



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO**

FACULTAD DE INGENIERÍA

**IMPLEMENTACIÓN DE UNA RED
INALÁMBRICA DE COMUNICACIÓN
EMPLEANDO EL ESTÁNDAR
ZIGBEE/802.15.4**

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE

INGENIERO ELÉCTRICO ELECTRÓNICO

P R E S E N T A:

FRANCISCO JONATHAN PÉREZ CALTEMPA

DIRECTOR DE TESIS:
ING. BEATRIZ ESLAVA ARELLANES



MÉXICO, D.F.

2009

AGRADECIMIENTOS

A Dios que siempre me ha acompañado en mi camino y me ha concedido una vida plena, llena de alegrías y satisfacciones.

A MI FAMILIA quienes han guiado mi camino con sabiduría, amor y dedicación, siendo el motor principal de mis más grandes anhelos.

A mis papas, Roberto Pérez Millán y Esthela Aurea Caltempa Sánchez, quienes con su ejemplo de vida me han demostrado que todo horizonte es alcanzable, si existe voluntad y deseo.

A mi hermano Roberto Paúl quien siempre ha estado a mi lado para procurarme bienestar y aconsejarme en todo momento.

El gran cariño, comprensión, confianza y apoyo incondicional que siempre me han brindado han sido fundamentales para alcanzar todas mis metas.

A mi querida Martha Ismene, quien siempre ha confiado en mí, me ha apoyado en todo lo que hago, comparte mis sueños y es motivo y fin de todos mis proyectos.

A mi querida Alma Mater y Facultad de Ingeniería por brindarme la formación académica que me será de gran utilidad para abrirme camino en la vida.

Al Departamento de Ingeniería Electrónica que brindó el apoyo y las facilidades para llevar a cabo este trabajo.

Al grupo de trabajo del proyecto “Alumbrado Público con Energía Solar y Sistema de Autodiagnóstico” que hizo posible el desarrollo de este proyecto.

A todas aquellas valiosas personas con las compartí momentos inolvidables durante mi estancia en la Universidad.

Dedico esta tesis y todo lo que representa:

*A mis admirables padres que amo infinitamente,
pues son la base de mi existir.*

En reconocimiento al gran esfuerzo que han hecho por mí.

Mis éxitos siempre serán los suyos.

*A mi querido hermano Paúl que comparte mi sangre,
en correspondencia a todo lo bueno
que me ha dado siempre.*

*A mi preciosa Isy,
quien es mi más grande tesoro
e inspiración de todos mis deseos.*

ÍNDICE GENERAL

INTRODUCCIÓN.....	1
1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	3
1.1 Antecedentes	3
1.1.1 Situación del alumbrado público en Ciudad Universitaria	3
1.1.2 Países desarrollando sistemas de alumbrado inteligente	6
1.1.2.1 Noruega.....	6
1.1.2.2 Suecia	7
1.1.2.3 República Checa	8
1.1.2.4 Polonia.....	9
1.1.2.5 Países Bajos	9
1.1.2.6 Bulgaria.....	10
1.1.2.7 Reino Unido.....	10
1.1.2.8 Finlandia	11
1.1.2.9 Austria	11
1.1.2.10 China.....	12
1.1.2.11 Canadá.....	12
1.1.2.12 India.....	13
1.1.2.13 Península Arábiga	14
1.2 Proyecto “Alumbrado Público con Energía Solar y Sistema de Autodiagnóstico”	14
1.2.1 Objetivos del Proyecto	15
1.2.1.1 Objetivo general.....	15
1.2.1.2 Objetivos particulares	16
1.2.2 Características del Sistema de Alumbrado Público Inteligente	16
1.2.3 Alcances del Proyecto	17
2. SITUACIÓN ACTUAL DE LAS COMUNICACIONES INALÁMBRICAS	19
2.1 Comunicaciones inalámbricas.....	19
2.1.1 Bandas de frecuencia	19
2.2 Redes inalámbricas.....	21
2.2.1 Tipos de redes inalámbricas.....	21
2.2.1.1 Redes de área amplia WWANs	22
2.2.1.1.1 Telefonía celular.....	22
2.2.1.2 Redes de área metropolitana WMANs	23
2.2.1.2.1 LMDS (Local Multipoint Distribution Service)	24
2.2.1.2.2 MMDS (Multipoint Microwave Distribution Service).....	24
2.2.1.2.3 WiMAX (Worldwide Interoperability for Microwave Access)	24
2.2.1.3 Redes de área local WLANs	25
2.2.1.3.1 Wi-Fi.....	25
2.2.1.3.2 HIPERLAN	25
2.2.1.4 Redes de área personal WPANs	26
2.2.1.4.1 Bluetooth	28
2.2.1.4.2 UWB (Ultra Wide Band)	29
2.2.1.4.3 Zigbee.....	31
2.2.1.4.4 WSN (Wireless Sensor Network).....	33

