer

Carlos Alberto Vera Romero<sup>1</sup>, Jhon Erickson Barbosa Jaimes<sup>2</sup>, Diana Carolina Pabón González<sup>3</sup>.

<sup>1,2,3</sup>GRINDES – Grupo de investigación para el desarrollo económico, tecnológico y social, Universidad Nacional Abierta y a Distancia, Pamplona, Colombia

carlos.vera@unad.edu.co

jhon.barbosa@unad.edu.co

diana.pabon@unad.edu.co

**Resumen**— Este artículo explica ampliamente los fundamentos del nivel físico de la tecnología ZigBee basado en el estándar IEEE 802.15.4 de redes inalámbricas de área personal. Presenta los componentes, las topologías, y la arquitectura utilizada por los dispositivos que usan este tipo de tecnología. El conocimiento de esta tecnología resulta indispensable para la posterior aplicación del sistema en aplicaciones reales, como en las redes de sensores.

**Palabras clave**—IEEE 802.15.4, Red inalámbrica, red de sensores, ZigBee, red de sensores.

**Abstract**— This article explains the basics widely ZigBee technology based on the IEEE 802.15.4 wireless personal area networks, at all levels of its architecture standard. Presents the components, topologies, and architecture used by devices using this technology. The knowledge of this technology is essential for the subsequent application of the system in real applications such as sensor networks.

**Key Word** — IEEE 802.15.4 wireless network, sensor network, ZigBee sensor network.

### I. INTRODUCCIÓN

Las redes inalámbricas descentralizadas como las ad-hoc es un campo muy activo de las actuales tecnologías emergentes, basadas en estándares generalmente bajo estándares como el IEEE 802.15.4.

El protocolo 802.15.4, es un estándar de comunicaciones inalámbricas para redes de área personal. Según [1] este protocolo fue creado por el Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers) [2], entidad cuya tarea principal es establecer normas comunes para los avances tecnológicos. El estándar fue diseñado para ser utilizado en una amplia variedad de aplicaciones que requieren comunicaciones inalámbricas sencillas de corto alcance y limitada potencia. Es importante

señalar que el enfoque de la norma IEEE 802.15.4, es ser un facilitador de aplicaciones, donde el valor estará en la aplicación y no en la capacidad inalámbrica [3].

Zigbee es una tecnología inalámbrica de baja tasa de transferencia, bajo consumo de energía. La IEEE y Zigbee Alliance han estado trabajando estrechamente para especificar toda la pila de protocolo. Este protocolo sigue la definición por capas del modelo de referencia de interconexión de sistemas abiertos OSI (Open System Interconnection). IEEE 802.15.4, se centra en la especificación de las dos capas inferiores del protocolo (capa física, control de acceso al medio). Por otro lado, Zigbee Alliance, proporciona las capas superiores de la pila del protocolo desde la capa de red hasta la de aplicación [4].

La principal función de ZigBee, es la de crear una topología de red jerárquica para que un número de dispositivos se comuniquen entre ellos, además de establecer características adicionales de comunicación tales como la autenticación, encriptación, de asociación y en los servicios de aplicación de la capa superior [5].

Este artículo de revisión tiene como objetivo mostrar profundamente la capa física dentro de la arquitectura del protocolo ZigBee, comprendiendo cada característica que la compone. Asimismo, es importante comprender la masiva aplicación que tiene este estándar de comunicación. A su vez permitirá a la comunidad científica y en general, a abordar de una forma más clara la importancia que tienen las tecnologías emergentes, específicamente la que tiene que ver con aplicaciones de la tecnología ZigBee, consideraba esta como una alternativa de solución exitosa en diversos sectores en lo que se refiere para aplicaciones de una red inalámbrica.

## II. CONTENIDO

Como se menciona en [6], la ciencia y la tecnología es importante para la sociedad ya que la influencia de esta es grande para el desarrollo económico, político y cultural de los países. Por lo tanto los intereses de bienestar social estén inherentes a ellas, hasta el punto de que se produce una fuerte competencia entre las naciones por la carrera del desarrollo científico y tecnológico, considerándolo como una de las mayores aspiraciones de la humanidad.

Ahora bien, la revisión bibliográfica es un tipo de artículo científico que sin ser original recopila la información más relevante sobre un tema específico [7].

Por lo tanto este artículo de revisión considera aquellos elementos principales que componen el uso de la tecnología ZigBee.

## III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Las Red Inalámbrica de Área Personal (WPAN- Wireless Personal Area Network, se centran en un espacio alrededor de una persona u objeto que normalmente se extiende hasta 10m en todas las direcciones. El foco de WPAN es de bajo costo, de baja potencia, de corto alcance y de tamaño muy pequeño.

