



UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL

SISTEMA DE POSGRADO
MAESTRÍA EN TELECOMUNICACIONES

TEMA:

**“ANÁLISIS Y EVALUACIÓN DEL PARÁMETRO DE CALIDAD DE
SERVICIO (QoS) EN RED ZIGBEE CON UN NODO COORDINADOR”**

AUTORA

ROMERO GARCÍA, NATALIA VANESSA

**TRABAJO DE TITULACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL GRADO
DE
MAGISTER EN TELECOMUNICACIONES**

TUTOR:

MSC. MANUEL ROMERO PAZ

Guayaquil, 24 de Agosto del 2017



UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL

SISTEMA DE POSGRADO
MAESTRÍA EN TELECOMUNICACIONES

CERTIFICACIÓN

Certificamos que el presente trabajo fue realizado en su totalidad por **Romero García, Natalia Vanessa** como requerimiento parcial para la obtención del Título de Magíster en Telecomunicaciones.

TUTOR

MSc. Manuel Romero Paz

DIRECTOR DEL PROGRAMA

MSc. Manuel Romero Paz

Guayaquil, 24 de Agosto del 2017



UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL

SISTEMA DE POSGRADO

MAESTRÍA EN TELECOMUNICACIONES

DECLARACIÓN DE RESPONSABILIDAD

Yo, **Romero García, Natalia Vanessa**

DECLARO QUE:

El trabajo de Titulación “**Análisis y evaluación del parámetro de calidad de servicio (QoS) en red Zigbee con un nodo coordinador**”, previa a la obtención del Título de **Magíster en Telecomunicaciones**, ha sido desarrollado respetando derechos intelectuales de terceros conforme las citas que constan en el documento, cuyas fuentes se incorporan en las referencias o bibliografías. Consecuentemente este trabajo es de mi total autoría.

En virtud de esta declaración, me responsabilizo del contenido, veracidad y alcance del Trabajo de Titulación referido.

Guayaquil, 24 de Agosto del 2017

La Autora

Romero García, Natalia Vanessa



UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL

SISTEMA DE POSGRADO
MAESTRÍA EN TELECOMUNICACIONES

AUTORIZACIÓN

Yo, **Romero García, Natalia Vanessa**

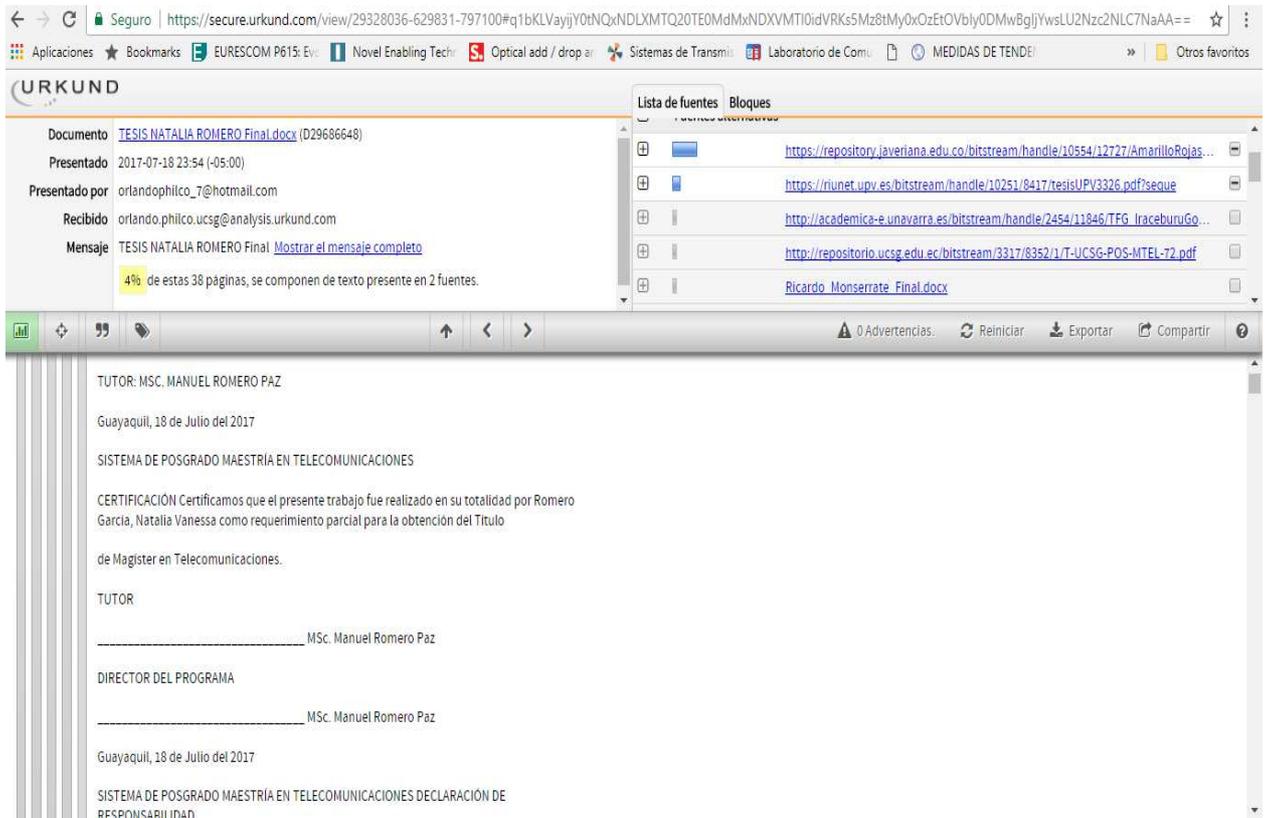
Autorizo a la Universidad Católica de Santiago de Guayaquil a la **publicación**, en la biblioteca de la institución del Trabajo de Titulación de Titulación, “**Análisis y evaluación del parámetro de calidad de servicio (QoS) en red Zigbee con un nodo coordinador**”, cuyo contenido, ideas y criterios son de mi exclusiva responsabilidad y total autoría.

Guayaquil, 24 de Agosto del 2017

La Autora

Romero García, Natalia Vanessa

REPORTE URKUND



The screenshot displays the URKUND web interface. The top navigation bar includes the URKUND logo and a 'Lista de fuentes' (List of sources) tab. The main content area shows document details for 'TESIS NATALIA ROMERO Final.docx' (ID: D29686648), presented on 2017-07-18 23:54 (-05:00) by 'ortlandophilco_7@hotmail.com'. The document is received by 'ortlando.philco.ucsg@analysis.orkund.com'. A message indicates that 4% of the 38 pages are composed of text from 2 sources. The 'Lista de fuentes' panel on the right lists several sources, including repositories from Javeriana, UNIV, UNAVARRA, and UCSC, along with a document titled 'Ricardo Monserrate_Final.docx'. The bottom section of the screenshot shows a certification text in Spanish, signed by MSc. Manuel Romero Paz, Director of the program, dated July 18, 2017, in Guayaquil. The text certifies the work of Natalia Vanessa Garcia for a partial requirement for a Master's degree in Telecommunications.

Reporte Urkund del Trabajo de Titulación de Maestría Telecomunicaciones denominado: Análisis y evaluación del parámetro de calidad de servicio (QoS) en red Zigbee con un nodo coordinador, de la ingeniera Natalia Romero al 4% de coincidencias.

Atentamente.

MSc. Orlando Philco Asqui

DEDICATORIA

Dedico este proyecto a mi madre, mi esposo y a mi hija cuyo amor, confianza y ejemplo de abnegación sublime han sido pilar fundamental en la formación de mi vida profesional, a mi hermana, familiares y amigos por ese apoyo incondicional que me dieron en su debido momento los cuales me ayudaron con sus experiencias y consejos a cumplir las metas y convertirme en una persona de éxito.

A mi tutor por ayudarme a realizar un trabajo digno que sirva de ejemplo a las generaciones venideras como una guía en el camino de la superación como Magister en Telecomunicaciones de la República.

Romero García, Natalia Vanessa

AGRADECIMIENTO

Agradezco en primer lugar a Dios por haberme brindado la fortaleza y sabiduría espiritual para lograr culminar este masterado. Agradezco a los pilares de mi vida mi madre, mi esposo y mi hija que con su ayuda espiritual, moral, económica y sus sabios consejos han sabido guiarme por el camino del bien y así llegar a convertirme en un profesional útil a la sociedad y por ende a la patria, a mi tutor que apporto grandemente en el proyecto compartiendo sus experiencias y conocimientos intelectuales.

A las autoridades, personal docente, administrativo de nuestra querida universidad por permitir exitosamente la culminación de este proyecto.

Romero García, Natalia Vanessa



UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL

SISTEMA DE POSGRADO
MAESTRÍA EN TELECOMUNICACIONES

TRIBUNAL DE SUSTENTACIÓN

MSc. Manuel Romero Paz

TUTOR

MSc. Manuel Romero Paz

DIRECTOR DEL PROGRAMA

MSc. Luis Córdova Rivadeneira

REVISOR

MSc. Orlando Philco Asqui

REVISOR

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE TABLAS	XII
ÍNDICE DE FIGURAS	XIII
RESUMEN.....	XV
ABSTRACT	XVI
CAPÍTULO I: GENERALIDADES DE LA INVESTIGACIÓN.....	1
INTRODUCCIÓN	1
1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	3
1.2 OBJETIVO GENERAL.....	3
1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	3
1.4 JUSTIFICACIÓN	3
1.5 HIPÓTESIS	3
1.6 METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN.....	3
CAPÍTULO II: REDES CON ESTANDAR IEEE 802.14.5.....	5
2.1 WPAN	5
2.2 BLUETOOTH	6
2.2.1 <i>Bluetooth Low Energy</i>	8
2.3 ZIGBEE	8
2.3.1 <i>Frecuencias de operación de Zigbee</i>	11
2.3.2 <i>Tipos de dispositivos Zigbee</i>	12
2.3.3 <i>Topologías de Zigbee</i>	13
2.3.4 <i>Capacidad de red y asignación de direcciones de red</i>	15
2.4 EL PROTOCOLO ZIGBEE	16

2.5 CAPAS DEL MODELO OSI PARA ZIGBEE	16
2.5.1 Descripción general de la Capa Red	18
2.5.2 Formatos de trama	20
2.5.3 Formato de cada uno de los tipos de trama.....	24
2.5.4 Programación de la transmisión de beacons	25
2.6 TÉCNICAS DE ENRUTAMIENTO EN RED DE SENSORES INALÁMBRICOS	27
2.6.1 Resumen de protocolos de enrutamiento.....	28
2.7 POLÍTICAS DE CALIDAD DE SERVICIO QOS	29
2.7.1 Calidad de servicio en red Zigbee	30
CAPITULO III: DISEÑO VIRTUAL DE RED ZIGBEE CON UN SOLO COORDINADOR	31
3.1 SELECCIÓN DEL SIMULADOR PARA RED ZIGBEE	31
3.1.1 Modelo de Simulación en el Dominio de Red (Modelo de Red)	31
3.1.2 Modelo de Simulación en el Dominio de Nodo (Modelo de Nodo).....	32
3.1.3 Modelo de Simulación en el Dominio de Proceso (Modelo de Proceso).....	34
3.2 ATRIBUTOS DE SIMULACIÓN DEL CONSUMO ENERGÉTICO.....	35
3.3 PARÁMETROS DE UN NODO COORDINADOR ZIGBEE.....	35
3.4 DESCRIPCIÓN DE LOS PARÁMETROS DE UN NODO TIPO ROUTER	37
3.5 DESCRIPCIÓN DE PARÁMETROS DE UN NODO TIPO DISPOSITIVO FINAL	38
3.6 DOMINIOS DEL MODELO DE SIMULACIÓN	39
3.6.1 Dominio del Modelo de Red.....	39
3.6.2 Dominio del Modelo de Nodo.....	40
3.7 CAPA FÍSICA	42
3.7.1 Módulo antena, módulo transmisor y módulo receptor.....	42
3.7.2 Subcapa MAC.....	44

3.7.3 <i>Capa de Red</i>	44
3.7.4 <i>Capa de Transporte</i>	45
3.7.5 <i>Capa de Aplicación</i>	45
3.8 LA VALIDACIÓN DE UN MODELO DE SIMULACIÓN	45
3.8.1 <i>Criterio para la Terminación del Modelo</i>	46
CAPITULO IV: RESULTADOS EVALUACIÓN DE RED ZIGBEE	48
4.1 PARÁMETRO DE CONSUMO DE ENERGÍA	48
4.2 MEDICIONES DE TRÁFICO DE DATOS DEL DISPOSITIVO FINAL HACIA EL COORDINADOR.....	51
4.3 RESULTADOS DE GENERALES DEL RENDIMIENTO DE RED ZIGBEE.....	57
4.4 ANÁLISIS DE RESULTADOS QoS EN RED ZIGBEE	63
CONCLUSIONES	65
RECOMENDACIONES.....	67
GLOSARIO	71

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2. 1 Potencia y alcance de Bluetooth, según la clase.....	7
Tabla 2. 2 Ancho de banda en las diferentes generaciones Bluetooth.....	8
Tabla 2. 3 Comparaciones de Wifi, Bluetooth y Zigbee.....	9
Tabla 2. 4. Configuraciones permitidas de los sub campos del control de trama.....	21
Tabla 2. 5 Características de 2 tipos de enrutamientos para WSN.....	29
Tabla 3. 1 Capa de red para cada uno de los tipos de nodo.....	44
Tabla 4. 1 Parámetros generales de la red Zigbee.....	58
Tabla 4. 2. Parámetros de Potencia.....	58
Tabla 4. 3 Parámetros de los nodos.....	58
Tabla 4. 4 Retardo promedio de la simulación.....	62

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2. 1 Representación de una red Zigbee	13
Figura 2. 2. Topologías Zigbee	14
Figura 2. 3 Pila de protocolos Zigbee	17
Figura 2. 4. Formato general de la trama de red (NWK)	20
Figura 2. 5. Campo control de trama	21
Figura 2. 6 Formato del campo control multicast.....	23
Figura 2. 7 Formato del campo sub trama de la ruta de origen.....	23
Figura 2. 8. Formato de la trama de datos	24
Figura 2. 9. Formato de la trama de comandos NWK	25
Figura 2. 10. Estructura típica de la trama para un dispositivo con beacon	26
Figura 2. 11. Clasificación de protocolos de enrutamiento para WSN.....	28
Figura 3. 1 Diseño de red Zigbee en topología árbol y topología de red sobre OPNET (derecha).....	32
Figura 3. 2 Modelo de nodo para Dispositivo Final (izquierda), Router (centro) y Coordinador (derecha)	33
Figura 3. 3 Atributos de un nodo coordinador	35
Figura 3. 4 Parámetros (atributos) para configurar un nodo tipo Coordinador ZigBee ...	36
Figura 3. 5 Opciones para la carga inicial de la batería del nodo.....	36
Figura 3. 6 Opciones para la potencia de transmisión del radio transmisor	36
Figura 3. 7 Parámetros (atributos) para configurar un nodo de tipo Router.....	38
Figura 3. 8 Parámetros (atributos) para configurar un nodo de tipo Dispositivo Final....	39
Figura 3. 9 Topología en árbol con su respectivo direccionamiento	40
Figura 3. 10. Modelo general de un nodo IEEE 802.15.4/ZigBee	41
Figura 3. 11 Secuencia de ejecución para una transmisión de datos inalámbricos	43
Figura 3. 12 Metodología para el desarrollo del modelo de simulación	46
Figura 4. 1 Topología de red (un coordinador ZigBee con un dispositivo final).....	48

Figura 4. 2 Consumo de energía en función del tiempo para la topología de red de la figura 4.1	49
Figura 4. 3 Tráfico promedio de envío y recepción de paquetes de la Figura 4.1.....	49
Figura 4. 4. Retardo sufrido por los paquetes de la topología de red de la Figura 4.1.....	50
Figura 4. 5 Topología igual a la de la Figura 4.1, con cambio el orden de la beacon a 6	50
Figura 4. 6 Consumo de energía de los dispositivos de la topología de red de la Figura 4.5	51
Figura 4. 7 Tráfico promedio de envío y recepción de paquetes para la topología de red (Figura 4.5)	52
Figura 4. 8 Retardo sufrido por los paquetes de la topología de red de la Figura 4.5.....	52
Figura 4. 9 Topología igual a la de las Figura 4.1 y Figura 4.5, con orden de beacon igual a 12.....	53
Figura 4. 10 Consumo de energía de los dispositivos de la topología de red de la Figura 4.9	54
Figura 4. 11 Tráfico promedio de envío y recepción de paquetes de la Figura 4.9.....	55
Figura 4. 12 Retardo sufrido por los paquetes de la topología de red de la Figura 4.9....	55
Figura 4. 13 Topología de red; un router (R3) reenvía datos desde dispositivo final 5 (DF5), hacia el coordinador Zigbee.....	56
Figura 4. 14 Consumo de energía de los dispositivos de la topología de red de la Figura 4.13	57
Figura 4. 15 Función polinomial grado 3 para el throughput de la red.....	59
Figura 4. 16 Función polinomial grado 3 para el delay de la red.....	60
Figura 4. 17 Throughput de la red vs número el de nodos	60
Figura 4. 18 Tiempo de Adquisición entre Muestras del Software	61
Figura 4. 19 Retardo Promedio de un Nodo Espec ífico de la Red.....	62

Resumen

En el presente trabajo se expone una visión general de la red de sensores inalámbricos (Wireless Sensor Network, WSN), en particular la red Zigbee, esta tecnología es clave en la realización de la plataforma denominada Internet de las Cosas, que cambia la forma de la transmisión de información entre las cosas, u objetos, al fusionar el mundo físico objetivo junto con la red de internet. Se analiza la literatura científica acerca de las políticas de la calidad de servicio (Quality of Service, QoS) en la transmisión de datos en redes Zigbee, ya que presentan problemas que afectan al envío y recepción de datos. Se utiliza metodología como la analítica, la exploratoria y la empírica, se debe desarrollar una aplicación. Una red Zigbee contiene 3 dispositivos principales, coordinador, router y dispositivos finales, la literatura científica ha nombrado la comunicación entre un coordinador y router o entre un router y un dispositivo final como comunicación nodo padre-nodo hijo. La distancia alrededor del coordinador con sus nodos hijos se define como diferentes factores de área. El factor de área se denomina zona y cada zona tiene muchos dispositivos finales bajo un enrutador. Cada zona tiene un conjunto de atributos de prioridad para definir su prioridad.

Palabras Claves: Internet de las cosas, Zigbee, Coordinador, Supervisión, QoS.

Abstract

The present work presents an overview of the Wireless Sensor Network (WSN), in particular the Zigbee network, this technology is key in the realization of the platform called Internet of Things, that changes the way of the transmission of information between things, or objects, by merging the physical world objective together with the internet network. We analyze the scientific literature on Quality of Service (QoS) policies in data transmission in Zigbee networks, since they present problems that affect the sending and receiving of data. We use methodology such as analytical, exploratory and empirical, an application must be developed. A Zigbee network contains 3 main devices, coordinator, router and end devices, the scientific literature has named the communication between a coordinator and router or between a router and an end device as communication parent-child node. The distance around the coordinator with its child nodes is defined as different area factors. The area factor is called the zone, and each zone has many end devices under one router. Each zone has a set of priority attributes to define its priority.

Keywords: Internet of Things, Zigbee, Coordinator, Supervision, QoS.

CAPÍTULO I: GENERALIDADES DE LA INVESTIGACIÓN

INTRODUCCIÓN

El estándar IEEE 802.15.4 conocido como *Zigbee* es un estándar abierto, ésta red especifica un conjunto de protocolos de comunicación de alto nivel que se utilizan para crear redes de área personal con bajo consumo de energía. A su vez, *Zigbee* pretende ser más simple y menos costosa que otras redes inalámbricas de área personal (*Wireless Personal Area Network*, WPAN), tales como *Bluetooth* o *Wi-Fi*. Aunque la interoperabilidad es un factor que afecta un sistema de monitoreo y control diseñado bajo este estándar, es esencial evaluar parámetros de calidad de servicio QoS (*Quality of Service*) con el fin de plantear topologías eficientes.

Zigbee proporciona la red de comunicaciones, la seguridad con algoritmos embebidos y los servicios de apoyo para aplicaciones que operan en determinadas capas del modelo de referencia OSI (*Open Systems Interconnection*), estas son; capa del Control de Acceso (*Media Access Control*, MAC) y la capa física (*Physical layer*, PHY), y una topología de red tan variada como sus diversas aplicaciones, claro está que aquella elegida debe ser la más apropiada para la aplicación final deseada.

Las aplicaciones incluyen la automatización del hogar, recopilación de datos de dispositivos para telemedicina y monitoreo de la salud, entre otras necesidades de bajo ancho de banda y de baja potencia.

Una red *Zigbee* contiene 3 dispositivos principales, cuales son: coordinador, *router* y dispositivos finales. La literatura científica ha mencionado la comunicación entre un coordinador y *router* o entre un *router* y un dispositivo final, como comunicación nodo padre- nodo hijo. Los dispositivos finales y enrutadores siempre tienen para la comunicación una distancia con el coordinador. Esta distancia alrededor del coordinador se define como diferentes factores de área. Los factores de área se denominan zona y cada zona tiene muchos dispositivos finales bajo un enrutador; cada zona tiene un conjunto de atributos de prioridad para definir su prioridad.

Asimismo, los nodos finales también tienen valores de prioridad en su zona, cuando los nodos de diferentes zonas están tratando de comunicarse a través de nodos

intermedios, los routers o el coordinador siempre comprueban sus valores de prioridad.

En este trabajo se hace también análisis a los diversos tipos de protocolos de enrutamiento, algunos autores la clasifican; en protocolos planos y protocolos jerárquicos, estos últimos se desempeñan de forma óptima para maximizar la energía de la red en WSN.

El enrutamiento implica la recuperación de la trayectoria de un mensaje, que se comunica desde un nodo de origen hacia un nodo de destino. Así como el ahorro energético de la red es vital, también es importante analizar y evaluar parámetros de calidad de servicio (QoS), retardo de datos, tasa transferencia o throughput, etc.

1.1 Planteamiento del Problema

La necesidad de obtener las características de calidad de servicio QoS en transmisión de datos en una red Zigbee con un solo coordinador.

1.2 Objetivo General

Realizar un análisis de la calidad de servicio en red Zigbee y evaluación de una red con un nodo coordinador con calidad de servicio.

1.3 Objetivos Específicos

- Caracterizar las redes del estándar basada en IEEE 802.15.4
- Analizar parámetros de comunicación en Zigbee para ahorro de energía.
- Evaluar parámetros QoS en red Zigbee con un solo coordinador

1.4 Justificación

Las políticas de calidad de servicio QoS proporcionan la capacidad de proveer garantías particulares para que los flujos de tráfico operen de forma eficiente en relación con las características de la red, la cual se analiza y se debe monitorear aspectos como la pérdida de paquetes, retardo experimentado por los flujos de datos. Alcanzar estos aspectos técnicos converge en una red de área personal eficiente.

1.5 Hipótesis

La plataforma Zigbee obtiene mejor resultado en el tráfico de datos con el método de sincronización basado en la zona y la prioridad individual del nodo final.

1.6 Metodología de la Investigación

La metodología que se utilizará en este trabajo de titulación para el grado académico de Magister en Telecomunicaciones, utiliza métodos elementales de investigación.

Es exploratoria por el estudio de las políticas de calidad de servicio QoS en una red bajo el estándar IEEE 802.15.4, particularmente de Zigbee.

Se utiliza la metodología descriptiva para caracterizar redes como Bluetooth y su desarrollo de QoS en soluciones a problemas de rendimiento de dichas redes. En

este trabajo también se empleará la metodología pre-experimental, porque se puede simular con un software como OPNET el desempeño de una red Zigbee con un solo coordinador.

