

UACM

**Universidad Autónoma
de la Ciudad de México**

Nada humano me es ajeno

COLEGIO DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA

LICENCIATURA EN INGENIERÍA EN SISTEMAS ELECTRÓNICOS
Y DE TELECOMUNICACIONES

**“Sistema de monitoreo para redes inalámbricas de sensores con protocolo de
comunicación ZigBee”**

TRABAJO RECEPTACIONAL
PARA OBTENER EL TÍTULO DE LICENCIADA EN
INGENIERÍA EN SISTEMAS ELECTRÓNICOS Y DE TELECOMUNICACIONES

PRESENTA:
ATZIRI ISABEL RAMOS RIZO

Directora del trabajo receptacional
M. en C. Magali Cortez Vázquez

México, D.F. marzo 2015.

SISTEMA BIBLIOTECARIO DE INFORMACIÓN Y DOCUMENTACIÓN



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE LA CIUDAD DE MÉXICO COORDINACIÓN ACADÉMICA

RESTRICCIONES DE USO PARA LAS TESIS DIGITALES

DERECHOS RESERVADOS[©]

La presente obra y cada uno de sus elementos está protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor; por la Ley de la Universidad Autónoma de la Ciudad de México, así como lo dispuesto por el Estatuto General Orgánico de la Universidad Autónoma de la Ciudad de México; del mismo modo por lo establecido en el Acuerdo por el cual se aprueba la Norma mediante la que se Modifican, Adicionan y Derogan Diversas Disposiciones del Estatuto Orgánico de la Universidad de la Ciudad de México, aprobado por el Consejo de Gobierno el 29 de enero de 2002, con el objeto de definir las atribuciones de las diferentes unidades que forman la estructura de la Universidad Autónoma de la Ciudad de México como organismo público autónomo y lo establecido en el Reglamento de Titulación de la Universidad Autónoma de la Ciudad de México.

Por lo que el uso de su contenido, así como cada una de las partes que lo integran y que están bajo la tutela de la Ley Federal de Derecho de Autor, obliga a quien haga uso de la presente obra a considerar que solo lo realizará si es para fines educativos, académicos, de investigación o informativos y se compromete a citar esta fuente, así como a su autor ó autores. Por lo tanto, queda prohibida su reproducción total o parcial y cualquier uso diferente a los ya mencionados, los cuales serán reclamados por el titular de los derechos y sancionados conforme a la legislación aplicable.

RESUMEN del trabajo recepcional de **Atziri Isabel Ramos Rizo**, presentada como requisito parcial para la obtención del grado de **LICENCIADA EN INGENIERÍA EN SISTEMAS ELECTRÓNICOS Y DE TELECOMUNICACIONES**. México, D.F. marzo 2015.

SISTEMA DE MONITOREO PARA REDES INALÁMBRICAS DE SENSORES CON PROTOCOLO DE COMUNICACIÓN ZIGBEE

En este documento se describe el desarrollo de la implementación de una red inalámbrica de sensores (RIS) Ad-hoc, con el fin de recolectar información de una red específica a través de nodos que se encuentran en igualdad de condiciones dentro de la red. La red inalámbrica de sensores consta de cuatro nodos provistos por módulos Xbee de la marca Digi, cada nodo cuenta con dos tipos de sensores; temperatura y humedad. En el modelo de capas que sigue la red, el estándar IEEE 802.15.4 resuelve el nivel uno (físico) y dos (MAC). Mientras que los niveles tres (red) y cuatro (aplicación) son regidos por la especificación ZigBee.

Además, presenta un sistema de monitoreo con interfaz gráfica desarrollado en la plataforma LabView de *National Instruments*, capaz de monitorear y obtener información referente a los sensores colocados en cada nodo de la red inalámbrica de sensores. Siendo este último la principal aportación del trabajo.

Los resultados obtenidos de las pruebas realizadas en conjunto con la red inalámbrica de sensores implementada y el sistema de monitoreo desarrollado, muestran que es posible adecuar dicho sistema para usarse en cualquier RIS.

Palabras clave: RIS, ZigBee, LabView, Xbee, IEEE 802.15.4, Sistema de monitoreo.

Dedicatoria

*A ti mi Marichu que estás en el cielo... parte de ti está
en mí y es la que me permite estar aquí.*

*A los compañeros estudiantes de ingeniería... el
camino en ocasiones es difícil tornándose
inalcanzable, pero en este camino es en donde te das
cuenta de la fuerza y tenacidad que tienes para lograr
tus sueños, finalizado con la recompensa de tu propio
trabajo.*

*Si decides cambiar tus horas de sueño por tu sueño...
No te rindas, la meta está cerca.*

*Solamente esfuérzate y sé muy valiente.
Josué 1:7*

Agradecimientos

A Dios por el soplo de vida que me permite estar aquí culminando uno de mis sueños.

A mis padres Lupita y Alejandro, agradezco la mujer en la que me han convertido, el amor, la confianza y el apoyo en cada decisión.

A mis hermanos Abi y Ale, por ser mi inspiración principal, por dejarme ser parte de sus vidas, por la confianza y el apoyo total. Amo la hermandad que existe entre nosotros y la complicidad de nuestras risas.

A Alex, por darle diseño a mi vida, llenándola de colores y nuevas ideas. Gracias por el apoyo, ayuda y cariño.

A mis tía(o)s, prima(o)s y sobrina(o)s por todo el cariño, apoyo y amor incondicional que me demuestran todos los días.

A mis amigos que conocí en la universidad y que se quedan para toda la vida... Violeta Pérez, Juan Ortega, Edgar García y Efraín Urincho. Gracias por el compañerismo relacionado con lo académico y lo emocional, el apoyo mutuo hizo que cada semestre termináramos como los grandes y la fraternidad hizo que fuéramos un buen grupo... ¡Cómo tenga que ser! Los amo amigos.

A mis amigos que son más que eso; Andrea, Dalia, Gaby, Diana, Edgar (Ciro), Miguel Tavera y Upita. Juan A. López, gracias por la ayuda en las últimas pruebas.

A mi asesora Magali Cortez Vázquez, porque indudablemente las enseñanzas, la paciencia, el compromiso, la entrega y la confianza que me brindó, contribuyeron en gran manera a mi formación académica y a la realización exitosa del trabajo.

Al maestro J. Ignacio Castillo Velázquez por poner nuestra atención en las pequeñas definiciones que determinan grandes cosas, por el entusiasmo y el apoyo en la lectura y corrección del trabajo.

Al Dr. Daniel Tapia Sánchez por motivarnos a ir más allá de lo posible. Por el apoyo y corrección del trabajo.

Al maestro J. Yazbek Buendía Gómez por las enseñanzas y el apoyo en la corrección del trabajo.

A la maestra S. Alejandra Andrade Rodríguez por la confianza que me dio al platicarle del proyecto. Gracias por las correcciones del trabajo.

En general a todos los profesores que de alguna manera contribuyeron a mi desarrollo y preparación profesional.

Finalmente agradezco a la Universidad Autónoma de la Ciudad de México por abrir sus puertas para que pudiera prepararme profesionalmente y formar parte de ella. Así mismo, agradezco el apoyo en la impresión y el empastado del trabajo recepcional.

Índice General

Resumen	
Dedicatoria	
Agradecimientos	

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN	1
1.1 Antecedentes	1
1.1 Motivación del proyecto	5
1.2 Objetivo	6
1.3 Alcances y limitaciones	6
1.4 Materiales y herramientas	6
1.5 Organización del trabajo recepcional.....	7

CAPÍTULO II

NIVEL FÍSICO Y CONTROL DE ACCESO AL MEDIO DE LA RED INALÁMBRICA DE SENSORES	8
2.1 Descripción general	8
2.2 Componentes de una LR-WPAN IEEE 802.15.4.....	9
2.3 Topologías de red.....	9
2.3.1 Topología de estrella	10
2.3.2 Topología punto a punto	10
2.3.3 Topología de árbol.....	11
2.3.3.1 Trama <i>Beacon</i>	11
2.4 Arquitectura.....	12
2.4.1 Capa física (PHY)	13
2.4.1.1 Numeración de canales para 868 MHz, 915 MHz y 2450 MHz	14
2.4.1.2 Tareas de la capa física.....	15
2.4.2 Subcapa MAC	16
2.4.2.1 Entrega fiable de datos	17
2.4.2.2 Control de acceso al medio	17
2.4.2.2.1 Función de coordinación distribuida	18
2.4.2.2.2 Función de coordinación puntual	19
2.4.2.3 Supertrama.....	20
2.4.2.3.1 Período de acceso a contención (CAP)	20
2.4.2.3.2 Período libre de contención (CFP).....	21
2.5 Redes con <i>BEACON</i>	22
2.5.1 Comunicación desde un dispositivo hacia el coordinador	22
2.5.2 Comunicación desde el coordinador hacia un dispositivo	22
2.5.3 Sincronización y operación en bajo consumo	23
2.6 Redes sin <i>BEACON</i>	23
2.6.1 Comunicación desde un dispositivo hacia el coordinador.....	23
2.6.2 Comunicación desde el coordinador hacia un dispositivo	24
2.6.3 Sincronización y operación en bajo consumo.....	24
2.7 Direccionamiento	24
2.8 Tipos de tramas.....	26

CAPÍTULO III

NIVEL DE RED Y APLICACIÓN DE LA RED INALÁMBRICA DE SENSORES	27
3.1 Dispositivos de una red ZigBee	27
3.1.1 Coordinador	27
3.1.2 Router	28
3.1.3 Dispositivo Final	28
3.2 Topologías de red	28
3.2.1 Topología de malla	29
3.3 Arquitectura ZigBee	29
3.3.1 Capa de red (NWK)	30
3.3.2 Capa de aplicación (APL)	34
3.3.2.1 Subcapa APS	34
3.3.2.1.1 Perfiles	34
3.3.2.1.2 Binding	35
3.3.2.2 Subcapa ZDO	35
3.4 Formación de una red ZigBee	36
3.5 Hardware	37
3.5.1 DIGI	37
3.5.2 Xbee S2C	37
3.5.2.1 Características de los módulos Xbee S2C	38
3.5.3 Modos de comunicación	39
3.5.3.1 Modo AT	39
3.5.3.2 Modo API	39
3.5.3.2.1 Estructura de trama API	40

CAPÍTULO IV

CONFIGURACIÓN E IMPLEMENTACIÓN DE LA RED INALÁMBRICA DE SENSORES	43
4.1 Elementos de red	43
4.2 Configuración de dispositivos en X-CTU	44
4.2.1 Parámetros del coordinador	44
4.2.1.1 Parámetros para la comunicación serial	45
4.2.2 Tiempo de muestreo	46
4.2.3 Parámetros del Router 1	46
4.2.4 Parámetros del Router 2	47
4.2.5 Parámetros del Dispositivo Final	48
4.3 Sensores	49
4.3.1 Sensor de humedad	50
4.3.2 Sensor de temperatura	51
4.4 Topología de la Red	51

CAPÍTULO V

PROGRAMA DE MONITOREO DE LA RED INALÁMBRICA DE SENSORES	56
5.1 LabView	56
5.1.1 Programación en LabView	57
5.2 Descripción del programa	57

5.2.1 Actualización de Red.....	58
5.2.2 Monitoreo Manual.....	62
5.2.3 Monitoreo Automático.....	65
5.3 Programa remoto.....	69
5.4 Programa ejecutable.....	72
5.5 Red de área local.....	77
Hub 8 Port NWay Switch ENH908-NWY.....	77

CONCLUSIONES	80
Alcances del proyecto:.....	81
Trabajo futuro.....	82

REFERENCIAS	83
--------------------------	-----------

Índice de figuras

FIGURA 1. 1 RED INALÁMBRICA DE SENSORES.....	2
FIGURA 1. 2 TOPOLOGÍA DE UN NODO INALÁMBRICO.....	3
FIGURA 2. 1 TOPOLOGÍA ESTRELLA Y PUNTO A PUNTO [2].....	10
FIGURA 2. 2 TOPOLOGÍA DE ÁRBOL [2].....	12
FIGURA 2. 3 ARQUITECTURA DEL ESTÁNDAR 802.15.4.....	12
FIGURA 2. 4 COMUNICACIÓN ENTRE CAPAS.....	13
FIGURA 2. 5 CANALES EN EL ESTÁNDAR 802.15.4 [8].....	14
FIGURA 2. 6 ESTRUCTURA DE TRAMA DE SINCRONIZACIÓN [7].....	16
FIGURA 2. 7 EJEMPLO DE TRAMA DE TRANSMISIÓN [7].....	16
FIGURA 2. 8 ALGORITMO CDMA-CA.....	19
FIGURA 2. 9 ESTRUCTURA DE SUPERTRAMA [2].....	20
FIGURA 2. 10 PARTES DE LA SUPERTRAMA [2].....	21
FIGURA 2. 11 DIAGRAMA DE PETICIÓN DE BEACON [7].....	23
FIGURA 2. 12 ESQUEMA DE TRAMA [7].....	25
FIGURA 3. 1 EJEMPLO DE TOPOLOGÍA DE MALLA [11].....	29
FIGURA 3. 2 CAPAS DE LA ESPECIFICACIÓN ZIGBEE [12].....	30
FIGURA 3. 3 DISPOSITIVOS XBEE S2C [14].....	37
FIGURA 3. 4 ESTRUCTURA DE LA TRAMA API [4].....	40
FIGURA 3. 5 TRAMA DE DATOS DE PUERTO SERIE [4].....	41
FIGURA 4. 1 SOFTWARE X-CTU.....	44
FIGURA 4. 2 CONFIGURACIÓN DEL COORDINADOR EN X-CTU.....	45
FIGURA 4. 3 CONFIGURACIÓN DE DIRECCIONAMIENTO DEL COORDINADOR.....	45
FIGURA 4. 4 DIRECCIONAMIENTO DEL ROUTER 1.....	46
FIGURA 4. 5 DIRECCIONAMIENTO ROUTER 2.....	48
FIGURA 4. 6 DIRECCIONAMIENTO DISPOSITIVO FINAL.....	48
FIGURA 4. 7 CONEXIÓN DE LOS SENSORES EN EL DISPOSITIVO FINAL.....	50
FIGURA 4. 8 SENSORES CONECTADOS AL DISPOSITIVO FINAL.....	50
FIGURA 4. 9 CIRCUITO DEL SENSOR DE HUMEDAD.....	51
FIGURA 4. 10 CIRCUITO DEL SENSOR DE TEMPERATURA.....	51

FIGURA 4. 11	DESCUBRIMIENTO DEL ROUTER 1.....	52
FIGURA 4. 12	DESCUBRIMIENTO DEL ROUTER 2 A TRAVÉS DEL ROUTER 1	53
FIGURA 4. 13	DESCUBRIMIENTO DEL DISPOSITIVO FINAL A TRAVÉS DEL ROUTER 1 Y 2	54
FIGURA 4. 14	CONFIGURACIÓN DE LA RED EN X-CTU	54
FIGURA 4. 15	TOPOLOGÍA DE MALLA PARA LA RED	55
FIGURA 4. 16	IMPLEMENTACIÓN DE LA RED, PLANTEL SAN LORENZO TEZONCO UACM	55
FIGURA 5. 1	NOMBRE DE USUARIO Y CONTRASEÑA	57
FIGURA 5. 2	PANEL FRONTAL DEL PROGRAMA	58
FIGURA 5. 3	DIAGRAMA DE FLUJO DEL PROCEDIMIENTO DE LA ACTUALIZACIÓN DE LA RED	60
FIGURA 5. 4	DIAGRAMA A BLOQUES DE LA ACTUALIZACIÓN DE LA RED	61
FIGURA 5. 5	PANEL FRONTAL DE LA PESTAÑA ACTUALIZACIÓN DE RED	61
FIGURA 5. 6	DIAGRAMA DE FLUJO DEL MONITOREO MANUAL.....	64
FIGURA 5. 7	DIAGRAMA A BLOQUES DEL MONITOREO MANUAL.....	64
FIGURA 5. 8	PANEL FRONTAL DEL MONITOREO MANUAL.....	65
FIGURA 5. 9	DIAGRAMA DE FLUJO DEL MONITOREO AUTOMÁTICO	67
FIGURA 5. 10	DIAGRAMA A BLOQUES DE LA ACTUALIZACIÓN AUTOMÁTICA	68
FIGURA 5. 11	PANEL FRONTAL DE LA TERCER PESTAÑA REFERIDA AL MONITOREO AUTOMÁTICO.....	69
FIGURA 5. 12	SERVIDOR WEB DE LABVIEW.....	70
FIGURA 5. 13	HERRAMIENTA DE PUBLICACIÓN DE VI REMOTO	70
FIGURA 5. 14	HERRAMIENTA DE PUBLICACIÓN DE VI REMOTO	71
FIGURA 5. 15	HERRAMIENTA DE PUBLICACIÓN DE VI REMOTO	71
FIGURA 5. 16	EXPLORADOR CON REMOTO	72
FIGURA 5. 17	CREACIÓN DE ARCHIVO EJECUTABLE	73
FIGURA 5. 18	CREACIÓN DE ARCHIVO EJECUTABLE.....	73
FIGURA 5. 19	PROPIEDADES DEL ARCHIVO EJECUTABLE.....	74
FIGURA 5. 20	PROPIEDADES DEL ARCHIVO EJECUTABLE.....	74
FIGURA 5. 21	PROPIEDADES DEL ARCHIVO EJECUTABLE.....	75
FIGURA 5. 22	CONSTRUCCIÓN DEL INSTALADOR	75
FIGURA 5. 23	PROPIEDADES DEL INSTALADOR.....	76
FIGURA 5. 24	PROPIEDADES DEL INSTALADOR.....	76
FIGURA 5. 25	ARCHIVO EJECUTABLE CON SO XP, DIRECCIÓN 192.168.30.2/24.....	78
FIGURA 5. 26	COMPUTADORA REMOTA CON DIRECCIÓN 192.168.30.3/24.....	78
FIGURA 5. 27	COMPUTADORA REMOTA CON DIRECCIÓN 192.168.30.4/24.....	79

Índice de tablas

TABLA 2. 1	BANDAS DE FRECUENCIA Y DATOS DE VELOCIDADES [2].....	14
TABLA 3. 1	DESCUBRIMIENTO DE RUTA DE UN NODO ORIGEN A NODO DESTINO [16].....	33
TABLA 3. 2	POSIBLE ERROR EN EL DESCUBRIMIENTO DE RUTA [16]	33
TABLA 3. 3	CARACTERÍSTICAS DE LOS MÓDULOS XBEE S2C	39
TABLA 3. 4	VALORES Y NOMBRE DE LAS TRAMAS API [4].....	42
TABLA 3. 5	TRAMAS UTILIZADAS PARA ESTE PROYECTO	42
TABLA 4. 1	ELEMENTOS QUE CONFORMAN LA RED.....	43
TABLA 4. 2	CONFIGURACIÓN DE PARÁMETROS PARA LA COMUNICACIÓN SERIAL.....	46
TABLA 4. 3	TIEMPO DE MUESTREO PARA CADA DISPOSITIVO	46
TABLA 4. 4	PARÁMETROS DE CONFIGURACIÓN DEL ROUTER 1.....	47
TABLA 4. 5	PARÁMETROS DE CONFIGURACIÓN DEL ROUTER 2	48

TABLA 4. 6 PARÁMETROS DE CONFIGURACIÓN DEL DISPOSITIVO FINAL.....	49
TABLA 4. 7 CARACTERÍSTICAS DE LOS SENSORES UTILIZADOS.....	49
TABLA 5. 1 ESTRUCTURA DE TRAMA PARA DESCUBRIR LOS NODOS	59
TABLA 5. 2 ESTRUCTURA DE TRAMA DE RESPUESTA A LA SOLICITUD DE DESCUBRIMIENTO DE NODO	59
TABLA 5. 3 ESTRUCTURA DE TRAMA PARA CONTACTAR A UN NODO	62
TABLA 5. 4 ESTRUCTURA DE TRAMA DE RESPUESTA A LA SOLICITUD REMOTA DE COMANDO AT.....	63
TABLA 5. 5 ESTRUCTURA DE TRAMA DE INDICADOR DE ESTADO AUTOMÁTICO	66

INTRODUCCIÓN

1.1 Antecedentes

Las redes en telecomunicaciones se construyen con el objetivo de prestar servicios de comunicación a los usuarios que se conectan a ellas, incorporando en éstas una combinación de tecnologías. Es decir, una red está conformada por enlaces y nodos en donde los mensajes pueden pasarse de una parte a otra de la red sobre múltiples enlaces y a través de varios nodos para lograr la comunicación.

Las redes inalámbricas por su parte, son llamadas así para distinguirlas de las redes tradicionales por cable. En una red inalámbrica los datos se transmiten por el aire, es decir, cualquier nodo se puede conectar a esta mientras se encuentre dentro de su radio, llamado la zona de cobertura de la red inalámbrica. En estas redes se manejan opciones de accesibilidad y movilidad diferentes o incluso contrarias a las opciones de las redes cableadas, siendo ideal su implementación en lugares donde la infraestructura de una red cableada resulta difícil de construir.

Debido al desarrollo de los dispositivos inalámbricos, la tecnología inalámbrica ha ido evolucionando con mayor fuerza en los últimos años, alcanzando avances importantes en cuanto a las velocidades de transmisión, seguridad, cobertura y la diversificación de las aplicaciones de una red inalámbrica. Por otro lado, los avances durante la última década en circuitos integrados han facilitado la manufacturación de sensores más potentes que son integrados a estas redes, permitiendo la producción en masa de sofisticados sistemas para conectar el mundo físico a la red de computadoras.

Dentro de estas redes inalámbricas se puede citar a las RIS (*WSN, Wireless Sensor Networks*, 'Red inalámbrica de sensores') que son un tipo de red de área personal (*PAN, Personal Area Network*) las cuales tienen una gran importancia tecnológica siendo utilizadas en una variedad de aplicaciones como el cuidado de la salud, la domótica, los entornos militares y la detección de variables ambientales.

Una red inalámbrica de sensores crea una red de dispositivos de captura constante que permite registrar y almacenar determinada información, transmitiéndola de un dispositivo a otro para almacenarla en una localización central. Los dispositivos que conforman la red integran comunicación inalámbrica y están equipados con sensores que cuentan con capacidades sensitivas, en conjunto estos dispositivos colaboran en una tarea en común formando redes ad-hoc.

Las redes ad-hoc son un tipo de red formada temporalmente en la que todos los nodos se encuentran en igualdad de condiciones y no requiere alguna configuración adicional en el administrador central. Es preciso que entre los nodos puedan ayudarse mutuamente para conseguir un objetivo común: que cualquier paquete llegue a su destino aunque el destinatario no sea accesible directamente desde el origen. El protocolo de encaminamiento es el responsable de descubrir las rutas entre los nodos para hacer posible la comunicación.

En cuanto a las características de estas redes se alude que tienen facilidad de despliegue y son autoconfigurables, pudiendo convertirse en todo momento en emisor, receptor y ofrecer servicios de encaminamiento entre nodos sin cobertura directa. Asimismo, ofrecen un registro de datos referentes a los sensores locales de cada nodo, realizan una gestión eficiente de energía lo que les permite obtener autonomía que las hacen plenamente operativas.

La idea de estas redes es repartir aleatoriamente sus nodos en un territorio amplio, en el cual capten cierta información del medio hasta que sus recursos energéticos se agoten [1]. Es decir, el tiempo de vida de la RIS dependerá del tiempo de vida de la batería de sus nodos.

En relación a la topología de una RIS, está conformada por nodos inalámbricos, una puerta de enlace y una estación base como se muestra en la figura 1.1.

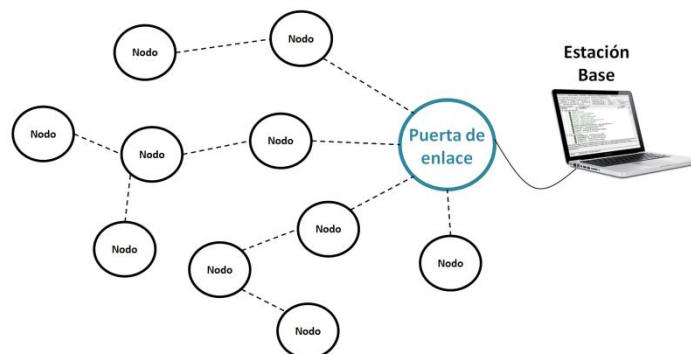


Figura 1.1 Red inalámbrica de sensores

Los nodos inalámbricos son dispositivos electrónicos capaces de captar información proveniente del entorno en el que se encuentran, procesarla y transmitirla inalámbricamente hacia otro destinatario.

El hardware de cada uno de estos dispositivos consta de diferentes bloques como se muestra en la figura 1.2.

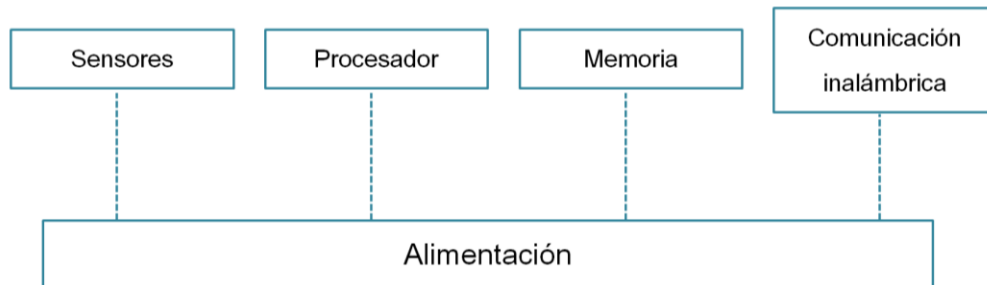


Figura 1. 2 Topología de un nodo inalámbrico

Procesador: Es el componente que interpreta y procesa los datos para transmitirlos a otro nodo. También gestiona el almacenamiento de datos en la memoria.