2.3	Comparación de tecnologías de comunicación inalámbrica por RF y elección para el uso en el monitoreo y control de luminarias.....	35
3.	ZIGBEE/IEEE 802.15.4.....	39
3.1	Generalidades de Zigbee e IEEE 802.15.4	39
3.1.1	Zigbee e IEEE 802.15.4	39
3.1.2	Aplicaciones y mercados de Zigbee.....	40
3.1.3	Características generales de Zigbee	41
3.2	WPAN Zigbee.....	43
3.2.1	Componentes de una WPAN Zigbee	44
3.2.2	Topologías de Red Zigbee	44
3.2.3	Arquitectura Zigbee	45
3.3	IEEE 802.15.4 PHY.....	46
3.3.1	Receiver Energy Detection	47
3.3.2	Link Quality Indication	47
3.3.3	Clear Channel Assessment (CCA)	48
3.3.4	Estructura PPDU (PHY Protocol Data Unit)	48
3.4	IEEE 802.15.4 MAC	49
3.4.1	Estructura de tramas MAC.....	49
3.4.1.1	Trama de datos (Data Frame).....	51
3.4.1.2	Trama de reconocimiento (Acknowledgement Frame).....	51
3.4.1.3	Trama de comando MAC (Mac Command Frame)	52
3.4.1.4	Trama de Beacon (Beacon Frame).....	52
3.4.2	Acceso al canal.....	53
3.4.3	Mecanismos CSMA-CA.....	54
3.4.4	Modelos de Transferencia de datos.....	55
3.4.5	Sincronización	56
3.5	Inicio y formación de una red Zigbee	56
3.5.1	Inicio de una red Zigbee	56
3.5.2	Formación de una red Zigbee.....	57
3.6	Comunicaciones de red Zigbee	59
3.6.1	Direccionamiento en Zigbee	59
3.6.1.1	Direccionamiento de Dispositivo Zigbee	59
3.6.1.2	Direccionamiento de Aplicación Zigbee	59
3.6.2	Transmisión y enrutamiento de paquetes en Zigbee.....	60
3.6.2.1	Transmisión Broadcast	60
3.6.2.2	Transmisión Unicast	61
3.6.2.2.1	Descubrimiento de dirección de red.....	62
3.6.2.2.2	Descubrimiento de ruta	62
4.	TECNOLOGÍA XBEE	67
4.1	Principales características.....	68
4.2	Disposición y asignación de señales en pines.....	69
4.3	Operación de módulos XBee/XBee-Pro.....	70
4.3.1	Comunicaciones seriales	70
4.3.1.1	Flujo de datos UART	70
4.3.1.1.1	Datos seriales.....	70
4.3.1.2	Buffers seriales	71
4.3.1.2.1	Buffer de recepción serial	71
4.3.1.2.2	Buffer de transmisión serial	71
4.3.1.3	Protocolos de comunicación serial.....	71
4.3.1.3.1	Operación transparente.....	71
4.3.1.3.2	Operación API	72
4.3.2	Estados de operación	73

Implementación de una red inalámbrica de comunicación empleando el estándar Zigbee/802.15.4.