Finalmente se utiliza la metodología analítica porque se determina la política de la calidad de servicio, como propuesta de mejorar el desempeño de comunicación en redes bajo el estándar IEEE 802.15.4.

CAPÍTULO II: REDES CON ESTÁNDAR IEEE 802.14.5

El Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos (*Institute of Electrical and Electronics Engineers, IEEE*) identifica los estándares 802.15 como redes WPAN y están categorizados de acuerdo a diferentes aplicaciones. Por ejemplo, es 802.15.1 para Bluetooth, 802.15.3 es una categoría de alta velocidad de datos para las tecnologías de banda ultra ancha, 802.15.4 especifica la red Zigbee y el 802.15.6 para redes de área corporal (*Wireless Body Area Networks, WBAN* o *BAN*).

Actualmente, existen muchos tipos de redes que pueden ser enmarcados dentro de las WSNs. Estos son tipos de WSNs definidos para aplicaciones particulares, como, por ejemplo, las redes inalámbricas de sensores multimedia (*wireless sensor multimedia networks, WSMNs*), las redes de sensores submarinas (*underwater sensor networks, USNs*), las redes de área corporal (*body area networks, BANs*), las redes de área vehicular (*vehicular area sensor networks, VANs*), entre otros.

Actualmente, este tipo de redes también se comienza a fusionar con el concepto de redes bajo el paradigma de Internet de las Cosas (*Internet of Things, IoT*), conocidos también como sistemas pervasivos y obicuos, o como ambientes inteligentes.

Las redes de sensores inalámbricos (WSN) son capaces de detectar eficientemente en diversos parámetros con alta precisión. Básicamente una red de sensores inalámbricos se compone de tres elementos principales; unidad de sensor (para tomar mediciones), unidad de cálculo (para procesar los datos) y la unidad de comunicación (para permitir la comunicación entre los nodos inalámbricos). (Risteska, Chatzimisios, & Avramova, 2014).

Las diferentes tecnologías de radio se pueden utilizar para la comunicación, tales como Zigbee, Wifi, Bluetooth y Sistemas Globales para Comunicaciones Móviles (*Global System for Mobile communications, GSM*).

2.1 WPAN

La norma 802.15 es probablemente el mayor estándar para WPAN. La categoría 802.15.4 o Zigbee fue desarrollada para supervisar y controlar las aplicaciones de

baja velocidad de datos y aplicaciones de baja potencia de consumo. (Fernández, Ordieres, González, & Alba, 2009).

Zigbee es diseñado por la Zigbee Alliance, la cual define un conjunto estandarizado de soluciones que pueden ser implementadas por cualquier fabricante. Con protocolos de comunicación inalámbrica en modelo abierto, se puede utilizar de forma similar a Bluetooth o Wifi para transferir datos; Sin embargo, Zigbee se utiliza para enviar mucho menos datos a la vez. (Glen & J. Moreno, 2012).

El objetivo principal de Zigbee es proporcionar una solución de bajo costo para redes inalámbricas de área personal. Está diseñado específicamente para redes de sensores inalámbricos y para encajar en microcontroladores de 8 bits, aunque se dispone de soluciones de 16 y 32 bits. En general, está planteado para ser confiable, rentable y seguro, así como tener bajo consumo de energía y transmitir a bajas velocidades de datos. El bajo consumo de energía de los dispositivos Zigbee conduce a prolongar la duración de la batería, que es un componente importante de esta solución. (Wilamowski & Irwin, 2011).

2.2 Bluetooth

En la actualidad existe un sin número de dispositivos habilitados, incluyendo un alto porcentaje de los teléfonos móviles vendidos en el mundo, para los que Bluetooth se presenta como la tecnología inalámbrica ideal para la conexión de dispositivos electrónicos. Por tanto, se puede determinar que *Bluetooth* es una especificación industrial para redes WPAN, que posibilita la transmisión de voz y datos entre diferentes dispositivos mediante un enlace por radiofrecuencia segura y globalmente libre. (Barbolla Asenjo, 2009).

Bluetooth es una tecnología diseñada para ofrecer conectividad a redes personales mediante dispositivos móviles, de forma económica. Dicha tecnología está respaldada por grandes fabricantes de dispositivos (Agere, Ericsson, IBM, Intel, Microsoft, Motorola, Nokia, Toshiba, etc.), que conforman desde 1999 el *Bluetooth Special Interest Group* (Bluetooth SIG), grupo destinado a realizar las especificaciones industriales de esta tecnología. El IEEE también desarrolla sus propios estándares para WPAN, bajo el estándar 802.15, que en su primera versión

aceptó en gran medida las especificaciones de Bluetooth. (Casar Corredera, 2005, págs. 32-33).

Por otro lado, otros autores como (Iraceburu González & Goicoechea Fernández, 2014) definen *Bluetooth* como un estándar de tecnología inalámbrica para el intercambio de datos a cortas distancias (empleando un enlace por radiofrecuencia en la banda ISM de 2,4 GHz), desde dispositivos fijos y móviles construyendo redes de área personal (*Personal Area Network*, PAN), pues, utiliza canales 79 canales RF (*Radio Frequency*) de $f = 2402 + k$ MHz siendo $k = 0.78$. El espacio entre los mismos, es de 1 MHz más unas bandas de guarda.

Además, Bluetooth permite conectar múltiples aparatos que dispongan de la tecnología, por ejemplo; computadores portátiles, PDAs (*Personal Digital Assistant*), teléfonos móviles, etc., formando *piconets*, en las que un dispositivo actúa como maestro y los otros como esclavos), y posibilita la conexión a una LAN (*Local Area Network*) o WAN (*Wide Area Network*) a través de un punto de acceso. (Casar Corredera, 2005)

Estos dispositivos se clasifican por clases: 1, 2 y 3, en referencia a su potencia de transmisión.

Tabla 2. 1 Potencia y alcance de Bluetooth, según la clase

Clase	Potencia máxima permitida (mW)	Potencia máxima permitida (dBm)	Alcance (aproximado)
Clase 1	100 mW	20 dBm	~100 metros
Clase 2	2.5 mW	4 dBm	~5-10 metros
Clase 3	1 mW	0 dBm	~1 metro

Fuente: Elaborada por la autora

Actualmente, Bluetooth SIG proporciona un sistema de aumento de velocidad y disminución de potencia (*Bluetooth Enhanced Data Rate*) que, según sus desarrolladores, permite triplicar la velocidad de las conexiones. (Casar Corredera, 2005, pág. 33)

La tecnología Bluetooth ha evolucionado considerablemente en los últimos años, y son ya varias las generaciones de ella que han existido, considerando mejoras en

ancho de banda, alcance o seguridad. Por lo tanto, los dispositivos pueden clasificarse, según su ancho de banda. Ver tabla 2.2.

Tabla 2. 2 Ancho de banda en las diferentes generaciones Bluetooth

Versión	Ancho de banda (BW)
Versión 1.2	1 Mbit/s
Versión 2.0 + EDR	3 Mbit/s
Versión 3.0 + HS	24 Mbit/s
Versión 4.0	32 Mbit/s

Fuente: Elaborada por la autora

2.2.1 Bluetooth Low Energy

También llamada *Bluetooth LE*, *Bluetooth ULP* y *Bluetooth Smart*, está creada para reducir eficazmente el consumo de energía manteniendo un rango de comunicación similar a *Bluetooth*.

BLE (*Bluetooth Low Energy*) es una tecnología todavía en desarrollo, pero actualmente, es compatible con la mayoría de los sistemas operativos (*IOS*, *Android*, *Windows Phone*, *Blackberry*, *OS X*, *Windows 8*), y se prevé que en 2018 más del 90% de los *smartphones* incluirán BLE. (Iraceburu González & Goicoechea Fernández, 2014).

2.3 Zigbee

La literatura científica al respecto coincide que la red Zigbee puede ofrecer las siguientes características:

- Bajo consumo de batería; un dispositivo final Zigbee tiene un consumo de 45mA transmitiendo y de 15mA en reposo, frente a los 40mA transmitiendo y 0.2mA en reposo que tiene el Bluetooth. Este menor consumo se debe a que el sistema Zigbee se queda la mayor parte del tiempo dormido, mientras que en una comunicación Bluetooth esto no se puede dar, y siempre se está transmitiendo y/o recibiendo. El nodo Zigbee podría funcionar durante meses o incluso años sin necesidad de reemplazar la pila o batería.
- Bajo costo.

- Baja velocidad de datos. La máxima velocidad de datos para un dispositivo Zigbee es 250 Kbps.
- Soporta hasta 65.000 nodos conectados en subredes de 255 nodos, frente a los 8 máximos de una subred Bluetooth.
- Puede establecer automáticamente su red.
- Utiliza paquetes pequeños en comparación con Wifi y Bluetooth.

La Tabla 2.3 muestra una comparación de características Zigbee con las de Wifi y Bluetooth.

Tabla 2. 3 Comparaciones de Wifi, Bluetooth y Zigbee

	WiFi IEEE 802.11	Bluetooth IEEE 802.15.1	ZigBee IEEE 802.15.4
Tipo de Modulación	BPSK, QPSK, COFDM, M-QAM	GFSK	BPSK, QPSK
Bandas de frecuencia	2,4 GHz, 5GHz	2,4 GHz	2,4 GHz, 868 MHz, 915 MHz
Duración de la batería (días)	0,1-5	1-7	100-700
Los nodos por red	30	7	65.000
Ancho de banda	2-100Mbps	1Mbps	20-250Kbps
Rango (metros)	1-100	1-10	1-75 y más
Topología	Árbol	Árbol	Estrella, árbol, árbol de clúster y malla
Seguridad	WEP, WPA2	64 bit, 128 Bit	128 bit, AES
Mecanismos de coexistencia	Espectro ensanchado por salto de frecuencia	Salto de frecuencia adaptativa	Selección por frecuencia dinámica

Fuente: Elaborado por la autora

La Tabla 2.3, muestra que Bluetooth, es similar en funcionalidad a Zigbee, pero no ofrece la variedad de topologías, y su corriente de espera es casi 70 veces más que Zigbee. De las tres redes inalámbricas bajo comparación, Zigbee es la única que ofrece topología de malla (mesh). Además, un dispositivo final Zigbee puede estar en modo de reposo y aun así mantener su asociación con su red.

Así entre sus principales aplicaciones, se puede indicar:

Energía Inteligente: Se puede utilizar para medir rápidamente los medidores de electricidad, gas y agua. La red Zigbee de energía inteligente permite la comunicación inalámbrica entre la infraestructura de medición avanzada (*Advanced Metering Infrastructure*, AMI) y la red doméstica de la zona; es decir, la red de energía inteligente se conectará a diversos electrodomésticos con la compañía de servicios públicos para la mejora de la eficiencia energética y la gestión de la demanda máxima.

Automatización de edificios comerciales: En este tipo de inmueble, se puede usar para supervisar el funcionamiento de los detectores de humo y la detección o presencia de fuego. Si un edificio de 50 pisos y en cada uno tiene 50 habitaciones, cada una equipada con un detector de humo, cada uno de estos por razones de seguridad se debe probar todos los meses. Esto requiere la comprobación de 2.500 habitaciones. En lugar de requerir que alguien pruebe manualmente los 2.500 detectores de humo, Zigbee permite a una estación central la supervisión a distancia de cada uno de ellos. Un dispositivo Zigbee también se puede utilizar para encender y apagar una luz sin necesidad de utilizar ningún cable. (XBee, 2016).

La domótica: Se puede utilizar para controlar de forma remota la iluminación, calefacción, refrigeración, y los mecanismos de bloqueo de puerta. También se puede controlar de forma remota los detectores de humo y sistemas de seguridad para el hogar

Atención hospitalaria: Este perfil se utiliza para supervisar la salud personal de un paciente en su domicilio sin limitar la movilidad del paciente. Por ejemplo, se puede controlar de forma remota la presión arterial y la frecuencia cardíaca. (XBee, 2016).

Aplicaciones de telecomunicaciones: Un dispositivo móvil Zigbee puede utilizarse para comunicarse con otros dispositivos de la misma tecnología y sus usuarios pueden enviar y recibir mensajes, tonos de llamada, avisos de contactos e imágenes.

Mando remoto para la electrónica de consumo (Zigbee RF4CE): En la actualidad, la mayoría de los mandos a distancia están utilizando la tecnología de infrarrojos (IR), que requiere línea de visión; Zigbee RF4CE es un protocolo que utiliza una frecuencia de radio (RF) para reemplazar la tecnología IR (*InfraRed*) para los

controladores remotos utilizados en la electrónica de consumo. (Anand & Chandel , 2014)

Supervisión de procesos industriales y el control: Se puede utilizar para el seguimiento y control de procesos industriales de forma inalámbrica. Por ejemplo, en el seguimiento del inventario, cada pieza de equipo puede ser etiquetado con un sensor inalámbrico y luego puede ser localizado por un nodo Zigbee. Este proceso se denomina identificación por radiofrecuencia (*Radio Frequency Identification*, RFID). Zigbee puede monitorizar el estado de la máquina y el rendimiento de los equipos de operación dentro de una planta; Zigbee puede grabar y transmitir información tan crítica como la temperatura, presión, caudal, nivel del tanque, la humedad y la vibración. (Risteska, Chatzimisios, & Avramova, 2014).

Logística y distribución; por ejemplo, en el seguimiento del inventario, cada pieza de equipo puede ser etiquetada con un sensor inalámbrico (bajo RFID) y luego puede ser localizado por un nodo Zigbee. Por aquello es considerada una red más sofisticada en comparación con Bluetooth o Wifi. (Elahi & Gschwender, 2009).

2.3.1 Frecuencias de operación de Zigbee

Zigbee tiene como principal objetivo, comunicar aplicaciones que requieren una comunicación segura, con baja tasa de envío y bajo consumo. Se basa en dispositivos inalámbricos operando en la banda ISM (*Industrial, Scientific and Medical*) para usos industriales, científicos y médicos (868 MHz, 915 MHz y 2.4 GHz) con una Modulación en Espectro Ensanchado por Secuencia Directa (*Direct Sequence Spread Spectrum*, DSSS), también conocida como Acceso Múltiple por División de Código en Secuencia Directa (*DS-Code Division Multiple Access*, DS-CDMA). En el rango de frecuencias de 2.4 GHz (banda más extendida) se definen 16 canales con un ancho de banda de 5 MHz. (Iraceburu González & Goicoechea Fernández, 2014, pág. 16).

Zigbee se integra en las redes de sensores inalámbricos, que ha incursionado los últimos años con aplicaciones en campos tan diversos como el militar, la domótica, la industria, la salud, entretenimiento y el monitoreo y control inteligente de sistemas de generación y distribución de energía denominados con el nombre genérico de *Smart Grid* (SG). (Agudelo Quiroz, 2011).

El estándar IEEE 802.15.4 y Zigbee definen diferentes tipos de dispositivos.

2.3.2 Tipos de dispositivos Zigbee

Según Zigbee Alliance, se definen los siguientes tipos de dispositivos:

Coordinador: Controla el ruteado y administra la red. Existe uno por *red*. Siempre necesita ser instalado primero el coordinador para el establecimiento del servicio de red Zigbee, al inicio de una nueva red PAN, es indispensable seleccionar el canal y el PAN ID. Puede ayudar a encaminar los datos a través de la red malla y permite unirse a la petición de ZR (*ZigBee Router*) y ZED (*ZigBee End Device*) (Fernández, Ordieres, González, & Alba, 2009).

Router: Interconecta diferentes nodos mediante direccionamiento. El primer router necesita unirse a la red, entonces se puede permitir que otra ZR + ZED para unir al PAN. No va a modo de suspensión.

Dispositivo final: Elemento pasivo que responde ante peticiones de otros dispositivos. Se pasa la mayor parte del tiempo dormido. Es alimentado por batería y no son compatibles con todos los dispositivos finales.

Según IEEE 802.15.4, los tipos de dispositivos pueden operar como:

FFD (*Full Function Device*)

RFD (*Reduced Function Device*) (Iraceburu González & Goicoechea Fernández, 2014)

Así, un nodo puede operar como FFD o RFD. Un nodo catalogado FFD puede realizar todas las tareas. Un nodo consta de un microcontrolador, un transceptor y una antena; utiliza perfiles de pila, que se desarrollan por software y puede ser utilizado para una amplia variedad de aplicaciones, por ejemplo, de control de iluminación, detector de humo, y de monitoreo de seguridad. Por lo tanto, un nodo puede soportar múltiples subunidades, y cada una tiene un objeto de aplicación que describe la función de la subunidad.

Un esquema de red Zigbee con sus tres tipos de dispositivos se muestra en la figura 2.1.

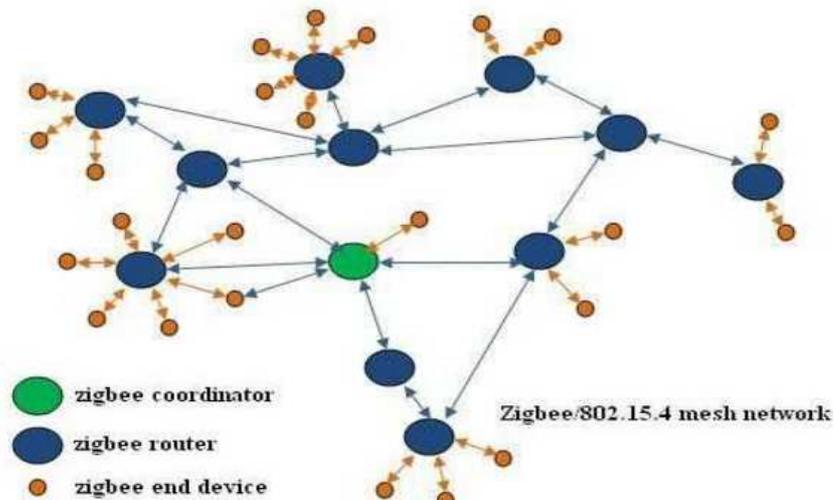


Figura 2. 1 Representación de una red Zigbee

Fuente: (Kochar Tech, 2012)

Como se muestra en la figura 2.1, la red Zigbee se compone de un coordinador ZC (ZC-ZigBee Coordinator), varios dispositivos router ZR y varios dispositivos finales ZED.

2.3.3 Topologías de Zigbee

A continuación, se detallan las diversas topologías de red Zigbee que se pueden formar con los dispositivos.

Punto a punto

- Topología más sencilla.
- Uno de los dispositivos es el coordinador y el otro puede ser un *router* o un dispositivo final.

Estrella

Esta topología se compone de un coordinador y varios dispositivos finales (nodos), el dispositivo final sólo se comunica con el coordinador. Cualquier intercambio de paquetes entre los dispositivos finales deben pasar por el coordinador. La desventaja de esta topología es que la operación de la red depende de su coordinador, y porque todos los paquetes entre los dispositivos deben pasar por el coordinador, el cual puede convertirse en un cuello de botella. (Barcell, 2010). En la figura 2.2 se muestran las topologías de comunicación bajo Zigbee.

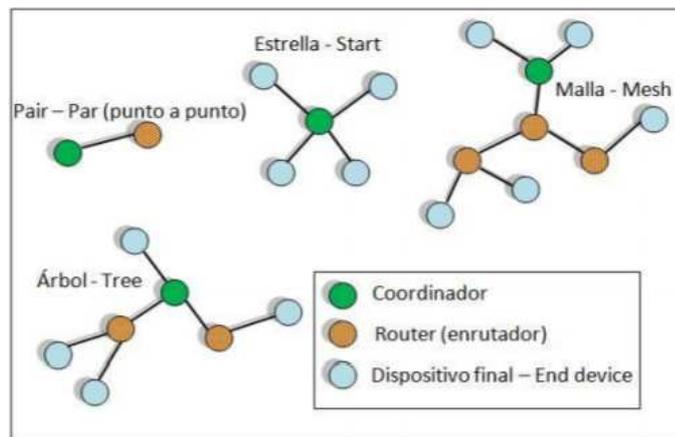


Figura 2. 2. Topologías Zigbee

Fuente: (Iraceburu González & Goicoechea Fernández, 2014)

La ventaja de la topología en estrella es que es simple y los paquetes pasan por un máximo de dos saltos para llegar a su destino. Todos los dispositivos de la red se pueden comunicar con el coordinador, pero no entre sí. (Glen & J. Moreno, 2012).

Malla

También referido como una red *peer-to-peer*, se compone de un coordinador, varios routers y dispositivos finales, como se muestra en la figura 2.2. Las siguientes son características de una topología Zigbee malla:

- Es una red de salto múltiple; los paquetes pasan a través de múltiples saltos para llegar a su destino.
- El alcance de una red se puede aumentar mediante la adición de más dispositivos a la red.
- Puede eliminar las zonas muertas.
- Permite la auto-curación, es decir que si durante la transmisión una ruta falla, el nodo encontrará un camino alternativo al destino.
- Los dispositivos pueden estar cerca el uno al otro para que usen menos energía.
- Cualquier dispositivo fuente puede comunicarse con cualquier dispositivo de destino en la red.
- En comparación con la topología estrella, la de malla requiere una mayor sobrecarga.
- Utiliza un protocolo de enrutamiento más complejo que la topología estrella.

Árbol

En esta topología, la red consta de un nodo central (raíz de árbol), denominado coordinador, que conecta a su vez a varios routers, y dispositivos finales, según la literatura científica estos últimos dispositivos se los llaman ‘nodos-hijos’ de la misma manera el nodo coordinador será conocido como ‘nodo-padre’. Varios artículos científicos (Dignani, 2011), (Aliaga, 2011), (Martínez & Conde, 2013), (Suárez, 2014) por consiguiente en topología árbol de una WSN citan la relación padre-hijo. Una analogía a nivel de comunicación industrial sería maestro-esclavo.

Características de esta topología son las siguientes:

- Los nodos ruteadores pueden tener nodos-hijos o nodos esclavos.
- Muestra comunicación directa solo a través de la comunicación nodo padre-nodo hijo o nodo maestro- nodo esclavo.
- Existe ruteo jerárquico con un único camino posible entre 2 nodos.

La función del router es extender la cobertura de la red. Los nodos finales que están conectados al coordinador o los routers, Solamente los routers y el coordinador tienen dispositivos finales, cada dispositivo final sólo es capaz de comunicarse con su ‘padre’ (router o coordinador). El coordinador y los routers pueden tener dispositivos finales y, por lo tanto, son los únicos dispositivos que pueden ser padres. (Iraceburu González & Goicoechea Fernández, 2014, págs. 15-16)

Cada agrupación se identifica mediante un ID (*Identification*) de clúster. Zigbee no es compatible con la topología árbol de clúster, pero IEEE 802.15.4 lo soporta. (Saldaña, 2011).

2.3.4 Capacidad de red y asignación de direcciones de red

La capacidad o profundidad de una red: se determina por el número de routers (saltos) desde el coordinador al dispositivo más alejado, dónde más lejos se define por el número de saltos. En una topología en estrella, la profundidad de una red es uno.

Número de dispositivos finales conectados a un router o coordinador: éste último establece el número máximo de dispositivos finales conectados a un router.

La asignación de direcciones: En una topología de árbol, cada coordinador contiene información acerca de la red, como el número máximo de nodos-hijos (el número de dispositivos finales conectados a cada router), el número máximo de routers, y utiliza esta información para asignar una dirección a cada enrutador. Los enrutadores, a continuación, asignan las direcciones de sus respectivos dispositivos finales (nodos-hijos). En una topología malla, sin embargo, cada router asigna una dirección al azar a sus respectivos dispositivos finales.