Alimentación: Normalmente la fuente de alimentación requiere de baterías o un adaptador con salida adecuada para el nodo si se dispone de toma de corriente. El consumo de energía viene dado por el consumo de los sensores y el procesador. La mayor cantidad de energía es consumida en la transmisión de información, siendo menor en el procesado y uso de los sensores.

Comunicación inalámbrica: los dispositivos se comunican dentro de un rango de transmisión por radio frecuencia (RF).

Sensores: Son dispositivos hardware que producen una respuesta medible ante un cambio en un estado físico en el área que están monitorizando, como puede ser temperatura o presión. La señal analógica continua detectada es digitalizada por un convertidor analógico digital y enviada a un controlador para ser procesada. Las características y requerimientos que un sensor debe tener son un pequeño tamaño, un consumo bajo de energía y ser autónomo.

Memoria: La memoria que incluyen estos dispositivos es de carácter no volátil y una forma desarrollada de la memoria EEPROM que permite que múltiples posiciones de memoria sean escritas o borradas en una misma operación de programación mediante impulsos eléctricos.

La puerta de enlace es un elemento para la interconexión entre la red de sensores y una red de datos. Las RIS no pueden operar completamente aisladas y deben contar con alguna forma de monitoreo y acceso a la información adquirida por los nodos de dicha red. Al dispositivo que realiza la función de interconectar dos redes de diferente naturaleza se le llama dispositivo de puerta de enlace.

Por su parte, la estación base es el elemento en donde se recolectan los datos de los nodos. Estos datos se almacenan en un equipo servidor dentro de una base de datos, desde donde los usuarios acceden remotamente pudiendo observar y estudiar los datos.

Por otro lado, las RIS pueden dividirse en dos tipos de redes, las redes monosalto multisalto. Las redes monosalto son las que conectan directamente con la estación base y como su propio nombre indica, la información es emitida desde el nodo directamente a la estación base. En las redes multisalto, la información es retransmitida por varios nodos antes de llegar a la estación base.

Los dispositivos de una RIS se basan en el estándar IEEE 802.15.4, el cual tiene como propósito definir niveles de red básicos para dar servicio a una red inalámbrica de área personal (*WPAN, Wireless Personal Area Network*) centrada en la comunicación entre dispositivos muy cercanos y con poca infraestructura, haciendo que consuman poca energía. Estas redes se basan en el modelo OSI, siendo el estándar IEEE 802.15.4 el más usado para implementar las dos primeras: la capa física (PHY), que contiene el transceptor de radiofrecuencia (RF) y una subcapa MAC que proporciona acceso al canal físico. En conjunto, las capas PHY y MAC brindan los servicios de transmisión de datos por el aire, punto a punto [2].

Ahora bien, tal y como lo define la Alianza ZigBee: "ZigBee es el lenguaje inalámbrico global que conecta diferentes dispositivos para trabajar en conjunto y mejorar la vida cotidiana". Es una especificación técnica de ámbito global, desarrollado y soportado por más de 300 compañías tecnológicas de gran importancia en todo el mundo, unidas a través de la Alianza ZigBee [3].

La Alianza ZigBee ha definido desde la capa de red hasta la capa de soporte de aplicación que se combinan con las capas inferiores de IEEE 802.15.4 para proporcionar una gama inalámbrica completa. Las placas de desarrollo que soportan la especificación ZigBee ofrecen un punto de partida para el procesamiento de aplicaciones ofreciendo flexibilidad para que el diseñador tome sus propias decisiones.

En las redes de sensores donde la transmisión de datos está limitada, la capacidad de ZigBee de completar la transacción de datos rápidamente permite mantener al transmisor apagado por periodos de tiempo más largos. Con respecto al ahorro de energía, un dispositivo "duerme" mientras el coordinador (dispositivo que coordina la red) no le pida su estatus actual.

Cada red ZigBee tiene un identificador de red único, lo que permite que coexistan varias redes en un mismo canal de comunicación sin ningún problema. Una red ZigBee puede constar de un máximo de 65,535 nodos distribuidos en subredes de 255 nodos [4].

Por lo tanto, la capa de red proveerá funciones para la implementación y manejo de redes, así como una interfaz simple para relacionarla con las aplicaciones de los usuarios. Dicho lo anterior, como el estándar IEEE 802.15.4 resuelve la capa uno y dos, mientras ZigBee la capa tres y cuatro, es posible implementar una RIS de manera relativamente sencilla.

1.1 Motivación del proyecto

Actualmente, no es simple encontrar un sistema de acceso libre que ayude a la adquisición de información de cada nodo que conforma una RIS, tornándose aún más difícil cuando se requiere tener dicha información en diferentes lugares. Dado que en algunas ocasiones cuando se requiere hacer u obtener cierto procedimiento de cierta RIS, existe una persona encargada que debe desplazarse varias veces para obtener los datos requeridos necesarios, sincronizarlos, hacer un diagnóstico y organizarlo dentro de un informe que sirva como base para la toma de decisiones.

Lo ideal y lo que se necesita al tener implementada una RIS, es la existencia de un sistema de monitoreo de la red que integre tanto la información que se recibe en tiempo real como la que se encuentra estática, ofreciendo interfaces que permitan acceder de forma remota a todos los servicios del sistema, dándole valor agregado enviando la información de manera continua cubriendo el total de las necesidades solicitadas por el usuario o empresa a la hora de realizar las tareas.

El sistema debe ser un intermediario entre la red y el usuario que permita la administración y control de ésta y sus recursos [5].

El sistema de monitoreo debe tomar un conjunto de señales físicas y acondicionarlas de manera que la información recibida sea adecuada para el usuario. Las ventajas de utilizar este sistema son la posibilidad de realizar las tareas en tiempo real o para análisis posteriores (a fin de analizar los posibles errores), el rápido acceso a la información y toma de decisiones, la gran cantidad de datos para poder analizar de varios nodos a la vez, entre otros.

Actualmente, existen sistemas de monitoreo que hacen recolección de datos funcionando únicamente para módulos específicos o de su propio fabricante. Por ejemplo, el *EZ Data Logger*

[23]. Así mismo, existen otros en los cuales primero es necesario que alguien vaya al lugar que desee monitorear, recolectar los datos y después descargarlos en el software del fabricante, por ejemplo, Placa GoGo [24].

1.2 Objetivo

Desarrollar un sistema de monitoreo con interfaz gráfica capaz de captar, procesar y almacenar información proveniente de una red inalámbrica de sensores, con funcionalidad remota basada en el estándar IEEE 802.15.4 y la especificación ZigBee.

Con el fin de lograr el objetivo planteado se definen los siguientes objetivos específicos:

- 1) Implementar una red inalámbrica de sensores mediante dispositivos de comunicación Xbee, de acuerdo con el estándar IEEE 802.15.4 y la especificación ZigBee.
- 2) Desarrollar el software del sistema de monitoreo de la red y la interfaz del sistema de administración usando el lenguaje de programación LabView.
- 3) Generar la versión ejecutable del sistema de monitoreo en LabView para facilitar su portabilidad.
- 4) Verificar y evaluar el funcionamiento remoto del sistema usando una red de área local.

1.3 Alcances y limitaciones

El alcance de este proyecto contempla el desarrollo de un sistema de monitoreo, siendo éste la principal aportación de este trabajo. Sin embargo, para el diseño, se implementó una RIS de cuatro nodos con los recursos con los que se contaba.

1.4 Materiales y herramientas

Para implementar dicho sistema se necesita de un software de instrumentación que sea flexible para futuros cambios y preferiblemente que sea de fácil manejo. Un lenguaje de programación gráfico que cumple con lo dicho es LabView, considerado como un metaprograma¹, está enfocado a la instrumentación virtual, por lo que cuenta con numerosas herramientas de presentación en gráficas, botones, indicadores y controles, los cuales serían complicados de realizar en lenguajes de programación como C++, donde el tiempo para lograr el mismo efecto sería mayor.

¹ Programa que genera otros programas [6]

Por otro lado, los nodos de la red implementada en este trabajo son tecnología Xbee, que comprende pequeños dispositivos capaces de monitorizar el entorno mediante sensores capaces de organizarse a sí mismos e interconectarse de forma inalámbrica con otros semejantes.

1.5 Organización del trabajo recepcional

En términos generales; el capítulo dos describe la base del estándar IEEE 802.15.4 en el que se fundamenta la implementación de la RIS; describe la capa física y subcapa MAC, topologías de red, control de acceso al medio y el protocolo de enrutamiento.

El capítulo tres explica la especificación técnica ZigBee dirigida a la implementación del proyecto, describiendo las características generales de la especificación como son: identificador de red, canal de comunicación, coordinador, routers y dispositivo final. También describe las características generales de los transceptores inalámbricos de Xbee.

El capítulo cuatro se refiere a la configuración de los transceptores inalámbricos Xbee, se menciona la configuración de cada dispositivo con el software X-CTU que asiste a los transceptores Xbee, la configuración de los sensores de temperatura y humedad y finalmente, la implementación de la red en un territorio de 155 m aproximadamente.

El capítulo cinco presenta la programación de la interfaz gráfica para el sistema de monitoreo con el lenguaje de programación LabView; se presenta todas las pestañas que integran al sistema así como la explicación de los botones e indicadores que conforman a cada una.

Finalmente se presentan las conclusiones y el trabajo futuro.

Capítulo II

NIVEL FÍSICO Y CONTROL DE ACCESO AL MEDIO DE LA RED INALÁMBRICA DE SENSORES

Para la implementación de la PAN (*Personal Area Network*, 'Red de Área Personal') con los módulos Xbee S2C (los cuales serán descritos en el capítulo III), es preciso mencionar que parte de su modelo de capas está basado en el modelo OSI (*Open System Interconnection*, 'Interconexión de sistemas abiertos'). Las primeras dos capas, física y MAC, son especificadas por el estándar IEEE 802.15.4 que está enfocado para redes inalámbricas personales proveyendo transferencia de datos confiable, de bajo costo y una duración razonable de las baterías. Mientras las siguientes dos (red y aplicación) por la especificación ZigBee. En este capítulo se describe brevemente el estándar IEEE 802.15.4.

2.1 Descripción general

El estándar 802.15.4 del IEEE forma parte de un grupo de estándares destinados a reglamentar la implementación de redes inalámbricas personales o WPANs (*Wireless Personal Area Networks*, 'Redes inalámbricas de área personal'), las cuales se utilizan para transmitir información a través de distancias relativamente cortas. Este estándar se encarga de establecer mediante un enlace de radiofrecuencia una comunicación confiable, debido a la detección de errores, acuses de recibo y de las retransmisiones. El énfasis del estándar 802.15.4 se encuentra en la sencillez de la implementación requiriendo relativamente poca potencia para procesamiento y facilitando la operación en bajo consumo, lo que permite que algunos dispositivos de la red puedan "ausentarse" para dormir por ciertos periodos de tiempo.

Dicho estándar se centra en las especificaciones de la capa física (PHY) y la subcapa MAC (*Medium Access Control*, 'Control de acceso al medio') para una red inalámbrica de área personal de baja velocidad (LR-WPAN, *Low rate*, 'baja velocidad'), que permite la conectividad inalámbrica de aplicaciones con energía y rendimiento limitado. Los principales objetivos de una LR-WPAN son garantizar una fácil instalación y una transferencia de datos fiable, un bajo costo y una duración de batería razonable, manteniendo un protocolo de comunicación simple y flexible [2].

2.2 Componentes de una LR-WPAN IEEE 802.15.4

El componente utilizado para este estándar es el llamado "dispositivo", el cual puede tomar lugar en la red como nodo de red, operando como fuente o destino de tráfico de datos o como coordinador de red, el cual tiene la capacidad de encaminar el tráfico de datos, controlar la red, controlar el acceso al canal de comunicación de otros dispositivos y proporcionar sincronización. Dos o más dispositivos que se comunican en el mismo canal físico constituyen una LR-WPAN. Existen dos tipos de dispositivos que pueden operar en este tipo de red: dispositivo de función completa (FFD) y dispositivo de función reducida (RFD). Un FFD es un dispositivo capaz de servir como coordinador de la PAN o como nodo de red. También conocido como nodo activo, un FFD puede comunicarse con otros RFD o FFD. Cuenta también con una memoria adicional que ayuda a la capacidad de procesar. Los FFD pueden formar parte de cualquier topología de red.

Un RFD es un dispositivo que no es capaz de servir como coordinador PAN, es decir, sólo puede ser un nodo de red y sólo se puede comunicar con un coordinador de la red (no hay conexión directa entre cada RFD). Está diseñado para aplicaciones que son muy simples; que no tienen la necesidad de enviar grandes cantidades de datos y sólo se asocia con un solo FFD a la vez. También conocido como nodo pasivo estos dispositivos se limitan a una topología en estrella.

2.3 Topologías de red

Cada PAN independiente selecciona un identificador único (ID) de red. Este ID de la PAN permite la comunicación entre dispositivos dentro de una misma red y permite transmisiones entre estos a través de redes independientes.

Esencialmente, el coordinador (FFD) de la PAN es el coordinador principal de la red. Dicho coordinador de PAN puede tener una aplicación específica, puede ser utilizado para iniciar o terminar la red y también como nodo intermedio en una ruta a través de la red. Todos los dispositivos que operan en una red de cualquier topología tienen direcciones únicas, estos utilizan o bien una dirección extendida de 64 bits para la comunicación directa en la PAN o una dirección corta de 16 bits que es asignada por el coordinador de la PAN cuando se asocia a la red.

El número máximo de dispositivos conectados dependerá de la demanda de tráfico o de las capacidades del coordinador, idealmente se garantizan 2^6 dispositivos conectados. El estándar sólo tendrá como limitantes el campo que se asigna a las direcciones de 16 bits.

El coordinador de la PAN será a menudo alimentado por la estación base, mientras que los dispositivos serán probablemente alimentados por baterías. Dependiendo de los requisitos de la aplicación, el estándar opera en cualquiera de dos topologías: topología de estrella o topología punto a punto. Ambos se muestran en la Figura 2.1.

2.3.1 Topología de estrella

En la topología de estrella sólo puede haber intercambio de comunicación entre el coordinador (FFD) de la PAN y otro dispositivo (RFD). Hay dos tipos de comunicación: enlace ascendente, a partir de los dispositivos al coordinador de la red; y descendente, desde el coordinador de la red a los dispositivos.

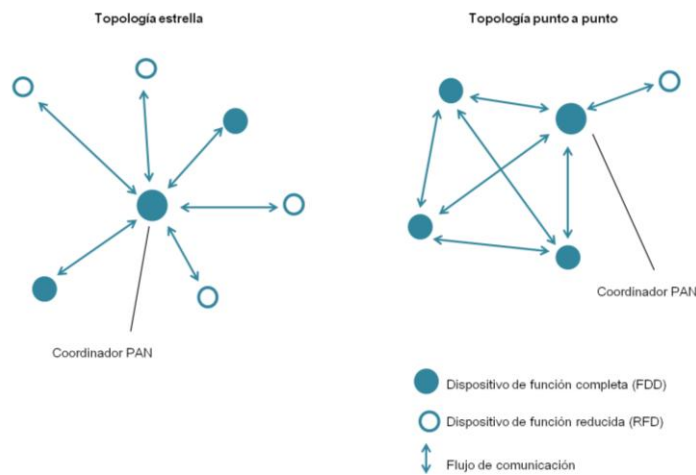


Figura 2. 1 Topología estrella y punto a punto [2]

2.3.2 Topología punto a punto

En la topología punto a punto un dispositivo es asignado como coordinador de la PAN, establecido en virtud de ser el primer dispositivo de comunicación en el canal; sin embargo, a diferencia de la topología de estrella, en esta topología cualquier dispositivo es capaz de comunicarse con cualquier otro de la red siempre y cuando los dos se encuentren en el mismo

rango. Esta topología permite formaciones de red más complejas por ejemplo, la topología de red de árbol o malla.

Una red punto a punto permite múltiples saltos para encaminar los mensajes desde un dispositivo a cualquier otro dispositivo de la red.

2.3.3 Topología de árbol

Un ejemplo del uso de topología punto a punto es el clúster de árbol. En esta red, la mayoría de los dispositivos son FFD, ya que un RFD se conecta a la red de árbol como si fuera una hoja en el extremo de una rama, debido a que éstos no permiten que otros dispositivos se asocien. Así mismo cualquier FFD es capaz de actuar como coordinador y proporcionar servicios de sincronización a otros u otros FDD coordinadores. Sólo uno de estos coordinadores es el coordinador general de la PAN, figura 2.2.

El coordinador principal de la PAN se forma en el primer grupo de la red siendo el que adquiere inicialmente un PAN ID y por la transmisión de tramas de señalización a los dispositivos vecinos. Se necesita un mecanismo de resolución de disputas si dos o más FFD intentan simultáneamente establecerse como coordinadores de la PAN.

2.3.3.1 Trama *Beacon*

La función de la trama *beacon* es la de informar a otros dispositivos de la existencia del dispositivo que la emite. Generalmente es utilizada por el coordinador de la red para permitir a otros dispositivos descubrirlo y asociarse a él. Dichas tramas contienen información de la administración dentro de la red (identificador, direccionamiento, entre otros) y son transmitidas periódicamente para anunciar la presencia de la red WPAN [7].

Un dispositivo apto para ingresar a la red como coordinador de un grupo y que reciba una trama de *beacon*, es capaz de solicitar unirse a la red por medio del coordinador principal de la PAN. Si el coordinador principal de la PAN permite al dispositivo unirse, lo agrega como dispositivo secundario en su lista de vecinos. A continuación, el dispositivo recién unido añade al coordinador principal de la PAN como su padre en su lista de vecinos y comienza a transmitir tramas *beacons* periódicamente a los siguientes dispositivos de la red.

Las líneas en la figura 2.2 representan las relaciones entre padres e hijos de los dispositivos y el flujo de comunicación. La ventaja de una estructura multiclúster es que se incrementa el área

de cobertura, mientras que la desventaja es un aumento en la latencia de los mensajes que se transmiten en la red.

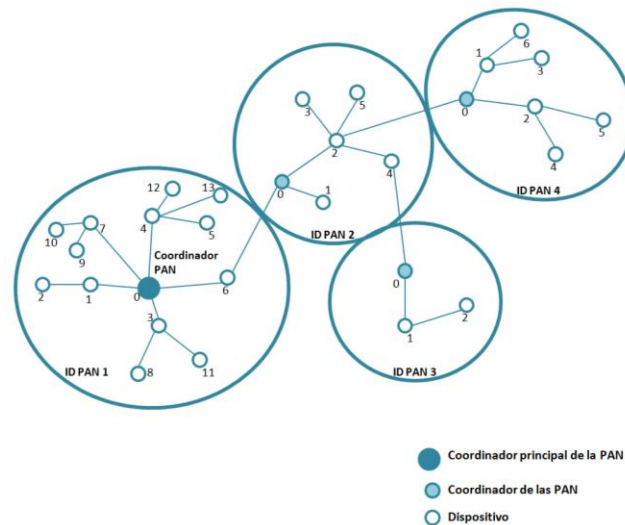


Figura 2. 2 Topología de árbol [2]

2.4 Arquitectura

La arquitectura del estándar IEEE 802.15.4 como se mencionó anteriormente, consta de dos capas con el fin de simplificar la comunicación entre dispositivos. Cada capa es responsable de satisfacer una parte de dicho estándar y ofrecer servicios a las capas superiores.

Los dispositivos de una LR-WPAN cuentan con una capa física (PHY) que contiene el transceptor de radiofrecuencia (RF) junto con un mecanismo de control de bajo nivel, y una subcapa MAC que proporciona acceso al canal físico. La figura 2.3 muestra estos bloques en una representación gráfica. En conjunto, las capas PHY y MAC brindan los servicios de transmisión de datos por el aire en enlaces punto a punto. Las capas superiores, consisten en la capa de red y capa de aplicación. Una definición más extendida de dichas capas se explica en el capítulo III.

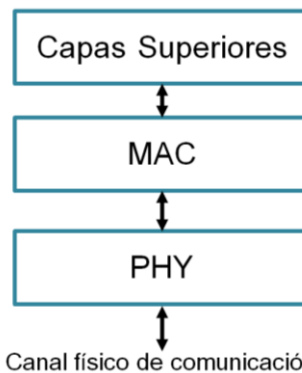


Figura 2. 3 Arquitectura del estándar 802.15.4

IEEE 802.15.4 usa el nombre de “primitivas” para describir los servicios que una capa le provee a la siguiente capa superior. Las capas PHY y MAC tienen funciones diferentes pero las formas de requerir servicios son similares. Por ejemplo, una capa superior usa el SAP (*Service Access Point*, ‘puntos de acceso al servicio’) para requerir servicios y la capa inferior da la confirmación de la transmisión exitosa a dicha capa superior y viceversa. En la figura 2.4 se muestra un ejemplo de la comunicación bidireccional entre la capa que solicita y la que brinda el servicio. Las etapas son: pedido, confirmación, respuesta e indicación.

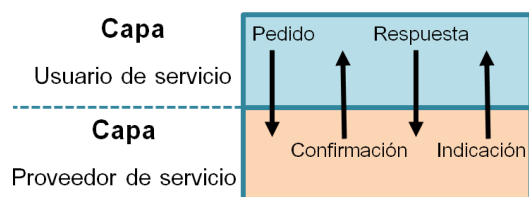


Figura 2.4 Comunicación entre capas

2.4.1 Capa física (PHY)

La capa física proporciona una interfaz entre la subcapa MAC y el canal físico de comunicación.

La especificación de la capa física incluye las siguientes frecuencias: 868 MHz (Europa), 915 MHz (Estados Unidos) y 2.4 GHz (resto del mundo), las cuales se encuentran en la banda ISM (*Industrial, Scientific and Medical*, 'Industrial, científica y médica') de uso no regulado. Ésta última es la más utilizada y menos problemática desde el punto de vista del marco regulatorio ya que ha sido liberada en la mayor parte del mundo, además de ser la que mayor *throughput*² provee [7].

En la banda de los 2.4 GHz, se especifican 16 canales (designados del 11 al 26), separados cada 5 MHz desde 2405 hasta 2480 MHz. La transmisión se realiza mediante la modulación O-QPSK, empleando codificación DSSS (*Direct Sequence Spread Spectrum*, 'Espectro expandido por secuencia directa'), lo que permite una coexistencia con otras fuentes similares, por ejemplo 802.11b y g que emplean una modulación similar y ocupan el mismo espectro.

La velocidad de modulación es de 62500 *bauds* (símbolos por segundo), donde cada símbolo corresponde a un grupo de cuatro bits, obteniéndose una velocidad de transmisión de 250

² Throughput: volumen de información que fluye a través de un sistema o la red.

Kbps. El ancho de banda efectivamente utilizado en el canal es de 2 MHz. En la tabla 2.1 se muestran las velocidades para las distintas bandas de frecuencia.

Capa Física (MHz)	Banda de Frecuencia (MHz)	Parámetros de extensión		Parámetro de Datos		
		Velocidad de Chip (kchip/s)	Modulación	Velocidad en Bit (kb/s)	Velocidad en Símbolo (ksymbol/s)	Símbolos
868/915	868-868.6	300	BPSK	20	20	Binario
	902-928	600	BPSK	40	40	Binario
2450 DSSS	2400-2483.5	2000	O-QPSK	250	62.5	16 ortogonal

Tabla 2.1 Bandas de frecuencia y datos de velocidades [2]

2.4.1.1 Numeración de canales para 868 MHz, 915 MHz y 2450 MHz

Como se mencionó anteriormente, existen 16 canales disponibles en la banda de 2450 MHz, 10 en la banda de 915 MHz y 1 en la banda de 868 MHz. La frecuencia central de estos canales se define enseguida y se muestra en la figura 2.5.

$F_c = 868.3$ en Megahertz, para $k = 0$

$F_c = 906 + 2(k - 1)$ en Megahertz, para $k = 1, 2, \dots, 10$... ec. 1

$F_c = 2405 + 5(k - 11)$ en Megahertz, para $k = 11, 12, \dots, 26$... ec. 2

Donde k es el número de canales.

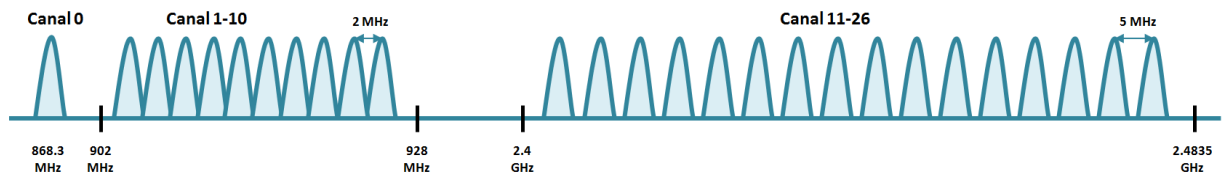


Figura 2.5 Canales en el estándar 802.15.4 [8]

2.4.1.2 Tareas de la capa física

a) Evaluación del nivel de señal

A fin de determinar cuál de los canales es el más apropiado para la transmisión, se evalúa el nivel de la señal mediante procedimientos denominados, ED (*Energy Detection*, 'Detección de energía') y CCA (*Clear Channel Assessment*, 'Evaluación del canal libre').

Detección de Energía (ED):

Se trata de la medición de energía presente en el canal, esto permite obtener una indicación del nivel con que se recibe la información (RSSI: *Received Signal Strength Indication*, 'Indicador de fuerza de la señal recibida') y poder determinar si el canal se encuentra ocupado o no.

b) Evaluación del canal libre (CCA):

Es el proceso por el cual se intenta identificar si el canal está libre, la detección se puede realizar por tres diferentes métodos.

Nivel de energía suficiente: se considera el canal ocupado si se verifica que el nivel de energía detectado supera un cierto umbral prefijado.

Presencia de portadora: se considera el canal ocupado si se verifica la existencia de señales compatibles IEEE 802.15.4.