4.3.2.1	Estado de inactividad (Idle mode)	73
4.3.2.2	Modo de transmisión	74
4.3.2.3	Modo de recepción	75
4.3.2.4	Modo de reposo	75
4.3.2.5	Modo comando	75
4.3.3	Redes XBee/XBee-Pro	76
4.3.3.1	Formación de una red Zigbee	76
4.3.3.2	Limitaciones de red Zigbee	77
4.3.3.3	Direccionamiento bajo Zigbee	78
4.3.3.3.1	Envío de paquetes de datos en el modo transparente	78
4.3.3.3.2	Envío de paquetes de datos en el modo API	78
4.3.3.3.3	Direccionamiento del coordinador	79
4.3.3.3.4	Direccionamiento para transmisión Broadcast	79
4.4	Operación API	79
4.4.1	Especificaciones de trama API	80
4.4.1.1	Operación API básica	80
4.4.1.2	Operación API con caracteres de escape	80
4.4.1.3	Descripción de la trama de datos UART	81
4.4.1.3.1	Start delimiter	81
4.4.1.3.2	Length	81
4.4.1.3.3	Frame data	81
4.4.1.3.4	Checksum	81
4.4.1.4	Tipos de tramas API	82
4.4.1.4.1	Modem Status	82
4.4.1.4.2	AT Command	82
4.4.1.4.3	AT Command – Queue Parameter Value	83
4.4.1.4.4	AT Command Response	83
4.4.1.4.5	Zigbee Transmit Request	84
4.4.1.4.6	Zigbee Transmit Status	84
4.4.1.4.7	Zigbee Receive Packet	85
5.	PRUEBAS, CARACTERÍSTICAS E IMPLEMENTACIÓN DE RED PROTOTIPO	87
5.1	Selección de radios	87
5.1.1	Diferencias entre radios XBee y XBee-Pro	87
5.1.2	Opciones de antena en los radios XBee/XBee-Pro	88
5.2	Pruebas de comunicación	89
5.2.1	Pruebas de comunicación punto a punto con radios bajo el protocolo estándar 802.15.4	89
5.2.1.1	Características y ubicación de los radios utilizados en las pruebas	90
5.2.1.2	Características de los paquetes enviados	92
5.2.1.3	Cálculo de la potencia máxima de la señal recibida	92
5.2.1.4	Resultados obtenidos	92
5.2.2	Pruebas de comunicación con radios bajo Zigbee	94
5.2.2.1	Características y ubicación de los radios utilizados en las pruebas	94
5.2.2.2	Características de los paquetes enviados	96
5.2.2.3	Resultados obtenidos	97
5.2.2.3.1	Formaciones de red Zigbee	97
5.2.2.3.2	Comunicación entre coordinador y enrutadores de la red Zigbee	100
5.3	Características de la red prototipo	101
5.3.1	Tipos de nodos y escalabilidad de la red	101
5.3.2	Ubicación de los nodos	101
5.3.3	Comunicación serial del coordinador y los enrutadores	102
5.3.4	Parámetros de operación de los radios	103

5.3.5 Integración de la red Zigbee con el Sistema de Administración para el Control y Monitoreo de Alumbrado Público	104
5.3.5.1 Protocolo de comunicación de datos	105
5.3.5.1.1 Establecimiento de las características de la red.....	105
5.3.5.1.2 Transmisión desde radio base/recepción en radio remoto	106
5.3.5.1.3 Recepción en radio base/transmisión desde radio remoto	107
5.3.5.1.4 Ejemplos de tramas de comunicación de la red prototipo	108
6. CONCLUSIONES.....	111
APÉNDICE A. ACRÓNIMOS Y ABREVIATURAS	115
APÉNDICE B. TABLAS DE REFERENCIA DE COMANDOS DE RADIO XBEE	119
APÉNDICE C. PATRÓN DE RADIACIÓN DE ANTENAS DE LOS RADIOS XBEE.....	123
BIBLIOGRAFÍA	125