2.4 El protocolo Zigbee

Una red Zigbee se compone de varias capas de protocolos para funcionar; estas empiezan desde la capa Física, de Enlace de datos (MAC), de Red y de Aplicación. Para cada una de las 4 capas se utilizan protocolos, aunque en la capa MAC se utilizan algunos que deben ser evaluados cada cierto tiempo, por la idea de mejorar de forma eficiente el rendimiento de transmisión de paquetes en una red de este estándar.

Para obtener información detallada sobre protocolo de enrutamiento empleado en Zigbee, se puede revisar la RFC 3561 que determina el protocolo de enrutamiento Ad-hoc sobre demanda de Vector de Distancia (*Ad Hoc On-Demand Vector Routing*, AODV). (Shen & Song, 2016).

En el siguiente subcapítulo se describe el modelo OSI y las capas específicas, con mayor detalle donde opera la red Zigbee.

2.5 Capas del Modelo OSI para Zigbee

-Capa Física: Define las funciones con la capa de enlace de datos, los niveles de potencia del transmisor y la sensibilidad del receptor, transfiriendo los datos por medio de un dígito de 8 bits. Sus funciones son: canales, numeración de canales, detección de energía, medición de portadora, indicador de calidad del enlace, evaluación de canal libre, cliente, servidor entre capas e interfaz/área de datos, capa física, enlace de datos. Ver figura 2.3.

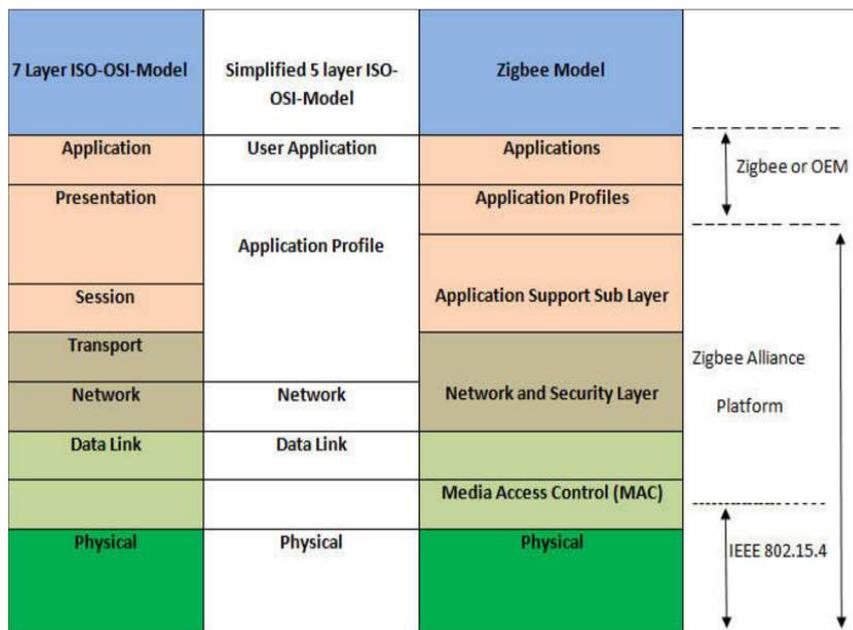


Figura 2. 3 Pila de protocolos Zigbee

Fuente: (Thakur, 2012)

-Capa de Enlace de datos: Provee la interfaz entre la capa física y la capa de red. Maneja los servicios y los datos. Sus funciones son: operación de la red usando balizas, espaciado entre tramas, CSMA-CA (*Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance*), nodo oculto y nodo expuesto, formato de la trama.

-Capa de Red: En esta capa se implementan las distintas topologías de red que Zigbee soporta (árbol, estrella y malla). Concede las funcionalidades para el armado y manejo de redes y una interfaz simple para las aplicaciones de usuarios. Se encarga de: establecer la red, configuración de dispositivos, enrutado, y seguridad.

-Capa de Aplicación: Nivel más alto de la especificación. Es la interfaz efectiva entre el nodo y el usuario. En él se ubican la mayor parte de los componentes definidos por la especificación, como la funcionalidad requerida para los dispositivos. El estándar Zigbee ofrece la opción de emplear perfiles en el desarrollo de aplicaciones. Un perfil de aplicación permite la interoperabilidad entre productos de diferentes fabricantes como si fuesen del mismo. La Zigbee Alliance define varios identificadores de perfil, un número de 16 bits de la capa de aplicación que define el perfil. (Iraceburu González & Goicoechea Fernández, 2014).

2.5.1 Descripción general de la Capa Red

La capa de red es requerida para proveer la funcionalidad que asegura la correcta operación de la sub capa MAC descrita en la norma IEEE 802.15.4, además provee una interfaz de servicio adecuada a la capa de aplicación. Para crear una interfaz con la capa de aplicación, la capa de red incluye dos entidades de servicio que proveen la funcionalidad necesaria. Estas entidades de servicio son; el servicio de datos y el servicio de gestión.

La entidad de datos (NLDE, *Network Layer Data Entity*) de la capa de red provee el servicio de transmisión de datos a través de su punto de acceso (SAP Service Access Point) asociado, el NLDE-SAP, y la entidad de gestión (NLME, *Network Layer Management Entity*) de la capa de red provee el servicio de gestión a través de su SAP asociado, el NLME-SAP. (Amarillo, 2012).

El NLME utiliza el NLDE para cumplir algunas de sus tareas de gestión y también mantiene una base de datos de los objetos gestionados, esta base de datos se conoce como base de información de red (NIB, *Network Information Base*).

2.5.1.1 Entidad de datos de la capa de red (NLDE)

La NLDE es la encargada de proveer un servicio de datos para permitir que una aplicación pueda transmitir una unidad de datos del protocolo de aplicación (APDU) entre dos o más dispositivos. Los dispositivos deben estar ubicados en la misma red.

La NLDE debe proveer los siguientes servicios:

- **Generación de la PDU a nivel de red (NPDU)**

La NLDE debe ser capaz de generar una NPDU desde la PDU de la sub capa application support a través de la adición del encabezado apropiado del protocolo.

- **Enrutamiento basado en la topología**

La NLDE debe ser capaz de transmitir una NPDU a un dispositivo adecuado que sea el destino final de la comunicación o el siguiente paso hacia su destino final en la cadena de comunicación.

- **Seguridad**

Asegura la autenticidad y la confidencialidad de una transmisión.

2.5.1.2 Entidad de gestión de la capa de red (NLME)

La NLME provee un servicio de gestión que permite a una aplicación interactuar con su pila.

La NLME provee los siguientes servicios:

- **Configurar un nuevo dispositivo:** Posee la capacidad de configurar la pila para que funcione como es requerido. Configura las opciones que incluye el inicio de su operación como coordinador Zigbee o la unión a una red ya existente.
- **Iniciar una red:** Es la capacidad de establecer una nueva red.
- **Unirse, re unirse o dejar una red:** Es la habilidad de unirse, re unirse o dejar una red sí como la habilidad de un coordinador Zigbee o un router Zigbee de pedirle a un dispositivo que deje la red.
- **Direccionamiento:** Es la capacidad de los coordinadores Zigbee y los routers Zigbee de asignar direcciones a los dispositivos que se unen a la red.
- **Descubrimiento de vecinos:** Es la habilidad de descubrir, grabar, y reportar información pertinente a los vecinos de un dispositivo que se encuentran a un salto.
- **Descubrimiento de la ruta:** Es la capacidad de descubrir y grabar caminos a través de la red, mediante la cual se los mensajes pueden ser eficientemente enrutados.
- **Control de la recepción:** Es la habilidad de un dispositivo de controlar cuando activar el receptor y por cuanto tiempo, habilitando la sincronización con la sub capa MAC o la recepción directa.
- **Enrutamiento:** Es la capacidad de enrutar usando diferentes mecanismos de enrutamiento como unicast, broadcast, multicast, o cualquier otro que pueda intercambiar eficientemente datos en la red. (Amarillo, 2012).

2.5.2 Formatos de trama

Se especifica el formato de la trama de la red (NPDU, *Network layer Protocol Data Unit*). Cada trama de la red consiste de los siguientes componentes básicos:

- El encabezado red, comprendido por el control de trama, direccionamiento e información de secuencia.
- La carga útil de la red, es de longitud variable y contiene información específica del tipo de trama.

Las tramas en la capa de red son descritas como una secuencia de campos en un orden descrito. Estos formatos de trama aquí descritos se representan en el orden en el cual deben ser transmitidos en la sub capa MAC, de izquierda a derecha, y en donde se transmite primero el bit que se encuentra más a la izquierda. Los bits dentro de cada campo se numeran desde 0 (el que está más a la izquierda y es el menos significativo) hasta $k-1$ (el que está más a la derecha y es el más significativo), donde la longitud de los campos es k bits. Los campos que tienen una longitud mayor a un octeto, se envían a la sub capa MAC en orden desde el octeto que contiene los bits de menor peso hasta el octeto que contiene los bits de mayor peso. (Amarillo, 2012).

2.5.2.1 Formato general de la trama NPDU

El formato de la trama de la red se compone de un encabezado de red y una carga útil de red. Los campos del encabezado de red aparecen en un orden fijo. El formato de la capa de red por sus primeras 3 iniciales en inglés NWK, debe ser como el que se muestra en la figura 2. 4.

Octetos:2	2	2	1	1	0/8	0/8	0/1	Variable	Variable
Control de trama	Dirección de destino	Dirección de origen	Radio	Numero de secuencia	Dirección IEEE de destino	Dirección IEEE de origen	Control <i>multicast</i>	Sub trama de la ruta de origen	Carga útil de la trama
<i>Encabezado NWK</i>									<i>Carga útil</i>

Figura 2. 4. Formato general de la trama de red (NWK)

Fuente: (Amarillo, 2012)

Campo control de trama

El campo control de trama tiene una longitud de 16 bits y contiene la información que define el tipo de trama, los campos de direccionamiento y secuencia, además de otras banderas de control. El campo control de trama debe tener el formato de la figura 2.5.

Bits: 0-1	2-5	6-7	8	9	10	11	12	13-15
Tipo de trama	Version del protocolo	Descubrir ruta	Bandera <i>multicast</i>	Seguridad	Ruta de origen	Dirección IEEE de destino	Dirección IEEE de origen	Reservado

Figura 2. 5. Campo control de trama

Fuente: (Amarillo, 2012)

La tabla 2.4 muestra las configuraciones permitidas para los sub campos del control de trama de las tramas NWK. Todas tramas listadas a continuación, tendrán el valor del sub campo tipo de trama igual a cero para indicar que son datos y un valor en el sub campo versión del protocolo, para indicar la versión del a especificación Zigbee implementada.

Tabla 2. 4. Configuraciones permitidas de los sub campos del control de trama

Método de transmisión de datos	de	Descubrir ruta	Multicast	Seguridad	Dirección IEEE de destino	Dirección IEEE de origen
Unicast		00 o 01	0	0 o 1	0 o 1	0 o 1
Broadcast		00	0	0 o 1	0	0 o 1
Multicast		00	1	0 o 1	0	0 o 1
Origen enrutado		00	0	0 o 1	0 o 1	0 o 1

Fuente: (Amarillo, 2012)

Campo dirección de destino

El campo dirección de destino siempre estará presente y tendrá 2 octetos de longitud. Si el sub campo bandera multicast del campo control de trama tiene el valor 0, el campo dirección de destino debe mantener direcciones de red de 16 bits para el dispositivo de destino, o direcciones broadcast. Si el sub campo bandera multicast tiene el valor 1, el campo dirección de destino mantendrá el Group ID de 16 bits del grupo multicast de destino. Todas las direcciones de red de un dispositivo deben ser puestas al valor del atributo macShortAddress de la PIB de la MAC.

Campo dirección de origen

El campo dirección de origen siempre debe estar presente. Tiene 2 octetos de longitud y mantiene las direcciones de red del dispositivo de origen de la trama.

Campo radio

El campo radio siempre está presente. Este debe tener 1 octeto de longitud y especifica el rango de una transmisión con radio limitado. Este campo se disminuye uno a uno en cada dispositivo receptor.

Campo número de secuencia

El campo número de secuencia está presente en cada trama y tiene un octeto de longitud. El valor del número de secuencia debe ser incrementado en 1 con cada trama nueva que se transmita. El valor del campo dirección de origen y el del campo número de secuencia de una trama, son tomados como una pareja y se usan para darle un identificador único a la trama dentro de las restricciones impuestas por el octeto de número de secuencia.

Campo dirección IEEE de destino

El campo dirección IEEE de destino, si está presente, contiene las direcciones IEEE de 64 bits correspondientes a las direcciones de red de 16 bits contenidas en el campo dirección de destino del encabezado NWK. Tras la recepción de una trama que contiene unas direcciones IEEE de 64 bits, el contenido del nwkAddressMap y la tabla de vecinos, deben ser revisados para ver si hay consistencia, y actualizarlos si es necesario. Si la dirección de red de 16 bits es una dirección broadcast o multicast entonces el campo dirección IEEE de destino no debe estar presente.

Campo dirección IEEE de origen

El campo dirección IEEE de origen, si está presente, contiene la dirección IEEE de 64 bits que corresponde a la dirección de red de 16 bits contenida en el campo dirección de origen del encabezado de la NWK. Tras la recepción de una trama que contiene una dirección IEEE de 64 bits, el contenido del nwkAddressMap y la tabla de vecinos deben ser revisados para verificar su consistencia, y actualizarlos en caso de que sea necesario. (Amarillo, 2012).

Campo control multicast

El campo control multicast tiene un octeto de longitud y debe estar presente si el sub campo bandera multicast tiene un valor igual a 1. Este campo se divide en tres sub campos como se muestra en la figura 2.6.

Bits:0-1	2-4	5-7
Modo multicast	Radio del no miembro	Radio máximo del no miembro

Figura 2. 6 Formato del campo control multicast

Fuente: autora

Campo sub trama de la ruta de origen

El campo sub trama de la ruta de origen está presente únicamente si el sub campo ruta de origen del campo control de trama tiene el valor de 1. Este se divide en tres sub campos como se muestra en la figura 2.7.

Octetos:1	1	Variable
Cuenta de relevos	Índice de relevos	Lista de relevos

Figura 2. 7 Formato del campo sub trama de la ruta de origen

Fuente: autora

Campo Carga útil de la trama

El campo carga útil de la trama tiene una longitud variable y contiene información específica de cada uno de los tipos de trama.

2.5.3 Formato de cada uno de los tipos de trama

Hay dos tipos de trama definidos para la NWK: datos y comandos NWK, cada uno de estos tipos de trama se describen a continuación.

Formato de la trama de datos. - El formato de la trama de datos debe ser como el que se muestra en la siguiente figura 2.8.

Octetos:2	Variable	Variable
Control de trama	Campos de enrutamiento	Carga útil de datos
Encabezado de la NWK		Carga útil de la NWK

Figura 2. 8. Formato de la trama de datos

Fuente: autora

El orden de los campos de la trama de datos debe cumplir con el formato general de la trama NWK de la Figura 2.4.

Campo encabezado de la NWK de la trama de datos. - El campo encabezado de la NWK de la trama de datos debe contener el campo control de trama y la combinación apropiada de los campos de enrutamiento como es requerido.

En el campo control de trama, el sub campo control de trama debe contener el valor que indica una trama de datos. El resto de los sub campos deben ser puestos de acuerdo al uso deseado para la trama de datos. (Amarillo, 2012).

Los campos de enrutamiento deben tener una combinación apropiada de direcciones y campos de broadcast, dependiendo de las configuraciones en el campo control de trama (ver figura 2,5).

Campo carga útil de datos. - El campo carga útil de datos de la trama de datos contiene la secuencia de octetos que la capa superior siguiente le ha pedido transmitir a la capa NWK.

Formato de la trama de comandos de la NWK. - La trama de comandos de la NWK debe tener el formato que se ilustra en la figura 2.9.

Octetos:2	Variable	1	Variable
Control de trama	Campos de Enrutamiento	Identificador de comandos NWK	Carga útil de los comandos NWK
Encabezado NWK		Carga útil de la NWK	

Figura 2. 9. Formato de la trama de comandos NWK

Fuente: autora

El orden de los campos de la trama de comandos de la capa de red (NWK) debe desempeñarse con el orden de la trama general mostrado en la figura 2.4.

Campo encabezado de la NWK de la trama de comandos NWK. - El campo encabezado NWK de una trama de comandos NWK debe contener el campo control de trama y una combinación apropiada de los campos de enrutamiento según lo requerido.

En el campo control de trama, el sub campo tipo de trama debe contener el valor que indica una trama de comandos NWK. El resto de sub los campos deben ser configurados de acuerdo al uso requerido de la trama de comandos de la NWK.

Los campos de enrutamiento deben tener una combinación apropiada de direcciones y campos de direccionamiento, dependiendo de la configuración en el campo control de trama. (Amarillo, 2012).

Campo identificador de comandos NWK. - El campo identificador de comandos indica el comando NWK que va a ser usado. Este campo debe ser puesto a uno de los valores no reservados.

Campo carga útil de los comandos NWK. - El campo carga útil de los comandos NWK de la trama de comandos NWK debe contener el comando NWK en sí mismo.

2.5.4 Programación de la transmisión de beacons

La programación de la beacon es necesaria en una topología multi salto para evitar que las tramas beacon de un dispositivo colisionen con las tramas beacon o las transmisiones de datos de sus dispositivos vecinos. La programación de la beacon se hace necesaria cuando se implementa una topología de tipo árbol y no una

topología tipo malla, puesto que no se permite beaconing en redes Zigbee con topología de malla.

2.5.4.1 Método de programación

El coordinador Zigbee debe determinar el orden de la beacon y el orden de la súper trama para cada dispositivo en la red: Esto se hace porque uno de los propósitos de redes multi salto con beacon es permitirles a los nodos de enrutamiento dormir para ahorrar energía, el orden de la beacon debe asignarse más largo que el de la súper trama. La configuración de los atributos de esta manera hace posible programar la porción activa de las súper tramas en cada dispositivo en cualquier vecindario de tal manera que no se superpongan en el tiempo. En otras palabras el tiempo se divide en $(\text{macBeaconInterval}/\text{macSuperframeDuration})$ slots de tiempo que no se superponen, y la porción activa de la súper trama de cada dispositivo de la red debe ocupar un slot de tiempo que no se superpone con los demás. Un ejemplo de la estructura de la trama resultante se muestra en la figura 2.10.

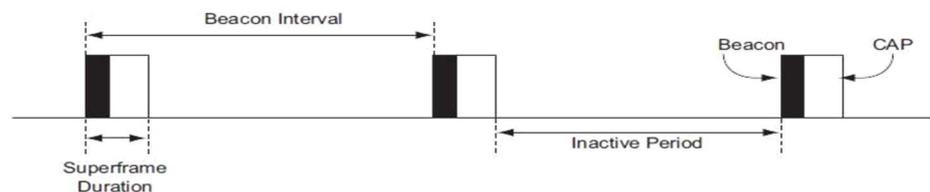


Figura 2. 10. Estructura típica de la trama para un dispositivo con beacon

Fuente: (Amarillo, 2012)

La trama beacon de un dispositivo debe ser transmitido al inicio de su slot de tiempo, y el tiempo de transmisión debe ser medido con respecto al tiempo de transmisión del dispositivo padre. El tiempo de desfase debe ser incluido en la carga útil de cada dispositivo en una red multi salto con beacon. Por lo tanto, un dispositivo que recibe una trama beacon conocerá el tiempo de transmisión de la beacon del dispositivo vecino y el dispositivo padre, ya que el tiempo de transmisión del padre puede ser calculado sustrayendo el tiempo de desfase contenido en la estampa de tiempo de la trama beacon.

El dispositivo receptor debe guardar la estampa de tiempo local de la trama beacon y el desfase incluido en la carga útil de la beacon en su tabla de dispositivos vecinos.

El propósito de tener un dispositivo que conozca cuando el nodo padre de su nodo vecino está activo, es mantener la integridad del enlace de comunicación nodo padre-nodo hijo, apaciguando el problema del nodo oculto. En otras palabras, un dispositivo nunca transmitirá al mismo tiempo que el nodo padre de su nodo vecino.

2.6 Técnicas de enrutamiento en red de sensores inalámbricos

Se ha indicado que una red Zigbee puede formar parte de una red de sensores inalámbricos WSN. Al igual que las redes inalámbricas de área local, necesita de protocolos de enrutamiento, así hasta el día de hoy se han formulado diversas técnicas sobre qué tipo de topología de red es la óptima para minimizar el consumo de energía y, en consecuencia, maximizar el tiempo de vida de la red.

A través de la técnica de enrutamiento en una red WSN, la operación de mantenimiento se reduce a ‘repoblar’ el área monitorizada con nuevos nodos que se integren en la red actual para sustituir aquellos que han dejado de funcionar, bien por avería, accidente, etc. como por agotamiento de sus baterías. (Capella, 2010).

Se diferencian cinco categorías en la forma de operar los protocolos de enrutamiento en las redes de sensores inalámbricos.

1. Basados en Negociación (Negotiation Based), donde empleando una serie de mensajes de negociación se pretende eliminar duplicados en la información y prevenir que datos redundantes se envíen al siguiente nodo o al sumidero.
2. Basados en Multiruta (Multi-Path Based), donde se usan múltiples caminos en lugar de un único camino con el fin de mejorar el rendimiento.
3. Basados en Consultas (Query Based), donde los nodos destinatarios propagan la consulta de información (tarea de sensorización) desde un nodo hacia la red y cuando se encuentra un nodo que posee dicha información, éste responde a la consulta enviando los datos al que inició la consulta.
4. Basados en Calidad de Servicio (QoS Based), donde la red debe satisfacer ciertas métricas de QoS, como delay, energía, ancho de banda, cuando envía datos al sumidero, manteniendo de esta forma la red balanceada en cuanto a consumo de energía y calidad de la información.

5. Basados en Coherencia (Coherent Based), donde la información es enviada después de un mínimo procesado a los nodos encargados de la agregación. El procesamiento en coherencia es una estrategia típica para elaborar algoritmos de enrutamiento eficientemente energéticos.



Figura 2. 11. Clasificación de protocolos de enrutamiento para WSN

Fuente: (Capella, 2010)

Según la estructura de la red, existen tres tipos de redes:

1. Redes Planas (Flat Networks), en las que todos los nodos desempeñan el mismo papel. En este tipo de redes la labor de sensor es realizada en colaboración.
2. Redes Jerárquicas (Hierarchical Networks), en las que existen nodos con distintos tipos de rol. Aquí se establecen diversos niveles en la red, en función del papel de los nodos.
3. Encaminamiento basado en Localización (Location-based routing), donde cada nodo dispone de un sistema que permite conocer la posición exacta del resto de nodos, y emplea esta información para la transmisión de datos.

2.6.1 Resumen de protocolos de enrutamiento

En la tabla 2.5, se resume las características de los dos tipos de protocolos de enrutamiento en redes WSN. En el anexo 1, se muestra una evaluación de diversos protocolos de enrutamiento en WSN.

Tabla 2. 5 Características de 2 tipos de enrutamientos para WSN

Enrutamiento Jerárquico	Enrutamiento Plano
Planificación basada en reserva.	Planificación basada en contienda.
Se evitan colisiones.	Sobrecarga por colisiones.
Ciclo de trabajo reducido, debido a los periódicos modos de bajo consumo.	Ciclo de trabajo variable.
Agregación de datos realizada por <i>cluster head</i> .	Los nodos en las rutas multisaltos agregan los datos que reciben de los vecinos.
Mecanismos de enrutamiento permiten las implementaciones de complejidad razonable.	Mecanismos de enrutamiento complejos de implementar.
Requiere sincronización.	Los enlaces se forman sobre la marcha.
Sobrecarga de formación de clústeres.	Las rutas se forman solo en regiones que tienen datos para transmitir. Existe sobrecarga cuando hay necesidad.
Bajas latencias en los múltiples saltos a través de <i>cluster heads</i> .	Latencias mientras se despiertan nodos intermedios y se configuran las rutas.
Consumo de energía uniforme.	Consumo de energía en función de los patrones de tráfico.
Reparto adecuado del canal.	No se garantiza reparto óptimo del canal.