Presencia de portadora con nivel de energía suficiente: se considera el canal ocupado si se verifica la existencia de señales compatibles IEEE 802.15.4 cuyo nivel de energía detectado supera un cierto umbral prefijado.

c) Indicador de calidad de enlace (ICT)

Este indicador funciona para los paquetes recibidos, cada coordinador o router periódicamente envía un mensaje con el estado del enlace en forma de *broadcast* recibéndolo su vecino más próximo, dicho mensaje contiene una lista de la calidad del enlace de cada dispositivo que tiene como vecino. Usando dicho mensaje un dispositivo determina si la calidad del enlace es óptima para realizar una comunicación bidireccional.

d) Sincronización

A fin de que los receptores puedan detectar el inicio de una transmisión y sincronizar sus relojes para poder discernir ceros de unos, se provee un preámbulo de treinta y dos ceros binarios³ seguidos de la secuencia 10100111 indicando que a continuación sigue un byte conteniendo la longitud de la trama, un ejemplo de esta trama se muestra en la figura 2.6.

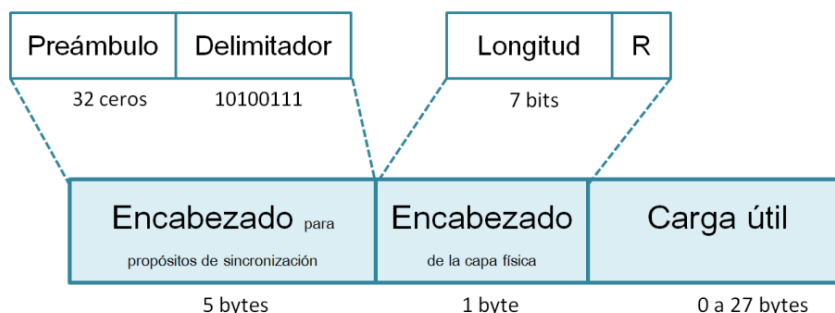


Figura 2. 6 Estructura de trama de sincronización [7]

2.4.2 Subcapa MAC

Como se mencionó anteriormente, la subcapa MAC proporciona una interfaz entre la capa física y la siguiente capa superior. Puesto que el estándar IEEE 802.15.4 se centra en bajo costo, dispositivos de bajo consumo de potencia y baja velocidad de transmisión; el diseño del protocolo MAC se limita con el fin de cumplir con funciones adecuadas que soporten las características antes mencionadas [8].

La información en esta capa se transmite en forma de tramas. Las tramas poseen: un encabezado que transporta la información de control, identificador de tipo de trama por ejemplo; carga útil que contiene los datos representando la información adquirida por el dispositivo y por último el final de trama que transporta la información de chequeo de errores tal como se muestra en la figura 2.7.

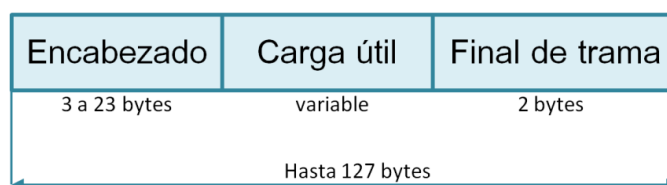


Figura 2. 7 Ejemplo de trama de transmisión [7]

³ Tanto el preámbulo como toda la información pasan por el esquema de modulación DSSS O-QPSK

En el estándar 802.15.4, el nivel de enlace especifica la subcapa MAC cubriendo dos funciones:

- 1) La entrega fiable de información; cuando ésta llega al otro extremo garantiza su integridad, proveyendo servicios de retransmisión y detección de errores FCS⁴ (*Frame Check Sequence*, 'Secuencia de verificación de trama') mediante CRC⁵ (*Cyclic Redundancy Check*, 'Verificación por redundancia cíclica').
- 2) Control de acceso al medio; integrando función distribuida y puntual.

2.4.2.1 Entrega fiable de datos

Cuando un dispositivo recibe una trama de datos de otro dispositivo, devuelve una trama de confirmación (ACK) al dispositivo de origen, sin ser interrumpido por una transmisión procedente de cualquier otra estación. Si el origen no recibe la confirmación en un intervalo corto de tiempo, ya sea porque la trama de datos resultó dañada, o porque no fue la trama ACK de retorno, el origen retransmite la trama [9].

Para mejorar aún más la fiabilidad, es posible utilizar un intercambio de cuatro tramas. En este sentido, el origen emite inicialmente una trama de solicitud para enviar (RTS, *Request to Send*) hacia el destino. El dispositivo de destino responde con una trama de permiso para enviar (CTS, *Clear to Send*). Tras recibir la trama CTS, el origen emite la trama de datos y el destino responde con una confirmación (ACK). La trama RTS alerta a todos los dispositivos que se encuentran dentro del rango de recepción del origen de que una transmisión está en curso. El resto de los dispositivos se abstiene de transmitir con objeto de evitar que se produzca una colisión entre dos tramas transmitidas al mismo tiempo. Análogamente, la trama CTS alerta a todas las estaciones que están en el rango de recepción del destino de que se va a producir un intercambio.

2.4.2.2 Control de acceso al medio

Dado que todas las comunicaciones tienen lugar en el mismo medio (el canal) y deben realizarse de una por vez, conviene definirse la forma de acceder a éste. El estándar IEEE 802.15.4 especifica un esquema de acceso al medio en el cual se intentan minimizar las colisiones⁶ y maximizar la utilización de este. Utiliza dos funciones de acceso al medio:

⁴ Es un conjunto de bits adjuntos al final de una trama utilizada para verificar la integridad de la información recibida mediante una "secuencia" de verificación de trama incorrecta.

⁵ Es un código de detección de errores usado para detectar cambios accidentales en los datos.

⁶ Intento de acceder simultáneamente al mismo canal de comunicación por dos o más entidades.

1. DCF (*Distributed Coordination Function*, 'Función de coordinación distribuida') utiliza un mecanismo que permite a los dispositivos transmitir sus tramas mediante la técnica CSMA/CA (*Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance*, 'Acceso múltiple con detección de portadora y prevención de colisiones') y un algoritmo de contención para proporcionar acceso a la totalidad del tráfico. La decisión de que dispositivo puede transmitir se decide entre todos los dispositivos que forman la red. DCF no incluye una función de detección de colisiones (es decir, CSMA/CD) porque ésta no resulta práctica en una red inalámbrica.
2. PCF (*Point Coordination Function*, 'Función de coordinación puntual') permite el protocolo de acceso centralizado donde un dispositivo tiene autoridad para decidir qué estación puede transmitir en cada momento, ofreciendo un servicio libre de contención.

2.4.2.2.1 Función de coordinación distribuida

DCF incluye un conjunto de retardos que se ordenan de acuerdo a un esquema de prioridades. Considerando un retardo simple denominado IFS (*Interframe Space* 'Espacio entre tramas'). Las reglas de acceso CSMA/CA son las siguientes:

- Un dispositivo escucha el medio cuando dispone de una trama para transmitir. Si éste se encuentra libre, espera una cantidad de tiempo IFS con el fin de verificar que el medio permanece libre. Si es así, el dispositivo puede transmitir inmediatamente.
- Si el medio está ocupado (bien porque el dispositivo lo encuentra inicialmente así, o bien porque este hecho ocurre durante el tiempo de espera IFS), la estación pospone la transmisión y continúa monitorizando el medio hasta que la transmisión en curso finalice.
- Una vez que la transmisión actual haya terminado, la estación espera otro IFS. Si el medio permanece libre durante este periodo, el dispositivo espera adicionalmente durante una cantidad aleatoria de tiempo y vuelve a sondear el medio de nuevo. Si el medio continúa libre, la estación puede transmitir. Si por el contrario, el medio queda ocupado durante el periodo de espera, el contador de espera se para comenzando de nuevo cuando el medio quede libre.

Para asegurar que el proceso de espera mantiene estabilidad, se utiliza una espera exponencial binaria pseudoaleatoria y cada dispositivo calcula la suya eligiendo un número entero de periodos entre 0 y $2^{BE}-1$. Donde BE se denomina exponente de *backoff* y es un número que se incrementa a cada intento fallido de transmisión. Para este proceso, la subcapa MAC envía

una petición de evaluación de canal (CCA) a la capa física. Los intentos repetidos y fallidos de transmisión se traducen en periodos de espera cada vez mayores, hecho que ayuda a reducir la carga.

Para que DCF proporcione el acceso basado en el esquema de prioridades utiliza tres valores para IFS:

SIFS (*Short IFS*, 'IFS corto'). Es el IFS más pequeño y se utiliza para todas las acciones de respuesta inmediatas.

PIFS (*Point coordination function IFS*, 'IFS de la función de coordinación puntual'). Se trata de un IFS de tamaño medio, utilizado por el controlador central en el esquema PCF cuando emite un sondeo.

DIFS (*Distributed coordination function IFS*, 'IFS de la función de coordinación distribuida'). Constituye el IFS más grande y se usa como un retardo mínimo para las tramas asíncronas que compiten por el acceso al medio.

Cualquier estación que utilice un SIFS para determinar la ocasión de transmitir tiene la prioridad más alta, dado que siempre ganará el acceso antes que cualquier otra estación que espere una cantidad de tiempo igual a un PIFS o a un DIFS. La figura 2.8 describe la comunicación entre dos dispositivos y como es la distribución de los tiempos.

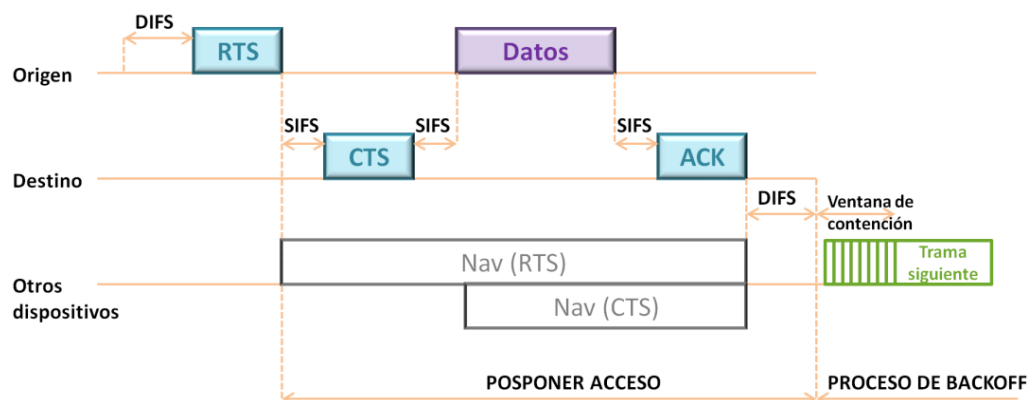


Figura 2. 8 Algoritmo CDMA-CA

2.4.2.2.2 Función de coordinación puntual

PCF es un método de acceso al medio alternativo implementado sobre DCF cuya función consiste en realizar un sondeo por medio de un elemento central (coordinador puntual). El coordinador puntual hace uso de un PIFS cuando emite el sondeo para verificar que dispositivo está listo para transmitir. El dispositivo consultado puede responder utilizando un SIFS y si el

coordinador puntual recibe una respuesta, entonces emite un nuevo sondeo usando un PIFS.

Si se implementa lo anterior, el coordinador puntual podrá adueñarse del medio y bloquear todo el tráfico asíncrono mientras emite el sondeo y recibe las respuestas de los dispositivos. Para prevenir la ocurrencia de este hecho se define por el estándar IEEE 802.15.4 que el canal se organice en un intervalo conocido como supertrama. Durante la primera parte de este intervalo, el coordinador puntual emite sondeos a todos los nodos. A continuación, el coordinador espera un tiempo igual a lo que reste de la supertrama permitiendo así la existencia de un periodo de contención para el acceso.

Al final del intervalo de supertrama, el coordinador puntual compite por el acceso al medio usando un PIFS. Si el medio se encuentra disponible, el coordinador gana el acceso inmediatamente, siguiendo a continuación una supertrama completa. Sin embargo, el medio puede estar ocupado al final de la supertrama. En este caso, el coordinador puntual debe esperar hasta que el medio quede libre para conseguir el acceso, lo que se traducirá en un periodo de supertrama más corto para el siguiente ciclo.

2.4.2.3 Supertrama

La estructura de supertrama comienza en la ranura 0 con un *beacon* en donde el coordinador de la red 1) sincroniza los dispositivos, 2) describe la estructura de la supertrama, y 3) notifica los mensajes pendientes a los nodos, describiendo también los parámetros de la red. La supertrama está dividida en 16 ranuras de igual duración. Opcionalmente, ésta puede tener una parte activa en la que se encuentra un periodo de acceso a contención (CAP, *Contention access period*) y un periodo libre de contención (CFP, *Contention-free period*) y una parte inactiva en donde el coordinador es capaz de entrar en un modo de bajo consumo de energía (reposo) como se muestra en la figura 2.9.

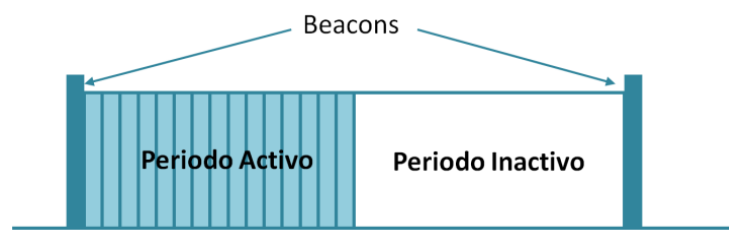


Figura 2.9 Estructura de supertrama [2]

2.4.2.3.1 Periodo de acceso a contención (CAP)

En un periodo de contención, como se mencionó anteriormente los dispositivos pueden tener acceso al medio de comunicación inalámbrica compitiendo mediante el mecanismo CSMA-CA

“ranurado”. Los dispositivos deben dejar de competir para acceder al canal al final del periodo de contención.

El CAP se iniciará inmediatamente después del *beacon* y se completará antes del comienzo de la CFP en un límite de ranura de supertrama. Si el CFP tiene longitud cero, el CAP deberá completar al final de la parte activa de la supertrama.

Un dispositivo de transmisión dentro del CAP deberá garantizar que su transmisión ha sido completada en un IFS antes del final del CAP. Si esto no es posible, el dispositivo aplazará su transmisión hasta el siguiente CAP de la supertrama. Todas las transacciones basadas en contención se completan antes de que comience la CFP.

2.4.2.3.2 Período libre de contención (CFP)

El periodo libre de contención se iniciará en un límite de ranura inmediatamente después del CAP, y será completada antes del final de la parte activa de la supertrama como se muestra en la figura 2.11. En este periodo se encuentran los GTS (*Granted Time Slot* ‘Ranuras de tiempo garantizadas’), que son periodos durante los cuales determinados dispositivos pueden transmitir sin necesidad de utilizar CSMA-CA, ya que su tiempo para transmitir está garantizado. Esta parte es asignada por el coordinador de la PAN. De la misma manera que en CAP, un dispositivo que desee transmitir en el CFP se asegurará de que sus transmisiones son completadas en un IFS. La Figura 2.10 también muestra una estructura de supertrama. En este caso, el intervalo de *beacon* (BI), es el doble de largo como la duración de supertrama activa (SD), incluyendo dos GTS en CFP.

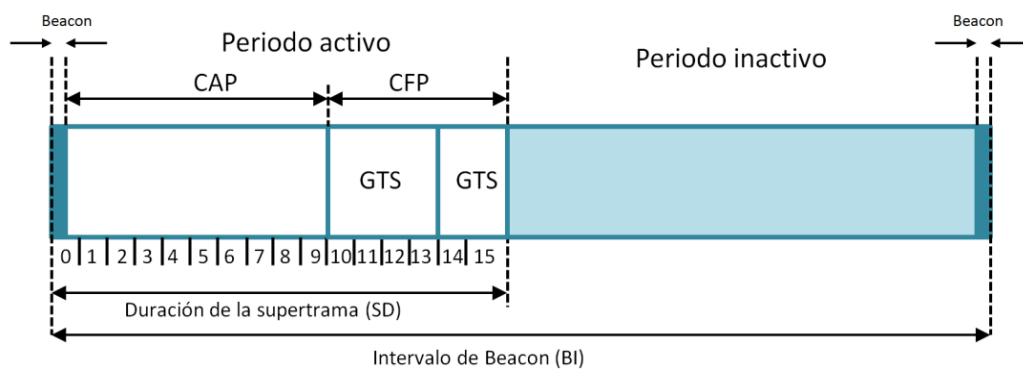


Figura 2.10 Partes de la supertrama [2]

La duración de supertrama varía dependiendo de las aplicaciones activas. Si hay aplicaciones que requieran alta latencia, la supertrama consta de sólo el *beacon* y el período de contención.

Por otro lado, si hay aplicaciones de baja latencia o aplicaciones que requieren ancho de banda garantizado se ocupa GTS de datos específico, el coordinador de la PAN dedicará entonces porciones de la supertrama activa a la aplicación asignando hasta siete de estos GTS.

Si un coordinador no desea utilizar una estructura de supertrama, se apagarán las transmisiones de *beacons*.

2.5 Redes con BEACON

La operación con *beacon* es la más compleja y también la que más prestaciones provee. En una red con *beacon*, el coordinador transmite periódicamente tramas *beacon* mediante las cuales informa el modo de operación manteniendo el sincronismo de la red. El coordinador y por ende toda la red, solo están en operación durante el periodo activo del intervalo *beacon*, pudiendo pasar a bajo consumo durante el periodo inactivo.

2.5.1 Comunicación desde un dispositivo hacia el coordinador

Cuando un dispositivo necesita enviar información al coordinador, transmite una trama de datos utilizando ranuras CSMA-CA dentro del CAP. Si la trama así lo especifica, el coordinador transmitirá una trama de reconocimiento (ACK) inmediatamente después utilizando CSMA-CA.

Si el dispositivo solicitó GTS y le fueron asignados, podrá transmitir en el CFP sin utilizar CSMA-CA.

2.5.2 Comunicación desde el coordinador hacia un dispositivo

Cuando el coordinador tiene información para un dispositivo, lo indica dentro de la trama *beacon*. Luego espera a que éste le envíe una trama *Data request*, y envía el ACK correspondiente sin utilizar CSMA-CA. A continuación, si queda espacio dentro de la misma ranura para el mensaje y su ACK, transmite una trama de datos inmediatamente. Caso contrario, transmite una trama de datos utilizando ranuras CSMA-CA, la comunicación se realiza siempre dentro del CAP.

Si la trama así lo especifica y queda espacio dentro de la ranura, el dispositivo transmitirá una trama de reconocimiento (ACK) inmediatamente después, sin utilizar CSMA-CA. El coordinador no puede transmitir hasta que el dispositivo lo contacte.

2.5.3 Sincronización y operación en bajo consumo

Como se mencionó, la red se encuentra sincronizada mediante la ranura de *beacon* y existe reserva para que también el coordinador pueda descansar momentáneamente, dado que nadie está autorizado para transmitir durante la parte inactiva de la supertrama, el coordinador puede apagar su receptor. La periodicidad en los *beacons* permite que los demás dispositivos sepan aproximadamente cuándo éstos van a ocurrir y entonces, encendiendo sus receptores con una pequeña anticipación, vuelvan a sincronizarse con el *beacon*. Si observan su dirección dentro del campo en el *beacon*, emiten una trama *Data request* dentro del espacio permitido en operación (CAP), solicitando que el coordinador les entregue cualquier mensaje que tuviera pendiente para ellos.

2.6 Redes sin BEACON

En este tipo de red, el coordinador no envía *beacons* de forma periódica, sino que lo hace sólo en respuesta a una trama *Beacon request* o al inicio de la red. Se identifican porque el *beacon* tiene cierta información en la especificación de supertrama (definida como *Beacon request=15*), como puede apreciarse en el diagrama de la figura 2.11.

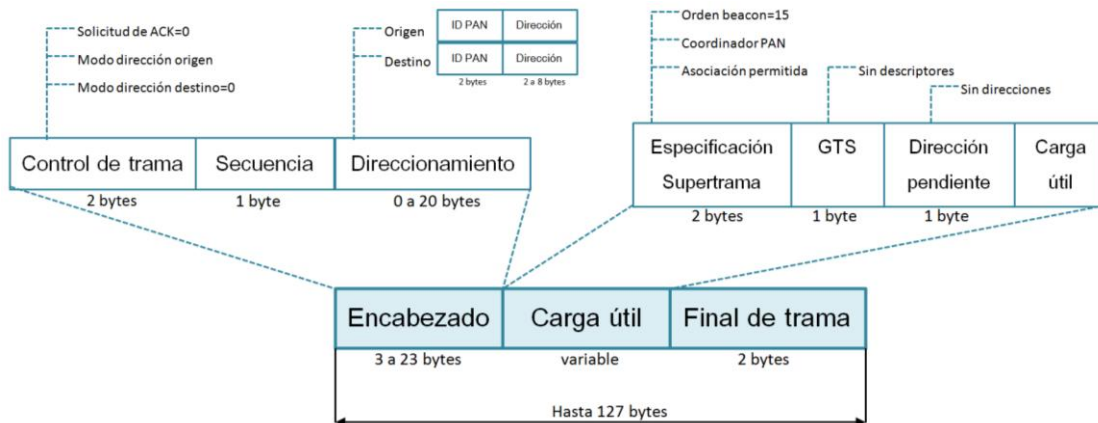


Figura 2. 11 Diagrama de petición de *beacon* [7]

2.6.1 Comunicación desde un dispositivo hacia el coordinador

Cuando un dispositivo necesita enviar información al coordinador, transmite una trama de datos utilizando CSMA-CA. Si la trama así lo especifica, el coordinador transmitirá una trama de reconocimiento (ACK) inmediatamente después sin utilizar CSMA-CA.

Este tipo de comunicación se denomina transmisión directa.

2.6.2 Comunicación desde el coordinador hacia un dispositivo

Cuando el coordinador necesita enviar información a un dispositivo, espera a que éste le envíe una trama *Data Request*, y luego le envía el ACK, a continuación transmite una trama de datos utilizando CSMA-CA. Si la trama así lo especifica, el dispositivo transmitirá una trama de reconocimiento (ACK) inmediatamente después, sin utilizar CSMA-CA. Esto significa que el coordinador no puede transmitir hasta que el dispositivo lo contacte.

Este tipo de comunicación se denomina transmisión indirecta. Si el coordinador debe enviar un *broadcast*, debe hacerlo mediante transmisión directa, por ende, todo dispositivo que no esté activo en ese instante no recibirá el mensaje.

2.6.3 Sincronización y operación en bajo consumo

Para disminuir el consumo de energía en las baterías, se permite que los dispositivos puedan apagar su receptor y dormir por un tiempo (de acuerdo a las especificaciones ZigBee un dispositivo dormido gasta aproximadamente $<1 \mu A$). Periódicamente vuelven a encender su receptor y emiten una trama *Data Request*, lo que permite que el coordinador almacene mensajes para un número determinado de dispositivos remotos. El coordinador espera entonces un cierto tiempo a que el dispositivo lo contacte, y si no recibe petición para esta información, la descarta. El coordinador deberá mantener su receptor permanentemente encendido pues no existe sincronismo entre éste y los remotos.

2.7 Direccionamiento

En algunos casos es posible omitir la dirección si ésta se encuentra implícita en el mensaje. En otros, es posible utilizar una versión reducida para comprimir espacio y minimizar *overhead*. Como se muestra en la figura 2.12, existe un espacio dentro del encabezado de la trama que indica si ésta está utilizando direccionamiento extendido o corto, tanto para el origen como para el destino del mensaje o si la información de direccionamiento se ha omitido. Existe además un número de secuencia que permite relacionar una trama con su acuse de recibo (ACK).

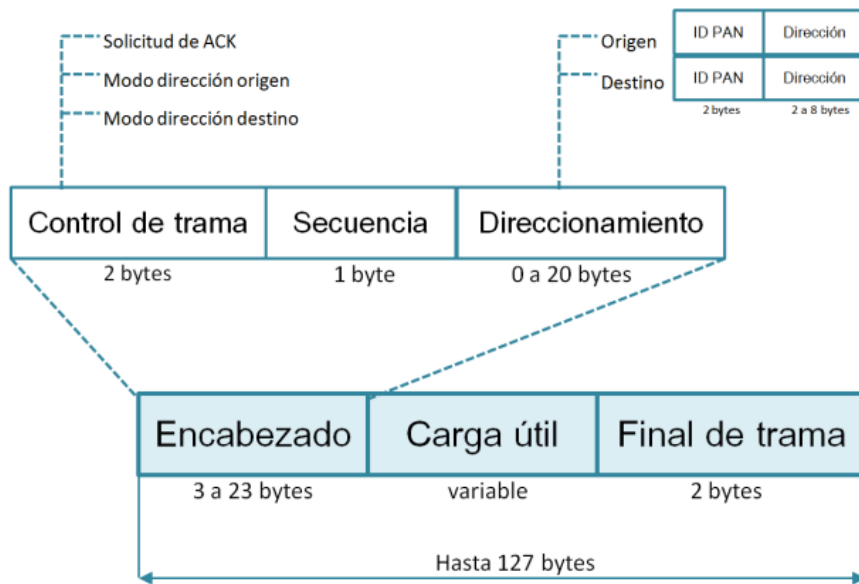


Figura 2. 12 Esquema de trama [7]

a) Dirección extendida

Cada dispositivo posee una dirección de 64 bits que es única. Esta dirección es el número de serie que lo identifica unívocamente de cualquier otro.

b) Dirección corta

Cada dispositivo puede tener una dirección asignada de 16 bits, esta dirección es única dentro de la red al que el dispositivo pertenece y lo identifica sólo dentro de la misma. Esta dirección la asigna el coordinador, lo que indica que éste debe tener una tabla de direcciones asignadas, en caso de que no se haga esto el coordinador puede asignar una dirección corta especial (por ejemplo ZigBee utiliza 0x00) que lo sigue identificando dentro de la red.

c) Identificador de red (PAN ID)

Existe un campo dentro de la trama que identifica en qué red se origina el mensaje, y otro que indica a qué red está destinado. A fin de evitar repetición, existe una "bandera" que identifica el tráfico de mensajes dentro de una misma red. El PAN ID es único para cada red.

d) *Broadcast*

Cuando la misma información es útil para muchos destinatarios, es posible realizar un *broadcast*, es decir, enviar un mensaje que es recibido por todos los dispositivos de una PAN (la dirección de destino de un *broadcast* en ZigBee es 0xFFFFE).