El grupo de trabajo IEEE 802.15 se forma para crear la norma WPAN. Este grupo actualmente ha definido tres clases de WPAN que se diferencian por la velocidad de datos, la descarga de la batería y la calidad de servicio (QoS). La alta velocidad de datos WPAN (IEEE 802.15.3) es adecuado para aplicaciones multimedia que requieren muy altas QoS. Tasa Media WPAN (IEEE 802.15.1 / bluetooth) se encargará de una variedad de tareas que van desde teléfonos celulares para comunicaciones PDA y tienen QoS adecuados para las comunicaciones de voz. Las principales características del estándar IEEE 802.15.4 WPAN es la flexibilidad de la red, de bajo costo, muy bajo consumo de energía, y baja velocidad de datos en una redes móviles ad hoc permitiendo la conexión de diversos dispositivos económicos fijos, portátiles y móviles [8],[9].

### A. Los componentes de una WPAN con ZigBee

Un sistema de ZigBee consta de varios componentes. El más básico es el dispositivo que puede ser un dispositivo de función completa (FFD - full-function device) o dispositivo de función reducida (RFD - reduced-function device) [10], [11]. Una red incluirá al menos un FFD, que opera como coordinador del PAN [12]. El FFD puede funcionar en tres modos: una red de área personal (PAN) coordinador, un coordinador o un dispositivo. Un RFD está diseñado para aplicaciones que son muy simples y no necesitan enviar grandes cantidades de datos. Un FFD puede comunicarse con RFDs o FFDs mientras que un RFD sólo pueden comunicarse con un FFD [13], [14].

### B. Las topologías de la red basada en ZigBee

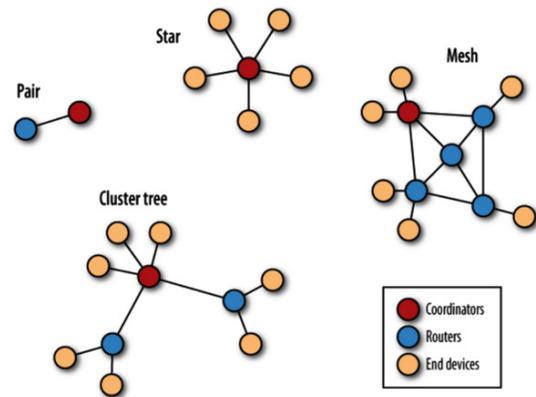


Figura No.1. Topologías ZigBee

Imagen tomada de: [http://jeromeabel.net/files/ressources/xbee-arduino/images/thumb\\_620x620/zigbee-topologies.png](http://jeromeabel.net/files/ressources/xbee-arduino/images/thumb_620x620/zigbee-topologies.png)

La Fig.1, muestra 4 tipos de topologías que la tecnología ZigBee soporta: topología en estrella (star), la topología entre pares (pair) árbol de grupos (cluster tree), topología malla (mesh) [15], [16], [17].

**Topología en estrella.** En la topología en estrella, se establece la comunicación entre los dispositivos y un controlador central único, llamado el coordinador de PAN [18], [19]. El coordinador de PAN puede ser conectado al fluido eléctrico, mientras que los otros dispositivos será probable que sean alimentados por baterías. Las aplicaciones que se benefician de esta topología incluyen domótica, computadoras personales (PCs) periféricos, juguetes y juegos [8], [11], [20]. Después de un FFD se activa por primera vez, puede establecer su propia red y convertirse en el coordinador de PAN. Cada red de inicio elige un identificador de PAN, que no está utilizado actualmente por cualquier otra red dentro de la esfera de radio de influencia. Esto permite que cada red en estrella para operar de forma independiente [8].

**Topologías entre pares.** En topología de punto a punto, también hay un coordinador de PAN. En contraste con topología en estrella, cualquier dispositivo puede comunicarse con cualquier otro dispositivo, siempre y cuando están en el rango de uno al otro. Una red peer-to-peer puede ser ad hoc, de auto-organización y auto-recuperación. Las aplicaciones como el control industrial y la vigilancia, las redes de sensores inalámbricos de activos y seguimiento de inventario se beneficiarían de una topología de este tipo [12], [21], [23], [24]. También permite múltiples saltos para encaminar mensajes desde cualquier dispositivo a cualquier otro dispositivo en la red, proporcionando fiabilidad por enrutamiento múltiples [25], [26].

**Topología árbol de grupos.** Esta denominación corresponde a un híbrido que se forma aplicando una estructura de árbol a varias estrellas. Cada estrella es un grupo (cluster), y el conjunto será un árbol de grupo (cluster tree) [27]. Red de árbol de grupo es un caso especial de una red peer-to-peer en la que la mayoría de los dispositivos son FFDs y un RFD pueden conectarse a una red de árbol de grupos como un nodo único al final de cada rama. Cualquiera de los FFD puede actuar como coordinador y proporcionar servicios de sincronización con otros dispositivos y coordinadores. Sin embargo sólo uno de estos coordinadores es el coordinador del PAN [28], [29], [30].