Fuente: autora

2.7 Políticas de Calidad de Servicio QoS

QoS es el conjunto de observaciones de las características de una red que tiene tráfico considerable de datos y que debiera sincronizar las solicitudes de cada dispositivo conectado a la red.

El análisis de QoS es la medida vital del rendimiento de la red. La calidad de servicio de las redes, justifican controles y evaluaciones de dispositivos y otros actores (incluye más plataformas de hardware y software) en el contexto de la protección de las infraestructuras críticas (IPC).

El desempeño de una red por lo regular se mide en términos de las variables respuesta: retardo, pérdida de paquetes y consumo de energía, buscándose una configuración adecuada del protocolo para obtener una buena respuesta para estas variables.

2.7.1 Calidad de servicio en red Zigbee

Dentro de una red Zigbee, sus dispositivos finales (hijos) interactúan y envían un enorme tráfico de datos al nodo coordinador. Los dispositivos finales en diferentes zonas tienen diferentes funciones en la comunicación entre sí. Pero es inevitable una equivocación en la ejecución de sus solicitudes de forma sincronizada en función de la prioridad de tareas.

Esta falta conduce a pérdidas masivas de tráfico de datos y degrada la Calidad de Servicio (QoS). Así se presentan hasta la actualidad, desafíos para analizar los parámetros QoS en la red Zigbee que ayudan a detectar el rendimiento general de la red. El QoS representa tanto un requerimiento como un reto importante dentro de la red Zigbee. Existen muchas limitaciones, en donde el primer desafío es el desvanecimiento en donde se reciben varias versiones de la misma señal en el receptor. Si estas señales están fuera de fase entre sí o afectadas por el efecto Doppler, pueden interferir unas con otras. Otra limitación en la calidad de servicio implica el retardo de propagación de la señal. La complejidad de ofrecer un buen servicio se incrementa con el uso de las redes inalámbricas y móviles. Así aplicaciones como de alerta temprana presentan requisitos de fiabilidad y entrega de datos, en donde los usuarios requieren de mediciones precisas y en tiempo real.

La literatura científica concuerda que se debe diseñar la red basada en prioridades, pues resulta útil, en el problema de rendimiento de la red. Así la técnica de prioridad se está aplicando para evaluar el rendimiento en términos de equilibrio de energía.

Así la prioridad se utiliza para la formación eficiente de la red y las políticas de QoS están altamente respaldado para analizar cualquier red. A partir de este contexto, una nueva estrategia de cálculo de prioridad para los dispositivos Zigbee es determinar o destinar prioridad a cada dispositivo y zona. Esta nueva prioridad es útil para sincronizar dispositivos Zigbee de diferentes zonas.

CAPÍTULO III: DISEÑO VIRTUAL DE RED ZIGBEE CON UN SOLO COORDINADOR

Para el cumplimiento de simular una red Zigbee, se escoge la herramienta de simulación, existen varios simuladores que permiten diseñar e implementar un modelo de red completo. Son herramientas de simulación Network Simulator 2 (NS-2), NS3, OMNET ++, OPNET, MATLAB, y otros que soportan las funciones de desarrollo de red de Zigbee.

Todos los simuladores nombrados proporcionan la simulación de eventos discretos, aspecto esencial para evaluar diversos parámetros de rendimiento de la red. Los simuladores de redes de eventos discretos emplean los modelos de propagación inalámbrica debido a los altos requerimientos de cálculo para el modelado realista.

3.1 Selección del simulador para red Zigbee

El simulador OPNET perteneciente a la organización Riverbed, resulta ser un simulador versátil, muy empleado por investigadores. Este simulador consta de un paquete de protocolos y tecnologías con un sofisticado entorno de desarrollo. Al modelar todas las tecnologías y tipos de red (incluidos VoIP, TCP, OSPFv3, MPLS, IPv6 y otras). Se puede encontrar y descargar la versión educacional (desde <https://www.riverbed.com/mx/products/steelcentral/steelcentral-riverbed-modeler.html>). Para el desarrollo del modelo de simulación se utilizaron tres dominios de modelamiento los cuales se organizan jerárquicamente.

3.1.1 Modelo de Simulación en el Dominio de Red (Modelo de Red)

La topología de red de sensores inalámbricos que se implementó se encuentra compuesta por ocho dispositivos finales Zigbee (DF), cuatro routers Zigbee (R) y un coordinador Zigbee (Coordinador), con sus respectivas direcciones de red, tal como se muestra en la figura 3.1.

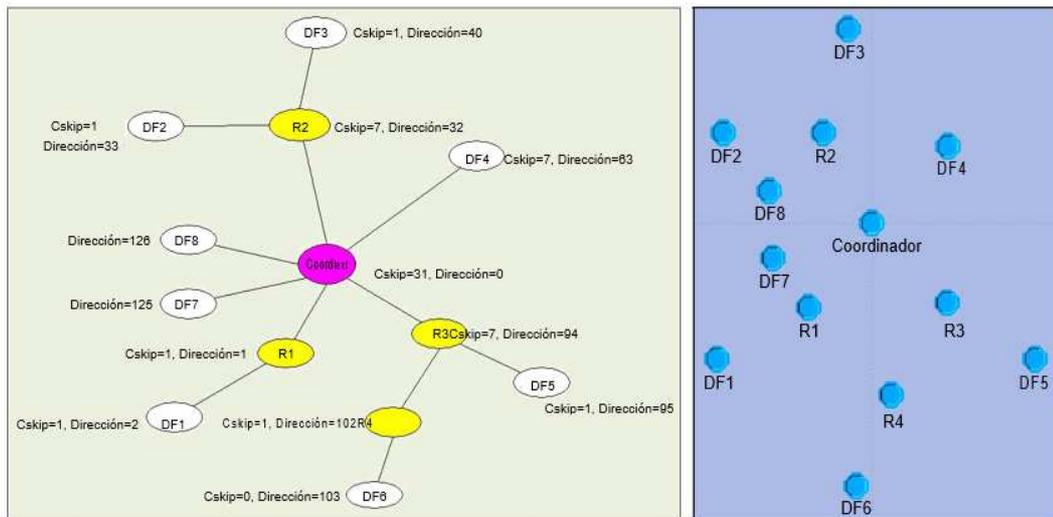


Figura 3. 1 Diseño de red Zigbee en topología árbol y topología de red sobre OPNET (derecha)

Fuente: autora

3.1.2 Modelo de Simulación en el Dominio de Nodo (Modelo de Nodo)

En el dominio de nodo se desarrollaron tres tipos de nodo (Coordinador, Router y Dispositivo Final), los cuales servirán para construir el modelo de red IEEE 802.15.4/Zigbee tal como se puede observar en la Figura 3.2.

Al lado izquierdo de la Figura 3.2, se observa el modelo de nodo del dispositivo final, el cual está compuesto por 10 módulos, 13 packet streams y 2 statistic wires. En el centro de la Figura 3.2, se observa el modelo de nodo del router, el cual está compuesto por 7 módulos, 8 packet streams y 2 statistics wires. Al lado derecho de la Figura 3.2, se observa el modelo de nodo del coordinador Zigbee, el cual está compuesto por 10 módulos, 13 packet streams y 2 statistic wires.

El modelo de la capa física, la subcapa de enlace de datos y el consumo de energía, del modelo de nodo de los tres tipos de nodos-sensores se modeló de la misma forma. La capa física está compuesta por un módulo antena, un módulo transmisor, un módulo receptor y un módulo de procesos llamado capa_física. La subcapa de enlace de datos está compuesta por un módulo llamado subcapa_MAC. El modelo de consumo de energía se implementó en el módulo llamado Batería.

El modelo de la capa de red, es diferente en el modelo de nodo de los tres tipos de nodo-sensores, ya que es en ésta capa donde se diferencian los tres tipos de nodos-

sensores, debido a las funciones que deben desempeñar cada uno de los tres tipos de nodo-sensores.

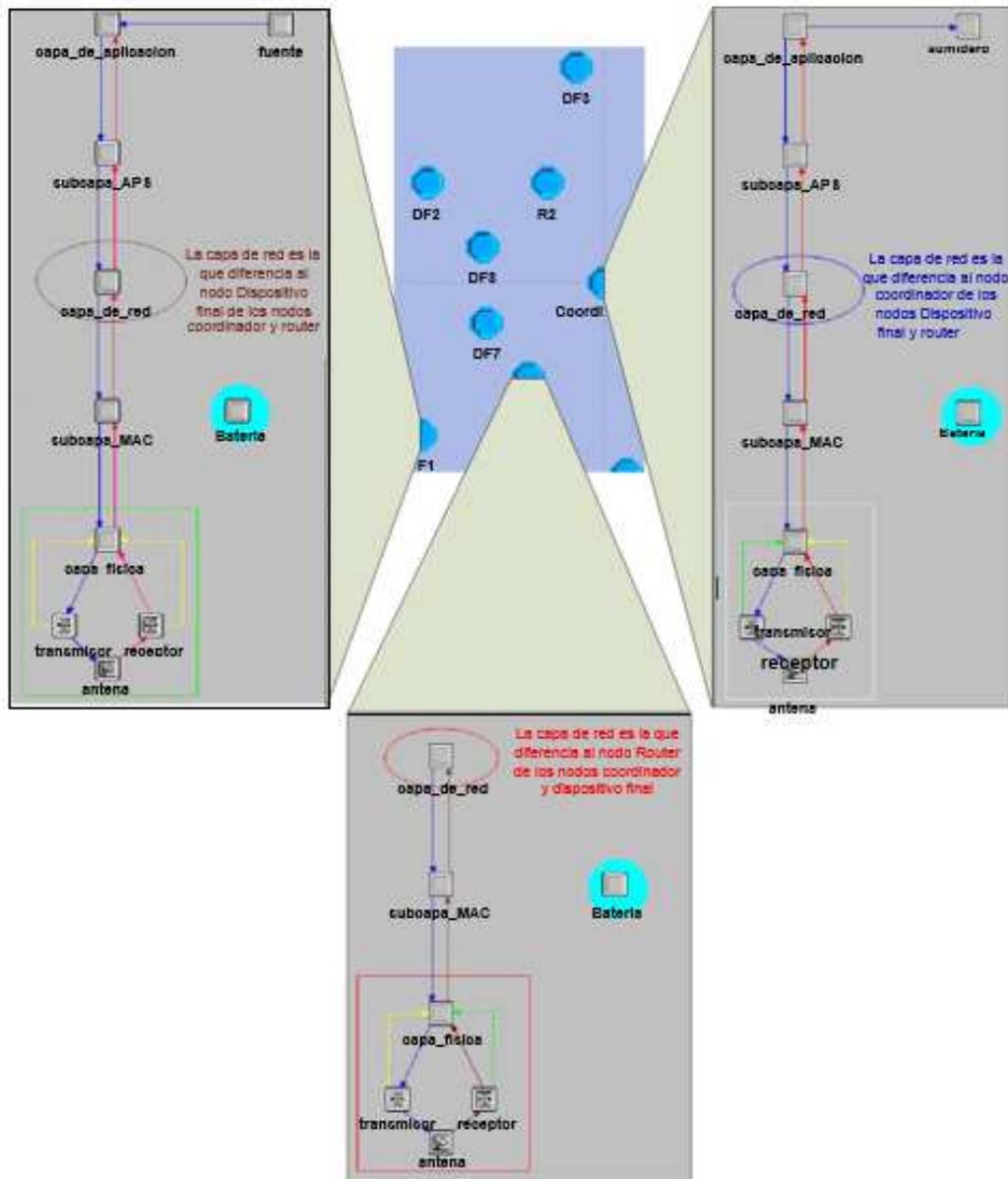


Figura 3. 2 Modelo de nodo para Dispositivo Final (izquierda), Router (centro) y Coordinador (derecha)

Fuente: autora

Como se puede observar en la Figura 3.2, el modelo de nodo del router sólo tiene hasta capa de red, ya que el router sólo se dedica a retransmitir los datos en la red y no necesita (en este modelo) procesar los datos de las capas superiores (capas de transporte y aplicación).

3.1.3 Modelo de Simulación en el Dominio de Proceso (Modelo de Proceso)

El modelo de simulación que se detalla a continuación es parte del trabajo de titulación de Milton Amarillo (2012), dicho modelo en el dominio de procesos consta de 8 modelos de procesos:

Proceso_capa_fisica_v3: Este modelo de procesos es asignado al módulo llamado capa_fisica, de los nodos Coordinador_v3, Router_v3 y DispositivoFinal_v3. Este modelo de procesos modela la capa física de la especificación IEEE 802.15.4.

Proceso_subcapa_MAC_v3: Este modelo de procesos es asignado al módulo llamado subcapa_MAC, de los nodos Coordinador_v3, Router_v3 y DispositivoFinal_v3 (ver Figura 3,2).

Proceso_capa_de_red_coordinador_v3: Este modelo de procesos es asignado al módulo llamado capa_de_red, del nodo Coordinador_v3 (ver Figura 3,2 derecha).

Proceso_capa_de_red_delRouter_v3: Este modelo de procesos es asignado al módulo llamado capa_de_red, del nodo Router_v3 (ver Figura 3.2, centro). Este modelo de procesos modela la capa de red para un router Zigbee, según la especificación Zigbee.

Proceso_capa_de_red_dispositivoFinal: Este modelo de procesos es asignado al módulo llamado capa_de_red, del nodo DispositivoFinal_v3 (ver Figura 3.2, izquierda).

Proceso_subcapa_APS_v3: Este modelo de procesos es asignado al módulo llamado subcapa_APS, de los nodos Coordinador_v3 y DispositivoFinal_v3 (ver Figura 3.2, derecha e izquierda).

Proceso_APL_v3: Este modelo de procesos es asignado al módulo llamado capa_de_aplicacion, de los nodos Coordinador_v3 y DispositivoFinal_v3 (ver Figura 3,2 derecha e izquierda). Este modelo de proceso modela la capa de aplicación. La capa de aplicación es diseñada por los desarrolladores de aplicaciones y utiliza para su funcionamiento los servicios (Datos) de la subcapa APS de la especificación Zigbee.

Proceso_Bateria_v3: Este modelo de procesos es asignado al módulo llamado Bateria, de los nodos Coordinador_v3, Router_v3 y DispositivoFinal_v3 (ver Figura 3.2).

3.2 Atributos de simulación del consumo energético.

En los atributos del nodo-sensor hay un atributo que permite seleccionar la capacidad de las baterías (2 baterías AA), con esta capacidad se calcula la energía inicial del módulo Bateria del modelo de nodo. En la Figura 3.3, se observa que los valores de capacidad, que se pueden seleccionar para el modelo de nodo del coordinador son 2600 mAh, 4600 mAh y 6000 mAh, igualmente los nodos dispositivo final y router tienen estos mismos valores de elección.

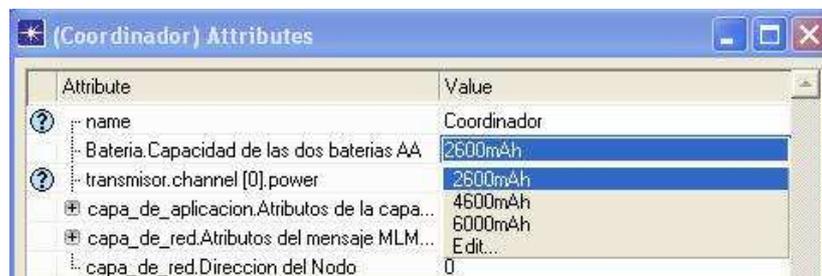


Figura 3.3 Atributos de un nodo coordinador

Fuente: autora

3.3 Parámetros de un nodo Coordinador ZigBee

A continuación, se describen los parámetros que definen a un nodo tipo Coordinador ZigBee, estos parámetros se pueden observar en la Figura 3.4.

- **Bateria.Capacidad de las dos baterías AA:** este parámetro hace referencia a la carga inicial que tendrá la batería (dos pilas AA) de un nodo. El valor para este parámetro se debe escoger dentro de tres opciones, las cuales son 2600mAh, 4600mAh y 6000mAh, tal como se muestra en la Figura 3.5.
- **Transmisor.channel[0].power:** Este parámetro hace referencia a la potencia de transmisión con la cual emite el radio transmisor. El valor para este parámetro se debe escoger dentro de 5 opciones, las cuales son -25dBm, -15dBm, -10dBm, -5dBm y 0dBm, tal como se muestra en la Figura 3.6.
- **Dirección de destino:** No aplica, ya que en este modelo de simulación el coordinador no envía tramas de datos.

- Endpoint de destino: Este parámetro indica hacia que aplicación van dirigidos los datos. Los valores posibles de endpoint van de 1 hasta 240.
- Endpoint de origen: Este parámetro indica de cual aplicación provienen los datos. Los valores posibles de endpoint van de 1 hasta 240.

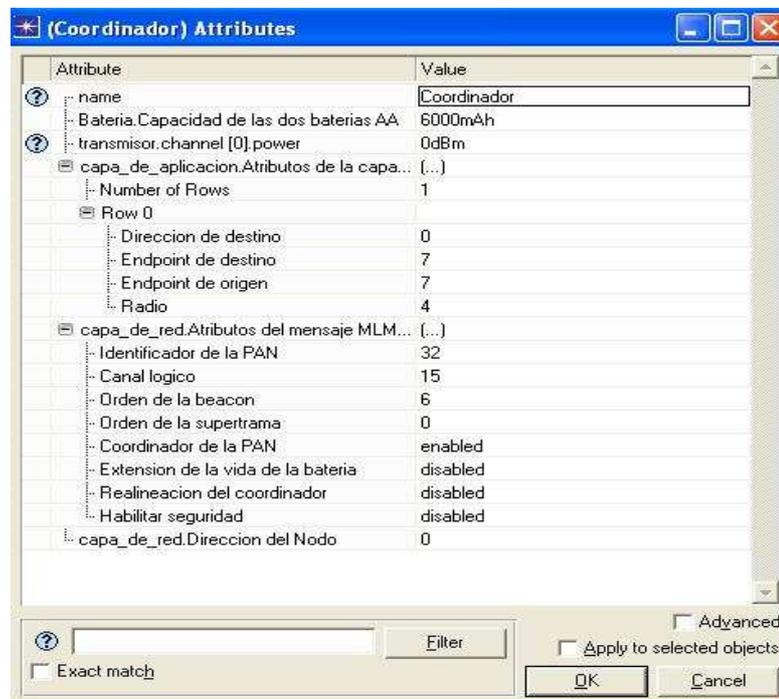


Figura 3. 4 Parámetros (atributos) para configurar un nodo tipo Coordinador ZigBee

Fuente: autora



Figura 3. 5 Opciones para la carga inicial de la batería del nodo

Fuente: autora

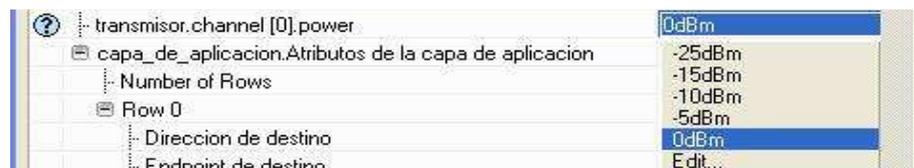


Figura 3. 6 Opciones para la potencia de transmisión del radio transmisor

Fuente: autora

- Radio: éste parámetro hace referencia al número de saltos máximos que puede tener un paquete. Cada vez que una trama de red pase por un dispositivo este parámetro va a ser decrementado en uno y si un dispositivo recibe un paquete con radio cero, este dispositivo descartará el paquete.
- Identificador de la PAN: éste parámetro identifica a que WPAN pertenece el dispositivo y sus valores posibles van de 0 hasta 65535.
- Canal lógico: éste parámetro hace referencia a la frecuencia en que se están transmitiendo y recibiendo los datos. Para este modelo solamente se tiene implementado un canal lógico el cual es el 15.
- Orden de la beacon: éste parámetro me sirve para definir el intervalo que tendrán las tramas beacon. Sus valores posibles van de 0 hasta 14.
- Orden de la supertrama: éste parámetro me sirve para definir cuál va a ser la duración de la supertrama. Sus valores posibles van de 0 hasta 14 y además no puede ser mayor al orden de la beacon.
- Coordinador de la PAN: éste me identifica si el dispositivo es un coordinador de alguna PAN. Sus valores posibles son enable o disabled.
- Extensión de la vida de la batería: No aplica todavía.
- Realineación del coordinador: No aplica todavía.
- Habilitar seguridad: No aplica todavía.
- capa_de_red.Direccion del Nodo: Hace referencia a la dirección de 16 bits del nodo. Sus valores posibles van de 0 a 65535.

3.4 Descripción de los parámetros de un nodo tipo Router

A continuación, se explicarán los parámetros de un nodo tipo Router. Los parámetros que son comunes con el nodo tipo coordinador.

- capa_de_red.Desfase de la supertrama: Este parámetro me indica el desfase que debe tener la supertrama del nodo hijo con respecto al nodo padre. El valor de este parámetro se calcula teniendo en cuenta la asignación de direcciones distribuidas de la especificación ZigBee.
- capa_de_red.Direccion del nodo padre: Este parámetro es el que hace posible que la topología de red sea una topología de árbol. Sus valores posibles son de 0 hasta 65535.

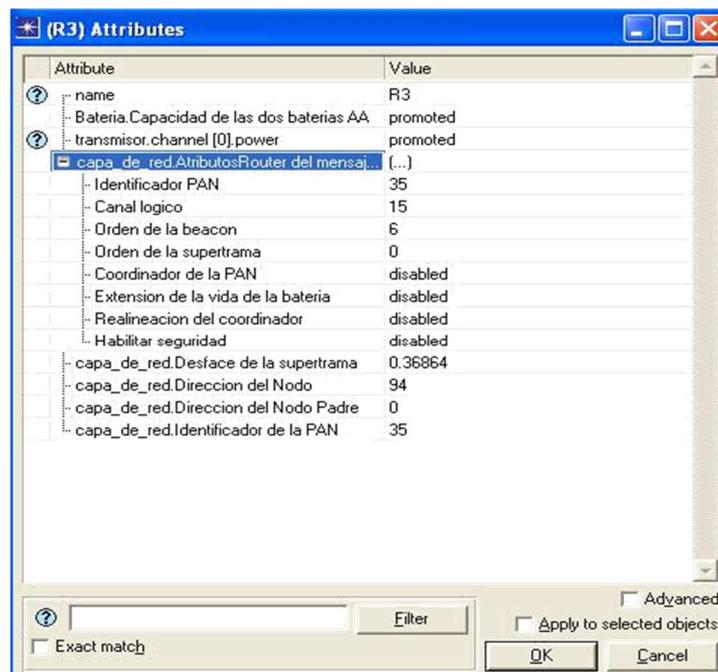


Figura 3. 7 Parámetros (atributos) para configurar un nodo de tipo Router

Fuente: autora

3.5 Descripción de parámetros de un nodo tipo Dispositivo Final

A continuación, se explicarán los parámetros de un nodo tipo Dispositivo Final. Los parámetros que son comunes con el nodo tipo Coordinador y el nodo tipo Router

- fuente.Packet Interarrival Time: En este parámetro se configura la distribución y los parámetros de la distribución, para el envío de datos desde el dispositivo final.
- fuente.Start Time: Este parámetro me indica el tiempo (en segundos) de inicio de envío de paquetes.