2.8 Tipos de tramas

Dentro de la trama existe un campo de control el cual indica qué tipo de trama es:

- *Beacon*; utilizado por un coordinador para transmitir tramas *beacons* con el propósito de informar a otros dispositivos de la existencia del que la emite.
- Datos; utilizado para todas las transferencias de datos.
- Reconocimiento o acuse de recibo (ACK); se utiliza para confirmar la recepción exitosa de la trama.
- Comandos; permite realizar funciones administrativas de la red, por ejemplo asociación y disociación a la red.

La recepción de una trama exitosa se define por parte de la capa física y la aprobación exitosa de la secuencia de verificación de trama (FCS) por la subcapa de MAC.

NIVEL DE RED Y APLICACIÓN DE LA RED INALÁMBRICA DE SENSORES

En éste proyecto se utilizó la especificación ZigBee como tecnología inalámbrica para cumplir el objetivo del mismo. El nombre de ZigBee proviene de la forma en que las abejas (*bee* en inglés) se comunican entre sí mediante vuelos en zigzag. ZigBee es una especificación de comunicación inalámbrica estandarizada en 2003 por la ZigBee Alliance basada en el estándar de comunicación IEEE 802.15.4. Dicha alianza es una asociación sin fines de lucro conformada por empresas, universidades y agencias gubernamentales en todo el mundo, las cuales en conjunto, crean soluciones inalámbricas de área personal a bajo costo [10].

Esta especificación define en la capa de red que permite la configuración, manipulación y enrutamiento de los paquetes en la red. Su arquitectura flexible permite a las aplicaciones trabajar a una baja tasa de datos, permitiendo la capacidad de una larga duración de la batería. Define también la capa de aplicación proporcionando funciones específicas a los dispositivos de la red.

3.1 Dispositivos de una red ZigBee

Existen tres tipos de dispositivos en una red ZigBee: Coordinador, Router y Dispositivo final; cada uno desempeña un papel diferente al formarse y permanecer a la red [4].

3.1.1 Coordinador

Es el dispositivo más completo. Existe uno por red y es responsable de las siguientes funciones: iniciar y mantener una red ZigBee, elegir un canal para transmitir e identificador de red (ID PAN); permitir a los routers y dispositivos finales unirse a la red, asignar direcciones de red a los dispositivos, ayudar en el encaminamiento de datos y finalmente, no puede "dormir" (ésta es una función única de los dispositivos finales), por lo que almacena los mensajes de datos de RF correspondientes a los dispositivos finales mientras éstos duermen. En cuanto los dispositivos finales despiertan y contactan al coordinador, este último les entrega los mensajes.

3.1.2 Router

Es un dispositivo capaz de actuar como buffer para otros y puede ser coordinador de un pequeño grupo de dispositivos. Es el encargado de entregar tramas a otros routers para que puedan llegar a su destino final. De la misma manera que el coordinador, el router no puede dormir, de manera que almacena los mensajes para cuando los dispositivos finales despierten y lo contacten, en este momento el router les entrega los mensajes. Al iniciar el proceso de asociación el router recibe una dirección corta (16 bits), la cual retiene almacenada en memoria no volátil; con esta dirección ya pertenece a la PAN y puede transmitir, recibir o enrutar datos.

3.1.3 Dispositivo Final

Los dispositivos finales tienen una funcionalidad reducida y tienen permitido dormir periódicamente. Para esto, se asocian a un router o a un coordinador de la red ZigBee, al cual reportan periódicamente. Como estos dispositivos carecen de funcionalidad de ruteo cuando deseen transmitir y recibir datos RF lo hacen siempre a través de sus padres (un router o un coordinador).

Al comenzar el proceso de asociación, un dispositivo final elige un padre y recibe una dirección corta de 16 bits, dicha dirección se mantiene durante la operación. Si el dispositivo final es reiniciado se declara huérfano e inmediatamente el router que lo tenía en su lista (u otro en su defecto) contesta indicando su dirección corta para que pueda operar nuevamente. Si este proceso falla, el dispositivo final otra vez realiza el proceso de asociación.

Los dispositivos finales generalmente entran periódicamente en modo "dormido" para consumir poca energía y emiten una trama *Data Request* al despertar, lo que permite que su padre les pueda entregar cualquier mensaje que tenga pendiente para ellos.

3.2 Topologías de red

ZigBee utiliza las topologías mencionadas en el estándar IEEE 802.15.4 (topología estrella y topología de árbol), agregando la topología de malla que se explica a continuación.

3.2.1 Topología de malla

La topología de malla es una extensión de la topología punto a punto, a diferencia de ésta, la topología de malla puede conectarse con otro nodo usando a varios de éstos como repetidores. A este concepto se le conoce como enrutado “multi-salto”. En esta red los routers y el coordinador esperan recibir/repetir las tramas de los nodos descubriendo la ruta hacia el destinatario del mensaje. Si no hay comunicación directa, los mensajes viajan de router en router hasta llegar al destinatario mientras se encuentre en el rango de cobertura. Un ejemplo de ésta topología es la que se muestra en la figura 3.1.

Si una ruta falla, es posible detectarlo debido a que 802.15.4 posee confirmación de recepción, entonces el router que tiene el mensaje inicia el proceso de descubrimiento de una ruta alternativa y la red converge nuevamente.

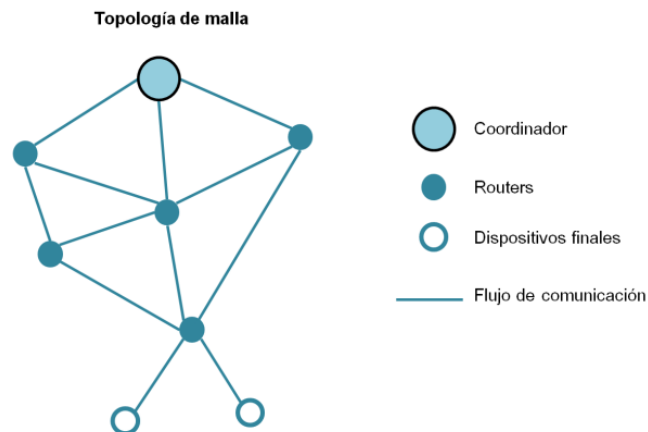


Figura 3.1 Ejemplo de topología de malla [11]

3.3 Arquitectura ZigBee

En la figura 3.2 se muestran las capas del protocolo ZigBee. La pila utiliza solo 4 capas con el objetivo de simplificar la arquitectura para la implementación el armado de una red simple, de baja tasa de transmisión y de bajo consumo. Las dos capas inferiores, es decir, la capa física (PHY) y la capa de acceso al medio (MAC) son definidas por el estándar IEEE 802.15.4 (capítulo II). Las capas de red (NWK, *Network*) y de aplicación (APL, *Application*) se describen en este capítulo.

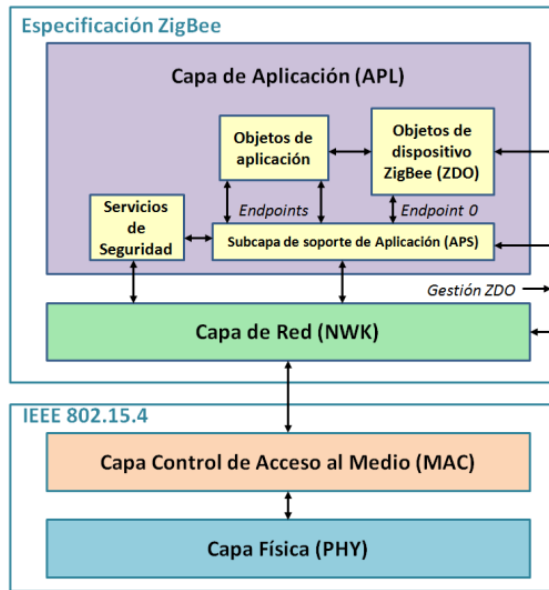


Figura 3. 2 Capas de la especificación ZigBee [12]

3.3.1 Capa de red (NWK)

La capa de red es la que se encarga de la conexión entre dispositivos, es decir, es la que se ocupa de la red. Esta capa hará todo lo posible para que los datos puedan pasar por dispositivos intermedios hasta llegar a su destino. Para ello, un router mantiene comunicación con otros routers y con esto conoce la topología de la red.

En esta capa es en donde el coordinador asigna direcciones de 16 bits a cada miembro de la PAN. En esta red cada trama de red lleva un parámetro llamado radio que indica la cantidad de saltos máximos que ésta puede llegar a realizar, este parámetro se va decrementando en uno en cada salto y cuando llega a cero, esa trama no será retransmitida a otro dispositivo.

Existen 3 tipos de mensajes: *broadcast*, *multicast* y *unicast*:

- Un mensaje tipo *broadcast* tiene como destino a todo dispositivo que lo pueda recibir.
- Un mensaje *multicast* se envía solo a un grupo de dispositivos.
- Un mensaje *unicast* contiene la dirección de un único dispositivo.

En resumen, ésta capa brinda los métodos necesarios para: iniciar la red, unirse a la red, enrutar paquetes dirigidos a otros dispositivos de la red, proporcionar los medios para garantizar la entrega del paquete al destinatario final, filtrar paquetes recibidos, cifrarlos y

autenticarlos. Además, en esta capa es en donde se implementan las distintas topologías de red de ZigBee.

3.3.1.1 Protocolo de ruteo

Los dispositivos con capacidad de ruteo (coordinadores y routers) pueden conocer diferentes tipos de rutas. Cuando un router recibe un mensaje, observa la dirección del destinatario y hace una búsqueda en sus tablas internas.

- Tabla de vecinos; Contiene las direcciones de red de los vecinos (routers y dispositivos finales) con los que existe comunicación directa a un salto.
- Tabla de ruteo; Contiene la información de posibles caminos a seguir para llegar a direcciones más lejanas a más de un salto.

Con dicha información, el router decide a que dispositivo enviar el mensaje que repetirá el procedimiento hasta que éste alcance al destinatario final. La elección de ruta, es decir, el camino que seguirá el mensaje, se hace en función del menor costo asociado.

Zigbee emplea enrutamiento de malla para establecer una ruta entre el dispositivo de origen y el dispositivo destino, este tipo de enrutamiento permite a los paquetes de datos atravesar múltiples dispositivos (saltos) en la red. Los coordinadores y routers participan en el establecimiento de las rutas con el proceso llamado "descubrimiento de ruta" el cual está basado en el protocolo AODV.

En los siguientes párrafos de ésta sección se nombrará nodo a los coordinadores, routers y dispositivos finales de manera general.

Un ruteo basado en el protocolo AODV (*Ad hoc On-Demand distance Vector*) por su simplicidad y bajo requerimiento de procesamiento, se logra usando tablas en cada nodo en donde se almacena la dirección del nodo siguiente (siguiente salto) para llegar al nodo destino. Si el siguiente salto es desconocido, el descubrimiento de ruta debe encontrar un camino alternativo, ya que cada nodo tiene una tabla de enrutamiento en donde puede guardar un número limitado de rutas.

Cuando un nodo de origen debe descubrir una ruta hasta el nodo destino, éste envía un comando con una solicitud de ruta en *broadcast*, dicho comando contiene la dirección de red del nodo origen y un campo en donde se irá almacenando la ruta que toma el paquete

determinando si es apropiada para la transferencia de los demás paquetes. Como este comando es propagado a través de la red, cada nodo actualizará en su tabla el campo de la calidad de la ruta y reenviará el *broadcast* creando rutas temporales en la tabla de descubrimiento de ruta.

En AODV existen tres tipos de mensajes:

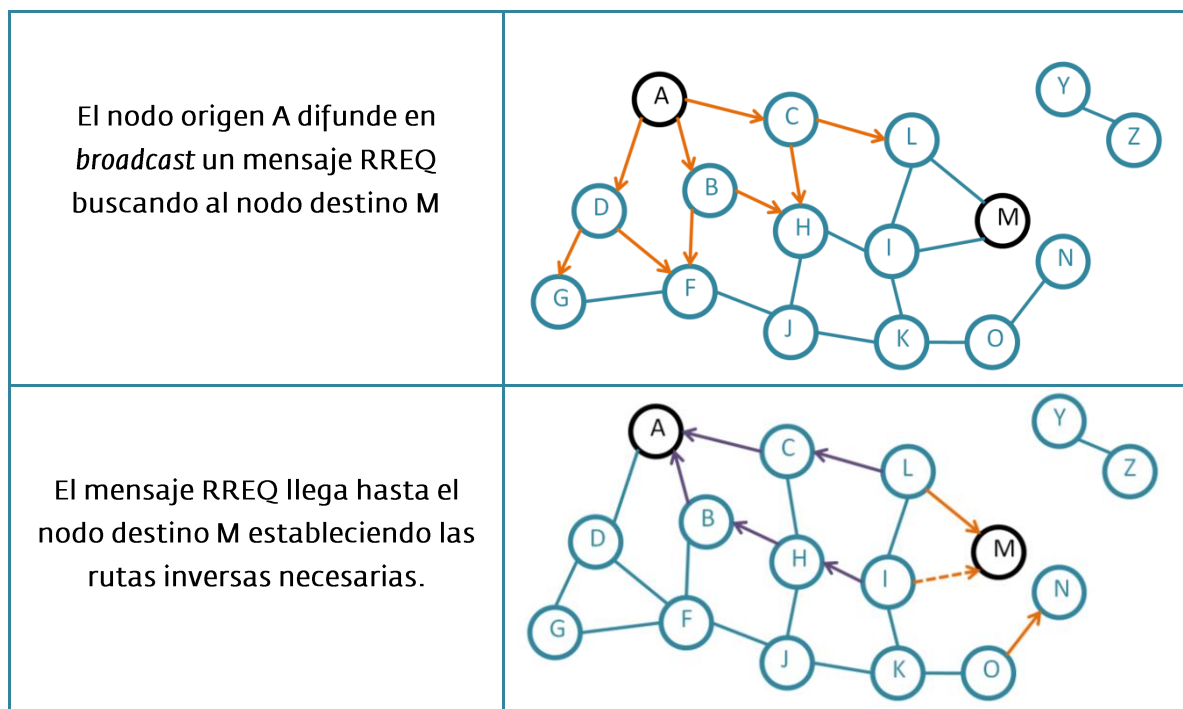
1. Mensaje de petición de ruta RREQ (*Route REQuest*)
2. Mensaje de indicación de ruta RREP (*Route REPLY*)
3. Mensaje de error de ruta RERR (*Route ERRor*)

Procesos básicos de AODV:

Descubrimiento de ruta, utiliza los mensajes RREQ + RREp

Notificación de errores de ruta, utiliza el mensaje RERR

La tabla 3.1 muestra un ejemplo de descubrimiento de ruta



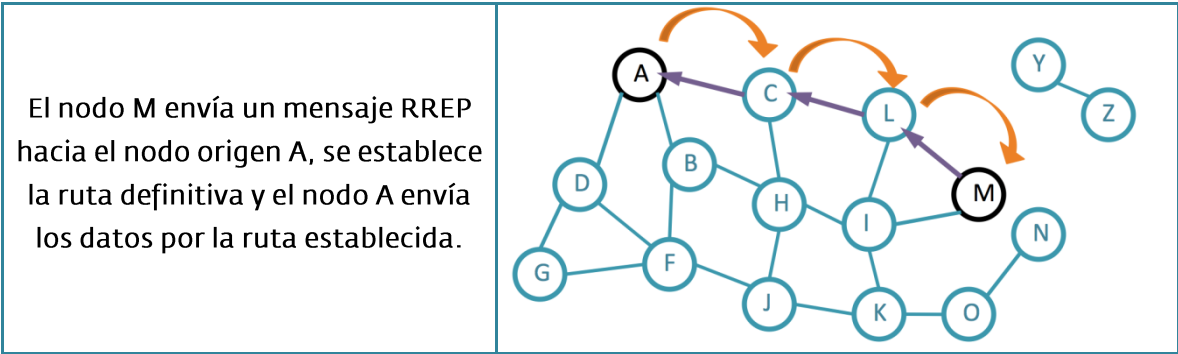


Tabla 3.1 Descubrimiento de ruta de un nodo origen a nodo destino [16]

Como se observa en la tabla 3.1, cuando el nodo destino recibe la solicitud de ruta, éste comparará la calidad de dicha ruta de acuerdo a la que el nodo origen trazó en un inicio, si ésta fue mejor que la trazada originalmente reenviará un comando de ruta al nodo origen en el que confirmará la ruta que siguió para la entrega de paquetes, es decir, desde el nodo destino se inicia el camino inverso hasta llegar al nodo origen. Una vez hecho lo anterior todos los nodos actualizan sus rutas.

El esquema de ruteo permite no sólo descubrir nuevas rutas sino también recuperarse ante problemas de conectividad. Si una ruta falla, el nodo que lo detecta puede iniciar el proceso de descubrir una ruta alternativa y ayudar a mantener conectividad en la red.

La tabla 3.2 muestra un ejemplo de un posible error de ruta

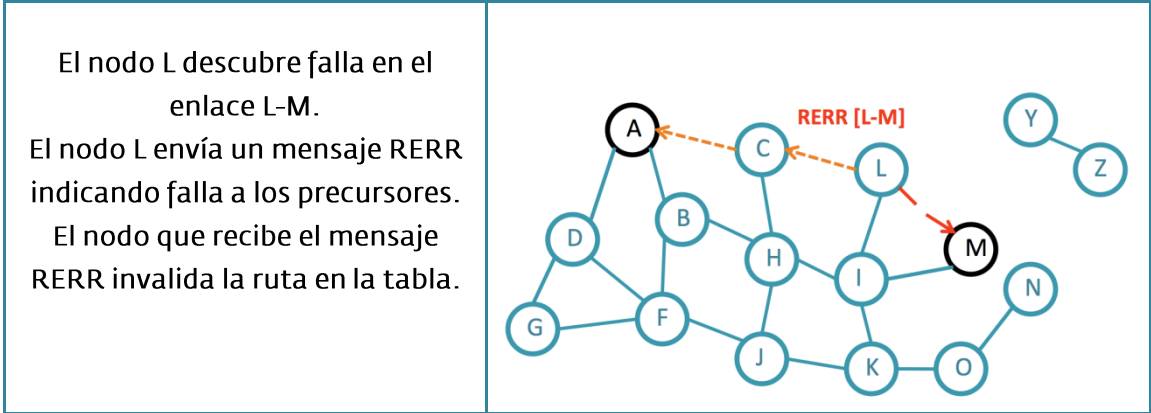


Tabla 3.2 Posible error en el descubrimiento de ruta [16]

3.3.2 Capa de aplicación (APL)

Por encima de la capa NWK se encuentra la capa de aplicación APL la cual cuenta con la subcapa APS (*APplication Support*, 'Soporte de aplicación') y con ZDO (*ZigBee Device Object*, 'Objetos de dispositivo ZigBee').

La capa de aplicación en ZigBee es la que se encarga de las aplicaciones específicas de los usuarios. El desarrollo de las aplicaciones se ve facilitado por el hecho de que dicha capa tiene interfaces a la capa red.

3.3.2.1 Subcapa APS

La subcapa APS proporciona una interfaz entre la capa de red y la capa de aplicación a través de un conjunto de servicios que se utilizan junto a los ZDO y otros objetos que hayan sido definidos por los fabricantes.

La subcapa APS determina qué dispositivos operan en el espacio de dicho dispositivo. Así mismo, enlaza dos o más dispositivos que basados en sus necesidades se envían mensajes entre ellos.

3.3.2.1.1 Perfiles

En la capa de aplicación hay perfiles que se diseñaron para unificar el intercambio de datos en esta capa. Un perfil caracteriza tipos de dispositivos, formato de los mensajes, acciones y funciones que se usarán en ciertas aplicaciones. Estos pueden ser:

- Perfiles públicos: los especifica la Alianza ZigBee para proveer algún tipo de interoperabilidad entre dispositivos de distintos fabricantes.
- Perfiles privados: los especifica un fabricante o usuario para sus aplicaciones específicas que no pueden realizarse con un perfil público.

Por otro lado, existen atributos que son tipos de datos individuales que se pueden enviar de un dispositivo a otro, a cada atributo se le asigna un identificador único de esta manera quedan todos los atributos con un mismo identificador agrupados bajo un cluster. Un cluster se asocia directamente con un flujo de datos de entrada o salida del dispositivo, al hacer las asociaciones de aplicación entre dispositivos se tienen en cuenta los identificadores de cluster (Cluster ID).

Es decir, Un cluster es un mensaje especial que contiene atributos definidos dentro de un perfil (Perfil ID).

La subcapa APS provee un elemento particular en cada dispositivo en el cual una aplicación está en ejecución, permitiendo la comunicación entre dichos dispositivos, este elemento soporta varios clusters y se denominan "*endpoint*". Dos dispositivos ZigBee diferentes pueden comunicarse si comparten un mismo perfil, mediante un mismo cluster y a través de sus respectivos *endpoints* en cada extremo de la comunicación.

Para saber a qué *endpoint* se le enviarán los datos, los coordinadores de red disponen de una tabla de asociación (*binding table*) donde se relacionan los cluster y *endpoints* de los dispositivos origen y destino.

3.3.2.1.2 *Binding*

El proceso de asociación (*binding*) tiene lugar antes de comenzar la comunicación en la aplicación, y puede hacerse sólo con el coordinador de red o a petición de un dispositivo cualquiera. De hecho, es un requisito para comunicarse, si no hay asociación, no hay comunicación.

3.3.2.2 Subcapa ZDO

ZDO Define el rol del dispositivo dentro de la red. En la capa de aplicación se inician o responden pedidos de enlace y se establece una relación segura entre dispositivos mediante un método de seguridad, por ejemplo una clave.

Los ZDO fueron creados para simplificar el manejo de la red por las aplicaciones de los usuarios. Los objetos ZigBee contienen perfiles de dispositivos ZigBee (ZDP: *ZigBee Device Profile*) que sólo se ocupan del manejo de red y no del intercambio de datos específico de la aplicación. ZDP provee un conjunto de comandos y respuestas para: realizar una exploración del canal, descubrir dispositivos y para el manejo de la potencia de transmisión.

El *endpoint* 0 está reservado para una aplicación especial ZDO, que es la que se encarga de las tareas de configuración y del funcionamiento automático. En los ZDO también se determina en qué *endpoint* se encuentra el dispositivo y qué perfil corresponde a éste. De este modo, es posible auto-configurarse y operar con otros dispositivos.

Técnicamente, en el diagrama arquitectónico de ZigBee, APS se visualiza como un subnivel de la capa de aplicación y se observa la interacción transversal en el plano de gestión con ZDO.

Esta interacción es fundamental, ya que permite a un dispositivo operar sobre la configuración de otro mediante mensajes entre sus ZDO.

3.4 Formación de una red ZigBee

Como se explicó en el capítulo II, el dispositivo coordinador es el único dispositivo que puede iniciar una red, una vez iniciada puede permitir que más dispositivos se unan, así mismo puede enrutar paquetes y comunicarse con los demás dispositivos de la red.

Al inicializar el proceso de asociación, cada dispositivo emite una trama *Beacon Request*. El coordinador contesta con un *Beacon*, y luego el dispositivo envía *Association Request*, el cual permite que el coordinador conozca su dirección MAC y pueda asignarle una dirección corta (16 bits). En el caso de los XBee, el coordinador asigna siempre la dirección 0xFFFE, lo que significa "utilizar direcciones de 64 bits para transmitir, aceptar direcciones de 16 bits en recepción". De este modo, el coordinador identifica fácilmente quién es el dispositivo que transmite, sin necesidad de mantener una tabla interna de direcciones asignadas [21].

Tal y como lo describe el estándar IEEE 802.15.4, el coordinador es responsable de seleccionar y fijar el canal por el cual operará toda la red. Para ello, realiza un escaneo de energía sobre múltiples canales (frecuencias) para detectar los niveles de energía en cada uno de ellos. De esta manera elige uno que no se encuentre ocupado. Los canales que exceden los niveles de energía son removidos de esta lista de posibles canales para iniciar la red.

El coordinador después de hacer el escaneo de energía, vuelve a hacer una revisión de los posibles canales con el fin de obtener una lista de redes vecinas PAN. Para realizar esto, el coordinador envía una solicitud de *beacon (broadcast)* a cada posible canal. Este *beacon* contiene información acerca de dicho dispositivo incluyendo sus direcciones e información acerca de los dispositivos que tiene asociados.

Después que el coordinador completa el escaneo del canal y de otras posibles PAN, selecciona de forma aleatoria un identificador PAN (PAN ID) de 16 bits que no esté en uso tal y como lo define el estándar IEEE 802.15.4. A continuación se asigna así mismo la dirección de red 0x0000 y queda a la espera.

Una vez que el coordinador ha formado la red, éste conserva la siguiente información hasta que sea apagado-encendido o reseteado: PAN ID, canal en operación, política de seguridad, los

valores en los contadores de trama y finalmente la tabla secundaria (dispositivos finales que se unieron al coordinador).

3.5 Hardware

Actualmente en el mercado se encuentran diferentes fabricantes de productos para la realización de redes ZigBee, por mencionar algunos; *Analog Devices, Atmel, Huawei, Microchip, Mitsubishi Electric, Siemens* y *Digi*. De éste último se adquirieron los módulos inalámbricos para la implementación del presente proyecto.

3.5.1 DIGI

Digi International ofrece la gama más amplia de la industria en productos inalámbricos. Ofreciendo productos como módulos embebidos, microprocesadores, productos de comunicaciones por satélite, kits de desarrollo y software. Existen también los adaptadores de comunicaciones inalámbricas (ZigBee, Wi-Fi, RF patentada), servidores de serie, sensores, entre otros. Todo el conjunto de soluciones está diseñado para permitir que cualquier dispositivo pueda comunicarse con cualquier aplicación, en cualquier lugar del mundo [13].