El coordinador del PAN se forma con el primer grupo mediante el establecimiento de sí mismo como la cabeza de grupo (CLH - Cluster head) con un identificador de grupo (CID - cluster identifier) de cero, elegir un identificador PAN sin usar y transmitir tramas de señalización a los dispositivos vecinos. Un dispositivo candidato que reciba una trama de baliza puede solicitar unirse a la red en la CLH [31]. Si el coordinador PAN permite unirse al dispositivo, añadirá este nuevo dispositivo como un dispositivo secundario en su lista de vecinos. El dispositivo recién unido añadirá la CLH como su padre en su lista de vecinos y empezará a transmitir balizas periódicas de tal manera que otros dispositivos candidatos pueden entonces unirse a la red en ese dispositivo [9], [32]. Una vez que se cumplen los requisitos de aplicación o de la red, el coordinador PAN puede instruir a un dispositivo para convertirse en el CLH de un nuevo grupo adyacente a la primera. La ventaja de esta estructura en clúster es el aumento del área de cobertura a costa de una mayor latencia de mensajes [29], [33], [34].

**Topología mesh.** La estructura de la topología de malla es similar a la de la topología de árbol, con el coordinador en la parte superior de una estructura en forma de árbol. El coordinador está vinculado a un conjunto de routers y dispositivos End - sus hijos [35].

Un router puede entonces estar vinculado a más routers y dispositivos End - sus hijos. Esto puede continuar a un número de niveles. Sin embargo, las reglas de comunicación son más flexibles que en los nodos de router dentro del alcance del otro puede comunicarse directamente [36].

La topología de malla da lugar a la propagación de mensajes más eficiente, y significa que posee rutas alternativas en donde se pueden encontrar si un enlace falla o hay congestión. Una función de "descubrimiento de ruta" es siempre lo que permite a la red para encontrar la mejor ruta disponible para un mensaje [22], [37], [38].

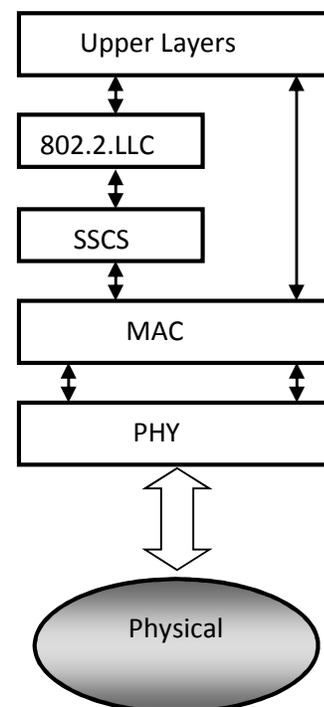
### C. Arquitectura del dispositivo de la LR-WPAN

El estándar IEEE 802.15.4. (Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc., IEEE Std. 802.15.4-2003) define las características de la capa física y de la capa de control de

acceso al medio (MAC- Medium Access Control) para redes inalámbricas de área personal (LR-WPAN: Low Rate Wireless Personal Networks) de baja tasa de transmisión. Las ventajas de un LR-WPAN son la facilidad de instalación, la transferencia de datos confiable, operación de corto alcance, costo extremadamente bajo, y una duración de batería razonable, manteniendo al mismo tiempo una pila de protocolo simple y flexible.

La Fig.2, muestra un dispositivo de LR-WPAN. El dispositivo comprende la capa física (PHY-layer physical), que contiene el transceptor de radiofrecuencia (RF- radio frequency), junto con su mecanismo de control de bajo nivel, y una subcapa MAC que proporciona acceso al canal físico para todos los tipos de transferencia [9]. Las capas superiores se componen de una capa de red, que proporciona la configuración de red, la manipulación y el enrutamiento de mensajes, y la capa de aplicación, que proporciona la función prevista de un dispositivo [9].

Una 802.2 control de enlace lógico IEEE (LLC) puede acceder a la subcapa MAC a través de la subcapa de convergencia específica de servicio (SSCS) [39]. Como la mayoría de otros protocolos 802, no se especifica ni describir las capas superiores de la pila OSI / ISO [29]. De hecho, si se compara el modelo de referencia OSI con la representación dada en la Fig.2, es evidente que 802.15.4 ni siquiera representa un conjunto completo de las capas de los medios de comunicación como se especifica en el modelo OSI.



LLC: Logical Link Control  
 MAC: Medium Access Control  
 SSCS: Service Specific Convergence Sublayer

Figura No.2 arquitectura del dispositivo IEEE 802.15.4 LR-WPAN  
 Imagen tomada de: <http://staff.ustc.edu.cn/~ustesse/papers/SR10.ZigBee.pdf>



#### D. La capa física de IEEE 802.15.4

La PHY proporciona dos servicios: el servicio de servicio de datos PHY y gestión PHY interfaz con la entidad de gestión de capa física (PLME- physical layer management entity). El servicio de datos PHY permite la transmisión y recepción de unidades de datos de protocolo de la capa física (PPDU- PHY protocol data units ) a través del canal de radio físico [40].

Las características de la PHY son activación y desactivación del transceptor de radio, la detección de energía (ED), indicación de la calidad del enlace (ICT), selección de canal, evaluación clara canal (CCA) y transmitir así como recibir paquetes a través del medio físico [42].