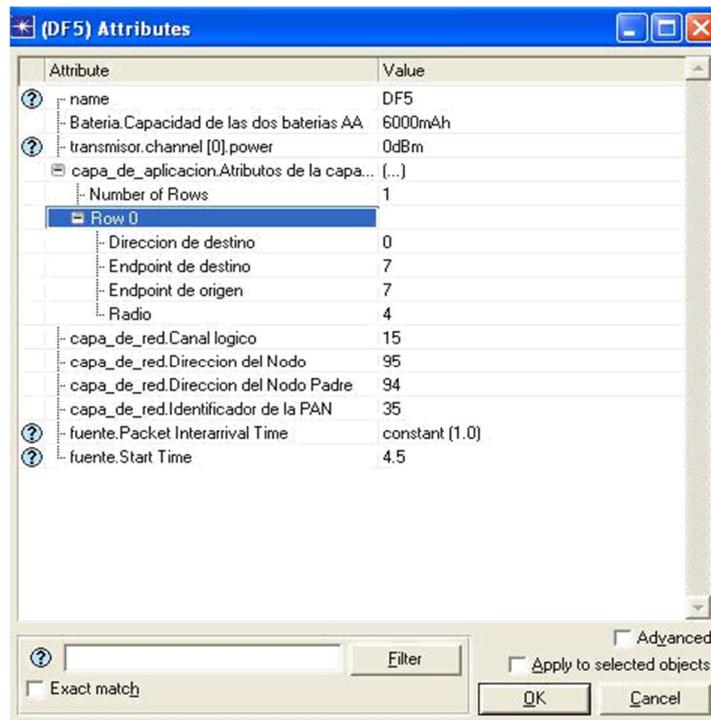


Figura 3. 8 Parámetros (atributos) para configurar un nodo de tipo Dispositivo Final

Fuente: autora

3.6 Dominios del Modelo de simulación

El modelo de simulación se organiza jerárquicamente en tres dominios:

- Modelo de red es el de más alto nivel dentro de la jerarquía (Se construye en este caso a partir de nodos).
- Modelo de Nodo (se construye a partir de módulos).
- Modelo de procesos (define el comportamiento de cada módulo de un nodo).

3.6.1 Dominio del Modelo de Red

El modelo de red implementa una topología de árbol, la cual se diseñó teniendo en cuenta el “mecanismo de asignación de direcciones distribuidas” de la especificación Zigbee.

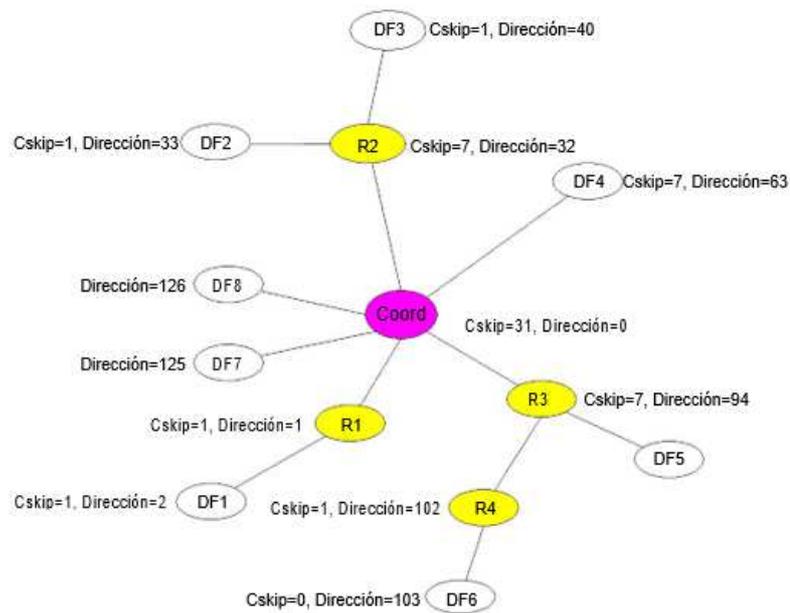


Figura 3. 9 Topología en árbol con su respectivo direccionamiento

Fuente: autora

3.6.2 Dominio del Modelo de Nodo

El modelo general de nodo se muestra en la Figura 3.10, este modelo general consta de:

Módulos: tienen asociados modelos de proceso que definen el comportamiento de cada módulo.

Packet Streams: intercomunican a los módulos, y permiten que los módulos se envíen información por medio de paquetes, estos paquetes que se envían deben tener algún tipo de formato, el cual se define en el editor de paquetes.

Packet (paquete): es la unidad fundamental de transporte de información entre módulos, y únicamente viaja a través de los “packet streams”.

Statistics Wires: En la Figura 3.10, se observan a los “statistics wires” como unas flechas de color verde y amarillo, estos “statistics wires” tienen la función de generar interrupciones para el modelo de procesos que tiene asociado el módulo destino (final de la flecha), con el fin de informar que ha ocurrido un evento en el módulo origen (inicio de la flecha) y que es de importancia para el módulo destino (final de la flecha).

El modelo general de simulación de un nodo IEEE 802.15.4/ZigBee consiste de 9 Módulos, 12 Packet Streams y 2 Statistic Wires.

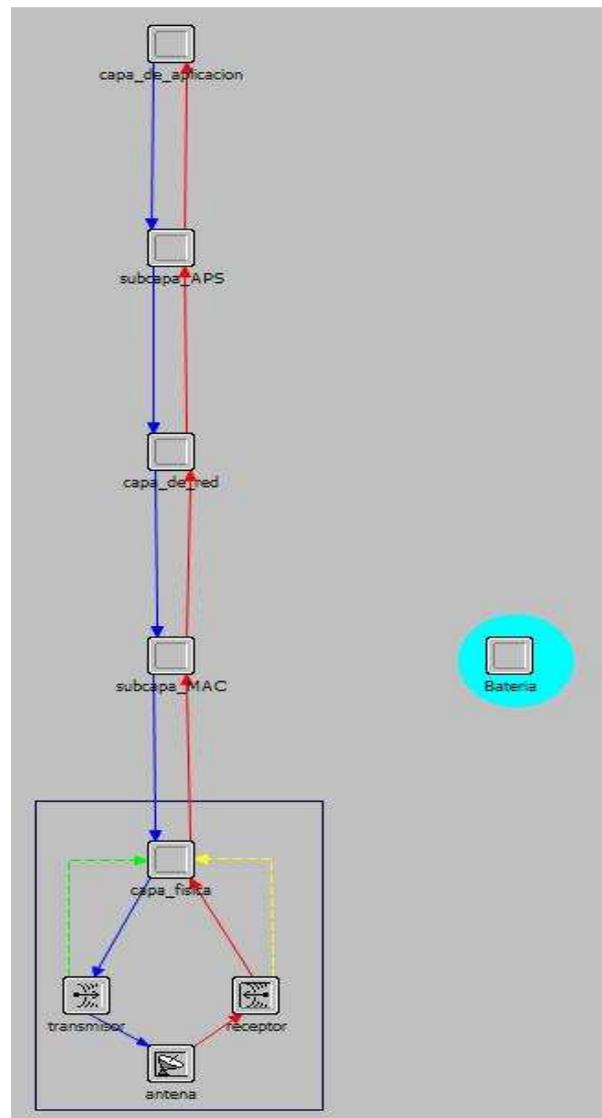


Figura 3. 10. Modelo general de un nodo IEEE 802.15.4/ZigBee

Fuente: autora

La capa física consta del módulo antena, el módulo transmisor, el módulo receptor y un módulo de procesos llamado capa_física, tal como se puede apreciar en la Figura 3.10; la subcapa de enlace de datos consta de un módulo de procesos llamado subcapa_MAC; la capa de red consta de un módulo de procesos llamado capa_de_red; la capa de transporte consta de un módulo de procesos llamado subcapa_APS; la capa de aplicación consta de un módulo de procesos llamado capa_de_aplicación; y por último se encuentra el módulo de proceso llamado

Batería, el cual se encarga de modelar el comportamiento energético del nodo-sensor. Cada una de las capas se comunica con sus capas adyacentes por medio de los “packet streams”, los cuales transmiten paquetes que proveen los servicios entre capas adyacentes (service primitives). Cada uno de los módulos de procesos () tiene asociado un modelo de procesos.

El modelo de nodo se divide en tres tipos de nodo que son Coordinador Zigbee, Router y Dispositivo Final, esto según la especificación Zigbee. El modelo de simulación de la capa física y la subcapa MAC es el mismo para cada uno de los tres tipos de nodo-sensores. El modelo de simulación de la capa de red es diferente para cada uno de los nodos-sensores, esto es debido a las funciones que cumple cada dispositivo en la capa de red. (Amarillo, 2012).

3.7 Capa Física

La capa física está conformada por 4 módulos, 4 packet streams y 2 statistics wires. Los módulos que conforman la capa física son el módulo antena, el módulo transmisor, el módulo receptor y un módulo de procesos llamado capa_fisica.

3.7.1 Módulo antena, módulo transmisor y módulo receptor

La transmisión de los datos inalámbricos entre los nodos en el simulador OPNET está a cargo de estos tres módulos. Para la transmisión de datos inalámbricos el simulador usa un modelo llamado “Radio Transceiver Pipeline”, el cual consta de 14 etapas que involucran al módulo transmisor y al módulo receptor, pero que tiene en cuenta los modelos del módulo antena.

Atributos de la antena

A continuación, se muestran solamente los atributos que se modificaron:

- Patrón de radiación: Radiación isotrópica.

Atributos del transmisor

A continuación, se muestran solamente los atributos que se modificaron:

- Tasa de Datos (bps): 250000
- Formatos de paquete: FormatoDelPaquete_PPDU

- Ancho de banda (KHz): 1000
- Frecuencia mínima (MHz): 2424.5
- Potencia de radiación: Promoted
- Modulación: qam16

Atributos del receptor

A continuación, se muestran solamente los atributos que se modificaron:

- Tasa de Datos (bps): 250000
- Formatos de paquete: FormatoDelPaquete_PPDU
- Ancho de banda (KHz): 1000
- Frecuencia mínima (MHz): 2424.5
- Modulación: qam16
- Modelo de potencia: dra_power_ConUmbralDePotenciaEnElReceptor

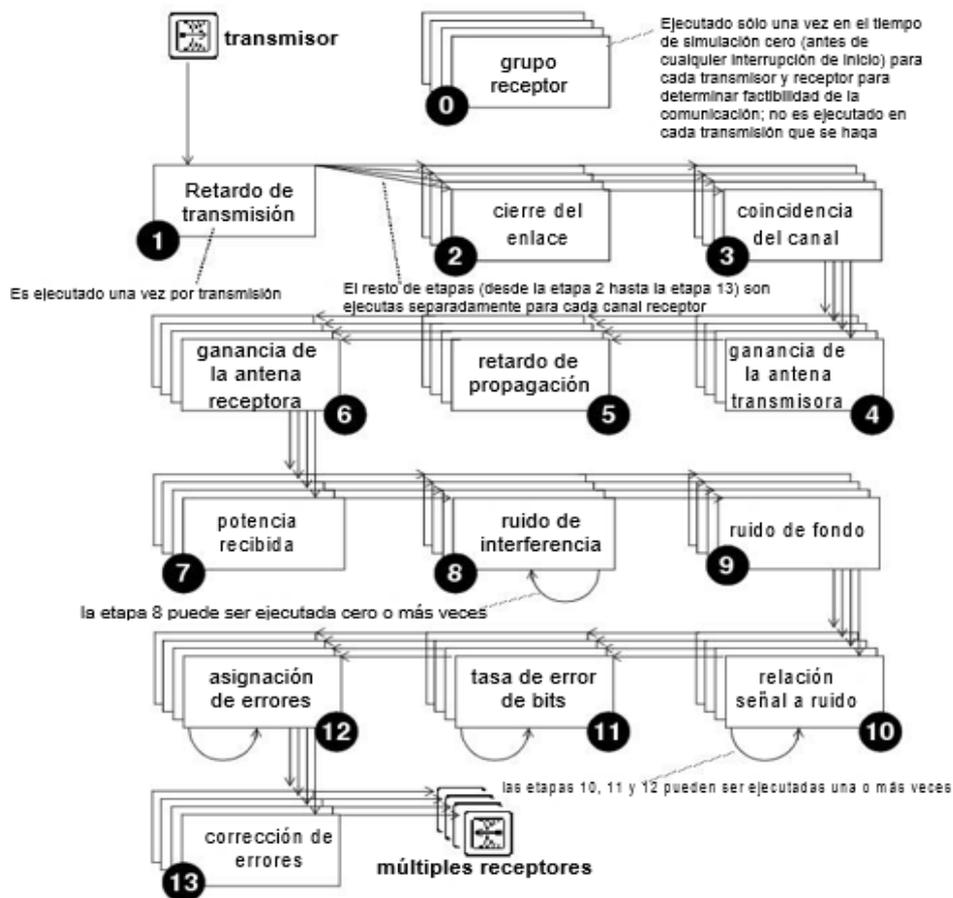


Figura 3. 11 Secuencia de ejecución para una transmisión de datos inalámbricos

Fuente: (Amarillo, 2012) Modificado por la autora

Módulo capa_física

El módulo de procesos capa_física tiene asociado un modelo de procesos llamado Proceso_capa_física_v3.pr.m, el cual se diseñó teniendo en cuenta la especificación IEEE 802.15.4, y se encarga de sondear el canal, enviar datos hacia el transmisor (cuando la subcapa_MAC se lo solicita), recibir datos del receptor(en el estado del nodo RX_ON) e indicárselo a la subcapa_MAC.

3.7.2 Subcapa MAC

La subcapa MAC está conformada por el módulo llamado subcapa_MAC, el cual tiene asociado un modelo de procesos llamado Proceso_subcapa_MAC_v3.pr.m el cual se diseñó teniendo en cuenta la especificación de la subcapa MAC de la especificación IEEE 802.15.4. La subcapa MAC está encargada de generar beacons si el dispositivo es un coordinador PAN; si el dispositivo es un dispositivo asociado a un coordinador PAN, entonces la subcapa MAC se encarga de sincronizarse con las beacons; y principalmente la subcapa MAC está encargada de emplear el mecanismo CSMA/CA para que el nodo-sensor pueda acceder al medio inalámbrico, evitando colisiones con los demás dispositivos que estén asociados a una PAN, esto con el fin de enviar datos. (Amarillo, 2012).

3.7.3 Capa de Red

La capa de red está conformada por el módulo llamado capa_de_red y dependiendo del nodo en el que el módulo se encuentre, así mismo tendrá asociado el modelo de procesos correspondiente, es decir el módulo capa_de_red que está en el nodo Coordinador_v3.nd.m, tiene asociado el modelo de procesos llamado Proceso_capa_de_red_coordinador_v3.pr.m, a continuación, véase la tabla 3.1.

Tabla 3. 1 Capa de red para cada uno de los tipos de nodo

Nodo	Módulo	Modelo de procesos asociado al módulo
Coordinador_v3.nd.m	capa_de_red	Proceso_capa_de_red_coordinador_v3.pr.m
Router_v3.nd.m	capa_de_red	Proceso_capa_de_red_delRouter_v3.pr.m
DispositivoFinal_v3.nd.m	capa_de_red	Proceso_capa_de_red_delRouter_v3.pr.m

Fuente: autora

La capa de red cumple diferentes funciones en cada uno de los tipos de nodos-sensores por tal motivo es que se crearon tres modelos de procesos para la capa de red, con el fin de diferenciar los tipos de nodo-sensores. Por ejemplo, la capa de red del dispositivo final no le da la capacidad a este dispositivo de enrutar datos, mientras que la capa de red del router si le da esta capacidad al router. El coordinador Zigbee es capaz de enrutar los datos, pero de una forma indirecta.

3.7.4 Capa de Transporte

La capa de transporte está conformada por el módulo llamado subcapa_APS, el cual tiene asociado un modelo de procesos llamado Proceso_subcapa_APS_v3.pr.m, el cual se diseñó teniendo en cuenta la especificación ZigBee. La subcapa APS (Application Support) proporciona una interfaz entre la capa de red y la capa de aplicación, proporcionando el servicio de transmisión de datos entre dos o más aplicaciones, esto lo logra gracias al concepto de endpoint (del 1 al 240). Para que el lector entienda un poco más el concepto de endpoint, sería bueno que hiciera la analogía con el concepto de puerto TCP.

3.7.5 Capa de Aplicación

La capa de aplicación está conformada por el módulo llamado capa_de_aplicacion, el cual tiene asociado un modelo de procesos llamado Proceso_APL_v3.pr.m, el cual se diseñó a criterio adecuado, utilizando el servicio de datos de la subcapa APS de la especificación Zigbee. La capa de aplicación es la capa utilizada por los desarrolladores de aplicaciones/soluciones informáticas para desarrollar aplicaciones para redes de sensores inalámbricos, utilizando los servicios de gestión y de datos que provee la subcapa APS de la especificación Zigbee.

3.8 La validación de un modelo de simulación

El modelo conceptual se valida a través del modelo operacional, ya que en el modelo operacional que se diseñó en OPNET, es donde se pueden recolectar las estadísticas de la simulación, para luego ser analizadas y así determinar si la WSN tiene un comportamiento lógico y que se esperaría de la red.

Milton Amarillo (2012) señala al respecto que el proceso de validación es un criterio subjetivo en la mayoría de ensayos de redes cuando se emplea la simulación

de modelos de sistemas reales, pues según especialista no existe validación general, puede no existir mundo real con el que comparar.

3.8.1 Criterio para la Terminación del Modelo

Cada vez que se realiza una iteración se busca mejorar al modelo de simulación anterior y para lograr mejorar el modelo de simulación hay que hacer modificaciones tal como se muestra en la figura 3.12.

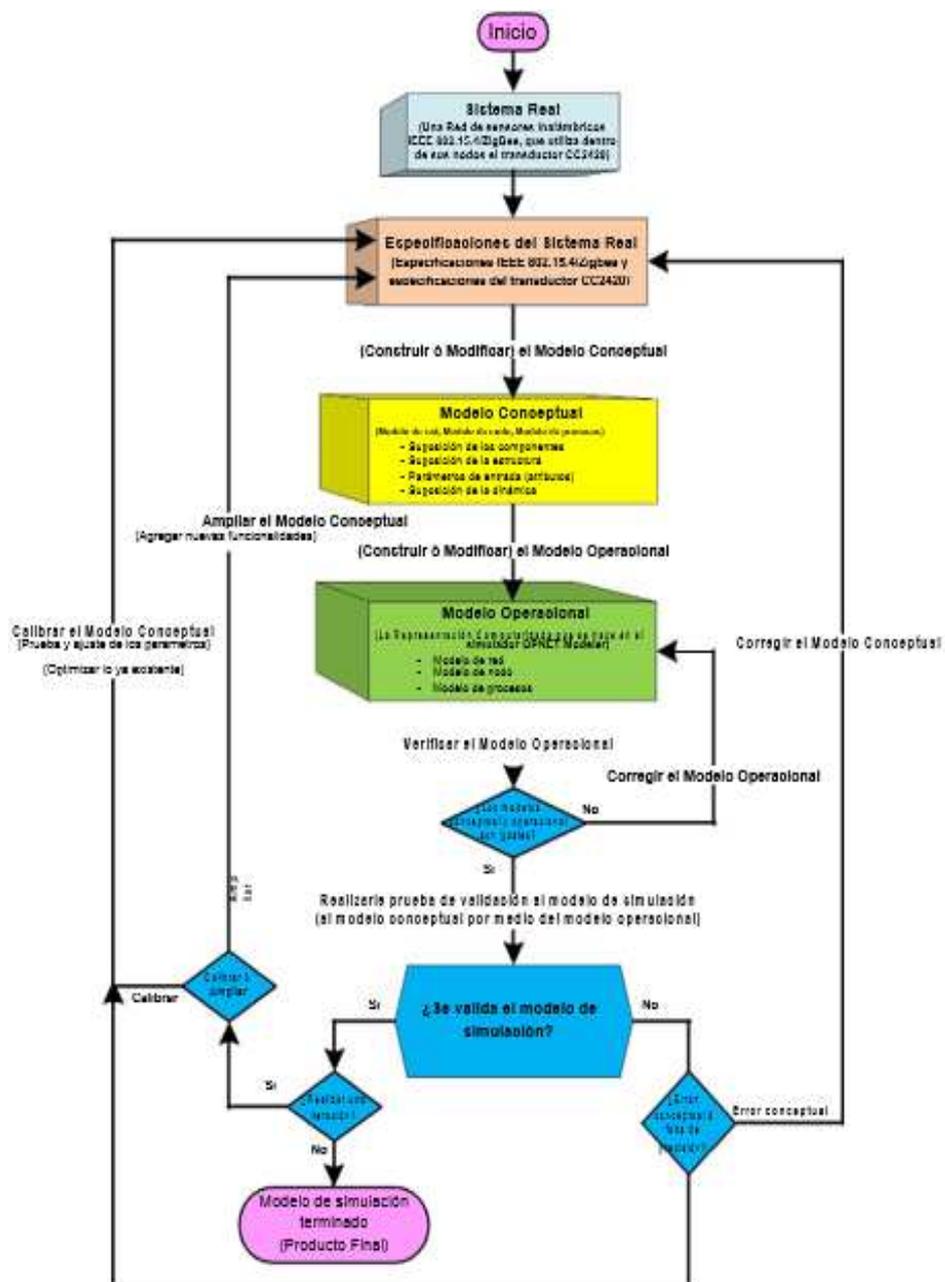


Figura 3. 12 Metodología para el desarrollo del modelo de simulación

Fuente: (Amarillo, 2012) modificado por la autora

Especificaciones del Sistema Real: El comienzo de cada iteración, inicia en la revisión de las especificaciones del sistema real, para luego si es el caso modificar el modelo conceptual.

Modelo conceptual: El modelo conceptual se modifica teniendo la revisión que se le hagan a las especificaciones del sistema real. Si el modelo conceptual se modifica, quiere decir que el modelo operacional ya no representará al modelo conceptual.

Modelo operacional: El modelo operacional será modificado si el modelo conceptual se modificó, entonces se volverá a proceder a realizar la verificación del modelo operacional, para que el modelo operacional represente fielmente el modelo conceptual. La validación del modelo se realiza de igual forma a como se realiza en la primera iteración.

En el capítulo IV se describen los resultados de la simulación

CAPITULO IV: RESULTADOS DE EVALUACIÓN EN RED ZIGBEE

El modelo operacional fue revisado minuciosamente (desde el código y las impresiones “printf y op_pk_print()” que quedan en la consola de simulación, guardados en unos logs, los cuales registran los reportes de eventos en el tiempo), con el fin de que el modelo operacional represente fielmente al modelo conceptual.

4.1 Parámetro de consumo de energía

La energía del nodo muestra resultados para una topología de red donde sólo participan un coordinador Zigbee y un dispositivo final (DF5), esto con el fin de mostrar el efecto del orden de la super trama y el orden de la beacon en el consumo de energía y la latencia de los datos. Véase la figura 4.1.