3.5.2 Xbee S2C

Los módulos de radiofrecuencia Xbee S2C provistos por Digi, son dispositivos que integran un transmisor - receptor y un procesador en un mismo módulo, proporcionando conectividad inalámbrica rentable para los dispositivos en redes de malla ZigBee. Dichos dispositivos son como los que se muestran en la figura 3.3 [14].



Figura 3. 3 Dispositivos Xbee S2C [14]

Algunas aplicaciones comunes de estos módulos son:

- Sistemas de seguridad y controles de iluminación.
- Automatización de casas (domótica).

- Aparatos domésticos y alarmas de incendio/CO₂.
- Monitorización de sistemas remotos.
- Colección de datos de un sensor en sistemas embebidos.

Estos módulos tienen implementada la especificación ZigBee y operan en la banda de frecuencia ISM de 2.4 GHz.

3.5.2.1 Características de los módulos Xbee S2C

Las principales características de los módulos Xbee S2C ofrecidas por el fabricante se muestran en la tabla 3.3.

Rendimiento	Xbee S2C
Zona urbana/interior	60 m de cobertura
Aire libre/línea de vista	1200 m de cobertura
Potencia de transmisión	3.1 mW (+5dBm)
Velocidad de datos de RF	250, 000 bps
Sensibilidad de receptor	-100 dBm
Requerimientos de potencia	
Fuente de voltaje	2.1-12 V
Corriente de transmisión	33 mA (+5dBm)
Corriente de recepción	28 mA
Corriente de apagado	<1 µA @ 25°C
Red y Seguridad	
Topologías de red soportadas	Punto a punto, punto a multipunto, <i>peer to peer</i> y malla, esta última con la capacidad de enrutarse y autoconfigurarse.
Número de canales	Cuenta con más de 65000 direcciones únicas para cada uno de los 16 canales de secuencia directa disponibles.
Codificación de canal	DSSS (<i>Direct Sequence Spread Spectrum</i>)
Opciones de direccionamiento	Identificador de red (PAN ID) y direcciones, (opcionalmente) ID de cluster y endpoints.
8 entradas/salidas analógicas y digitales.	

Interfaz serial.
X-CTU; software gratuito para la configuración básica de los módulos.
Amplio conjunto de comandos.
Modos de comandos AT y API, para la comunicación entre los módulos.

Tabla 3. 3 Características de los módulos Xbee S2C

Existen 2 series de estos módulos; la serie 1 y la serie 2. Dichos módulos no son compatibles entre sí ya que trabajan con diferentes protocolos [15].

3.5.3 Modos de comunicación

Los módulos brindan dos formas de comunicación para redes ZigBee usando la interfaz serial: transmisión AT (modo transparente) y el modo API (*Application Programming Interface*, 'Interfaz de programación de Aplicación') la cual provee múltiples ventajas.

3.5.3.1 Modo AT

En el modo de transmisión serial transparente (Modo AT), la comunicación se asemeja a una transmisión a través de un puerto serie, en cuanto los datos llegan al transceptor éstos son enviados de forma inalámbrica. Por ello, se considera el modo más sencillo para utilizar, su principal desventaja es que para enviar información a distintos nodos es necesario entrar constantemente al modo configuración para cambiar la dirección del nodo destino.

Cuando se reciben datos por RF, estos se envían al puerto serie. De igual manera los parámetros de configuración del dispositivo se configuran mediante la interfaz de comandos AT. Es importante mencionar que los comandos AT siempre son integrados en las tramas de transmisión o recepción para la comunicación.

3.5.3.2 Modo API

La operación API es una alternativa a la operación transparente. El modo API está basado en tramas, esto hace que se extienda el nivel al que una aplicación puede interactuar con las capacidades de red del dispositivo. Cuando se está en modo API, todos los datos que entran y salen del dispositivo están contenidos en las tramas que definen las operaciones o eventos dentro del mismo.

Los tipos de tramas que se pueden transmitir son:

- Tramas de datos por RF
- Trama de comando (equivalente a los comandos AT)

Los tipos de tramas que se pueden recibir son:

- Tramas de datos recibidas por RF
- Respuesta de comando
- Notificaciones de eventos, tales como asociación, disociación, etc.

La operación de tramas API proporciona medios alternativos para la configuración de los datos en la capa de aplicación de los dispositivos. Por ejemplo, una aplicación puede enviar tramas de datos a un dispositivo específico indicando en el campo de dirección de la trama la dirección del dispositivo en lugar de utilizar el modo de comando para modificar direcciones.

Entre otras operaciones que facilita el modo API, se encuentran:

- La transmisión de datos a múltiples destinos sin entrar en modo comandos.
- Recibir la confirmación de éxito/fracaso de cada trama de RF transmitida.
- La identificación de la dirección de origen de cada paquete recibido.

3.5.3.2.1 Estructura de trama API

En la figura 3.4 se muestra la estructura de una trama API. En los siguientes párrafos se detalla cada parte de dicha estructura.

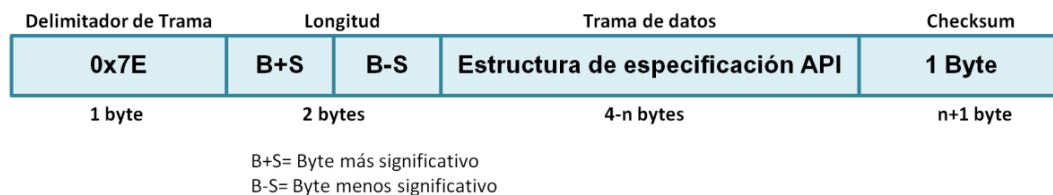


Figura 3. 4 Estructura de la trama API [4]

a) Delimitador de trama

Una trama comienza con el carácter de inicio de trama 0x7E que ocupa 1 Byte.

b) Longitud

El campo de la longitud tiene valor de un doble-byte que especifica el número de bytes que estarán contenidos en el campo de las tramas de datos.

c) Tramas de datos

Las tramas de datos están formadas por una cadena de bytes de información. Su estructura se muestra en la figura 3.5.

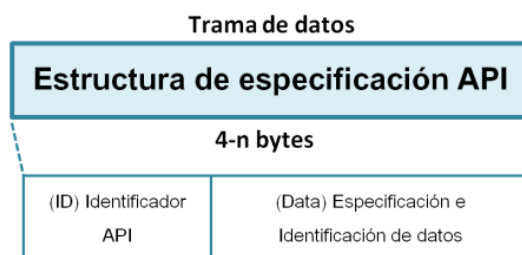


Figura 3. 5 Trama de datos de puerto serie [4]

El parámetro ID (Identificador API) mostrado en la figura 3.5 indica qué tipo de trama es, mientras que el parámetro Data (Especificación e Identificación de los datos) es propiamente del contenido de la trama.

d) *Checksum* (suma de verificación)

El *checksum* es un byte que se calcula como 0xFF menos la suma de todos los bytes del campo "Trama de datos". Lo que hace es detectar cambios accidentales en una secuencia de datos, con el fin de proteger la integridad de los datos verificando que no haya discrepancias. Dicho de otro modo, es el control de errores en la trama.

La especificación ZigBee cuenta con varias tramas API debido a que cada una tiene una función especial de acuerdo a la aplicación que se desee realizar. En la tabla 3.4 se muestran los tipos de tramas API para los dispositivos Xbee S2C.

ID API	NOMBRES DE LAS TRAMAS API
0x08	AT Command
0x09	AT Command – Queue Parameter Value
0x10	ZigBee Transmit Request
0x11	Explicit Addressing ZigBee Command Frame

0x17	Remote Command Request
0x21	Create Source Route
0x88	AT Command Response
0x8A	Modem Status
0x8B	ZigBee Transmit Status
0x90	ZigBee Receive Packet (AO=0)
0x91	ZigBee Explicit Rx Indicator (AO=1)
0x92	ZigBee IO Data Sample Rx Indicator
0x94	XBee Sensor Read Indicator (AO=0)
0x95	Node Identification Indicator (AO=0)
0x97	Remote Command Response
0xA0	Over-the-Air Firmware Update Status
0xA1	Route Record Indicator
0xA3	Many-to-One Route Request Indicator

Tabla 3. 4 Valores y nombre de las tramas API [4]

Las tramas API que se utilizaron en este trabajo se muestran en la tabla 3.5.

ID API	Nombres de las tramas API
0x08	AT Command
0x88	AT Command Response
0x17	Remote Command Request
0x97	Remote Command Response
0x91	ZigBee Explicit Rx Indicator (AO=1)

Tabla 3. 5 Tramas utilizadas para este proyecto

CONFIGURACIÓN E IMPLEMENTACIÓN DE LA RED INALÁMBRICA DE SENSORES

Previamente se expuso cómo se forma una red inalámbrica de sensores de área personal usando la especificación ZigBee, así como las características de los dispositivos Xbee S2C. En este capítulo se detalla la configuración de cada uno de los dispositivos Xbee S2C con el que cuenta el kit de Digi para formar la red inalámbrica de sensores.

4.1 Elementos de red

El kit de Digi Xbee S2C cuenta con 4 tarjetas con interfaz serial y 6 módulos Xbee S2C (de estos sólo se usan 4, por las tarjetas que se tienen disponibles). Estos dispositivos se configuraron para obtener los elementos de la red que se muestran en la tabla 4.1 con sus respectivas direcciones de red. Estos módulos fueron configurados usando el software X-CTU que forma parte de los módulos Xbee.

Dispositivos	Dirección extendida (64 bits)
Coordinador	0013 A200 407B 4174
Router 1	0013 A200 4077 589C
Router 2	0013 A200 4077 58D6
Dispositivo Final	0013 A200 4076 84A4

Tabla 4.1 Elementos que conforman la red

Se observa al principio de cada una de las direcciones de 64 bits de la tabla 4.1 que conservan una similitud, pero los últimos 3 bytes cambian haciendo al dispositivo único en el mercado. A partir de este momento, sólo se tomarán en cuenta los últimos 3 bytes para identificar a los elementos que conforman la red.

Cabe mencionar que al alimentar al dispositivo coordinador, éste forma la red automáticamente. Este dispositivo se conecta a una computadora personal, funcionando como estación base recolectando datos; se encuentra instalada de manera fija y se comunica mediante el coordinador con el resto de la red.

La estación base asistirá a conectar la interfaz X-CTU con el dispositivo coordinador para configurar los parámetros básicos de los módulos con dicho software, el cual, establece el modo de operación y los recursos que se deseen utilizar.

4.2 Configuración de dispositivos en X-CTU

Dentro del software X-CTU, en la pestaña "Modem Configuration" se configuran los parámetros para que todos los dispositivos operen con la función deseada. En este sentido se debe seleccionar una opción para: *Modem: XBEE-PRO*, *Function Set* y *Version*. Como se muestra en la figura 4.1.

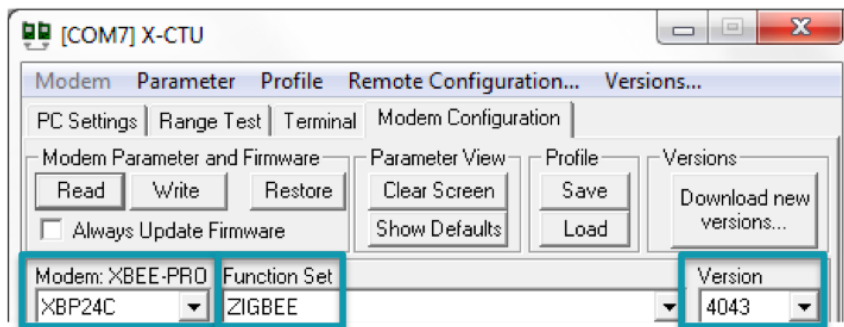


Figura 4. 1Software X-CTU

4.2.1 Parámetros del coordinador

Para formar una red, el coordinador selecciona un canal que no esté siendo utilizado de los 16 disponibles y un identificador para la red (PAN ID). Todos los datos y las configuraciones se efectúan en formato hexadecimal.

En la figura 4.2 se muestra desplegada la sección de red, en la que el coordinador ha configurado ciertos parámetros al iniciar la red. Estos parámetros son: la selección del canal de operación número 11, el identificador de la red como A5FC3C99CFC9DD50 y la operación del PAN ID de 16 bits de la red es ACA3. A partir de esta selección todos los dispositivos que se unan a esta red adquieren los mismos parámetros configurados.

La habilitación del dispositivo como coordinador se realiza por el usuario en esta sección en el apartado de "Coordinador Enable".

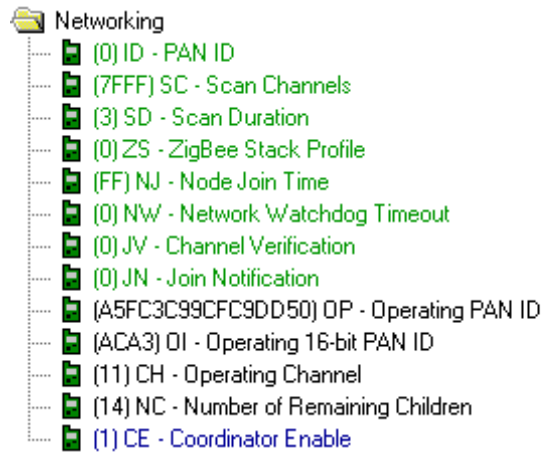


Figura 4. 2 Configuración del coordinador en X-CTU

En el apartado de direccionamiento como se muestra en la figura 4.3, el software muestra la dirección larga (64 bits) y corta (16 bits) del dispositivo. En este sentido, para el coordinador siempre está reservada la dirección 0. Así mismo, si la red requiere que el coordinador funcione como dispositivo recolector de datos, en esta misma sección el usuario debe especificar el número 2 en “*Node discovery options*”, con el fin de que el coordinador también muestre siempre su estatus de conexión.

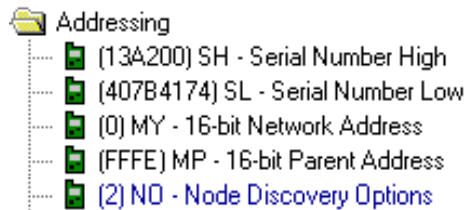


Figura 4. 3 Configuración de direccionamiento del coordinador

4.2.1.1 Parámetros para la comunicación serial

En el apartado de comunicación serial, todos los dispositivos se configuran como se muestra en la tabla 4.2.

Parámetro	Descripción
“API Enable”	Se asigna en 1, especificándole al dispositivo que debe enviar tramas API.

"API Output Mode"	Se asigna en 1, esto es necesario en Xbee para recibir la trama explícita API (0x91). Esto es si la aplicación necesita indicación del origen o destino, así como valores usados en los <i>endpoints</i> , <i>cluster</i> o <i>perfil ID</i> , todo esto sólo puede ser recibido si AO=1 (AO significa Opciones de configuración para API).
-------------------	---

Tabla 4. 2 Configuración de parámetros para la comunicación serial

4.2.2 Tiempo de muestreo

El tiempo de muestreo define cada cuánto tiempo los dispositivos enviarán las muestras hacia el coordinador referente a los sensores que tengan conectados. La especificación ZigBee establece un tiempo de muestreo para cada dispositivo que puede ser desde 50 ms a 65 535 ms (0x32 a 0xFFFF en hexadecimal). En este sentido, dado que tres dispositivos estarán enviando muestras de sus respectivos sensores, se especificó un intervalo entre ellas de 0.5 s (500 ms), con estos tiempos las tramas de los tres dispositivos (Router 1, Router 2 y Dispositivo Final) pueden ser leídas por el coordinador facilitando la recolección de datos. Dicho lo anterior, se establecen los tiempos de muestreo para los dispositivos de acuerdo a la tabla 4.3.

Dispositivo	Tiempo de muestreo
Router 1	5 s
Router 2	5.05 s
Dispositivo Final	5.1 s

Tabla 4. 3 Tiempo de muestreo para cada dispositivo

4.2.3 Parámetros del Router 1

En el apartado de red ya no es necesaria alguna configuración, ya que ésta ha sido especificada por el coordinador. Sin embargo, se muestra la dirección corta que le fue asignada dentro de la red (1A9B) en el apartado "16-bit Network Address", figura 4.4.

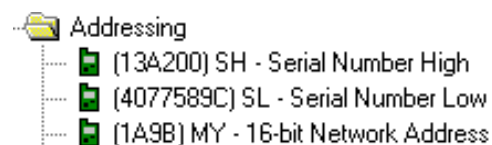


Figura 4. 4 Direccionamiento del Router 1

Las configuraciones adicionales para el Router 1 se muestran en la tabla 4.4. Cabe mencionar que los mismos apartados que se encuentran en esta tabla, son configurados en los dispositivos posteriores.

Apartado	Parámetro	Descripción
Seguridad	"Encryption Options"	Se asigna en 8 para la autenticación de la red, con el fin de que el dispositivo se una a la red correspondiente.
Muestreo	"IR – IO Sampling Rate"	Se asigna en 1388 que es el tiempo de 5 s en hexadecimal.
Ajustes de entrada y salida Se habilitaron dos entradas analógicas dado que solo se requiere hacer el monitoreo de dos variables (humedad y temperatura).	"AD0/DIO0"	Se asigna en 2 para habilitar la salida del convertidor analógico-digital (ADC).
	"AD1/DIO1"	

Tabla 4. 4 Parámetros de configuración del Router 1

Tomando el último apartado de la tabla 4.4 (ajustes de entrada y salida), es importante mencionar que las muestras analógicas tomadas por los sensores son digitalizadas con una resolución de 10 bits, donde el valor 0x0000 representa 0 V, y 0x3FF es el voltaje máximo que se puede digitalizar (1.2 V). Por ello las muestras analógicas de los sensores no pueden sobrepasar valores de más de 1.2 V. Este es un problema para las lecturas de sensores que sobrepasen este umbral [4].

Para convertir la palabra digital a mV, se utiliza la ecuación 4.1

$$AD(mV) = \frac{(AD \text{ reading})(1200mV)}{1024} \quad \text{ec. 4.1 [1]}$$

4.2.4 Parámetros del Router 2

De manera similar al Router 1, en el Router 2 no se modifica ningún parámetro de la red. La dirección corta que le fue asignada para trabajar en la red es E808. Como se muestra en la figura 4.5.

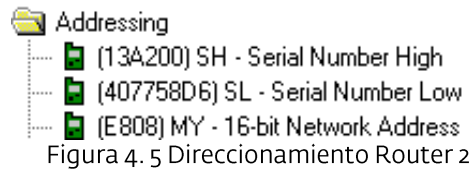


Figura 4. 5 Direccionamiento Router 2

Parámetros de seguridad y ajustes de entrada y salida son configurados de la misma manera que el Router 1. El único parámetro que cambia es el tiempo de muestreo como se muestra en la tabla 4.5.

Apartado	Parámetro	Descripción
Muestreo	"IR – IO Sampling Rate"	Se asigna en 13BA que es el tiempo de 5.05 s en hexadecimal.

Tabla 4. 5 Parámetros de configuración del Router 2

4.2.5 Parámetros del Dispositivo Final

El apartado de red está configurado de la misma manera que los dispositivos anteriores. En la parte de direccionamiento se le asigna al dispositivo la dirección corta de 67B0. Adicionalmente se agregó una dirección de 16 bits (E808) en "16-bit Parent Address", lo que indica la dirección corta del dispositivo que tomó como padre. En este caso tomó al Router 2. Figura 4.6.



Figura 4. 6 Direccionamiento Dispositivo Final

Los parámetros de seguridad y ajustes de entrada y salida son configurados igual que los dispositivos anteriores; por lo tanto los parámetros que se configuran en el dispositivo final se muestran en la tabla 4.6.

Apartado	Parámetro	Descripción
Muestreo	"IR – IO Sampling Rate"	Se asigna en 13EC que es el tiempo de 5.1 s en hexadecimal.

<p>Forma de dormir</p> <p>Opciones para dormir:</p> <p>0: No dormir (Router)</p> <p>1: hibernación; es la energía más baja</p> <p>2 y 3: Reservados</p> <p>4: Dormir cíclicamente</p>	<p>"SM - Sleep Mode"</p>	<p>El modo de operación se asigna en 4, indicando que el dispositivo dormirá cíclicamente, es decir, controla el tiempo en que el dispositivo está inactivo para enviar o recibir mensajes.</p>
---	--------------------------	---

Tabla 4. 6 Parámetros de configuración del dispositivo final

4.3 Sensores

Para realizar la prueba de la red, fueron utilizados dos sensores; humedad y temperatura. Los cuales fueron conectados al dispositivo final, siendo la base para demostrar que puede conectarse cualquier tipo de sensor en la red. Los sensores utilizados en este trabajo se muestran en la tabla 4.7.

Sensor	Características
Temperatura LM35	<ul style="list-style-type: none"> • Voltaje de entrada: 4 V a 30 V • Voltaje de salida: 0 V a 1.250 V • Rango de temperatura: -55°C a +150°C • Ecuación correspondiente: $^{\circ}C = \frac{V_{out}}{10mV} \quad \text{ec. 4.2 [17]}$
Humedad HIH-4000-01	<ul style="list-style-type: none"> • Voltaje de entrada: 4 V a 5.8 V • Voltaje de salida: 0 V a 4 V • Humedad relativa del aire (%RH): $\%RH = \frac{V_{out}-0.826}{0.0315} \quad \text{ec. 4.3 [18]}$

Tabla 4. 7 Características de los sensores utilizados

Cada sensor se conectó a una de las entradas del dispositivo final; en ADo se conectó el sensor de humedad y AD1 el sensor de temperatura, pines 32 y 33 respectivamente como se muestra en la figura 4.7.

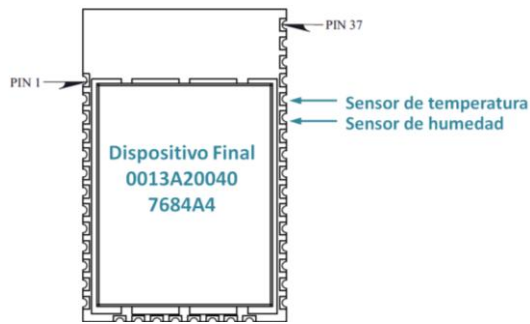


Figura 4.7 Conexión de los sensores en el dispositivo final

Los sensores conectados al dispositivo final se muestran en la figura 4.8.

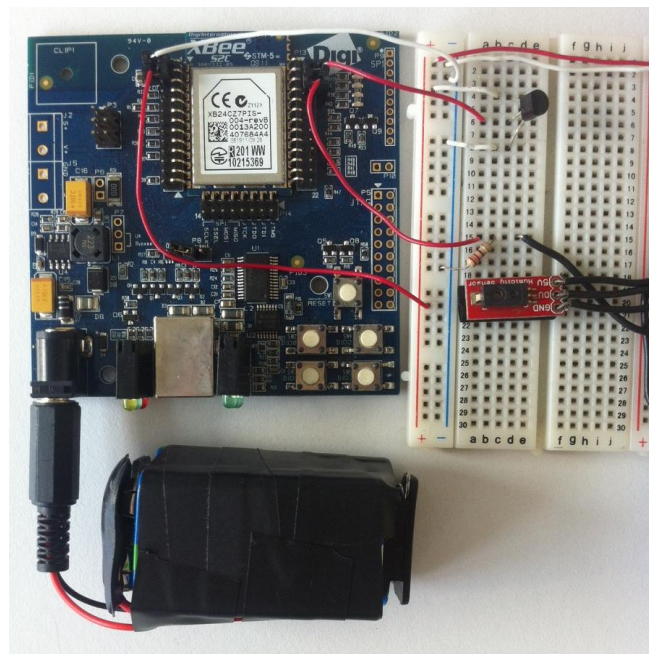


Figura 4.8 Sensores conectados al dispositivo final

4.3.1 Sensor de humedad

El sensor de humedad fue caracterizado para que el voltaje máximo de salida no rebase los 1.2V acorde a la especificación del ADC del módulo Xbee.

El circuito típico para este sensor es como el de la figura 4.9, se le ha agregado un resistor de 220Ω para que el voltaje aproximado de 3.54 V (100% de humedad) que tiene como salida

máxima, sea reducido hasta un voltaje de 1.1 V aproximadamente. A causa de esto, la ecuación 4.3 es modificada para que el voltaje de salida no se muestre saturado y arroje valores erróneos, la nueva ecuación es la 4.4.

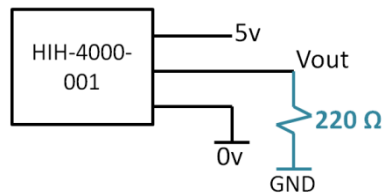


Figura 4. 9 Circuito del sensor de humedad

$$\%RH = \frac{V_{out}(3.54) - 0.826}{0.0315} \quad \text{ec. 4.4}$$

4.3.2 Sensor de temperatura

El sensor de temperatura comprende un voltaje de salida de 0 a 1.250 V. Por lo tanto, este sensor se encuentra en el rango establecido por ZigBee.

El circuito típico de este sensor es el que se muestra en la figura 4.10.

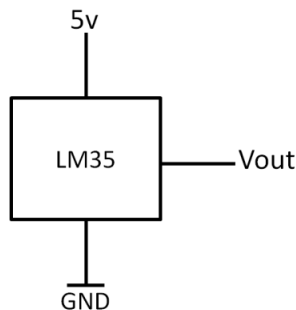


Figura 4. 10 Circuito del sensor de temperatura

4.4 Topología de la Red

De acuerdo a la tabla 4.1, la topología propuesta es de tipo malla. Los dispositivos se colocaron en el plantel San Lorenzo Tezonco de la UACM del siguiente modo: en un punto alejado de los edificios del plantel, se conectó el Coordinador con la estación base (en este caso una laptop), el Router 1 se colocó del edificio C a 89m aproximadamente del Coordinador en línea de vista. A

esta distancia el Coordinador tiene su radio de cobertura, esto se fue comprobando con el software X-CTU ingresando el comando ATND (Descubrimiento de nodo) en la pestaña de "Terminal" como se muestra en la figura 4.11.