El estándar ofrece dos opciones PHY basado en la banda de frecuencia. Ambos se basan en espectro ensanchado de secuencia directa (DSSS) [1], [9]. La velocidad de datos es 250kbps a 2.4GHz, 40kbps en 915MHz y 868MHz a 20kbps. La velocidad de datos superior a 2,4 GHz se atribuye a un esquema de modulación de orden superior [13]. Menor frecuencia proporciona mayor alcance debido a las pérdidas de propagación más bajas. Baja tasa se puede traducir en una mejor sensibilidad y una mayor área de cobertura. Tasa más alta significa mayor rendimiento, menor latencia o ciclo inferior de trabajo [42].

El protocolo IEEE 802.15.4 se encuentra en el nivel 2 del modelo OSI, capa llamada de enlace de datos. Aquí las unidades digitales de información (bits) son gestionados y organizados para convertirse en impulsos electromagnéticos (ondas) en el nivel inferior, el físico. Esta capa es similar a los otros conocidos tales como la 802.11 (denominada comercialmente bajo las tecnologías WiFi) o el común Ethernet (802.3). El medio de transmisión ZigBee trabaja sobre la banda ISM (Industrial, Scientific and Medical), bandas reservadas internacionalmente para uso no comercial de radiofrecuencia electromagnética en áreas industrial, científica y médica [43]. Las frecuencias definidas en el estándar se reparten entre 27 canales diferentes, divididas en tres grupos principales como se muestra en la tabla 1.

Las frecuencias definidas en la tecnología ZigBee se reparten entre 27 canales diferentes, divididas en tres grupos principales [37]. La tabla 1, muestra las bandas de frecuencia y la velocidad de datos según la banda elegida.

El estándar IEEE 802.15.4 define dos representaciones física que incorporan tres bandas de frecuencias de licencia libres [44] tal como se indica en la figura No.3, e incluyen dieciséis canales a 2.4 GHz, diez canales a 902-928 MHz, y un canal en 868-868.6 MHz. Las tasas máximas de datos para cada banda son 250 kbps, 40 kbps y 20 Mbps, respectivamente [37].

Tabla 1: Bandas de frecuencia y velocidad de datos

Física	Banda de Frecuencia	Números de canales	Parámetros de propagación		Parámetros de los datos		
			Velocidad de procesamiento	Modulación	Bits por segundo	Cantidad de información	Modulación
868/915MHz	868-870 MHz	0	300 kchip/s	BPSK	20 kb/s	20 kbaud	BPSK
	902-928 MHz	1 a 10	600 kchip/s	BPSK	40 kb/s	40 kbaud	BPSK
2.4 GHz	2.4-2.4835 GHz	11 a 26	2.0 Mchip/s	O-QPSK	250 kb/s	62.5 kbaud	16-ary Orthogonal

Varios canales en diferentes bandas de frecuencia permite la posibilidad de moverse dentro del espectro. La norma también permite la selección dinámica de canales, una función de exploración que través de los pasos en una lista de canales soportados busca ya sea una señal de baja potencia que se emplea sin modular como señal de seguimiento o test, llamado Beacon o Baliza, así como también, la detección de la energía del receptor, la indicación de la calidad del enlace y el cambio de canal [45]; [46], [47]. La sensibilidad del receptor son -85dBm de 2.4GHz y -92dBm de 868 / 915MHz. La ventaja de 6-8dB proviene de la ventaja de la tarifa más baja. La variedad más es una función de sensibilidad del receptor y potencia de

transmisión [9]. La máxima potencia de transmisión se ajustará a la normativa local.

#### E. Aplicaciones de la Tecnología ZigBee

Las aplicaciones de la tecnología ZigBee son diversas, van desde aplicaciones de automatización del hogar, control industrial, en electromedicina [48], en aplicaciones industriales, en control de tráfico, en sistemas de alertas, localización y seguimiento de personas [49], activos y animales, control de accesos, detección de fugas, sistemas de alerta y petición de ayuda, control de perímetros de seguridad, optimización de recursos, control de gasto energético, seguimiento de patrones de consumo, monitorización y control

de equipos eléctricos y electrónicos [50], medición de variables ambientales [51] monitorización de datos medioambientales [52], control de iluminación [53] domótica activado por comandos de voz [54], en redes industriales [55], medición del consumo de agua domiciliar [56], gestión energética de energía [57], y climatización, automatización de escenas, sensorización y automatización industrial y doméstica [58], [59], [1], [60].

Cada vez más, las empresas desarrollan aplicaciones de seguimiento y control en entornos como edificios industriales y comerciales buscando tecnologías inalámbricas como ZigBee para ahorrar el costo de cableado y la instalación, así como para permitir un despliegue más flexible de los sistemas [55].