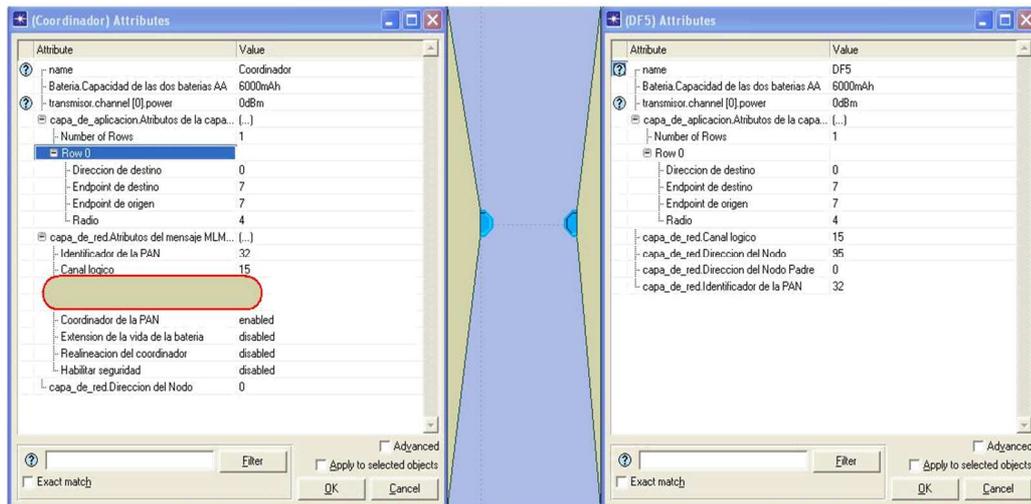


Figura 4. 1 Topología de red (un coordinador ZigBee con un dispositivo final)

Fuente: autora

La Figura 4.2 y Figura 4.5, tienen la misma topología de red con la misma configuración del orden de la super trama, pero con diferente configuración del orden de la beacon, La Figura 4.2 tiene un orden de la beacon de 1, lo que no le permite tener periodos de inactividad muy largos y por ende sus dispositivos consumen más energía que los dispositivos de la Figura 4.5 los cuales tienen un orden de la beacon de 6, permitiéndoles tener periodos de inactividad más largos lo cual los hace consumir menos energía.

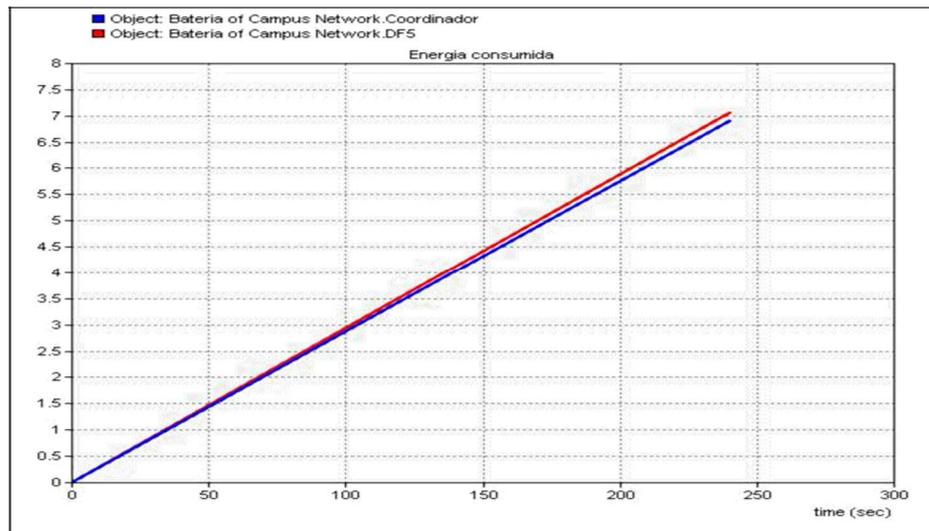


Figura 4. 2 Consumo de energía en función del tiempo para la topología de red de la figura 4.1

Fuente: autora

La ventaja que tiene al tener un orden de la beacon de 1, la topología de la Figura 4.2 con respecto a un orden de la beacon de 6 de topología de la Figura 4.5 es que la latencia de los datos es menor tal como se puede ver en la Figura 4.4 con respecto a la Figura 4.8.

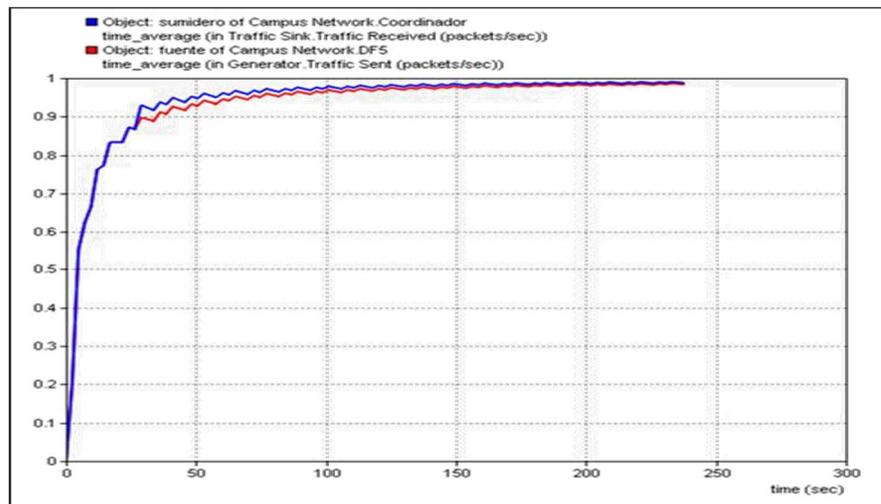


Figura 4. 3 Tráfico promedio de envío y recepción de paquetes de la Figura 4.1

Fuente: autora

En aplicaciones reales, se implementan redes de sensores inalámbricos que pueden contener fácilmente cientos de nodos y éstos deben ser distribuidos en zonas remotas y de gran extensión, permitiendo a los usuarios extraer información de maneras que de otra forma no serían posibles. Por ello, se requiere que los nodos

sean capaces de comunicarse los unos con los otros incluso en la ausencia de una infraestructura de red.

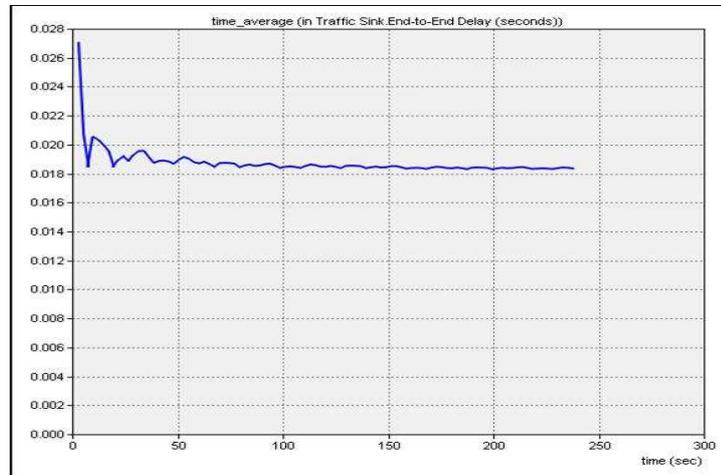


Figura 4. 4. Retardo sufrido por los paquetes de la topología de red de la Figura 4.1

Fuente: autora

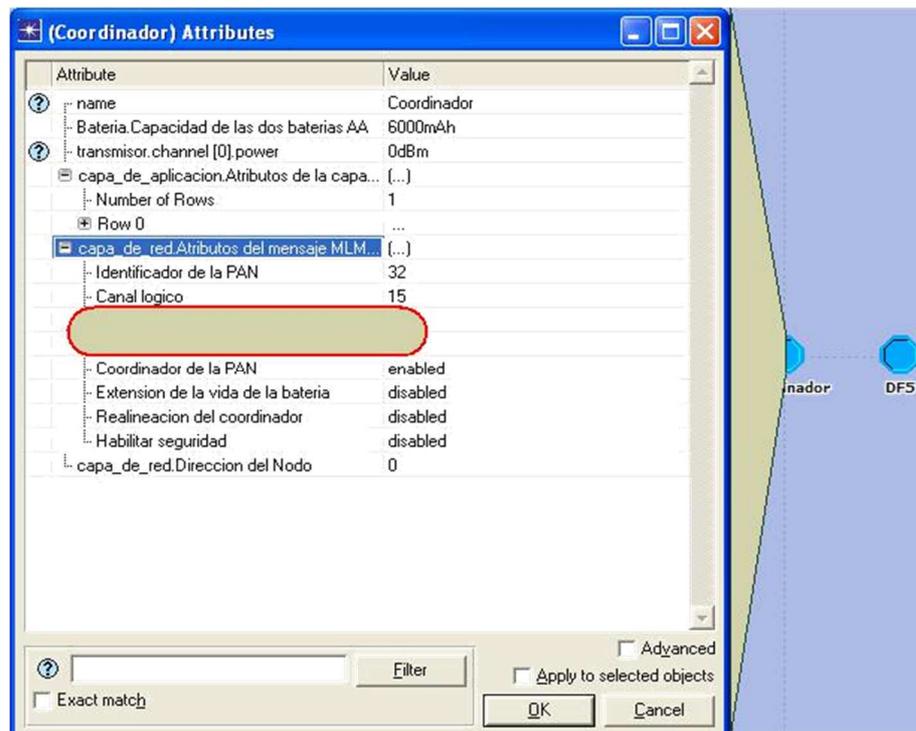


Figura 4. 5 Topología igual a la de la Figura 4.1, con cambio el orden de la beacon a 6

Fuente: autora

La Figura 4.5, tiene un orden de la super trama de cero mientras que el orden de la beacon es de seis, y esto se ve reflejado en la gráfica de la Figura 4,6, si se observa detenidamente el zoom que se le hace la gráfica de la Figura 4.6, se observa que las

línea de mayor pendiente corresponden al periodos de tiempo de actividad de los dispositivos (consumo alto de energía), mientras que las líneas con menor pendiente corresponden a los periodos de inactividad de los dispositivos (cuando el transmisor y el receptor están apagados), y estos periodos de inactividad se aumentan a medida que se aumenta el orden de la beacon y se disminuyen a medida que se aumenta el orden de la super trama.

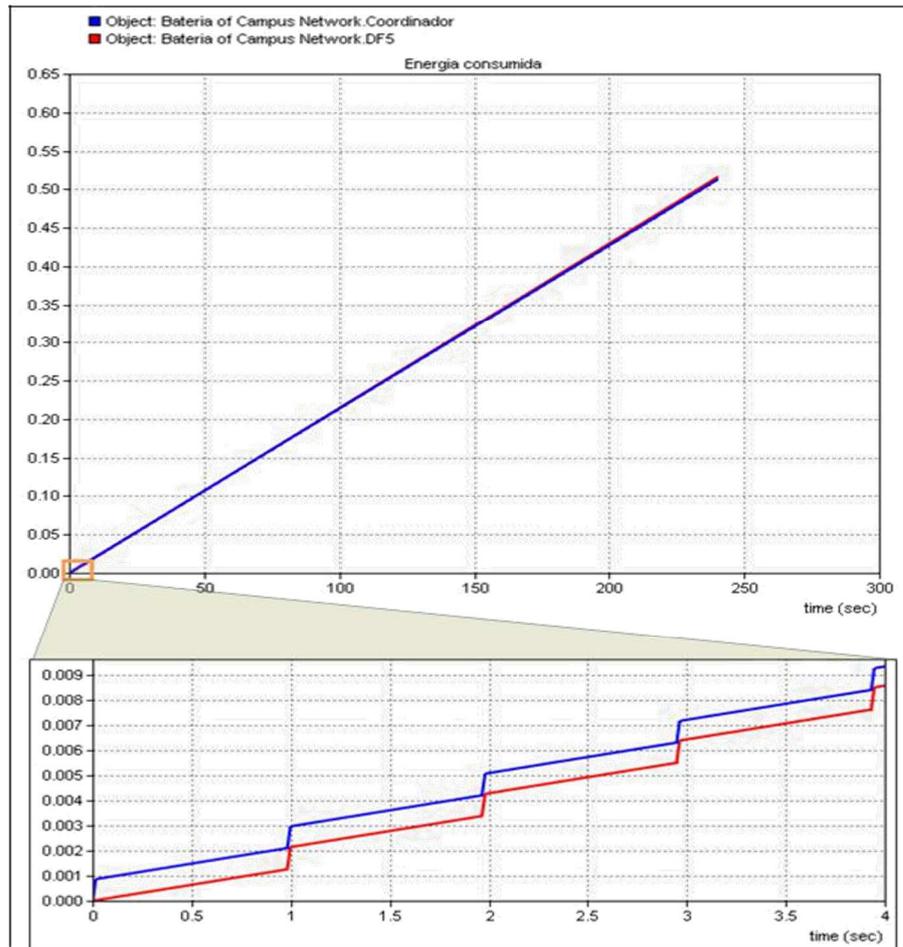


Figura 4. 6 Consumo de energía de los dispositivos de la topología de red de la Figura 4.5

Fuente: autora

4.2 Mediciones de tráfico de datos del dispositivo final hacia el coordinador

Las siguientes mediciones de tráfico de datos, también se realizó a través del simulador OPNET. El simulador después de varias mediciones en tiempos específicos (10 minutos, 20 minutos, 30 minutos, etc.) puede calcular el tráfico promedio de retardos.

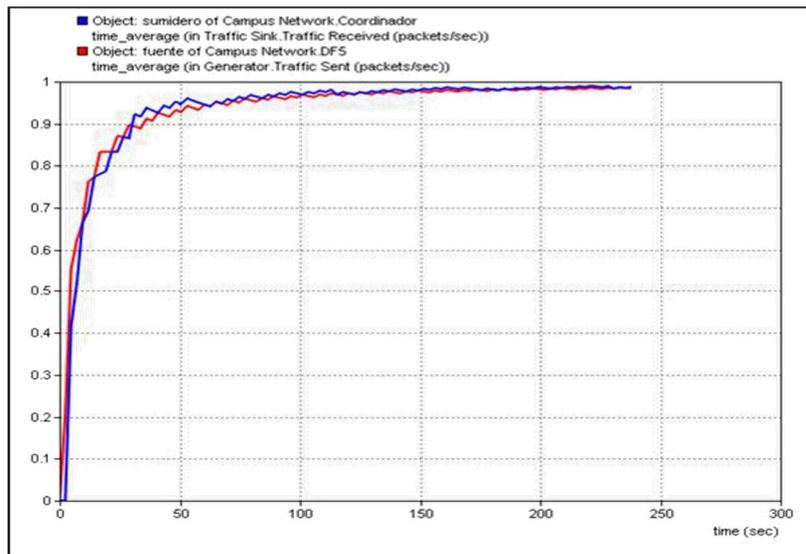


Figura 4. 7 Tráfico promedio de envío y recepción de paquetes para la topología de red (Figura 4.5)

Fuente: autora

El tráfico promedio de envío de datos del dispositivo final hacia el coordinador se mantiene, y el tráfico promedio de recepción del coordinador se mantiene tal como se muestra en la gráfica de la Figura 4.7, la única diferencia es que la latencia de datos aumento tal como se observa en la gráfica de la Figura 4.8.

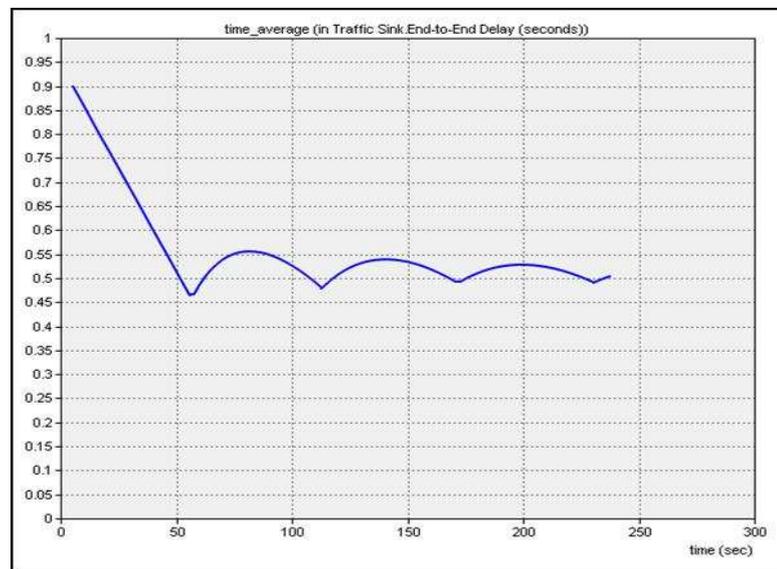


Figura 4. 8 Retardo sufrido por los paquetes de la topología de red de la Figura 4.5

Fuente: autora

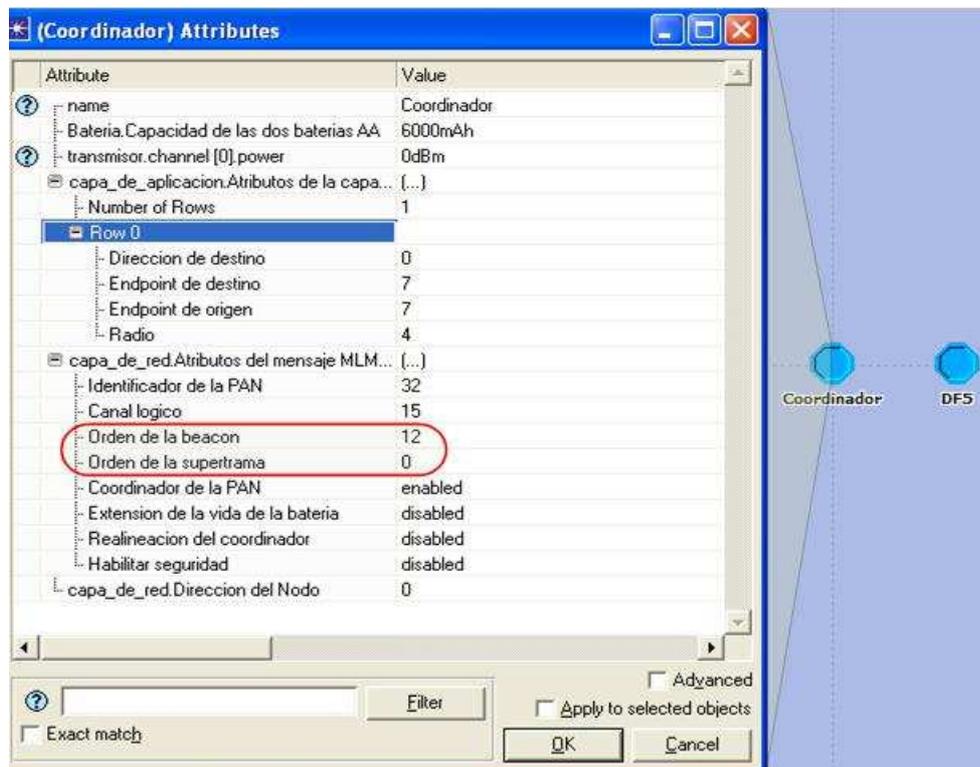


Figura 4. 9 Topología igual a la de las Figura 4.1 y Figura 4.5, con orden de beacon igual a 12

Fuente: autora

La Figura 4.1, Figura 4.6 y la Figura 4.9, tienen la misma topología de red con la misma configuración del orden de la super trama, pero con diferente configuración del orden de la beacon, La Figura 4.1, tiene un orden de la beacon de 1, lo que no le permite tener periodos de inactividad cortos, la Figura 4.5 tiene un orden de la beacon de 6, lo que le permite tener periodos de inactividad más largos que la anterior y la Figura 4.9 tiene un orden de la beacon de 12, lo que le permite tener periodos de inactividad muchísimo más largos que las dos anteriores y por ende los dispositivos de ésta última (ver Figura 4.10) consumen menos energía que los dispositivos de las dos anteriores (gráficas de la Figura 4.2 y Figura 4.6).

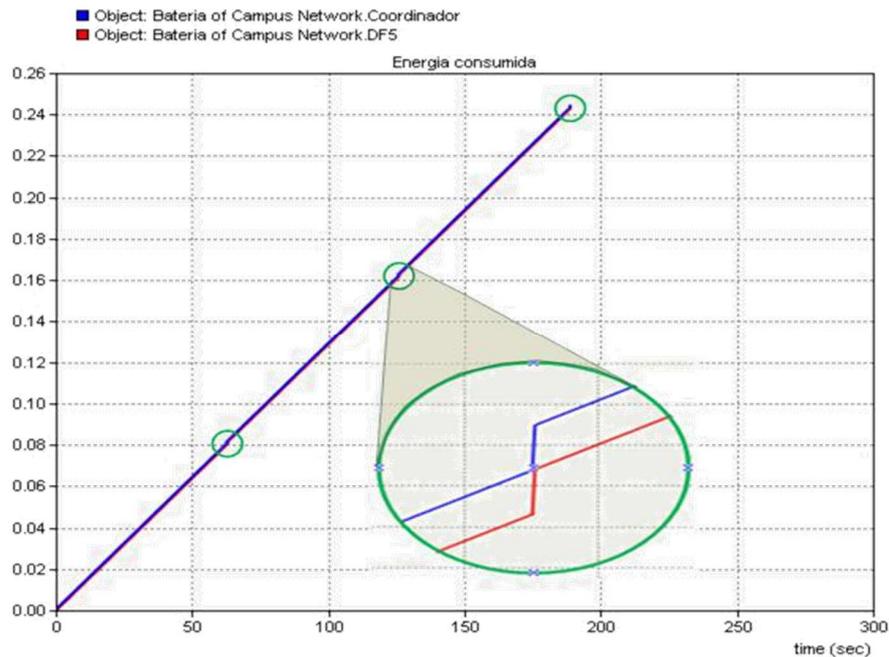


Figura 4. 10 Consumo de energía de los dispositivos de la topología de red de la Figura 4.9

Fuente: autora

Los resultados indican que la mejor configuración de la super trama y orden de beacon es de 0 y 6 respectivamente, tal como se recomienda en la especificación Zigbee, ya que se optimizan dos aspectos importantes de la red Zigbee, el primero es que ésta configuración hace que el tiempo de vida de un nodo sensor sea alto, lo cual es importante para la relación costo beneficio; lo segundo es que ésta configuración permite la calendarización, para las super tramas del coordinador Zigbee y dispositivos de enrutamiento (la calendarización de las super tramas permite el enrutamiento dentro de la red).

La desventaja de tener un orden del orden de la beacon tan grande (de 12) y orden de la super trama pequeño (de cero) es que la latencia de datos aumenta muchísimo, tal como se puede observar en las gráficas de la Figura 4.11 y Figura 4.12.

Mientras que la latencia al tener un orden de la beacon de 6 y un orden de la super trama de cero es baja (Figura 4.8). Y la latencia al tener un orden de la beacon de 1 y un orden de la super trama de cero es aún más baja (Figura 4.4).