Del lado izquierdo de la figura aparece la dirección de 16 y 64 bits, ID de cluster, identificador de trama, identificador de perfil e identificador de manufactura. Del lado derecho aparece lo mismo pero en valores hexadecimales para las letras y el número 3 como precursor de los números, el cuadro en color verde indica el dispositivo encontrado que corresponde al Router 1 con dirección 4077 589C. El cuadro negro indica el comando AT enviado.

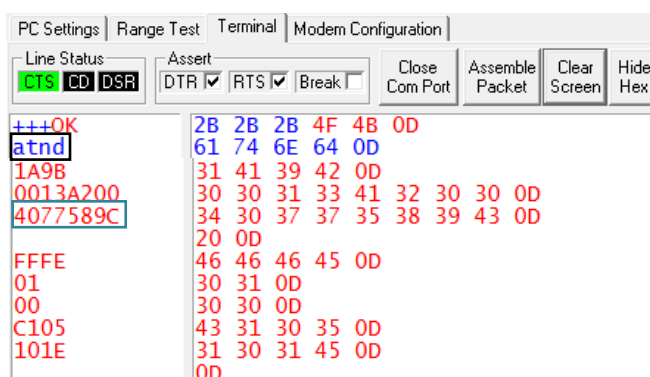


Figura 4. 11 Descubrimiento del Router 1

Posteriormente el Router 2 se conectó a 33 m del Router 1, considerando este valor como el radio de cobertura del Router 1. Desde el nodo coordinador se mandó nuevamente el comando ATND para el descubrimiento de estos dos Routers como se muestra en la figura 4.12. En los cuadros en verde se encuentran localizados dichos nodos, el Router 2 corresponde a la dirección 4077 58D6.

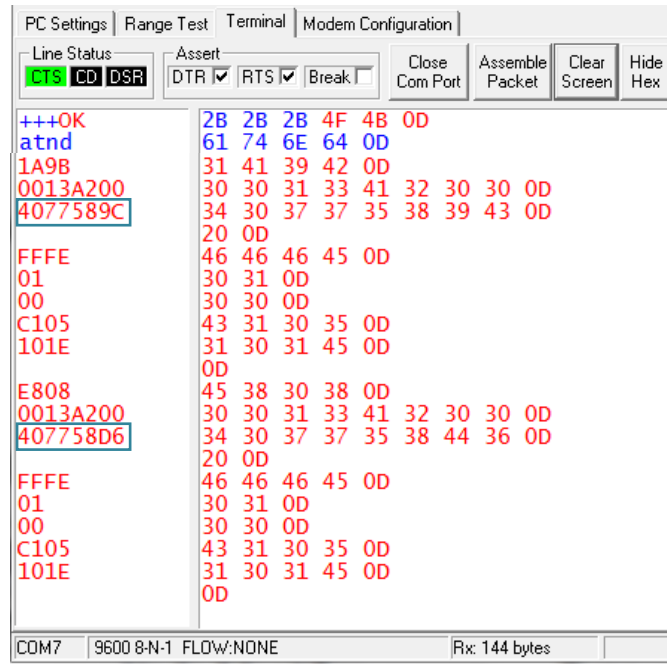


Figura 4. 12 Descubrimiento del Router 2 a través del Router 1

El Dispositivo Final se conectó a 32 m del Router 2 alcanzando la máxima cobertura de dicho Router. El descubrimiento de este nodo junto con los 2 anteriores se muestra en la figura 4.13, el cuadro en verde que marca la dirección 4076 84A4 corresponde al dispositivo final.

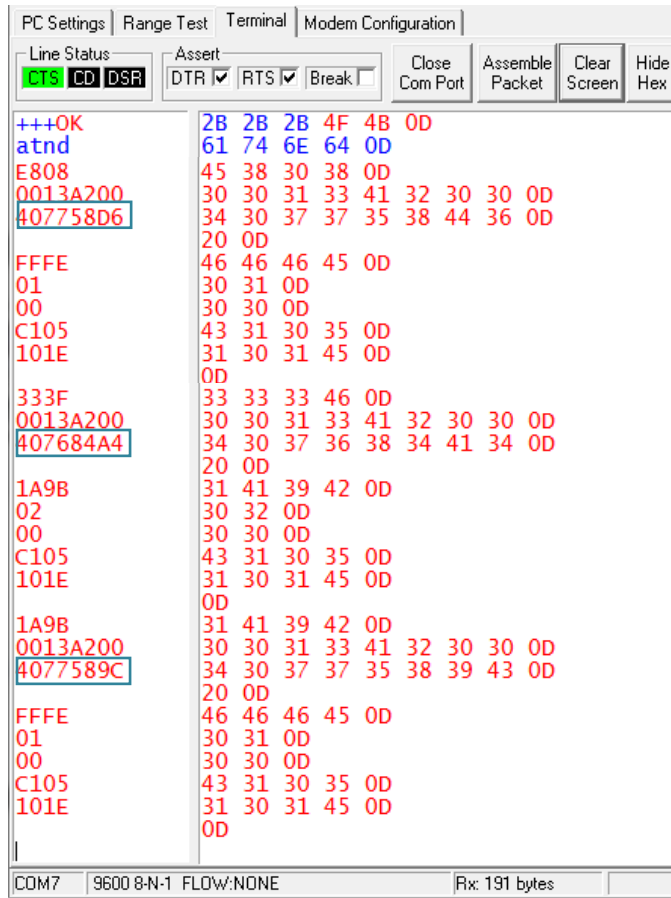


Figura 4. 13 Descubrimiento del Dispositivo final a través del Router 1 y 2

Finalmente en la pestaña de "Remote Configuración" del software X-CTU, se puede verificar cómo quedó configurada la red, figura 4.14.

Address	Node Identifier	Type	Short Address
13A200407B4174		Coordinator	
13A2004077589C		Router	1A9B
13A200407684A4		End Device	333F
13A200407758D6		Router	E808

Figura 4. 14 Configuración de la red en X-CTU

La topología de malla resultó configurada como se muestra en las figuras 4.15 y 4.16.

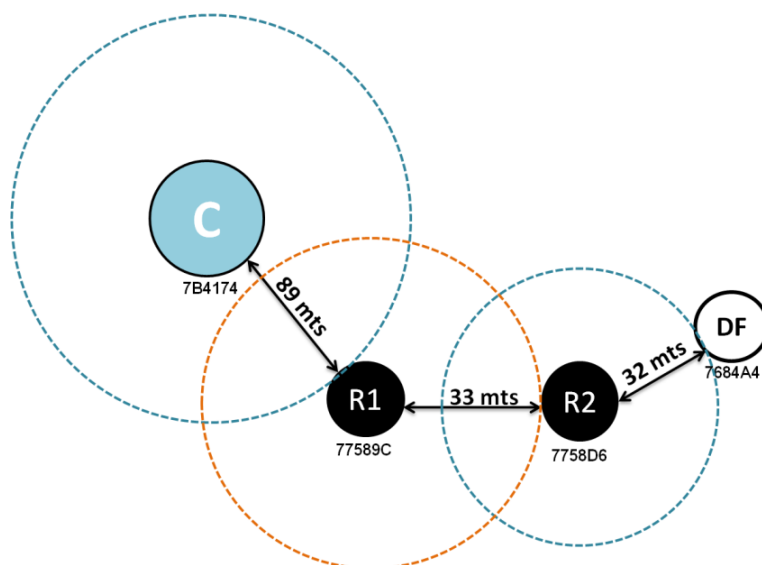


Figura 4. 15 Topología de malla para la red



Figura 4. 16 Implementación de la red, plantel San Lorenzo Tezonco UACM

PROGRAMA DE MONITOREO DE LA RED INALÁMBRICA DE SENSORES

El sistema de monitoreo permite conocer el estado de la red mediante una opción que le permite al usuario verificar si la red se encuentra funcionando adecuadamente. Previamente, los transceptores inalámbricos Xbee requieren ser configurados con las funciones mencionadas en la sección Configuración de la red del capítulo IV.

El sistema de monitoreo también permite la recolección manual o automática de datos de los nodos en la RIS. En la recolección manual el usuario tiene la opción de elegir entre uno o varios nodos de los cuales desea obtener información, en la recolección automática el sistema realiza una serie de descargas de información en horas previamente establecidas. Una vez recolectados los datos, éstos se guardan en un archivo de texto en la estación base donde está instalado el programa y se envían por correo electrónico a una lista de destinatarios. Por otro lado, el usuario puede tener acceso remoto al programa de monitoreo a través de Internet.

El sistema de monitoreo está programado en LabView, mismo que se describe a continuación.

5.1 LabView

LabView (*Laboratory Virtual Instrumentation Engineering Workbench*, 'Banco de pruebas de ingeniería. Laboratorio de instrumentación virtual') es una plataforma y entorno de programación gráfico para el diseño de sistemas de medición, prueba y control. El lenguaje G se refiere al sistema gráfico de programación en LabVIEW, el cual usa una ejecución basada en el flujo de datos que se lee de izquierda a derecha asociado al flujo de datos, se dispone de un diagrama de bloques el cual termina las operaciones o funciones que procesan los datos [19].

Este entorno de programación fue creado por *National Instruments* en el año de 1986. Sin embargo, continua vigente pues permite recoger, analizar y monitorizar los datos dentro de dicho entorno con lenguaje G.

Entre los objetivos del lenguaje o entorno de programación están el reducir el tiempo de desarrollo de aplicaciones y permitir la entrada a profesionales de cualquier campo. LabView

posee una importante compatibilidad pues consigue combinarse con gran variedad de software y hardware, tanto del propio fabricante como de otros [20]. En este caso, se combina con ZigBee.

5.1.1 Programación en LabView

LabView es un metaprograma, significa que genera otros programas (por ejemplo, de modelos gráficos a código Java). Esto señala que los programas no se escriben sino que se dibujan, facilitando su comprensión al tener pre-diseñados una gran cantidad de bloques para la programación facilitando al usuario la creación de proyectos llamados instrumentos virtuales (VIs *virtual instruments*) [4].

Cada instrumento virtual consta de dos partes diferenciadas:

- *Diagrama de Bloques*: es el programa donde se define la funcionalidad del sistema, en esta parte se colocan herramientas que realizan una determinada función y que se interconectan entre sí, dicho de otra manera es el código que controla el programa.
- *Panel Frontal*: En esta interfaz se definen los controles (usados como entradas, pueden ser botones, marcadores, entre otros) e indicadores (usados como salidas, pueden ser gráficas o cuadro de datos). Es utilizado para interactuar con el usuario cuando el programa se está ejecutando, pudiendo observar los datos del programa actualizados en tiempo real.

5.2 Descripción del programa

Cuando el programa se ejecuta, el usuario debe iniciar sesión y escoger el puerto con la interfaz serial donde el coordinador haya sido conectado como muestra la figura 5.1.



Figura 5. 1 Nombre de usuario y contraseña

Una vez iniciada la sesión, en la figura 5.2 se muestra un panel frontal con una serie de instrucciones que guían al usuario en la operación del programa. Se observa que el sistema consta de tres menús organizados en pestañas:

1. Actualización de red
2. Monitoreo manual
3. Monitoreo automático



Figura 5. 2 Panel frontal del programa

5.2.1 Actualización de Red

En la pestaña actualización de red, el usuario puede monitorear que nodos de la red se encuentran activos antes de hacer una consulta de datos referente a los sensores. Para hacer esto, el programa genera una trama 0x08 y la envía en *broadcast* desde el coordinador como se muestra en la tabla 5.1. Dicha trama es la que se ocupa del descubrimiento de los nodos activos con el comando AT "ND".

7E	Delimitador de trama
00 04	Longitud de trama, a partir de aquí y hasta el <i>checksum</i>

08	Tipo de trama API para comandos AT
01	Identificador de trama (diferente de cero)
4E44	Comando AT, ND; <i>Node Discovery</i> , 'Descubrimiento de nodo activo'
64	<i>Checksum</i>

Tabla 5.1 Estructura de trama para descubrir los nodos

Una vez enviada la trama 0x08, el programa espera a que cada nodo al recibir dicha solicitud, envíe su respuesta con la trama 0x88 que corresponde a una respuesta a comando AT, con su estatus. Tomando como ejemplo la respuesta del coordinador, la trama está conformada como se muestra en la tabla 5.2.

7E	Delimitador de trama
0019	Longitud de trama, a partir de aquí y hasta el <i>checksum</i>
88	Tipo de trama API, respuesta a un comando AT
01	Identificador de trama (diferente de cero)
4E44	Comando AT, ND; <i>Node Discovery</i> , 'Descubrimiento de nodo'
00	Estatus de comando 00=OK
0000	Dirección corta o de red que asigna el coordinador (16 bits)
0013A200407B4174	Dirección larga (64 bits)
2000	20=Endpoint de quien inició la transmisión 00=Endpoint del destino, el mensaje está dirigido a.
FFFE	Identificador de Cluster, el paquete está dirigido al coordinador (esto por la dirección corta que aparece).
0000	Número de saltos del coordinador al router
C105	Identificador de perfil
101E	Identificador de manufactura, establecido por Digi
AE	<i>Checksum</i>

Tabla 5.2 Estructura de trama de respuesta a la solicitud de descubrimiento de nodo

Una vez que el sistema recolectó las tramas correspondientes a cada nodo de la red procede a hacer un proceso de filtrado de cada una de ellas para separar la información útil para el usuario de cada nodo. El filtrado se hace a partir de la dirección larga (64 bits) utilizando los últimos tres bytes como se definió previamente, dado que esta dirección nunca cambia, caso contrario a la dirección corta (16 bits), del mismo modo se podría configurar un identificador

para cada nodo. Sin embargo, para garantizar la identificación del nodo en la red al momento del monitoreo se opta por la dirección larga.

El diagrama de flujo correspondiente a esta sección del programa, se muestra en la figura 5.3. La primera parte se encarga de preguntar si se requiere actualizar la red, si la respuesta es afirmativa se envía una solicitud a la red usando la trama 0x08. Posteriormente, se lee el puerto correspondiente si no existe error. Inmediatamente después, el programa espera 2 segundos para garantizar la recepción de todas las tramas enviadas por los nodos. Una vez hecho lo anterior, comienza el procesamiento de cada una de ellas mostrando los nodos disponibles.

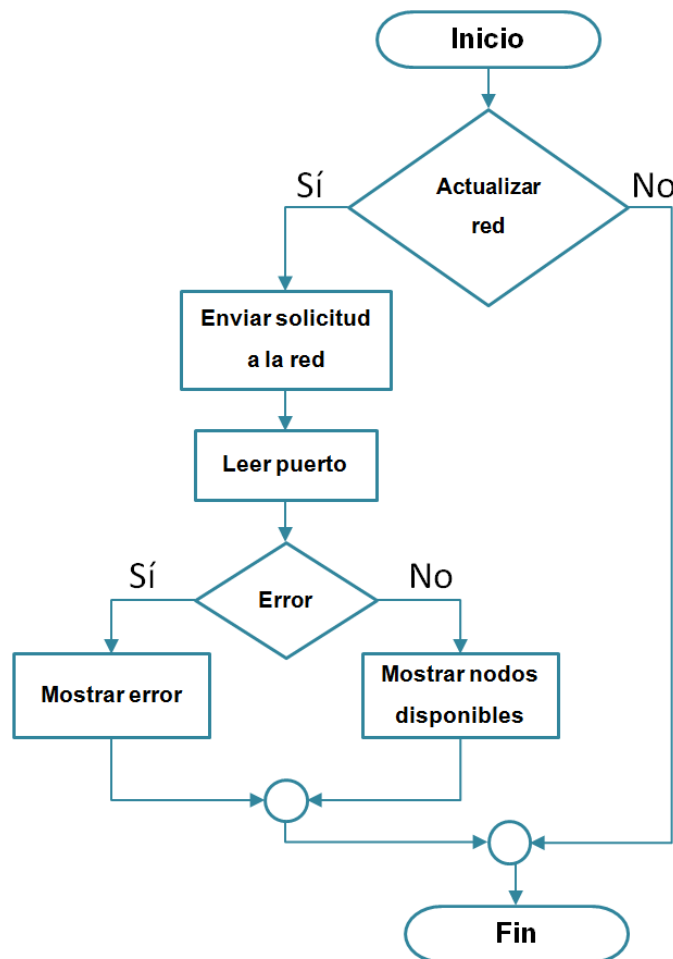


Figura 5.3 Diagrama de flujo del procedimiento de la Actualización de la red

El diagrama a bloques que describe el funcionamiento de la opción Actualización de la red es mostrado en la figura 5.4.

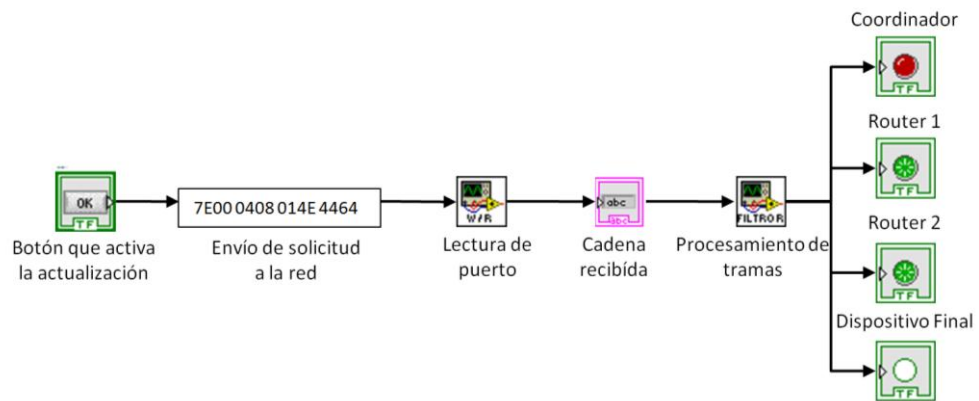


Figura 5. 4 Diagrama a bloques de la Actualización de la red

Si las tramas son recibidas exitosamente por el sistema de monitoreo, en el panel frontal se iluminará el indicador correspondiente a cada nodo. Dicho panel se muestra en la figura 5.5.

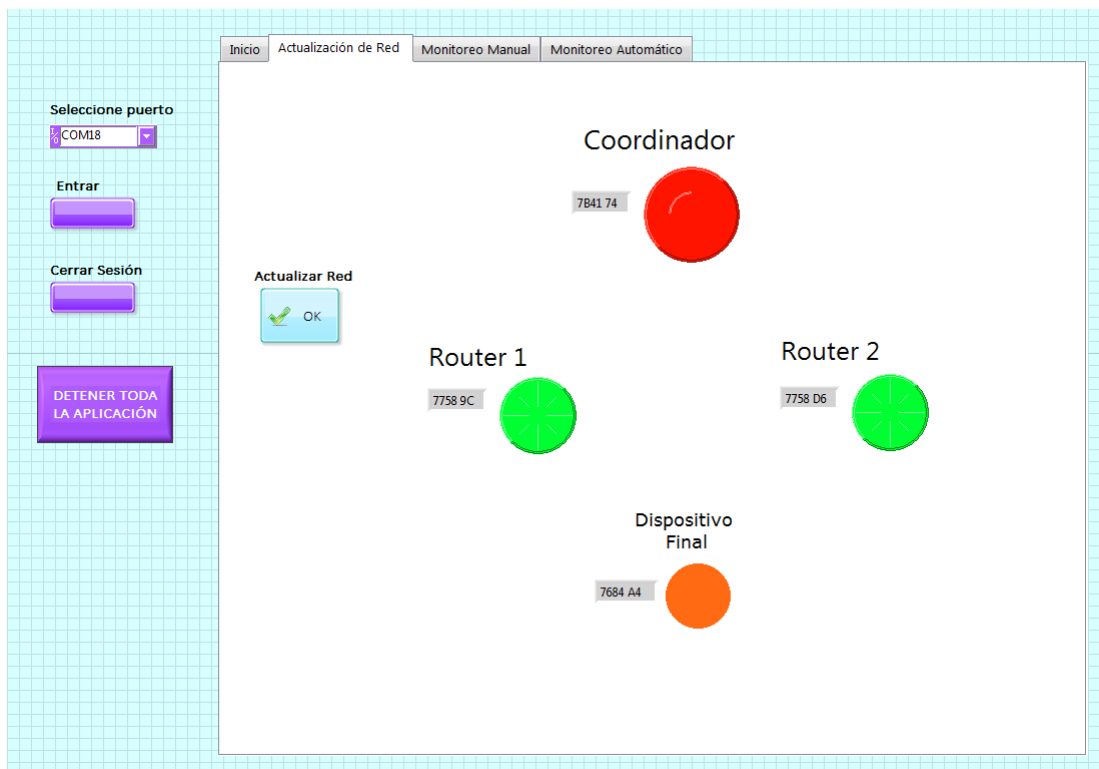


Figura 5. 5 Panel frontal de la pestaña Actualización de red

5.2.2 Monitoreo Manual

En esta pestaña la comunicación entre los nodos de la red que se realiza para esta sección del programa puede ser de dos tipos: *unicast* o *broadcast*. La primera se realiza del nodo coordinador a un solo nodo y la segunda del nodo coordinador a todos los nodos de la red. Ambas comunicaciones se realizan con el tipo de trama 0x17, la cual corresponde a una solicitud remota de comando AT. El comando que se envía es "IS" (*Force Sample*, 'forzar las muestras'), el cual solicita que se muestren los valores que se encuentran en las entradas analógicas y digitales de cada nodo. En este sentido, el usuario puede seleccionar con un botón el nodo que desea para desplegar los datos. Una vez seleccionado, el programa muestra los datos recolectados del nodo seleccionado en tiempo real. Por ejemplo, si se desea contactar al Router 1, el programa genera una trama API como se muestra la tabla 5.3.

7E	Delimitador de trama
000F	Longitud de trama, a partir de aquí y hasta el <i>checksum</i>
17	Tipo de trama API, solicitud remota de comando AT
01	Identificador de trama (diferente de cero)
0013A2004077589C	Dirección larga (64 bits)
FFFE	Dirección corta (16 bits), si esta dirección es desconocida se asigna el valor FFFE, se sugiere poner siempre esta dirección ya que si el nodo tiene otra y sale de la red, la dirección cambiará. Éste evento no es conveniente si el nodo era reconocido por esta dirección y ésta ha cambiado.
00	Para uso óptimo del comando remoto
4953	Comando AT, IS; <i>Force Sample</i> , indica en la trama el valor que arrojan las entradas AD.
EE	<i>Checksum</i>

Tabla 5.3 Estructura de trama para contactar a un nodo

Cuando el Router 1 reciba esta petición, enviará la trama 0x97 correspondiente a una respuesta de comando remoto, para responder a dicha solicitud de acuerdo a la tabla 5.4.

7E	Delimitador inicial
0017	Longitud de la trama, a partir de aquí y hasta el <i>checksum</i>
97	Tipo de trama API, respuesta a comando remoto AT
01	Identificador de la trama (diferente de cero)

0013A2004077589C	Dirección larga, asignada por el fabricante, se puede ver como el número de serie (64 bits)
1A9B	Dirección corta o de red que asigna el coordinador (16 bits)
4953	ND (letras en hexadecimal (comando AT))
00	Estatus de comando 00=OK
01 0000 03	Entradas analógicas habilitadas mostradas como bytes [3]
0209 0221	Carga útil
84	<i>Checksum</i>

Tabla 5. 4 Estructura de trama de respuesta a la solicitud remota de comando AT

El diagrama de flujo que describe la pestaña de monitoreo manual se muestra en la figura 5.6. Inicialmente se pregunta si se desea hacer una descarga manual, en caso afirmativo se tienen dos opciones; si se desea hacer la descarga de toda la red o de algún nodo en específico. En cualquiera de estas dos opciones se enviará la solicitud a la red y se esperará la respuesta correspondiente. Una vez que ésta ha sido leída y no haya error de lectura del puerto, se procesa la información mostrando únicamente la carga útil de la trama al usuario. Posteriormente se mostrarán los datos recolectados en el panel frontal y se guardarán inmediatamente en un archivo en la estación base. Finalmente se pregunta al usuario si se desea enviar por correo electrónico el archivo.

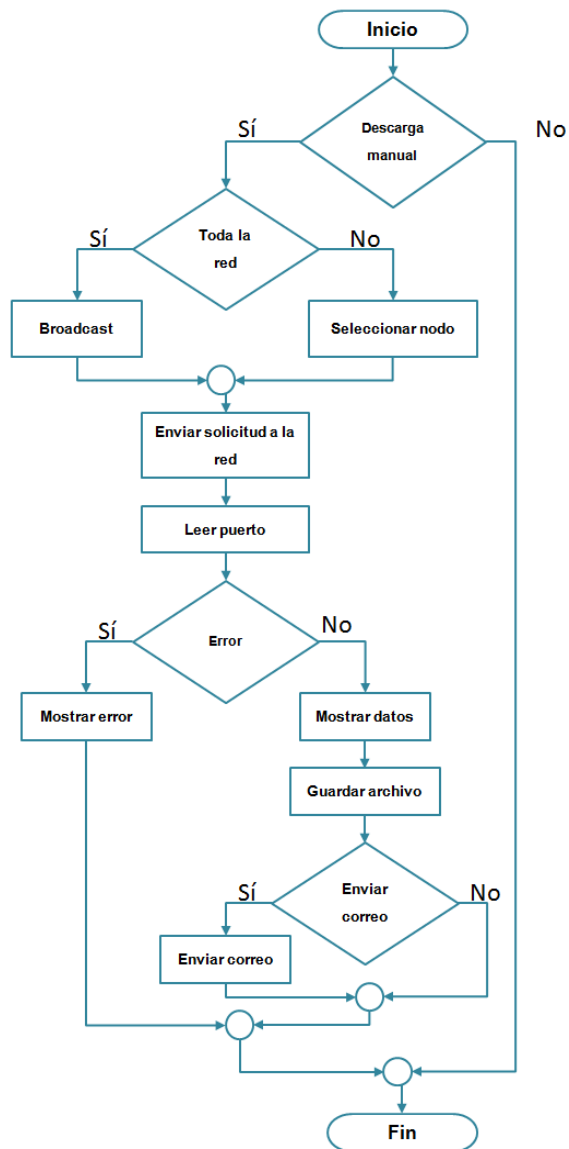


Figura 5. 6 Diagrama de flujo del Monitoreo manual

El diagrama a bloques de esta pestaña se muestra en la figura 5.7.