#### IV. CONCLUSIONES

Recapitulando, ZigBee se fundamenta en el estándar de comunicaciones IEEE 802.15.4 que define el hardware y software de las capas física (PHY) y de acceso al medio (MAC). Se han revisado las normas ZigBee / IEEE 802.15.4 que componen la tecnología ZigBee. ZigBee son adecuados para aplicaciones de baja velocidad de datos con una alta eficiencia energética de la batería limitada tales como los dispositivos móviles y las redes de sensores que funcionan con baterías, debido a su bajo consumo de energía que lleva a una larga vida útil. Según lo investigado el protocolo de enrutamiento ZigBee es más estable y fiable.

Es probable que ZigBee cada vez juegue un papel importante en el futuro de la informática y la comunicación. En términos de tamaño de la pila del protocolo, de ZigBee 32 KB es alrededor de un tercio del tamaño necesario en otras tecnologías inalámbricas (para dispositivos finales de capacidad limitada, el tamaño de la pila es de tan sólo 4 KB). ZigBee basado en IEEE 802.15.4 está diseñado para los controles y sensores remotos, que son muy muchos en número, pero necesita solo los datos de paquetes pequeños y, sobre todo, utiliza muy bajo consumo de energía a lo largo de su vida de uso. Por lo tanto son naturalmente diferentes en su enfoque de sus respectivos ámbitos de aplicación. Los objetivos de las aplicaciones de la Alianza ZigBee van desde los mercados de consumo, comerciales, industriales y gubernamentales en todo el mundo. Las aplicaciones inalámbricas son muy codiciados en muchas redes que se caracterizan por numerosos nodos que consumen potencia mínima y disfrutando de larga duración de las baterías lo que ha hecho que la Tecnología ZigBee este diseñado para adaptarse mejor a estas aplicaciones, por la razón de que permite la reducción de costos de desarrollo y adopción en el mercado muy rápido.

#### RECOMENDACIONES

La presente reseña hace parte de la búsqueda y recopilación de información para la realización del proyecto red de sensores inalámbricos basado en protocolo IEEE 802.15.4 para la

medición de algunas variables ambientales financiado por el Sistema de gestión de la investigación SIGI de la Universidad Nacional Abierta y a Distancia – UNAD Colombia. Mediante convocatoria interna No.002 bajo el código SIGI-0044 al grupo de investigación GRINDES-COL0045135.

#### REFERENCIAS

- [1] Kinney, P. (2003, October). Zigbee technology: Wireless control that simply works. In Communications design conference (Vol. 2). Recuperado de, <http://www.mouser.in/pdfdocs/ZigBeeTechnology.pdf>
- [2] IEEE. (2003). Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc., IEEE Std. 802.15.4-2003. New York, IEEE Press. October 1, 2003.
- [3] Gutiérrez, J. A., Callaway, E. H., & Barrett, R. L. (2004). *Low-rate wireless personal area networks: enabling wireless sensors with IEEE 802.15.4*. IEEE Standards Association.
- [4] Aziz, A., Qureshi, M. A., Soorage, M. U., Kashif, M. N., & Hafeez, M. A. (2012). Evaluation of ZigBee Based Wireless Sensor Network with Static Sink and Random Sink Mobility. *International Journal of Computer & Electrical Engineering*, 4(4). Recuperado de, <http://www.ijcee.org/papers/558-P235.pdf>
- [5] Kastner, W., Neugschwandtner, G., Soucek, S., & Newmann, H. M. (2005). Communication systems for building automation and control. *Proceedings of the IEEE*, 93(6), 1178-1203. Recuperado de, <http://ieeexplore.ieee.org/xpl/articleDetails.jsp?arnumber=1435745>
- [6] Sancho, R. (1990). Indicadores bibliométricos utilizados en la evaluación de la ciencia y la tecnología. Revisión bibliográfica. *Revista española de documentación científica*, 13(3-4). Recuperado de, <http://www.temarium.com/serlibre/recursos/pdf/79059.Inteligencia%20Competitiva.Lecturas.pdf#page=77>
- [7] Guirao-Goris, J. A., Olmedo-Salas, A., & Ferrer Ferrandis, E. (2008). El artículo de revisión. *Revista Iberoamericana de Enfermería Comunicataria*, 1(1). Recuperado de, <http://files.cimape.webnode.es/200000027-21c6423bb0/EL%20ARTICULO%20DE%20REVISION-2.pdf>
- [8] Callaway, E., Gorday, P., Hester, L., Gutierrez, J. A., Naeve, M., Heile, B., & Bahl, V. (2002). Home networking with IEEE 802.15.4: a developing standard for low-rate wireless personal area networks. *IEEE Communications Magazine*, 40(8), 70-77. Recuperado de, <http://cs.tju.edu.cn/faculty/ytshu/old%20courses/>