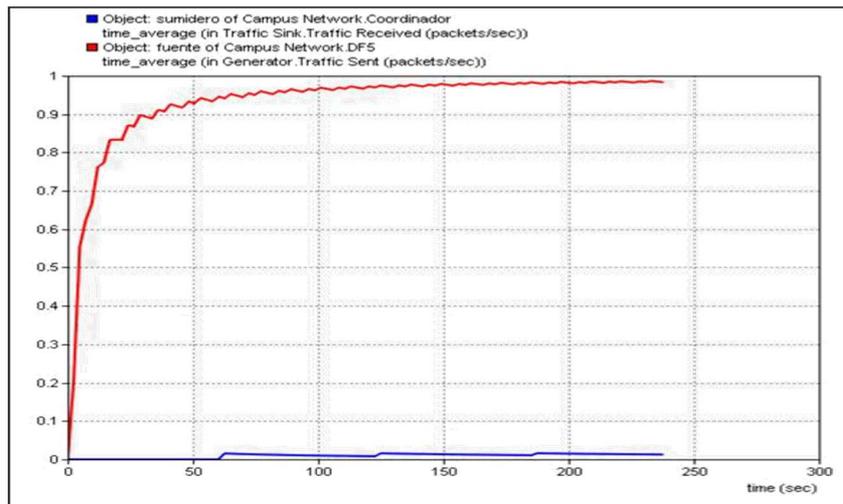


Figura 4. 11 Tráfico promedio de envío y recepción de paquetes de la Figura 4.9

Fuente: autora

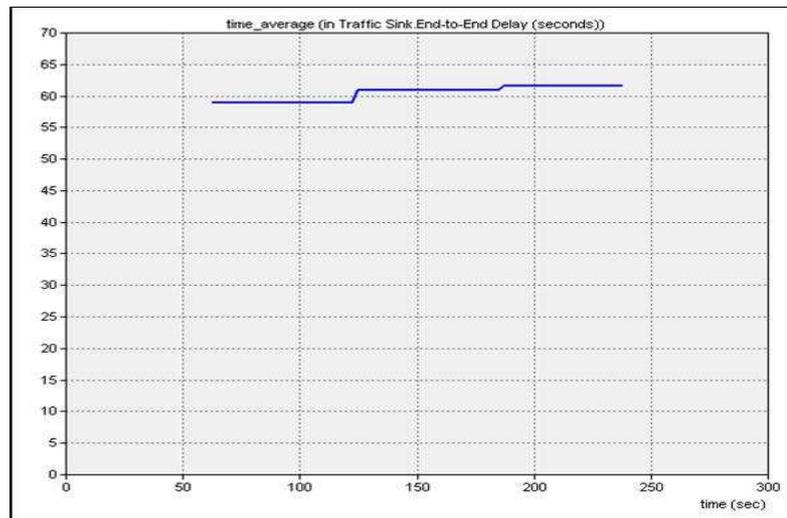


Figura 4. 12 Retardo sufrido por los paquetes de la topología de red de la Figura 4.9

Fuente: autora

Cuando se configura nodos sensores de tipo router, estos gastan mucha más energía, más o menos el doble (en este modelo lineal) que los nodos sensores de tipo coordinador Zigbee o dispositivo final, esto es debido al doble papel que deben cumplir los nodo sensores de tipo router (dentro de la red Zigbee) para poder enrutar los datos, ya que durante un periodo de super trama deben comportarse como dispositivos asociados a un coordinador PAN (están activos durante este periodo de tiempo), y durante otro periodo de tiempo deben comportarse como coordinadores PAN (también están activos durante este periodo de tiempo). De lo anterior se

concluye que durante un intervalo específico de tiempo (intervalo de la beacon) del coordinador Zigbee (comienzo de una trama beacon al comienzo de la siguiente trama beacon del coordinador Zigbee), el coordinador Zigbee y los dispositivos finales, sólo estarán activos durante una duración de super trama (en periodos diferentes), mientras que el router estará activo durante dos periodos de super trama, una duración de super trama cuando actúa como dispositivo asociado a un coordinador PAN, y otra duración de super trama cuando actúa como coordinador de una PAN (para PANs diferentes, durante periodos de tiempo diferentes). Véase la figura 4.13 donde se configura el router para comunicar un dispositivo final con un nodo coordinador.

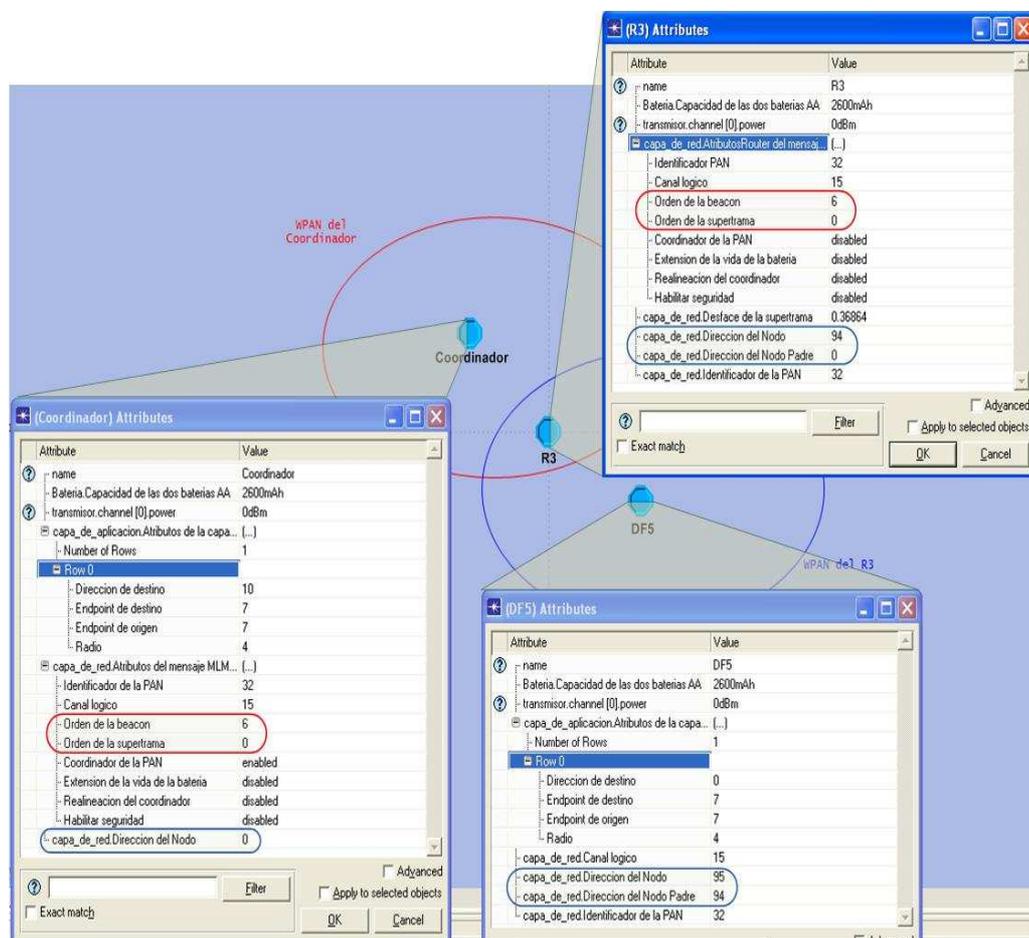


Figura 4. 13 Topología de red; un router (R3) reenvía datos desde dispositivo final 5 (DF5), hacia el coordinador Zigbee

Fuente: autora

El consumo de energía cuando el router es el equipo maestro, se observa que el consumo de energía del router (color verde, Figura 4.14) es mucho mayor al

consumo de energía del coordinador Zigbee (color azul, Figura 4.14) y el dispositivo final (color rojo, Figura 4.14), debido a que como se observa en el zoom de la Figura 4.14, el router tiene el doble de periodos activos (líneas con mayor pendiente) que el dispositivo final y el coordinador Zigbee. Es importante entender que en el zoom la línea de mayor pendiente representa a los periodos activos (TX_ON o RX_ON) y la línea de menor pendiente representa a los periodos inactivos (transmisor y receptor apagados TRX_OFF).

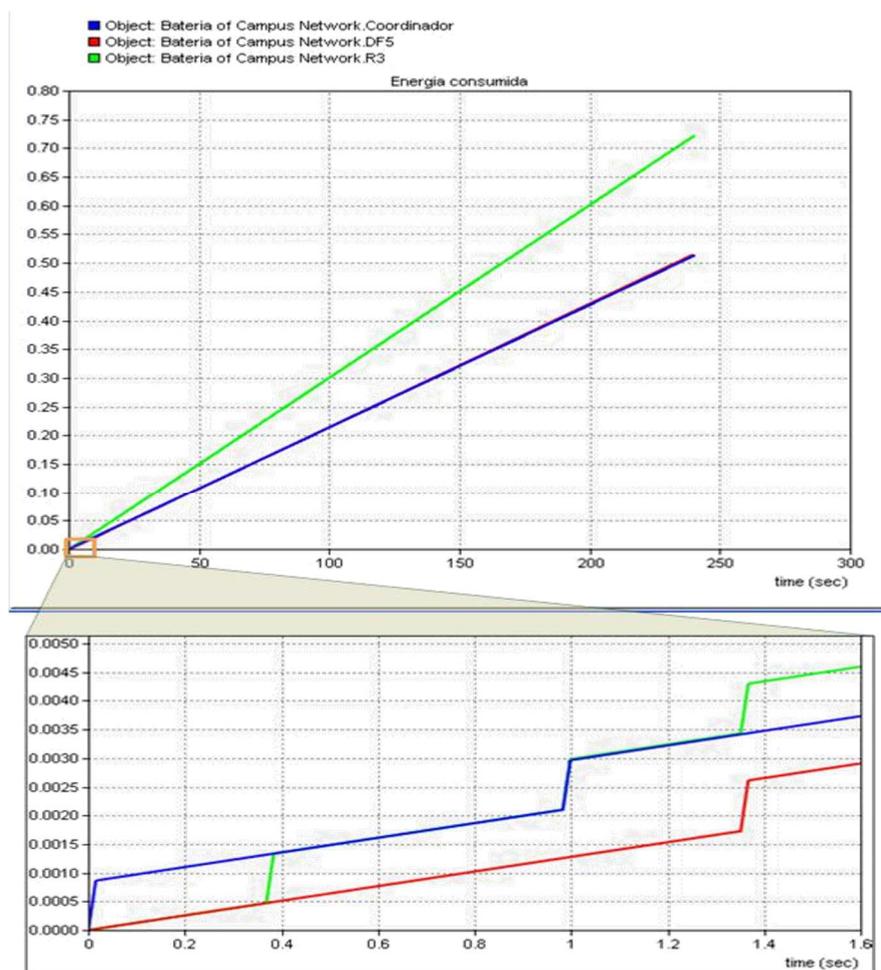


Figura 4. 14 Consumo de energía de los dispositivos de la topología de red de la Figura 4.13

Fuente: autora

4.3 Resultados de generales del rendimiento de red Zigbee

Se configura para este criterio de QoS una red con 20 y 50 nodos, a partir de los resultados obtenidos se pueden examinar el rendimiento de la red y la cantidad de paquetes perdidos.

Tabla 4. 1 Parámetros generales de la red Zigbee

Parámetro	Valor
Modelo de Radio Propagación	Two-Ray Ground
Tecnología inalámbrica	IEEE 802.15.4
Protocolo de enrutamiento	AODV
Tasa de transmisión	250 kbps
Frecuencia de transmisión	2.4 GHz
Tipo de antena	Omnidireccional
Tiempo de simulación	240 seg

Fuente: autora

Tabla 4. 2. Parámetros de Potencia

Parámetro	Valor
Potencia de transmisión	0 dBm (1mW)
Sensibilidad	-94 dBm
Ganancia antena transmisora Gt (dB)	1.0
Ganancia antena receptora Gr (dB)	1.0
Perdidas por trayectoria(dB)	1.0

Fuente: autora

Tabla 4. 3 Parámetros de los nodos

Parámetro	Valor
Tipo de tráfico	FTP
Dirección del tráfico	Todos al Coordinador
Tamaño del paquete	55 bytes
Numero de coordinadores	1 coordinador
Distancia entre nodos	30m
Numero de nodos	Desde 6 hasta 36 nodos
Beacon mode	Enabled Beacon Order:3 Superframe Order:3

Fuente: autora

Para determinar el throughput de la red se usa la ecuación (4.1).

$$\text{Throughput de la red} = \frac{8 * \text{Número de bytes}}{\text{Tiempo de simulación}} \left[\frac{\text{bits}}{\text{seg.}} \right] \quad \text{Ecuación 4.1}$$

Con esto, se puede realizar un análisis de resultados analíticos y comparar de acuerdo a las gráficas obtenidas con los valores de las simulaciones. A través de OPNET. El simulador puede realizar una interpolación de los resultados obtenidos del throughput y el delay, obteniendo como resultado una ecuación de tercer grado para el throughput y para el delay de la red. Estos criterios últimos son aspectos técnicos de la calidad de servicio en el rendimiento de la red.

En las figuras 4.15 y 4.16 se puede visualizar los puntos obtenidos de la simulación y la curva de obtenida del throughput y el delay, con la cual se puede analizar el comportamiento de la red y comparar con los resultados obtenidos en la implementación.

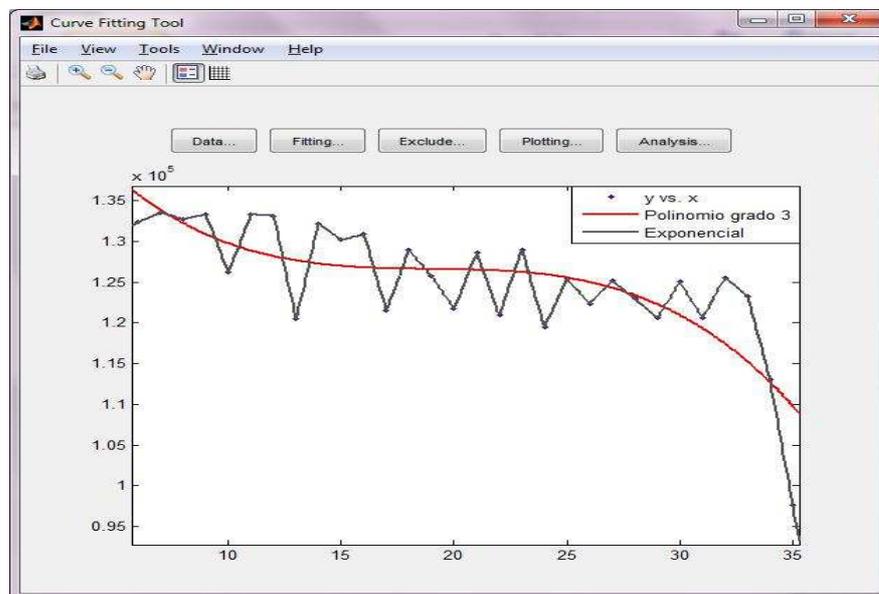


Figura 4. 15 Función polinomial grado 3 para el throughput de la red

Fuente: autora

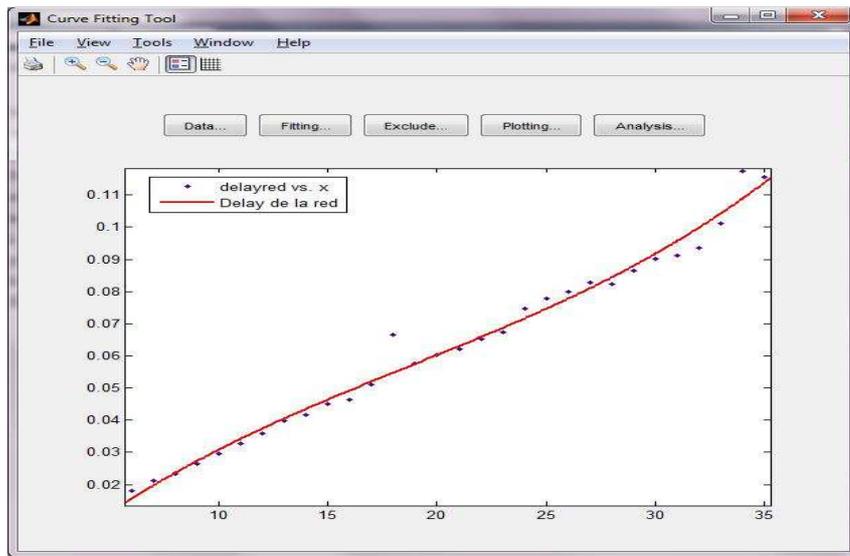


Figura 4. 16 Función polinomial grado 3 para el delay de la red

Fuente: autora

La curva del throughput, se muestra en la figura 4.17, se aprecia que a mayor número de nodos el desempeño de la red baja, ya que existe un solo nodo receptor que maneja toda la información que se transmite en la red, este es el nodo coordinador.

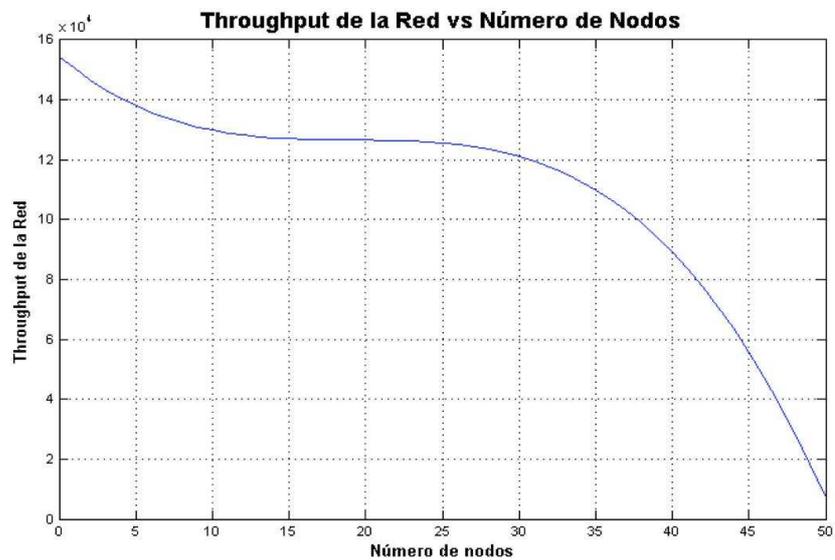


Figura 4. 17 Throughput de la red vs número el de nodos

Fuente: autora

Existe un rango en la curva obtenida en que el throughput se estabiliza, este valor es entre 15 y 24 nodos, superior a este número de dispositivos el tráfico de la red se satura y el throughput empieza a decaer hasta hacerse cero, además el rendimiento de la red se hace cero al superar los 50 dispositivos. Obviamente, al tener menor número de nodos enviando información al coordinador el canal va a estar menos saturado, por lo cual el número de paquetes caídos va a ser mínimo.

El número de paquetes caídos en la red es muy alto y aumenta conforme se incrementa el número de nodos. Esto es debido a que los dispositivos están ‘alerta’ de los paquetes beacon que son transmitidos por el coordinador periódicamente. Debido a esto la gran cantidad de paquetes de control generados se colisionan resultando una gran cantidad de paquetes caídos.

Analizando la curva del throughput se puede afirmar que para máximo 20 nodos, el retardo y el throughput de la red serán óptimos para una monitorización en tiempo real al no existir saturación de la red. Haciendo una comparación del Throughput en la simulación en el rango de 10 a 20 sensores se puede decir que una cantidad óptima de nodos sensores en una red es 15, ya que tiene un valor de desempeño adecuado y además la red con esta cantidad de ‘motas’ podrá adquirir más datos y cubrir un área mayor con un buen desempeño de la red.

Se observa en las Figuras. 4.18 y 4.19, que los tiempos se incrementan hasta llegar a un punto máximo de saturación en donde ya no se puede añadir más nodos.

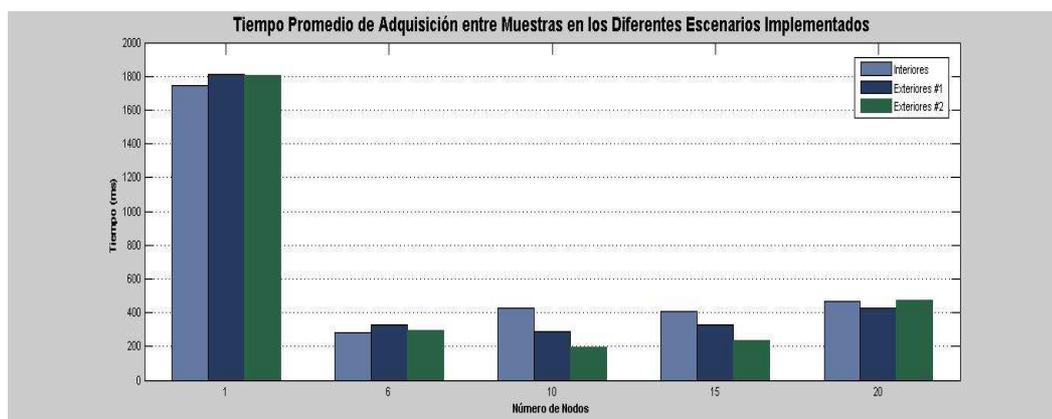


Figura 4. 18 Tiempo de Adquisición entre Muestras del Software

Fuente: autora

Esto se debe a que el tráfico que circula por la red es demasiado alto y consecuentemente, la información entrante con la misma velocidad que cuando son pocos los nodos que están enviando información.

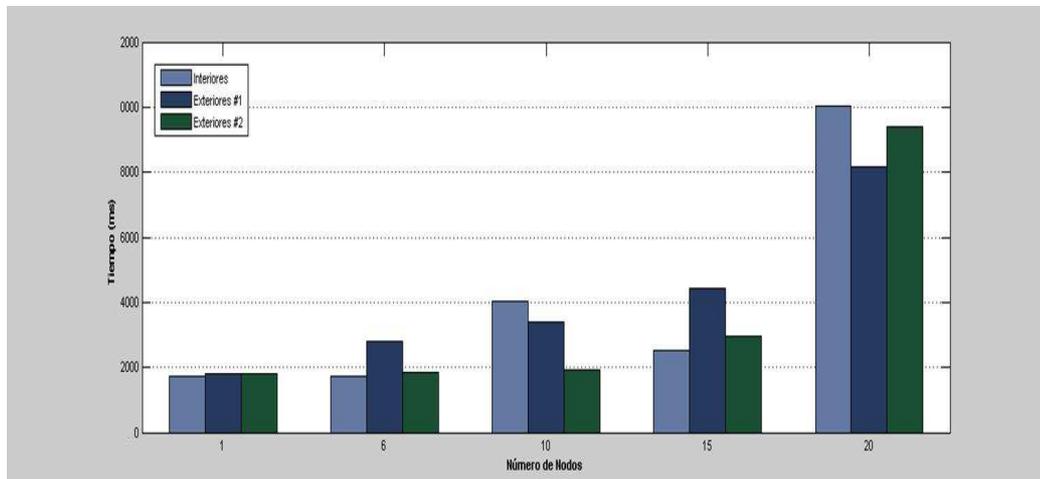


Figura 4. 19 Retardo Promedio de un Nodo Específico de la Red

Fuente: autora

La Figura.4.19 grafica de mejor manera como la evolución de la red aumenta el retardo de la misma y al sacar un promedio del retardo de todos los nodos de la red, se obtiene la tabla. 4.4. En base a la misma se afirma que la cantidad máxima de nodos que puede soportar la red está entre 15 y 20.

Tabla 4. 4 Retardo promedio de la simulación

Cantidad de Nodos	Retardo Promedio
1	1787,189
6	2128,794
10	3112,028
15	3306,138
20	9208,811

Fuente: autora

4.4 Análisis de resultados QoS en red Zigbee

Analizar y evaluar la calidad de servicio (Quality of Service o QoS) permitirá ofrecer garantías de servicio sobre determinado tráfico de la red.

El concepto de calidad en una red de sensores es diferente al concepto en redes inalámbricas para las WSNs, el usuario final no requiere toda la información de la red debido a que la información de nodos vecinos está sensiblemente correlacionada, haciendo que exista redundancia. La calidad de la red se basa entonces en dos aspectos:

Aunque se busca productividad y bajo consumo, los protocolos deben disponer de esquemas mínimos de QoS, que garanticen un retardo acorde con las especificaciones de la aplicación y una tasa de entrega aceptable, no poniendo en peligro otros aspectos. El desarrollar protocolos eficientemente energéticos no debe ser a costa de obtener deficiencias en los atributos principales de la red.

La calidad de la red se basa principalmente en el conjunto de datos agregados, por lo que los protocolos deben designarse también pensando en optimizar este conjunto de datos y la carga que proporcionan.