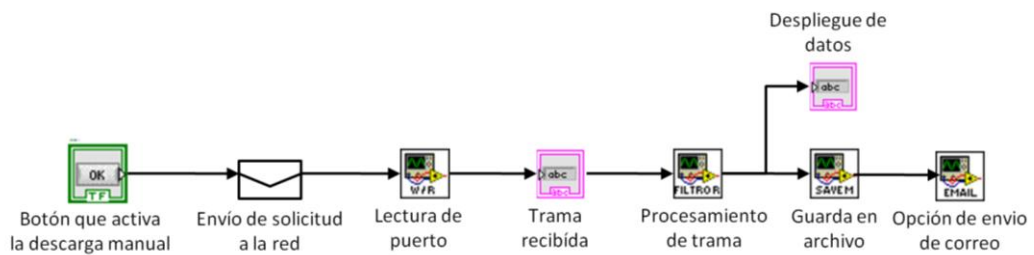


Figura 5. 7 Diagrama a bloques del Monitoreo manual

Con respuesta inmediata, los datos recolectados se muestran en el panel frontal, al mismo tiempo que son guardados en un archivo de texto llamado `descarga_manual.txt`. Aunado a esto, en la pestaña de monitoreo manual se encuentra un botón que da la opción al usuario de enviar la información recolectada en ese momento a un correo electrónico. Dicho panel se muestra en la figura 5.8 en donde se hizo la recolección de datos del dispositivo final.

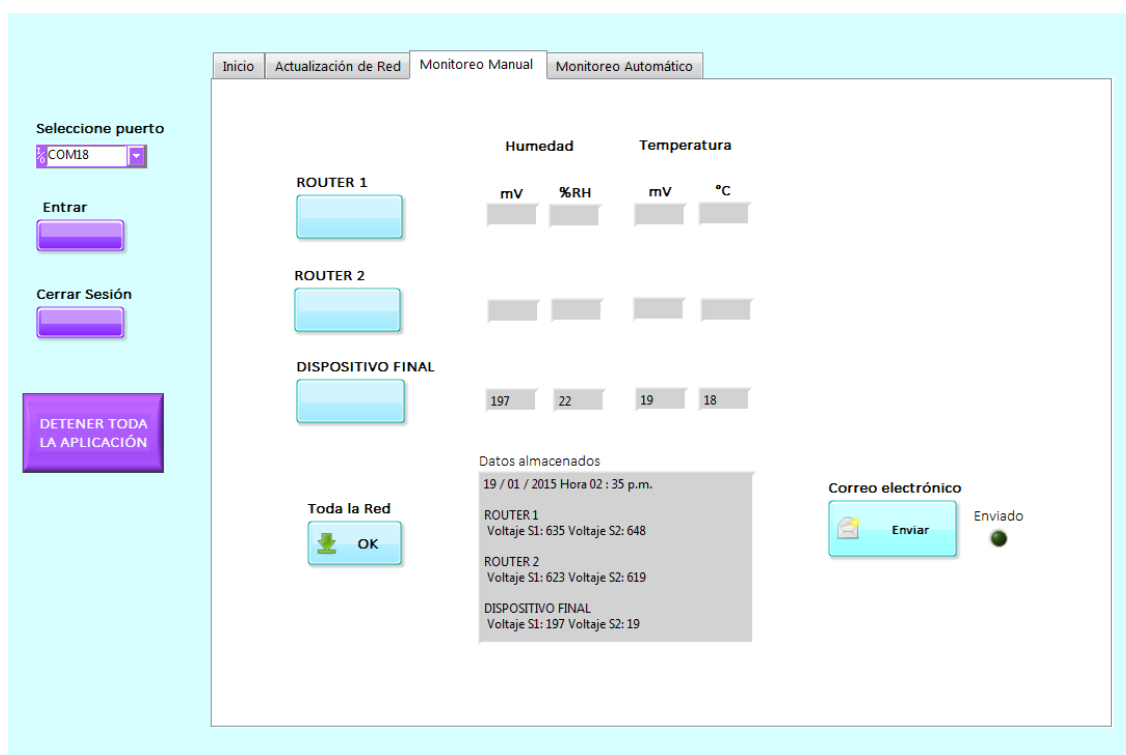


Figura 5. 8 Panel frontal del Monitoreo manual

5.2.3 Monitoreo Automático

El monitoreo automático es una opción que consiste en tomar las muestras de los nodos en los tiempos que previamente fueron configuradas en el capítulo IV (Router 1; 5 s, Router 2; 5.05 s y Dispositivo Final; 5.1 s). En esta pestaña no se envía ninguna trama desde el dispositivo coordinador, ya que los nodos ya han sido programados para hacer llegar sus datos.

La trama que hace llegar cada nodo al coordinador es del tipo `0x91`, que es un indicador de RF explícito de ZigBee. En la tabla 5.5 se muestra una de las tramas que llega de la recolección.

7E	Delimitador inicial
001A	Longitud de la trama, a partir de aquí y hasta el <i>checksum</i>
91	Tipo de trama API, indicador de Radiofrecuencia explícito
0013A2004077589C	Dirección larga, asignada por el fabricante, se puede ver como el número de serie (64 bits)
1A9B	Dirección corta o de red que asigna el coordinador (16 bits)
E8E8	<i>Endpoints</i> de origen y destino
0092	Identificador de cluster
C105	Identificador de perfil
01	Reconocimiento de paquete
01 0000 03	Entradas analógicas habilitadas mostradas como bytes
021B 0215	Carga útil
F8	<i>Checksum</i>

Tabla 5. 5 Estructura de trama de indicador de estado automático

Como se muestra en la tabla 5.5 la trama que se tomó es del nodo configurado como Router 1, contiene parámetros similares a las anteriores pero correspondiendo a la especificación de la trama 91.

El diagrama de flujo del monitoreo automático se muestra en la figura 5.9. Automáticamente el programa lee el puerto serie y si no arroja algún error, cíclicamente estará leyendo cada 750 ms correspondiente a la lectura de las tres tramas. Una vez recibidos los datos comienza el filtrado de cada nodo. Cuando se sabe a qué nodo corresponde la información, ésta se convierte en valores convenientes para el usuario siendo concatenada con la información de los otros nodos. Todos los datos se escriben en un archivo de texto y al terminar, este archivo se envía por correo electrónico en intervalos de una hora, hasta que el usuario detenga la aplicación.

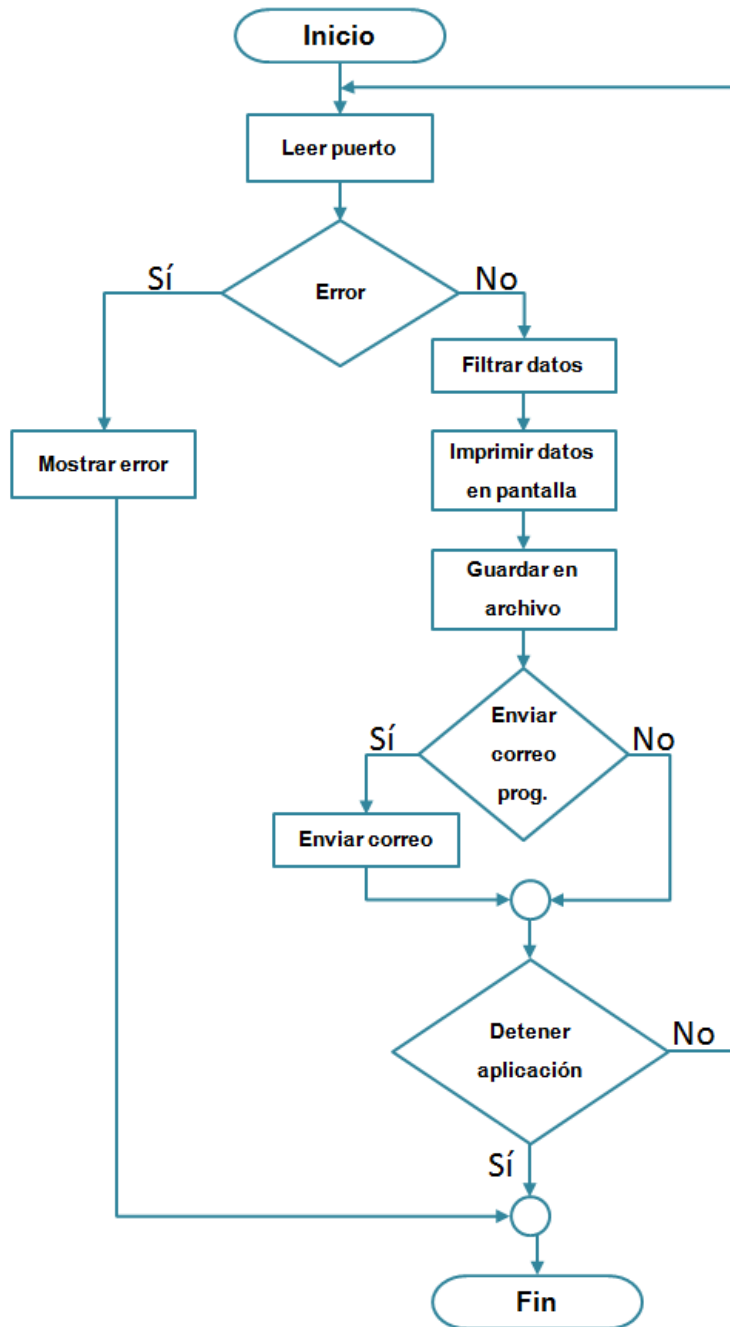


Figura 5. 9 Diagrama de flujo del Monitoreo automático

El diagrama a bloques de esta pestaña se muestra en la figura 5.10.

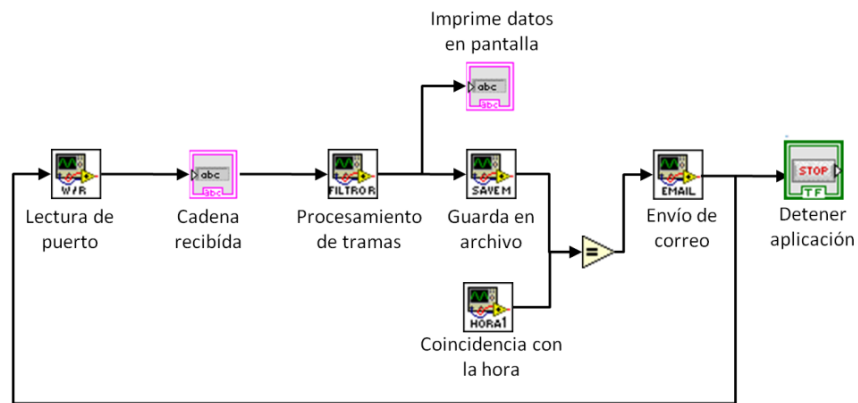


Figura 5. 10 Diagrama a bloques de la actualización automática

Una vez iniciado el programa, éste comenzará a descargar los datos mostrando la recolección en el panel frontal y de manera simultánea los almacena en un archivo de texto llamado datos_automáticos.txt. Esta parte del programa está configurada para que cada hora se envíe un correo electrónico a ciertos destinatarios con los datos almacenados hasta ese momento. Si el usuario no requiere esperar una hora para recibir el correo, él lo puede enviar de manera manual con un botón en el panel frontal, figura 5.11.

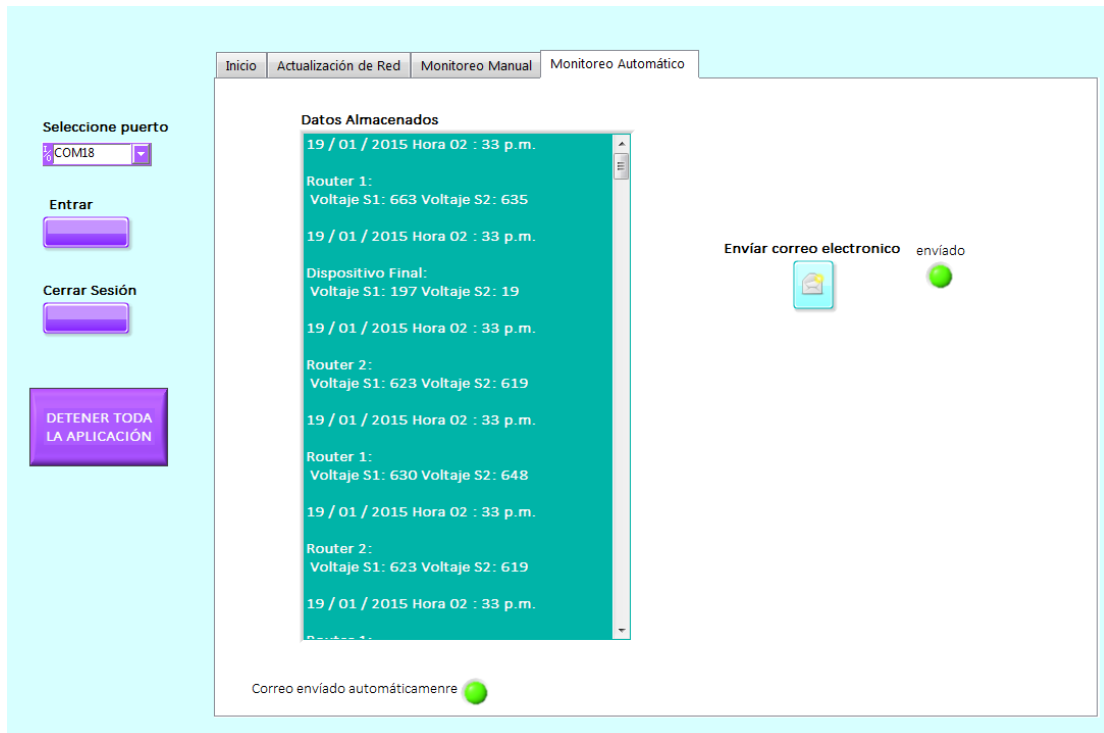


Figura 5.11 Panel frontal de la tercer pestaña referida al monitoreo automático

5.3 Programa remoto

Una vez que fue creado el sistema de monitoreo, es sustancial verificar que el programa funciona remotamente. Esto provee al usuario de herramientas con las que puede tener acceso a todas las funciones de la RIS, monitoreándola a través de una red local o de Internet. Esta última requiere una configuración en el router para proveer dicho servicio.

En LabView es posible crear un instrumento virtual remoto dado que se integra en su licencia un servidor web. En la ventana principal de LabView se selecciona la pestaña *Tool* y la opción *Options...* Como se muestra en la figura 5.12, se selecciona la opción *Web Server* y a la derecha se despliega una sección en la que se ubica el servidor, el puerto 8000 es utilizado para el protocolo de internet y habilitaciones del panel frontal.

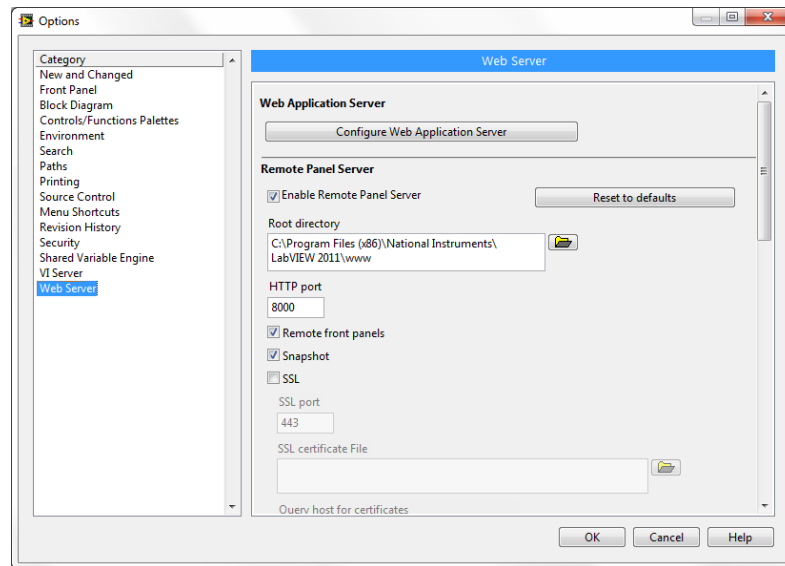


Figura 5. 12 Servidor Web de LabView

Una vez hecho esto, nuevamente se selecciona la pestaña *Tool* y el submenú *Web Publishing Tool...* Aparece una ventana como la que se muestra en la figura 5.13.

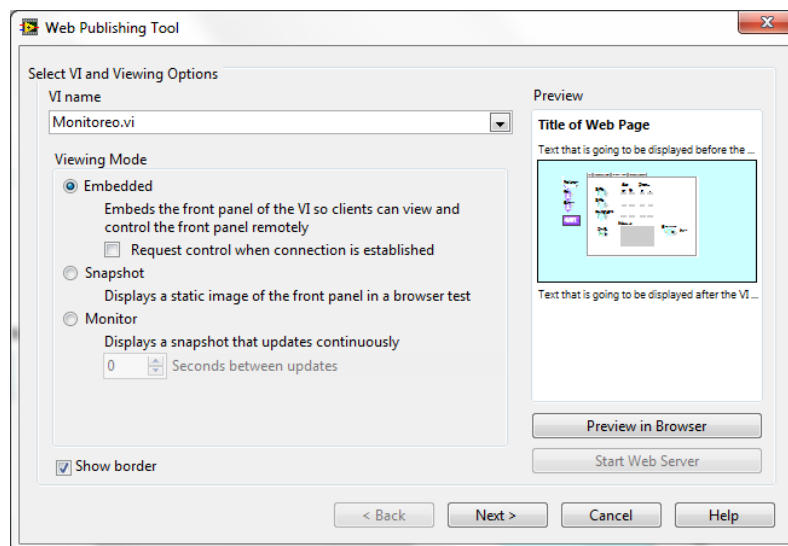


Figura 5. 13 Herramienta de publicación de VI remoto

En dicha ventana se selecciona el instrumento virtual que se ejecutará remotamente. El modo de visualización permite tres opciones: la primera autoriza a los clientes ver y controlar el panel frontal, la segunda únicamente muestra una imagen del panel frontal y la última es un monitoreo solamente. Una vez seleccionada la opción 1, se continúa con la configuración con el botón *next*.

La ventana que muestra la figura 5.14 proporciona la opción de poner un título a la página web, un encabezado y un pie de página.

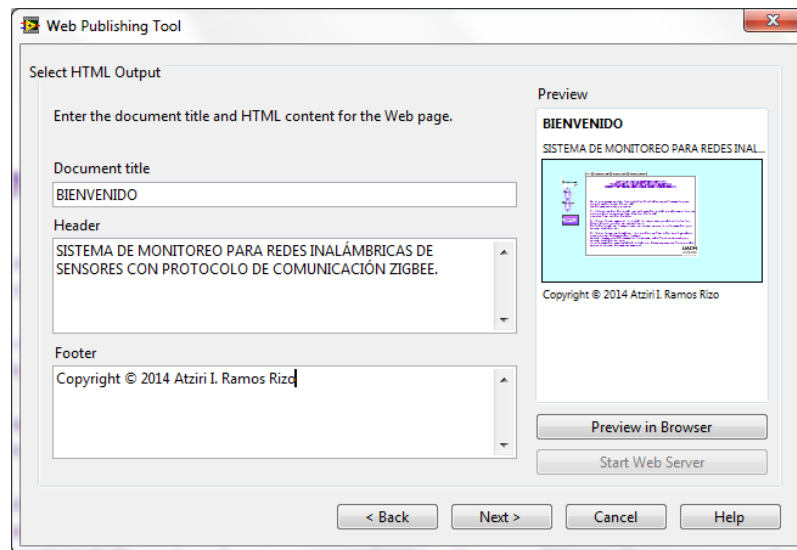


Figura 5. 14 Herramienta de publicación de VI remoto

La siguiente ventana (figura 5.15) muestra dónde se guardará el instrumento virtual remoto, el nombre que se le da al archivo y finalmente la URL con que se podrá abrir el instrumento virtual, esta última contiene el nombre del equipo, dominio local, el puerto y nombre del archivo.

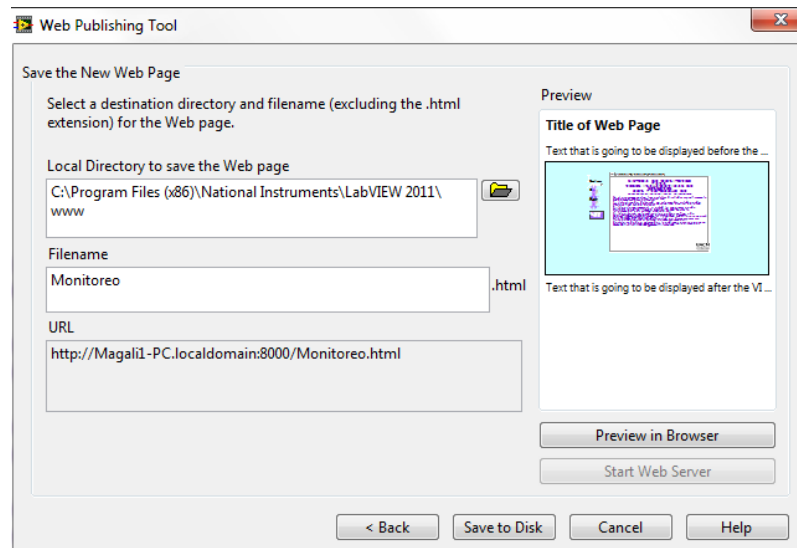


Figura 5. 15 Herramienta de publicación de VI remoto

Finalmente, se abre el explorador y se ingresa la URL que se proporcionó anteriormente. En el instrumento virtual se solicita el control del panel frontal como se muestra en la figura 5.16.

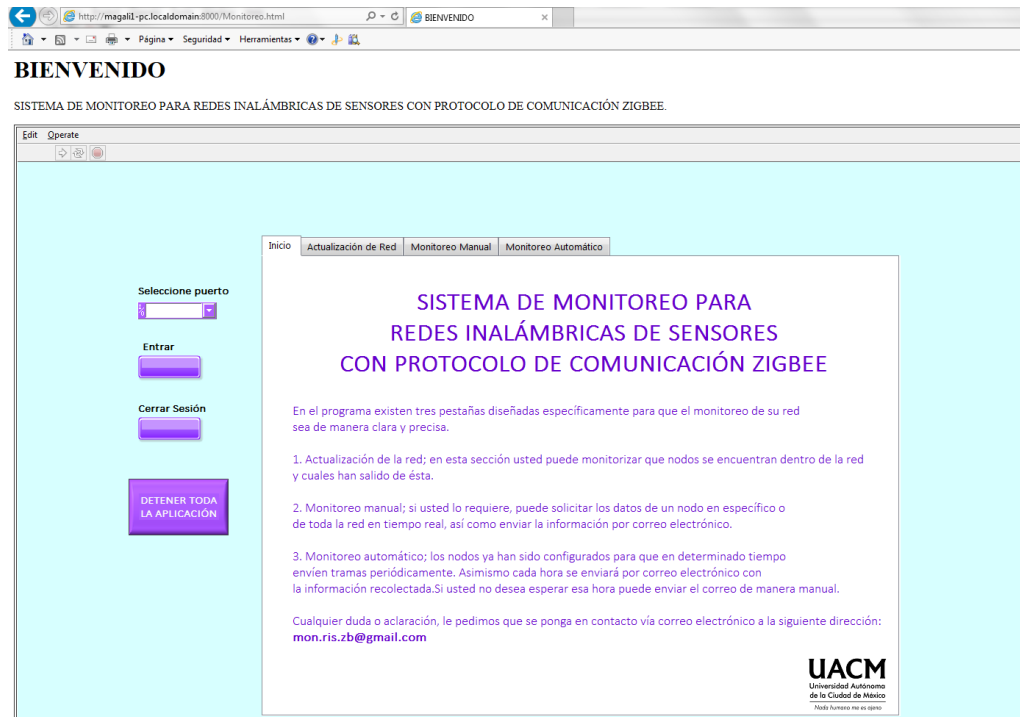


Figura 5. 16 Explorador con remoto

Es preciso mencionar que se pueden conectar hasta cinco usuarios para monitorear el sistema pero únicamente puede ser manipulado por uno a la vez. Para hacer la prueba con otras computadoras es necesaria la creación de un archivo ejecutable del instrumento virtual e instalarlo en éstas.

5.4 Programa ejecutable

La finalidad de tener un programa creado en la LabView, es que éste pueda ser portátil e instalarlo en cualquier computadora con sistema operativo (SO) Windows sin necesidad de tener licencia de dicho software.

Una ventaja que provee LabView es que puede crear un archivo ejecutable de un instrumento virtual capaz de cumplir con la aplicación para la que fue creado, en la computadora donde se instale el sistema únicamente se debe agregar el programa llamado "RunTime", propio de *National Instruments*.

Para crear el archivo ejecutable, primero es necesario crear un proyecto en la pestaña *Projet* en el submenú *New Projet*. Aparecerá una ventana como la que se muestra en la figura 5.17.

Agrega a su vez con el botón derecho en *My Computer*, el archivo que fue generado como html en el programa remoto (en este caso es el que dice *Monitoreo.html*).