- Net II 08/Ch4/4-2%20Networking/CGH02\_802.15.4.pdf
- [9] Ergen, S. C. (2004). ZigBee/IEEE 802.15. 4 Summary. UC Berkeley, September, 10. Recuperado de, <http://staff.ustc.edu.cn/~ustcsse/papers/SR10.ZigBee.pdf>
- [10] Kim, K. S., Park, C., Seo, K. S., Chung, I. Y., & Lee, J. (2007, February). ZigBee and the UPnP expansion for home network electrical appliance control on the internet. In *Advanced Communication Technology, The 9th International Conference on* (Vol. 3, pp. 1857-1860). IEEE.
- [11] Krasteva, R., Boneva, A., Georchev, V., & Stoianov, I. (2005). Application of Wireless Protocols Bluetooth and ZigBee in Telemetry System Development. *Problems of Engineering, Cybernetics, and Robotics*, 55, 30-38. Recuperado de, <http://www.iit.bas.bg/PECR/55/30-38.pdf>.
- [12] Jung, S., Chang, A., & Gerla, M. (2007, October). Comparisons of ZigBee personal area network (PAN) interconnection methods. In *Wireless Communication Systems, 2007. ISWCS 2007. 4th International Symposium on* (pp. 337-341). IEEE. Recuperado de, [http://wons09.cs.ucla.edu/publication/download/431/Jung\\_ISWCS07.pdf](http://wons09.cs.ucla.edu/publication/download/431/Jung_ISWCS07.pdf)
- [13] Ahamed, S. R. (2009). The role of zigbee technology in future data communication system. *Journal of theoretical and applied information technology*, 5(2), 129-135. Recuperado de, <http://www.jatit.org/volumes/research-papers/Vol5No2/5Vol5No2.pdf>
- [14] Lee, J. S., Su, Y. W., & Shen, C. C. (2007, November). A comparative study of wireless protocols: Bluetooth, UWB, ZigBee, and Wi-Fi. In *Industrial Electronics Society, 2007. IECON 2007. 33rd Annual Conference of the IEEE* (pp. 46-51). IEEE. Recuperado de, <http://eee.guc.edu.eg/Announcements/Comparative Wireless Standards.pdf>
- [15] Baker, N. (2005). ZigBee and Bluetooth: Strengths and weaknesses for industrial applications. *Computing and Control Engineering*, 16(2), 20-25. Recuperado de, [http://digital-library.theiet.org/content/journals/10.1049/cce\\_2\\_0050204](http://digital-library.theiet.org/content/journals/10.1049/cce_2_0050204)
- [16] Farahani, S. (2011). *ZigBee wireless networks and transceivers*. Newnes.
- [17] Sun, J., Wang, Z., Wang, H., & Zhang, X. (2007, November). Research on routing protocols based on ZigBee network. In *Intelligent Information Hiding and Multimedia Signal Processing, 2007. IHHMSP 2007. Third International Conference on* (Vol. 1, pp. 639-642). IEEE.
- [18] Howitt, I., & Gutierrez, J. A. (2003, March). IEEE 802.15. 4 low rate-wireless personal area network coexistence issues. In *Wireless Communications and Networking, 2003. WCNC 2003. 2003 IEEE* (Vol. 3, pp. 1481-1486). IEEE. Recuperado de, [http://morse.colorado.edu/~tlen5520/Papers/802\\_154WiFi.pdf](http://morse.colorado.edu/~tlen5520/Papers/802_154WiFi.pdf)
- [19] Lu, G., Krishnamachari, B., & Raghavendra, C. S. (2004). Performance evaluation of the IEEE 802.15. 4 MAC for low-rate low-power wireless networks. In *Performance, Computing, and Communications, 2004 IEEE International Conference on* (pp. 701-706). IEEE. Recuperado de, [http://anrg.usc.edu/www/papers/LuKrishnamachariRaghavendra\\_802154\\_EWCN.pdf](http://anrg.usc.edu/www/papers/LuKrishnamachariRaghavendra_802154_EWCN.pdf)
- [20] Baronti, P., Pillai, P., Chook, V. W., Chessa, S., Gotta, A., & Hu, Y. F. (2007). Wireless sensor networks: A survey on the state of the art and the 802.15. 4 and ZigBee standards. *Computer communications*, 30(7), 1655-1695. Recuperado de, [http://www.science.smith.edu/~jcardell/Courses/EGR328/Readings/WSN\\_Zigbee%20Ovw.pdf](http://www.science.smith.edu/~jcardell/Courses/EGR328/Readings/WSN_Zigbee%20Ovw.pdf)
- [21] Kumar, M. (2010, March). Zigbee: The Low Data Rate Wireless Technology for Ad-Hoc and Sensor Networks. In *NCCI 2010-National Conference on Computational Instrumentation CSIO*. Recuperado de, [http://www.faroudja.com/st-web-ui/static/active/cn/resource/technical/document/conference\\_paper/TP%201285\\_ZigBee\\_MK\\_Paper\\_WH.pdf](http://www.faroudja.com/st-web-ui/static/active/cn/resource/technical/document/conference_paper/TP%201285_ZigBee_MK_Paper_WH.pdf)
- [22] Lee, M. J., Zheng, J., Ko, Y. B., & Shrestha, D. M. (2006). Emerging standards for wireless mesh technology. *Wireless Communications, IEEE*, 13(2), 56-63. Recuperado de, <http://www.cse.iitb.ac.in/~varsha/allpapers/wireless/mesh/lee-zheng-emerging-standards.pdf>
- [23] Kohvakka, M., Kuorilehto, M., Hännikäinen, M., & Hämäläinen, T. D. (2006, October). Performance analysis of IEEE 802.15. 4 and ZigBee for large-scale wireless sensor network applications. In *Proceedings of the 3rd ACM international workshop on Performance evaluation of wireless ad hoc, sensor and ubiquitous networks* (pp. 48-57). ACM. Recuperado de, <http://www.cs.berkeley.edu/~culler/AIIT/papers/performance%20analysis/Zigbee%20p48-kohvakka.pdf>
- [24] Sun, J., & Zhang, X. (2009, August). Study of ZigBee wireless mesh networks. In *Hybrid Intelligent Systems, 2009. HIS'09. Ninth*