En los protocolos de enrutamiento planos se asume que la red es generalmente homogénea, esto es, todos los nodos de la red comparten el mismo canal de acceso aleatorio inalámbrico, el status y las capacidades de cada nodo son iguales. SPIN Direct Diffusion y Rumor Routing entre otros comparten este punto de vista. Se hace necesario disminuir la sobrecarga de estas redes y proporcionarles un buen escalado y, por ello, las investigaciones se centran en una opción jerárquica de desarrollo.

El enrutamiento en redes jerárquicas escala perfectamente con el tamaño de la red, conformando así un minucioso modelo de aproximación para la reducción del consumo energético ya que se elimina el flooding de envío en la red, reduciéndose así el número de transmisiones gracias a su topología.

El protocolo que puede asegurar mínimos de calidad de servicio es un protocolo tipo jerárquico, que estructura la red en árboles de clústeres, donde la raíz de cada árbol será un nodo sumidero, dado que, a partir de cierto número de nodos en la red,

es muy recomendable disponer de varios nodos sumideros en funcionamiento no solo por tolerancia a fallos sino también por prestaciones.

Los clústeres son grupos de nodos sensores, controlados por uno de ellos ejerciendo el rol de nodo padre de forma rotatoria (mediante mecanismos de auto-elección y auto-regulación de población adecuados). Estos nodos padres gestionan el proceso de formación del clúster y gobiernan comunicación dentro del clúster mediante el protocolo intra-clúster propuesto al efecto, que está basado en la asignación de tiempos a cada nodo una topología energéticamente eficiente en los siguientes términos:

Realizar tareas de agregación-fusión y compresión de la información antes de proceder al envío de los datos tiene una importancia vital ya que, sabiendo que las tareas de computación son más baratas que las de transmisión, se disminuye la cantidad de datos y por lo tanto el tiempo que se tarda en transmitirlos, lo que conlleva un menor tiempo en el que el módulo de radio está activo y por ello un menor consumo.

Dentro de una posible implementación, la medición de retardo bien podría efectuarse en el envío de los datos, estos datos son normalmente sensibles al tiempo, luego es importante acotar la recepción de los mismos en el tiempo, ajustando la latencia de la red lo máximo posible.

Según la aplicación, existirá zonas o sectores, cada zona tiene un valor de prioridad, así el valor de mayor prioridad hace que los dispositivos de la zona sean ejecutados primero en el Coordinador. El valor de prioridad de las zonas y la ejecución de estos nodos de acuerdo con el valor de la zona se consideran procesamiento global. Por otra parte, cada zona consta de numerosos nodos Zigbee y cada nodo tiene que ajustar los valores de prioridad para su procesamiento local. El procesamiento local se refiere al procesamiento de tráfico de la aplicación de dispositivos finales en función de sus respectivos valores de prioridad.

CONCLUSIONES

Zigbee fue diseñado para proporcionar un alto rendimiento de datos en aplicaciones donde el menor ciclo de trabajo y el consumo de energía son una consideración importante.

Se asocia frecuentemente a la comunicación máquina a máquina (M2M) y al paradigma del Internet de las cosas, en la que los objetos están censados con microprocesadores embebidos, software y conectividad para permitir un mayor servicio mediante el intercambio de datos con otros dispositivos conectados.

El coordinador de la red de área personal (PAN) activa una red Zigbee; primero busca un canal de radio adecuado (normalmente el que tiene la menor actividad) y luego crea la red de auto-asignación de un PAN ID. Cuando se forma la red, un enrutador o dispositivo terminal puede reunir la red a través de un nodo padre cercano (es decir, el coordinador u otro enrutador) enviando una solicitud de unión y el padre puede aceptar o rechazar la solicitud basándose en su disponibilidad de direcciones y otros criterios.

Los dispositivos finales Zigbee envían un gran número de solicitudes a los routers o al coordinador y viceversa.

Los dispositivos finales y enrutadores siempre tienen una distancia de con el coordinador. Esta distancia alrededor del coordinador se define como diferentes factores de área. El factor de área se denomina zona y cada zona tiene muchos dispositivos finales bajo un enrutador. Cada zona tiene un conjunto de atributos de prioridad para definir su prioridad.

Los nodos finales también tienen valores de prioridad en su zona, cuando los nodos de diferentes zonas están tratando de comunicarse a través de nodos intermedios, los routers o el coordinador siempre comprueban sus valores de prioridad. En este mecanismo, un nodo secundario-hijo (nodo final o enrutador) se conecta a un nodo padre de acuerdo con la disposición de los nodos secundarios a pagar por la conexión.

Los protocolos para el enrutamiento son de vital utilización, estos deben tener mecanismos para el ahorro de energía en los nodos debido a que recargar la batería

de los mismos es un gran inconveniente o imposible. Todos los aspectos de los nodos, desde el hardware hasta las operaciones realizadas por éstos en el protocolo, en la medida de lo posible ayudar a distribuir la carga energética.

Por las diversas aplicaciones, una prioridad esencial, es la del ahorro energético, conservando valores de retardos, QoS y aportando tolerancia a fallos entre otras características. Así para casos de implementación de red zigbee, es esencial determinar valores de prioridad diferentes de la zona o sector donde estarán operando.

Los simuladores de redes de eventos discretos emplean los modelos de propagación inalámbrica debido a los altos requerimientos de cálculo para el modelado realista.

RECOMENDACIONES

Emplear protocolos de enrutamiento de alta eficiencia que den soporte a múltiples nodos sumideros y que combinen requisitos de QoS, consumo energético.

Existen varios programas desarrollados para el análisis de WSN, pero es necesario comprobar su desempeño antes de tomarlos como válidos.

Que cada fabricante aplique un esquema de calidad de servicio en sus equipos, y al hacer un diseño es importante tener en cuenta la compatibilidad de los estándares.

La mayoría de veces los resultados obtenidos en las simulaciones e implementaciones tienen grandes diferencias por lo que se recomienda utilizar herramientas de software que permiten realizar las comparaciones de manera más comprensible para la detección de las acciones correctivas necesarias balanceo de carga.

Desarrollar algoritmos para enrutamiento basado en inteligencia computacional que otros autores denominan algoritmos inteligentes.

BIBLIOGRAFÍA

- Agudelo Quiroz, S. (2011). *REDES DE SENSORES INALÁMBRICOS UTILIZANDO ZIGBEE/802.15.4*. Obtenido de https://nelwibaez.files.wordpress.com/2014/01/a_redes_de_sensores_inalambricos_utilizando_zigbee802154_a05yzx_.pdf
- Aliaga, V. (2011). *Diseño, simulación y estudio de una red de sensores*. Obtenido de <https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/14237/Memoria.pdf?sequence=1>
- Amarillo, M. (2012). *Simulación de redes de sensores inalámbricos: un modelo energético a nivel de nodo-sensor bajo las especificaciones IEEE 802.15.4 y Zigbee*. Obtenido de <https://repository.javeriana.edu.co/bitstream/handle/10554/12727/AmarilloRojasMiltonOsvaldo2012.PDF?sequence=1&isAllowed=y>
- Anand, S., & Chandel, S. (2014). *Comparison of Routing protocols in Wireless Sensor Networks: A Detailed Survey*. Obtenido de The International Journal Of Engineering And Science (IJES). ISSN (e): 2319 – 1813 ISSN (p): 2319 – 1805: <http://www.theijes.com/papers/v3-i12/Version-3/D031203020027.pdf>
- Barbolla Asenjo, D. (2009). *Desarrollo de una aplicación de comunicación Bluetooth entre una PDA y sensores*. Obtenido de Universidad Carlos III de Madrid Escuela Politécnica Superior. Ingeniería en Informática.: <https://core.ac.uk/download/pdf/30043084.pdf>
- Barcell, F. (2010). *Wireless Sensor Network*. Obtenido de Sitio web: Manuel Fernández Barcell: <http://www.mfbarcell.es/conferencias/wsn.pdf>
- Capella, J. (2010). *Redes inalámbricas de sensores: Una nueva arquitectura eficiente y robusta basada en jerarquía dinámica de grupos*. Obtenido de Tesis Doctoral de Universidad Politécnica de Valencia: <https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/8417/tesisUPV3326.pdf?sequence>
- Dementyev, A., Hodges, S., Taylor, S., & Smith, J. (2016). *Power Consumption Analysis of Bluetooth Low Energy, ZigBee and ANT Sensor Nodes in a Cyclic Sleep Scenario*. Obtenido de Department of Electrical Engineering, University of Washington, Seattle, WA, USA: <https://www.microsoft.com/en-us/research/wp-content/uploads/2016/02/IWS20201320wireless20power20consumption.pdf>

- Dignani, J. (2011). *Análisis del protocolo Zigbee*. Obtenido de http://postgrado.info.unlp.edu.ar/Carreras/Especializaciones/Redes_y_Seguridad/Trabajos_Finales/Dignanni_Jorge_Pablo.pdf
- Elahi, A., & Gschwender, A. (2009). *Introduction to the ZigBee Wireless Sensor and Control Network*. Obtenido de Informit: <http://www.informit.com/articles/article.aspx?p=1409785>
- Fernández, R., Ordieres, J., González, A., & Alba, F. (2009). *Redes Inalámbricas de Sensores: Teoría y aplicación práctica*. ISBN: 978-84-692-30007-7 Logroño. España: Publicaciones de Universidad de la Rioja. Obtenido de Repositorio Digital; Universidad de la Rioja.
- Flores, E. (2012). *Redes de sensores Inalámbricos Aplicados a la Medicina*. Obtenido de Repositorio Digital de Universidad de Cantabria: <https://repositorio.unican.es/xmlui/bitstream/handle/10902/1288/349251.pdf?sequence=1>
- Glen, M., & J. Moreno. (2012). *Zigbee*. Obtenido de <https://sx-dex.wikispaces.com/ZIGBEE>
- Grover, J., Sharma, S., & Sharma, M. (2014). *A Study of Geographic Adaptive Fidelity Routing Protocol in Wireless Sensor Network*. Obtenido de ResearchGate: <http://nubr.co/Po5iGm>
- Ibrahim, S. K. (2015). *Performance Evaluation of Zigbee Coordinator Fails Node with Different Topologies*. Obtenido de J Comput Sci Syst Biol 8:292-295.: <https://www.omicsonline.org/open-access/performance-evaluation-of-zigbee-coordinator-fails-node-with-different-topologies-jcsb-1000203.php?aid=60264>
- Iraceburu González, J., & Goicoechea Fernández, J. (2014). *Desarrollo e implementación de una red inalámbrica de sensores de temperatura y humedad*. Obtenido de Universidad Pública de Navarra. Ingeniería Industrial, Informática y de Telecomunicación: http://academicas.unavarra.es/bitstream/handle/2454/11846/TFG_IraceburuGonzalezJulen2014.pdf?sequence=1
- Javaid, N., Mohammad, N., Latif, K., Qasim, U., & Khan, A. (2013). *HEER: Hybrid Energy Efficient Reactive Protocol for Wireless Sensor Networks*. Obtenido de COMSATS Institute of Information Technology, Islamabad, Pakistan: <https://arxiv.org/pdf/1304.0617.pdf>
- Kochar Tech. (2012). *Zigbee tutorial. Protocol,frame,PHY,MAC*. Obtenido de http://www.rfwireless-world.com/Tutorials/Zigbee_tutorial.html
- Martínez, J., & Conde, H. (2013). *Red inalámbrica de sensores ambientales mediante uso de la tecnología Zigbee*. Obtenido de

<http://tesis.ipn.mx/jspui/bitstream/123456789/13168/1/Red%20Inalambrica%20de%20Sensores%20Ambientales%20Mediante%20el%20Uso%20de%20la%20Tecnologia%20ZIGBEE.pdf>

Querol, J. (2011). *Estudio y evaluación de prestaciones de redes inalámbricas de sensores*. Obtenido de Repositorio Digital Universidad de Valencia: https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/10354/Proyecto_Querol.pdf

Risteska, B., Chatzimisios, P., & Avramova, A. (2014). *Application of Wireless Sensor Networks for Indoor Temperature Regulation*. Obtenido de SAGE Journals: <http://journals.sagepub.com/doi/full/10.1155/2014/502419>

Saldaña, J. M. (2011). *TÉCNICAS DE OPTIMIZACIÓN DE PARÁMETROS DE RED PARA LA MEJORA DE LA COMUNICACIÓN EN SERVICIOS DE TIEMPO REAL*. Obtenido de http://diec.unizar.es/~jsaldana/personal/doctoral_thesis_jsaldana.pdf

Shen, B., & Song, J. (2016). *A Method of Data Aggregation for Wearable Sensor Systems*. Obtenido de Sensor 16 (7). doi: 10.3390 / s16070954: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC4970008/>

Suárez, C. (2014). *Algoritmo de Detección y Notificación de Apuntamiento Entre Nodos de una Red Inalámbrica Móvil de Sensores* . Obtenido de <https://repository.javeriana.edu.co/bitstream/handle/10554/12743/SuarezSuarezCarlosRene2014.pdf?sequence=1>

Thakur, A. (2012). *EngineersGarage*. Obtenido de La tecnología ZigBee: <http://www.engineersgarage.com/articles/what-is-zigbee-technology?page=3>

UIT-T. (2014). *Una visión general de las ciudades inteligentes sostenibles y el papel de las tecnologías de la información y comunicación* . Obtenido de https://www.google.com.ec/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&cad=rja&uact=8&ved=0ahUKEwjv_6Ds35XRAhXC7iYKHe_HC8UQFggaMAA&url=http%3A%2F%2Fwww.itu.int%2Fen%2FITU-T%2Ffocusgroups%2Fssc%2FDocuments%2FApproved_Deliverables%2FTR-Overview-SSC-espanol.docx

Wilamowski, B., & Irwin, D. (2011). *Industrial Communication Systems*. 2^o Edición. Boca Ratón. USA: CRC Press.

XBee. (2016). *¿Qué es XBee?* Obtenido de Ingeniería MCI Ltda.: <http://xbee.cl/que-es-xbee/>

GLOSARIO

APDU: Application support sub-layer Protocol Data Unit

APL: Application Layer

APS: Application Support

BI: Beacon Interval

BO: Beacon Order

BSN: Beacon Sequence Number

CAP: Contention Access Period

CCA: Clear Chanel Assessment

CFP: Contention Free Period

CSMA: Carrier Sense Multiple Access

CSMA-CA Carrier Sense Multiple Access-Collision Avoidance

DF: Dispositivo final

DSN: Data Sequence Number

ED: Energy Detection

FFD: Full Function Device

GTS: Guaranty Time Slot

LIFS: Long Inter Frame Spacing

MAC: Media Access Control

MLME: MAC Sub Layer Management Entity

MPDU: MAC Protocol Data Unit

NB: Number of Backoff

NIB: Network Information Base

NLDE: Network Layer Data Entity

NLDE-SAP: Network Layer Data Entity-Service Access Point

NLME: Network Layer Management Entity

NLME-SAP: Network Layer Management Entity-Service Access Point

NPDU: Network layer Protocol Data Unit

NWK: Network

O-QPSK: Offset Quadrature Phase-Shift Keying

PAN: Personal Area Network

PDU: Protocol Data Unit PHY: Physical Layer

PIB: Physical Information Base

SAP: Service Access Point

WPAN: Wireless personal area network

WSN: Wireless Sensor Networks

ANEXOS

Protocolos (breve característica)	Clasificación	Movilidad	Conocimiento de la posición	Basado en negociación	Agregación de datos	Localización	QoS	Complejidad	Escalabilidad	Multi-ruta	Basado en consultas
Sensor Protocols for Information via Negotiation (SPIN) Una de las ventajas de SPIN es que los cambios en la topología son localizados.	Plano	Posible	No	Sí	Sí	No	No	Baja	Limitada	Sí	Sí
Directed Diffusion , es un paradigma centrado en los datos.	Plano	Limitada	No	Sí	Sí	Sí	No	Baja	Limitada	Sí	Sí
Rumor Routing , es una variación de Difusión Directa.	Plano	Muy limitada	No	No	Sí	No	No	Baja	Buena	No	Sí
Gradient-Based Routing (GBR) , es una nueva variante de Difusión Directa.	Plano	Limitada	No	No	Sí	No	No	Baja	Limitada	No	Sí
Minimum Cost Forwarding Algorithm (MCFA) , el algoritmo MCFA explota el hecho de que la dirección del encaminamiento es siempre conocida.	Plano	No	No	No	No	No	No	Baja	Buena	No	No
Constrained anisotropic diffusion routing (CADR) , difunde consultas usando un criterio de selección para elegir los sensores que tengan más probabilidades de obtener los datos deseados.	Plano	No	No	No	Sí	No	No	Baja	Limitada	No	No
COUGAR , el protocolo COUGAR se centra en los datos y considera la red como una gran base de datos distribuida.											

	Plano	No	No	No	Sí	No	No	Baja	Limitada	No	Sí
<i>Active Query forwarding in sensor networks (ACQUIRE)</i> al igual que COUGAR, ve la red como una gran base de datos donde las consultas complejas se dividen en varias subconsultas.	Plano	Limitada	No	No	Sí	No	No	Baja	Limitada	No	Sí
EAR	Plano	Limitada	No	No	No		No	Baja	Limitada	No	Sí
<i>Low Energy Adaptive Clustering Hierarchy (LEACH)</i> , es un protocolo basado en clústeres. LEACH selecciona aleatoriamente unos pocos sensores como CHs y turna este rol para distribuir la carga energética entre todos los nodos de la red.	Jerárquico	Sumidero fijo	No	No	Sí	Sí	No	CHs	Buena	No	No
<i>Threshold-sensitive Energy Efficient Protocols (TEEN & APTEEN)</i> , éstos protocolos se desarrollaron para aplicaciones críticas donde se precisa de una respuesta rápida frente a repentinos cambios en los parámetros que están siendo sensorizados.	Jerárquico	Sumidero fijo	No	No	Sí	Sí	No	CHs	Buena	No	No
<i>Power-Efficient Gathering in Sensor Information Systems (PEGASIS)</i> , la idea principal en PEGASIS es formar una cadena de sensores donde cada nodo recibirá y transmitirá a un vecino cercano.	Jerárquico	Sumidero fijo	No	No	No	Sí	No	Baja	Buena	No	No
<i>Small Minimum Energy Communication Network (MECN & SMEC)</i> , el protocolo MECN computa una subred de mínima energía para cierta red de sensores,	Jerárquico	No	No	No	No	No	No	Baja	Baja	No	No

ayudándose de receptores GPS . MECN identifica una región de acción para cada nodo.											
Self Organizing Protocol (SOP) , en SOP se diseña una arquitectura donde cada nodo posee sus propias capacidades y funcionalidades.	Jerárquico	No	No	No	No	No	No	Baja	Baja	No	No
Hierarchical Power-aware Routing (HPAR) , divide la red en grupos de sensores. Cada grupo geográficamente cercano se configura como un clúster zonal y cada uno de éstos se trata como una entidad.	Jerárquico	No	No	No	No	No	No	Baja	Buena	No	No
Virtual Grid Architecture Routing (VGA) , es un protocolo que emplea agregación de la información y procesamiento dentro de la red, para aumentar el tiempo de vida de la misma.	Jerárquico	No	No	Sí	Sí	Sí	No	CHs	Buena	Sí	No
Sensor Aggregate , un conjunto agregado de sensores comprende aquellos nodos en la red que satisfacen un predicado para una tarea de procesado en conjunto. El propósito de esta aproximación es monitorizar conjuntamente la actividad de un objetivo en un cierto medio.	Jerárquico	Limitada	No	No	Sí	No	No	Baja	Buena	No	Posible
Two-Tier Data Dissemination (TTDD) , proporciona una entrega eficiente y escalable a múltiples sumideros móviles.	Jerárquico	Sí	Sí	No	No	No	No	Moderada	Baja	Posible	Posible

ANEXO 1 Resumen de los dos tipos de protocolos de enrutamientos para WSN/ Red ZIGBEE

DECLARACIÓN Y AUTORIZACIÓN

Yo, **Romero García, Natalia Vanessa**, con C.C: # 1206295691 autor del trabajo de titulación: **Análisis y evaluación del parámetro de calidad de servicio (QoS) en red Zigbee con un nodo coordinador**, previo a la obtención del título de **Magister en Telecomunicaciones** en la Universidad Católica de Santiago de Guayaquil.

1.- Declaro tener pleno conocimiento de la obligación que tienen las instituciones de educación superior, de conformidad con el Artículo 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior, de entregar a la SENESCYT en formato digital una copia del referido trabajo de titulación para que sea integrado al Sistema Nacional de Información de la Educación Superior del Ecuador para su difusión pública respetando los derechos de autor.

2.- Autorizo a la SENESCYT a tener una copia del referido trabajo de titulación, con el propósito de generar un repositorio que democratice la información, respetando las políticas de propiedad intelectual vigentes.

Guayaquil, 24 de Agosto del 2017

f. _____

Nombre: **Romero García, Natalia Vanessa**

C.C: **1206295691**

REPOSITORIO NACIONAL EN CIENCIA Y TECNOLOGÍA

FICHA DE REGISTRO DE TESIS/TRABAJO DE TITULACIÓN

TÍTULO Y SUBTÍTULO:	Análisis y evaluación del parámetro de calidad de servicio (QoS) en red Zigbee con un nodo coordinador		
AUTOR(ES)	Romero García, Natalia Vanessa		
REVISOR(ES)/TUTOR(ES)	MSc Manuel Romero Paz		
INSTITUCIÓN:	Universidad Católica de Santiago de Guayaquil		
FACULTAD:	Sistema de Posgrado		
CARRERA:	Maestría en Telecomunicaciones		
TÍTULO OBTENIDO:	Magister en Telecomunicaciones		
FECHA DE PUBLICACIÓN:	24 de Agosto del 2017	No. PÁGINAS:	DE 76
ÁREAS TEMÁTICAS:	Redes de sensores inalámbricos, IEEE 802.15.4, QoS		
PALABRAS CLAVES/ KEYWORDS:	QoS, ZigBee, Bluetooth, WSN, Coordinador.		

En el presente trabajo se expone una visión general de la red de sensores inalámbricos (Wireless Sensor Network, WSN), en particular la red Zigbee, esta tecnología es clave en la realización de la plataforma denominada Internet de las Cosas, que cambia la forma de la transmisión de información entre las cosas, u objetos, al fusionar el mundo físico objetivo junto con la red de internet. Se analiza la literatura científica acerca de las políticas de la calidad de servicio (Quality of Service, QoS) en la transmisión de datos en redes Zigbee, ya que presentan problemas que afectan al envío y recepción de datos. Se utiliza metodología como la analítica, la exploratoria y la empírica, se debe desarrollar una aplicación. Una red Zigbee contiene 3 dispositivos principales, coordinador, router y dispositivos finales, la literatura científica ha nombrado la comunicación entre un coordinador y router o entre un router y un dispositivo final como comunicación nodo padre- nodo hijo. La distancia alrededor del coordinador con sus nodos hijos se define como diferentes factores de área. El factor de área se denomina zona y cada zona tiene muchos dispositivos finales bajo un enrutador. Cada zona tiene un conjunto de atributos de prioridad para definir su prioridad.

ADJUNTO PDF:	<input checked="" type="checkbox"/> SI	<input type="checkbox"/> NO
CONTACTO CON AUTOR/ES:	Teléfono: +593-0991883868	E-mail: natyprincessa88@hotmail.com
CONTACTO CON LA INSTITUCIÓN (COORDINADOR DEL PROCESO UTE):	Nombre: Romero Paz Manuel de Jesús	
	Teléfono: +593-994606932	
	E-mail: manuel.romero@cu.ucsg.edu.ec	

SECCIÓN PARA USO DE BIBLIOTECA

Nº. DE REGISTRO (en base a datos):	
Nº. DE CLASIFICACIÓN:	
DIRECCIÓN URL (tesis en la web):	