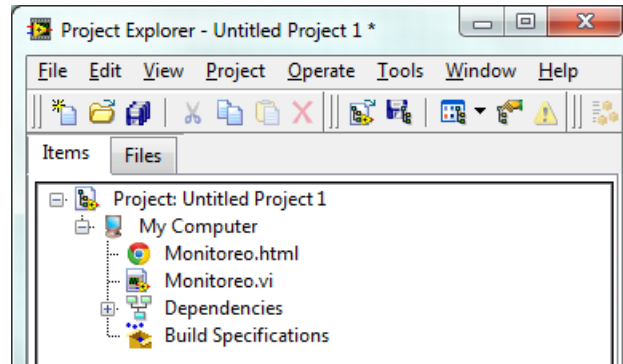


Figura 5.17 Creación de archivo ejecutable

Se selecciona la opción *Build Specifications*, eligiendo *New* y posteriormente *Application (EXE)*, figura 5.18.

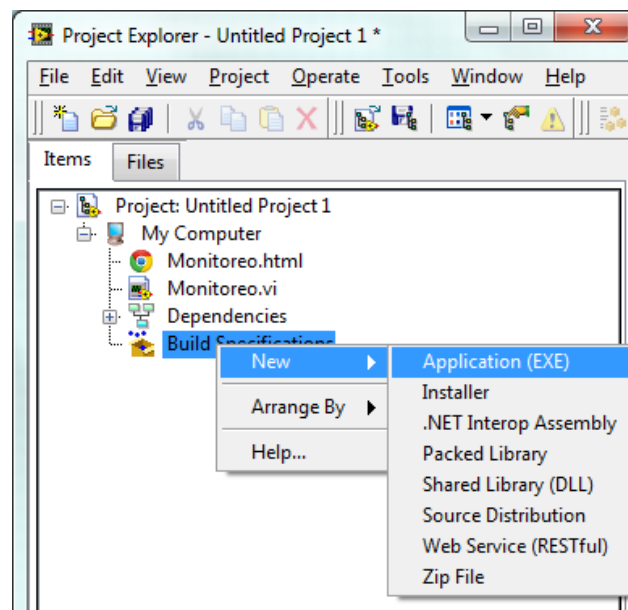


Figura 5.18 Creación de archivo ejecutable

Se guarda el proyecto y aparece una ventana como la que se muestra en la figura 5.19. En la pestaña *Information* se definen el nombre de la especificación y el nombre del ejecutable.

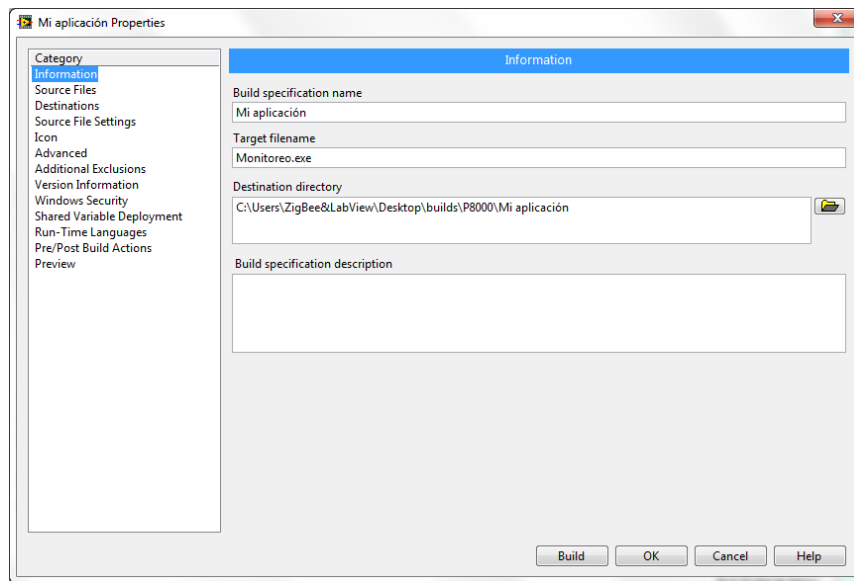


Figura 5. 19 Propiedades del archivo ejecutable

En la pestaña de *Source files*, en la ventana de *Startup VIs*, se agrega el archivo *.vi* y en la ventana de *Always Included* el archivo *.html*. Tal como se observa en la figura 5.20

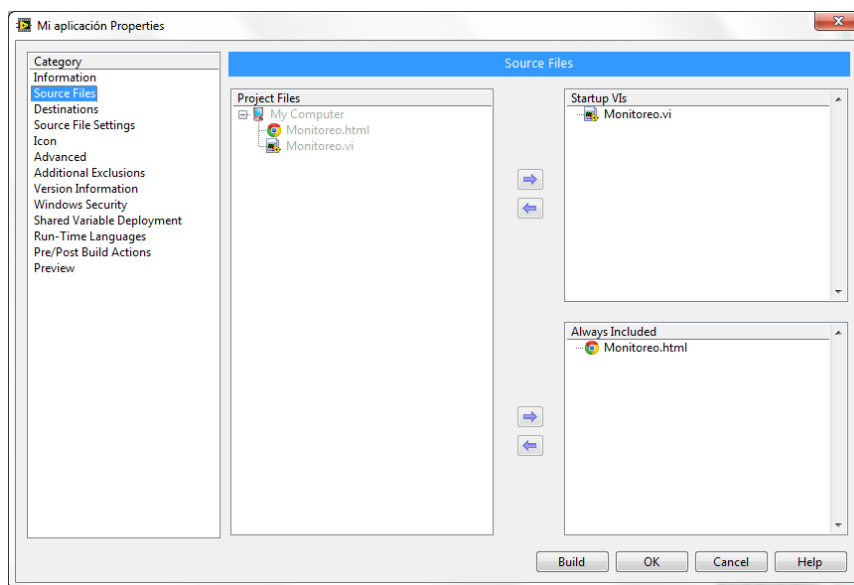


Figura 5. 20 Propiedades del archivo ejecutable

Finalmente en la pestaña de *Icon*, se selecciona un ícono creado, figura 5.21. Se construye entonces el archivo ejecutable.

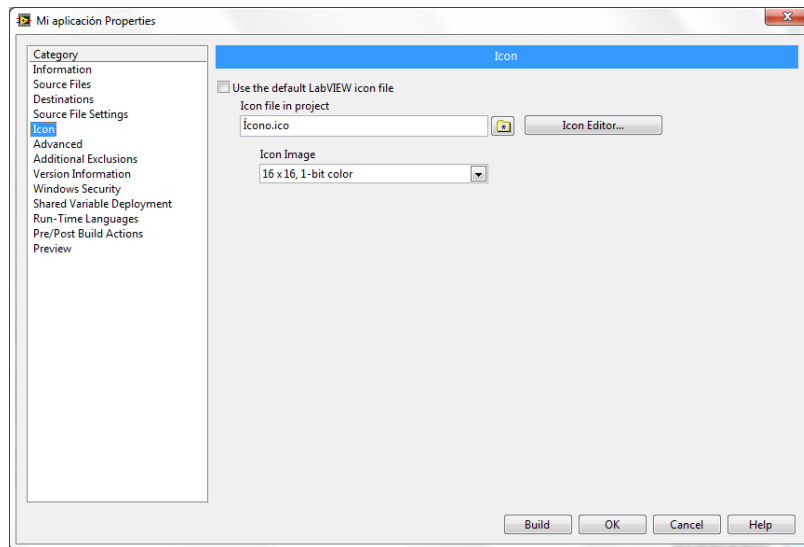


Figura 5. 21 Propiedades del archivo ejecutable

El archivo ejecutable que se acaba de crear funciona como archivo portátil y únicamente se ejecuta en el momento que se desee. Por el contrario, si se requiere que el archivo esté instalado de manera permanente en una computadora es necesario crear el instalador de dicho instrumento virtual. En la misma ventana donde se creó el proyecto se selecciona la opción *Installer* como lo muestra la figura 5.22.

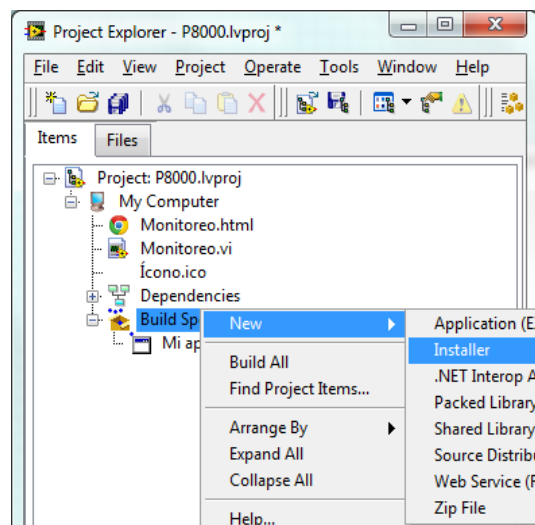


Figura 5. 22 Construcción del instalador

Aparece una ventana en que la pestaña *Product Information* almacena el nombre de la aplicación así como la carpeta en que estará guardado, figura 5.23.

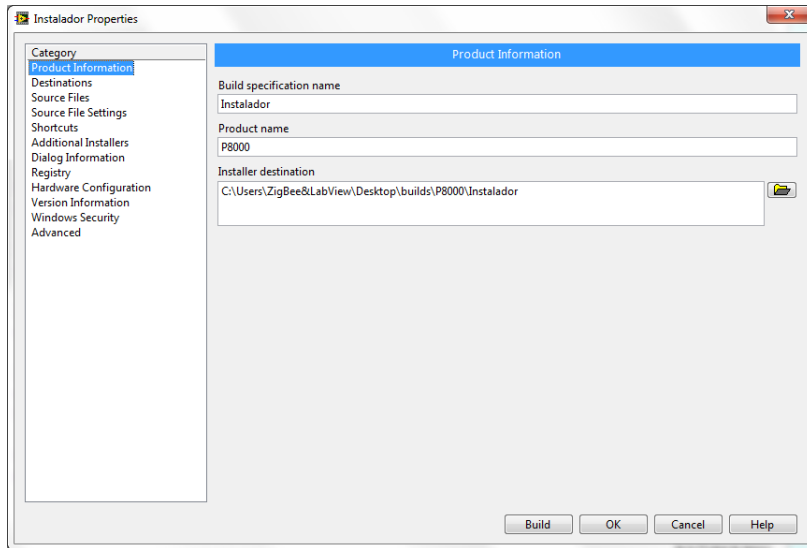


Figura 5. 23 Propiedades del instalador

Posteriormente en la pestaña de *Source Files*, se agrega el archivo ejecutable que fue creado anteriormente a la pestaña en la que se han guardado todos los archivos como se muestra en la figura 5.24, en este caso la carpeta 8000. Las siguientes pestañas indican atributos adicionales si el usuario está interesado en registrar su instrumento virtual, modificar la versión del software, entre otros. Los parámetros ya configurados hasta el momento son suficientes para construir el instalador.

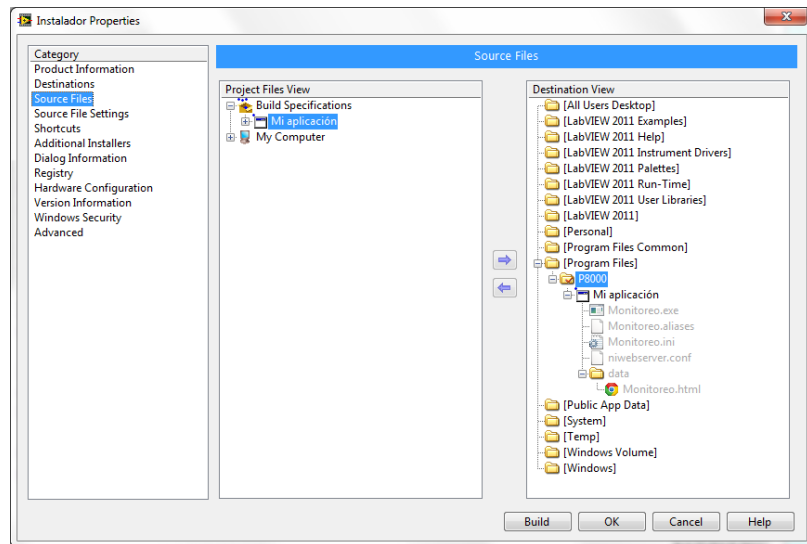


Figura 5. 24 Propiedades del instalador

5.5 Red de área local

Una vez creados los archivos anteriores se puede implementar una pequeña red local para verificar que el archivo ejecutable del programa puede ser instalado sin necesidad de una licencia de LabView.

Con un hub y tres computadoras se formo una LAN (*Local Area Network* 'Red de área local') configurando con direcciones estáticas.

Hub 8 Port NWay Switch ENH908-NWY

El EN908-NWY es un concentrador de conmutación con Ethernet Rápido de alto desempeño, con todos los puertos capaces de una operación de negociación automática de 10 ó 100 Mbps, lo que significa que el conmutador puede negociar automáticamente con socios conectados a la velocidad de la red y modo dúplex. Comparada a las redes compartidas a 10Mbps o a 100Mbps, el concentrador de conmutación suministra una conexión dedicada de 10/100Mbps a cada cliente conectado sin problemas de congestión a causa del ancho de banda. El modo de conmutación *Store-and-forward* promete una latencia baja además de que elimina todos los errores de la red, incluyendo los paquetes de errores de colisión y CRC. El conmutador es *plug-n-play* por lo que no hay que configurar ningún software y también es completamente compatible con todos los tipos de protocolos de red [22].

Configuración de los equipos de cómputo

En una computadora con SO XP y características de procesador Inter Core Duo a 3 GHz y memoria RAM de 2GB, se configura con la dirección IP 192.168.30.2/24, se instala el instrumento virtual y se ejecuta el programa como se muestra en la figura 5.25.



Figura 5. 25 Archivo ejecutable con SO XP, dirección 192.168.30.2/24

Posteriormente en las dos computadoras restantes con SO Win7 con características de procesador Inter Core i5-3450 a 3.10 GHz y memoria RAM de 2GB, se agrega la nueva dirección URL que ahora corresponde al instrumento virtual que corre en la computadora con SO XP. Las dos computadoras configuradas con las direcciones IP 192.168.30.3/24 y 192.168.30.4/24 respectivamente se muestran en las figuras 5.26 y 5.27 respectivamente.



Figura 5. 26 Computadora remota con dirección 192.168.30.3/24



Figura 5. 27 Computadora remota con dirección 192.168.30.4/24

De esta manera se comprueba la funcionalidad del programa ejecutable y el acceso remoto a este en una LAN.

CONCLUSIONES

Las redes inalámbricas de sensores se crean con la finalidad de transmitir datos en distancias relativamente cortas con un consumo bajo de energía, adecuando su topología para cubrir grandes extensiones de territorio. El diseño y la implementación de estas redes son relativamente sencillos, ya que existen dispositivos de comunicación inalámbrica capaces de comunicarse entre sí lo que facilita la captura periódica, el procesamiento y almacenamiento de información proveniente de la RIS. Un aspecto importante es el monitoreo autónomo de estas redes para facilitar el acceso y el análisis de la información, en tiempo real para la toma de decisiones.

En este contexto, el presente trabajo describe el desarrollo de un sistema de monitoreo capaz de captar, procesar y almacenar información en tiempo real proveniente de una red inalámbricas de sensores, proveyendo una interfaz gráfica que permite al usuario acceder de manera remota a las funciones de toda la red. Por otro lado, dado que el sistema está orientado a trabajar en RIS basadas en el estándar IEEE 802.15.4 y la especificación ZigBee es posible utilizarlo en una variedad de aplicaciones.

Antes de iniciar el proceso de desarrollo de una RIS, conviene conocer las características de este tipo de redes llevando el buen manejo de los estándares y especificaciones que estas comprenden. En particular, para implementar la RIS de este proyecto, se revisó el estándar IEEE 802.15.4 para comprender los dos primeros niveles de la arquitectura específica de los dispositivos de la red. En estos dos primeros niveles se describen; el tipo de codificación del canal, modulación, canales, frecuencia de operación y finalmente el acceso al medio. Si se requiere instruirse en este tipo de estándares es necesario tener conocimientos previos de comunicaciones electrónicas.

Con respecto a la especificación ZigBee que describe los últimos dos niveles de la arquitectura, en donde se explica el protocolo de enrutamiento y la configuración de los dispositivos.

En lo que concierne a los módulos Xbee 2SC provistos por Digi, es importante conocer las tramas de datos, los comandos AT resolvía los requerimientos del sistema y el realizar el acondicionamiento de los sensores para ajustarlos a la resolución de 10 bits que ZigBee requiere.

Con lo que respecta al consumo de energía de la red, utilizar tecnología de bajo consumo permite tener nodos alimentados con baterías haciéndolos portátiles y autónomos, lo que permite la extensión de la vida útil de la red.

LabView por su parte, es un entorno de programación que ayuda a realizar funciones que comprenden un sistema de forma más práctica, abriendo su ambiente a la mayoría de las áreas de conocimiento. Para utilizar este entorno es importante tener conocimientos básicos de programación que ayuden a entender mejor los diagramas prediseñados. Otro aspecto importante es cuando se está trabajando con programas separados, al momento de introducirlos al programa principal se requiere hacer ajustes generales.

Con los resultados obtenidos al implementar la red inalámbrica de sensores con la especificación ZigBee y la comprobación con el sistema de monitoreo en LabView, se concluye que es posible adecuar dicho sistema para utilizarlo con cualquier RIS.

Alcances del proyecto:

- Se configuraron los transceptores Xbee para conformar una RIS de cuatro nodos basada en el estándar IEEE 802.15.4 y la especificación ZigBee que incluye: un dispositivo coordinador, dos routers y un dispositivo final. A los routers y dispositivos finales se les asignaron tiempos de muestreo para la adquisición de datos de los sensores conectados, un sensor de temperatura y un sensor de humedad.
- Se expandió la RIS en un territorio aproximado de 155 m. La especificación ZigBee establece una cobertura en línea de vista de 1200 m idealmente. Este valor no se alcanzó debido a las condiciones en las que se encuentra la red. Existen edificios y obstáculos en el medio afectando a la potencia de transmisión.
- Se diseñó un programa de monitoreo en LabView con interfaz gráfica con el cual es posible verificar el estado actual de la red, recolectar información de manera manual y automática.
- Se generó un archivo ejecutable del sistema de monitoreo en LabView con el fin de hacerlo portátil.
- Finalmente se formó una LAN con la finalidad de comprobar el acceso remoto a la RIS.

Algunas recomendaciones de este proyecto que ayudarán al mejor funcionamiento de monitorización de la RIS son: los dispositivos que conforman la red deben estar siempre

conectados a la corriente eléctrica, esto con el fin de que no dejen de funcionar si se requiere que la monitorización sea durante un prolongado periodo de tiempo, por otro lado, realizar la instalación de los dispositivos considerando la mejor ubicación con el fin de minimizar los efectos del canal de comunicación inalámbrica.

Trabajo futuro

Al tener un sistema que monitorea la infraestructura de una red inalámbrica de sensores, este proyecto servirá como base para trabajos futuros donde:

- Se realice la comprobación del funcionamiento realizando pruebas de desempeño como el tiempo de vida de la RIS, situándola en zonas comerciales o industriales.
- Se extienda el protocolo de enrutamiento extendiendo la red de malla.
- Desde el programa de monitoreo se envíen solicitudes específicas a los nodos, como encender un motor o hacer sonar una alarma. Esto con la finalidad que el programa cumpla con la finalidad de hacer de doble vía la comunicación.
- Se logre comprimir la información para la adquisición de imágenes.
- Se pueda probar el archivo ejecutable en sistemas operativos IOS o Linux.
- Hacer pruebas con los módulos de la serie uno también provistos por Digi.

REFERENCIAS

- [1] Rios M... [et al.] (Universidad Nacional de Rosario Facultad de Ciencias Exactas Ingeniería y Agrimensura), *Redes inalámbricas de sensores* [en línea]; Argentina, 2003 [Consulta: Octubre 2014] Disponible en: <<http://www.dsi.fceia.unr.edu.ar/downloads/distribuidos/material/monografias/RedesSensInalam.pdf>> pp.8
- [2] IEEE Computer Society, IEEE Standard 802.15.4: Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications for Low-Rate Wireless Personal Area Networks (LR-WPANs). New York: IEEE Press, 2011. pp 8-20, 147-148.
- [3] Daintree Networks, *Technology FAQ* [en línea]; California, EEUU, 2014 [Consulta: Octubre 2014] Disponible en: <<http://www.daintree.net/products/technology-faq/>>
- [4] Digi International Inc. Manual: XBee®/XBee-PRO® ZB SMT RF Modules. Minnetonka, MN: 90002002_C 2/2/2011, pp 33-55, 92-97.
- [5] Fernández, R... [et al.] (Integrantes del Grupo de Investigación EDMANS), *Redes inalámbricas de sensores: teoría y aplicación práctica* [en línea]; La Rioja, España, 2009 [consulta: 06 Agosto 2014] Disponible en: <<http://www.unirioja.es/servicios/sp/catalogo/monografias/mdi26.shtml>>
- [6] Lajara J, Pelegrí J. LabVIEW: Entorno gráfico de programación [en línea]; España, Valencia, 2012 [Consulta: Octubre 2014] Disponible en: <https://books.google.com.mx/books?id=NnkwnsnGoUUC&pg=PT410&lpg=PT410&dq=labview+metaprograma&source=bl&ots=XrYMfokoR5&sig=52lHAWXmqUbf03quf1-tyuJC_QE&hl=es&sa=X&ei=lj-GVKCDHpG4oQTgjYGACQ&ved=oCBwQ6AEwAA#v=onepage&q=labview%20metaprograma&f=false>
- [7] Caprile, S. (2009). Equisbí: Desarrollo de aplicaciones con comunicación remota basadas en módulos ZigBee y 802.15.4. Buenos Aires: GAE, pp 77-99.
- [8] Ganz, Aura, Ganz Zvi & Wongthavarawat, Kittu (2003). Multimedia Wireless Networks: Technologies, Standards, and QoS. E.U.:Prentice Hall PTR, pp 179-185.
- [9] Stallings, W. (2004). Comunicaciones y Redes de Computadores (7ª ed.). Madrid: Pearson Educación S.A., pp 572-579.

- [10] ZigBee Alliance. *The Alliance* [en línea]; San Ramon, CA. USA: Enero 2014 [consulta: 15 Mayo 2014] About Alliance. Disponible en:
<<https://www.zigbee.org/About/AboutAlliance/TheAlliance.aspx>>
- [11] Ruíz, D. y Martín, J. *Informe Técnico: Protocolo ZigBee (IEEE 802.15.4)* [en línea]; España, 2007 [consulta: Julio 2014] Disponible en:
<http://rua.ua.es/dspace/bitstream/10045/1109/7/Informe_ZigBee.pdf>
- [12] Caprile, S. (2009). Algoritmos de Routing. *Equisbí: Desarrollo de aplicaciones con comunicación remota basadas en módulos ZigBee y 802.15.4*. Buenos Aires: GAE, pp 140-148.
- [13] Digi International, *About Digi International* [en línea]; Minnesota, EEUU, 2014 [consulta: 14 Julio 2014] Disponible en: <<http://www.digi.com/aboutus/>>
- [14] XBee® ZB SMT, *ZigBee® embedded surface mount RF modules for OEMs* [en línea]; Minnesota, EEUU, 2014 [consulta: 14 jul. 2014] Disponible en:
<<http://www.digi.com/products/wireless-wired-embedded-solutions/zigbee-rf-modules/zigbee-mesh-module/xbee-smt>>
- [15] Xbee, *Módulos de transmisión inalámbrica* [en línea]; Chile 2013 [consulta: 15 Julio 2014] Disponible en: <<http://www.xbee.cl/index.html>>
- [16] Jiménez, J. *Optimización de los parámetros del protocolo de encaminamiento AODV* [en línea]; España, 2006 [consulta: 01 Noviembre 2014] Disponible en:
http://webpersonal.uma.es/de/ECASILARI/Docencia/Memorias_Presentaciones_PFC/39PRESENTACIONJOSE.pdf
- [17] DatasheetCatalog.com, *National Semiconductor LM35 Precision Centigrade Temperature Sensors*, [en línea]; EEUU, 2013 [Consulta: 01 diciembre 2014]. Disponible en:
<<http://pdf.datasheetcatalog.com/datasheet/nationalsemiconductor/DS005516.PDF>>
- [18] Honeywell, *HIH-4000 Series Humidity Sensors*, [en línea]; EEUU, 2010 [Consulta: 01 diciembre 2014]. Disponible en: <<http://sensing.honeywell.com/honeywell-sensing-hih4000%20series-product-sheet-009017-5-en.pdf>>
- [19] IEEE, *LabVIEW Student Install Option Offer* [en línea]; California EEUU, 2014 [consulta: 29 Junio 2014] Disponible en: <http://www.ieee.org/membership_services/membership/students/NI_offer.html?WT.mc_id=carousel_labview>
- [20] National Instruments, *Software de Desarrollo de Sistemas NI LabVIEW* [en línea]; México D.F., 2014 [consulta: 29 Junio 2014] Disponible en:
<<http://www.ni.com/labview/esa/>>

- [21] R. Sergio, Utilización de módulos XBee 802.15.4 con coordinador [en línea]; 2008 [consulta: Junio 2014] Disponible en: <http://cika.com/soporte/TechComm/CTC-057_XBee802.15.4Coordinador.pdf>
- [22] Encore electronics, *ENH908-NWY | Switch Nway de 8 Puertos de 10/100*, [en línea]; EEUU, 2014 [consulta: Enero 2015] Disponible en: <http://www.encore-usa.com/uy/support/ENH908-NWY>
- [23] ICPDAS, *EZ Data Logger*, [en línea]; EEUU, 2014 [consulta: Enero 2015] Disponible en: <http://www.icpdas.com/products/Software/ez_data_logger/ez_data_logger.html>
- [24] SEED Schlumberger Excellence in Education Development, *Conceptos básicos de la placa GoGo*, [en línea]; EEUU, 2014 [consulta: Enero 2015] Disponible en: <<http://www.planetseed.com/es/conceptos-basicos-de-la-placa-gogo-preparacion>>