- International Conference on (Vol. 2, pp. 264-267). IEEE. Recuperado de,
- [25] Sbarufatti, C., Manes, A., Giglio, M., Mariani, U., Molinaro, R., Matta, W., ... & Katsikeros, C. Application of Structural Health Monitoring over a Critical Helicopter Fuselage Component. Recuperado de, <http://www.vitrociset.it/images/files/Application%20of%20Structural%20Health%20Monitoring.pdf>
- [26] Gupta, V., & Pandey, R. (2008). Data fusion and topology control in wireless sensor networks. *WSEAS Transactions on Signal Processing*, 4(4), 150-172. Recuperado de, <http://wseas.us/e-library/transactions/signal/2008/25-843N.pdf>
- [27] Caprile, S. R. (2009). *Equisbí: Desarrollo de aplicaciones con comunicación remota basadas en módulos ZigBee y 802.15. 4*. Sergio R. Caprile.
- [28] Chavan, S. G., & Dhongade, R. D. (2013). Simulative Investigation of Zigbee based Wireless Star Networks by using NS-2. Recuperado de, <http://www.ijser.org/researchpaper/simulative-investigation-of-zigbee-based-wireless-star-networks-by-using-ns-2.pdf>
- [29] Kim, Y. D., & Moon, I. Y. (2014). ZigBee and IEEE 802.15. 4 Standards. *ZigBee® Network Protocols and Applications*, 31.
- [30] Hernández Herranz, A. (2011). Wireless Inverted Pendulum using IEEE 802.15. 4 Protocol.
- [31] Mithila, N. H., Rahman, B., & Taher, A. B. (2012). *Study and Analysis of Protocols of Wireless Sensor Network* (Doctoral dissertation, Department of Computer Science and Engineering, Military Institute of Science and Technology). Recuperado de, <http://111.221.3.150/bitstream/handle/123456789/42/200914034,%20200914038,%20200814011.pdf?sequence=1>
- [32] Manjunath, T. C., Kusagur, A., Sanjay, S., Sindushree, S., & Ardil, C. (2008). Design, Development & Implementation of a Temperature Sensor using Zigbee Concepts. *World Academy of Science, Engineering and Technology*, 44.
- [33] Nagarajan, S., & Ganesh, S. (2014, April). Energy efficient Zigbee cluster-tree wireless sensor network using modified distributed algorithm. In *Communications and Signal Processing (ICCSP), 2014 International Conference on* (pp. 1912-1916). IEEE
- [34] Cuomo, F., Della Luna, S., Cipollone, E., Todorova, P., & Suihko, T. (2008, March). Topology formation in IEEE 802.15. 4: cluster-tree characterization. In *Pervasive Computing and Communications, 2008. PerCom 2008. Sixth Annual IEEE International Conference on* (pp. 276-281). IEEE.
- [35] Chandra, R., Fetzer, C., & Hogstedt, K. A. R. I. N. (2002, September). Adaptive topology discovery in hybrid wireless networks. In *Informatics* (Vol. 35, pp. 121-132).
- [36] Li, T., & Zhang, Z. (2012, September). Nat. Astron. Obs., Nanjing Inst. of Astron. Opt. & Technol., Nanjing, China. In *Network Infrastructure and Digital Content (IC-NIDC), 2012 3rd IEEE International Conference on* (pp. 194-198). IEEE. Recuperado de, <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=6418742&isnumber=6418700>
- [37] Craig, W. C. (2004). Zigbee: Wireless control that simply works. *Program Manager Wireless Communications ZMD America, Inc.*
- [38] Zheng, J., & Lee, M. J. (2004). A comprehensive performance study of IEEE 802.15. 4.
- [39] Tariq, E. C., Mrabet, R., & Berbia, H. (2011). Interoperability of LoWPANs Based on the IEEE802. 15.4 Standard through IPV6. *IJCSI*, 315. Recuperado de, <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.402.9531&rep=rep1&type=pdf#page=337>
- [40] Fariborzi, H., Moghavvemi, M., & Mehrkanoon, S. (2007, November). The design of an intelligent wireless sensor network for ubiquitous healthcare. In *Intelligent and Advanced Systems, 2007. ICIAS 2007. International Conference on* (pp. 414-417). IEEE
- [41] Ma, C. (2014). *Performance modelling and analysis of multiple coexisting IEEE 802.15. 4 wireless sensor networks* (Doctoral dissertation).
- [42] Chen, A. W., Shih, B., Chang, C., & Chen, C. (2010). Enhanced MAC channel selection to improve performance of IEEE 802.15. 4. *International Journal of Innovative Computing, Information and Control*, 6(12), 5511-5526.
- [43] Mohanty, S. (2010). *Energy Efficient Routing Algorithms for Wireless Sensor Networks and Performance Evaluation of Quality of Service for IEEE 802.15. 4 Networks* (Doctoral dissertation, National Institute of Technology, Rourkela)
- [44] Adams, J. T. (2006, March). An introduction to IEEE STD 802.15. 4. In *Aerospace Conference, 2006 IEEE* (pp. 8-pp). IEEE.
- [45] Jurčík, P., & Koubâa, A. (2007). The IEEE 802.15. 4 OPNET simulation model: reference guide v2. 0. *IPP-HURRAY Technical Report, HURRAY-TR-070509*.
- [46] Koubâa, A., Alves, M., & Tovar, E. (2005). IEEE 802.15. 4 for wireless sensor networks: a technical overview.

- [47] Wang, C., Jiang, T., & Zhang, Q. (Eds.). (2014). *ZigBee® Network Protocols and Applications*. CRC Press.
- [48] Donoso García, E. F., & Paredes Bastidas, W. A. (2012). *Implementación de un sistema electrónico de atención de turnos mediante radiofrecuencia y grabación de voz para un patio de comidas* (Doctoral dissertation, QUITO/EPN/2012).
- [49] Ramamurthy, H., Prabhu, B. S., Gadh, R., & Madni, A. M. (2007). Wireless industrial monitoring and control using a smart sensor platform. *Sensors Journal, IEEE*, 7(5), 611-618.
- [50] Guo, W., Healy, W. M., & Zhou, M. (2010, April). ZigBee-wireless mesh networks for building automation and control. In *Networking, Sensing and Control (ICNSC), 2010 International Conference on* (pp. 731-736). IEEE.
- [51] Vera, C., Barbosa, J & Pabón, D. (2014). Acople de sensores en la medición de variables ambientales usando tecnología ZigBee. *Scientia et Technica*, 19(4), 419-424. Recuperado de, <http://revistas.utp.edu.co/index.php/revistaciencia/article/view/9252/5876>
- [52] Wang, N., Zhang, N., & Wang, M. (2006). Wireless sensors in agriculture and food industry—Recent development and future perspective. *Computers and electronics in agriculture*, 50(1), 1-14. Recuperado de, <http://ecaaser3.ecaa.ntu.edu.tw/weifang/WSN/Wireless%20sensors%20in%20agriculture%20and%20food%20industry%E2%80%94Recent.pdf>
- [53] Siddiqui, A. A., Ahmad, A. W., Yang, H. K., & Lee, C. (2012, February). ZigBee based energy efficient outdoor lighting control system. In *Advanced Communication Technology (ICACT), 2012 14th International Conference on* (pp. 916-919). IEEE. Recuperado de, [http://www.icact.org/upload/2012/0549/20120549\\_finalpaper.pdf](http://www.icact.org/upload/2012/0549/20120549_finalpaper.pdf)
- [54] Falconí Cepeda, L. F., & Jimenez Yedra, C. R. (2010). Estudio e Implementación de Domótica Activado por Comandos de Voz y Comunicación en Zigbee. Recuperado de, <http://dspace.espace.edu.ec/bitstream/123456789/165/1/38T00156.pdf>
- [55] Willig, A., Matheus, K., & Wolisz, A. (2005). Wireless technology in industrial networks. *Proceedings of the IEEE*, 93(6), 1130-1151.
- [56] Egan, D. (2005). The Emergence of ZigBee in building automation and industrial controls. *Computing and Control Engineering*, 16(2), 14-19.
- [57] Osorio, J. A. C., Garzón, H. B. C., & Giraldo, E. E. (2008). propuesta de aplicación medición del consumo de agua domiciliaria utilizando tecnología inalámbrica ZigBee. *Scientia et Technica*, 2(39), 43-47. Recuperado de, <http://revistas.utp.edu.co/index.php/revistaciencia/article/view/3151/1913>
- [58] Álvarez, F. L. S., & Trejos, E. D. (2011). Modelo de Gestión de Demanda Energética Usando Tecnologías Inalámbricas. *Scientia et Technica*, 2(51), 175-180. Recuperado de, <http://200.21.217.140/index.php/revistaciencia/article/viewFile/7899/4701>
- [59] Geer, D. (2005). Users make a Beeline for ZigBee sensor technology. *Computer*, 38(12), 16-19.
- [60] Qinqin, Z. Y. L. Z. W. (2005). ZigBee Wireless Communication Technology and Investigation on Its Application [J]. *Process Automation Instrumentation*, 6, 002.