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 Ciudad Universitaria UNAM.....	4
Figura 1.2 Uso de foto-controles (imagen izquierda), ejemplo de uso de temporizadores en luminarias, una de dos luminarias son apagadas por periodos de tiempo fijos (imagen derecha).....	5
Figura 1.3 Sistema de Alumbrado Inteligente, Oslo Noruega	7
Figura 1.4 Modo de operación del sistema	13
Figura 1.5 Visión General del Sistema de Alumbrado Público Inteligente	15
Figura 2.1 Clasificación de las tecnologías según su velocidad	21
Figura 2.2 Características de redes inalámbricas actuales.....	22
Figura 2.3 Características básicas de WiMAX	24
Figura 2.4 Aplicaciones para las WPAN	26
Figura 2.5 Esquema de una scatternet en Bluetooth	28
Figura 2.6 Canalización física de Bluetooth	29
Figura 2.7 Bandas de frecuencia asignadas para UWB	30
Figura 2.8 Módulos Zigbee de diferentes fabricantes	31
Figura 2.9 Topologías de red en Zigbee.....	33
Figura 2.10 Estructura en la red Zigbee.....	33
Figura 2.11 Arquitectura de una red WSN.....	34
Figura 2.12 Características principales de las tecnologías de comunicación inalámbrica por RF	36
Figura 2.13 Tecnologías inalámbricas que usan batería	36
Figura 3.1 Modelo de las capas de Zigbee.....	40
Figura 3.2 Ruta asignada para envío de mensaje (a), pérdida de nodos de ruta asignada (b), generación de la nueva ruta asignada (c).	42
Figura 3.3 Comportamiento de BER respecto a SNR	43
Figura 3.4 Topologías Zigbee.....	45
Figura 3.5 Características de las capas físicas.....	46
Figura 3.6 Canales IEEE 802.15.4.....	47
Figura 3.7 Formato del paquete PPDU	48
Figura 3.8 Formato general de la trama MAC	50
Figura 3.9 Estructura de la trama de datos	51
Figura 3.10 Estructura de la trama de reconocimiento (ACK).....	52
Figura 3.11 Estructura de la trama de comandos MAC	52
Figura 3.12 Estructura de la trama Beacon	53
Figura 3.13 Ejemplo de supertrama	54
Figura 3.14 Operación del escaneo activo.....	57
Figura 3.15 Proceso de unión en una PAN	58
Figura 3.16 Ejemplo de direccionamiento de aplicación Zigbee	60

Figura 3.17 Ejemplo de transmisión broadcast	61
Figura 3.18 Ejemplo de broadcast de Route Request Command, búsqueda de ruta de R3 a R6.....	63
Figura 3.19 Ejemplo de Route Reply Commnad, R6 puede enviar más de un Route Reply si este identifica una mejor ruta	65
Figura 3.20 Secuencia de salto para ruta de R3 a R6 después de haber efectuado el descubrimiento de ruta.	65
Figura 3.21 Proceso de transmisión de datos en entre nodos Zigbee.....	65
Figura 4.1 Vista de los módulos XBee.....	67
Figura 4.2 Características de rendimiento de los radios de la familia XBee	68
Figura 4.3 Disposición de pines en los radios XBee	69
Figura 4.4 Asignación de señales en los pines de los radios XBee.	69
Figura 4.5 Diagrama de flujo de datos en dispositivos con interface UART	70
Figura 4.6 Paquete de datos UART 0x1F (valor decimal "31").	70
Figura 4.7 Diagrama interno de flujo de datos	71
Figura 4.8 Modos de operación en módulos XBee.	73
Figura 4.9 Modo de secuencia de transmisión	74
Figura 4.10 Sintaxis para enviar un comando AT.....	75
Figura 4.11 Máximo número de Hijos por Padre.....	77
Figura 4.12 Profundidad Máxima de Red	77
Figura 4.13 Estructura de trama de datos UART con AP = 1	80
Figura 4.14 Estructura de trama de datos UART con AP = 2	80
Figura 4.15 Trama de datos UART y estructura específica API.....	81
Figura 4.16 Tipos de tramas API.....	82
Figura 4.17 Trama Modem Status	82
Figura 4.18 Trama AT Command.....	83
Figura 4.19 Trama AT Command con valor en cola.	83
Figura 4.20 Trama AT Command Response.....	84
Figura 4.21 Trama Zigbee Transmit Request	84
Figura 4.22 Zigbee Transmit Status	84
Figura 4.23 Zigbee Receive Packet	85
Figura 5.1 Diferencias entre radios XBee y XBee-Pro	88
Figura 5.2 Tipos de antena en radios XBee/XBee-Pro, a) antena de chip, b) antena de látigo y c)conector U.FL.....	89
Figura 5.3 Parámetros de operación de los radios utilizados para la prueba bajo 802.15.4.	90
Figura 5.4 Ubicación visual de los radios XBee-Pro dentro del campus	91
Figura 5.5 Ubicación de los radios para las pruebas bajo 802.15.4.....	91
Figura 5.6 Condiciones y resultados obtenidos en pruebas bajo 802.15.4	93
Figura 5.7 Parámetros configurados en los XBee-Pro en las pruebas bajo Zigbee	94
Figura 5.8 Configuración automática de parámetros al establecerse los radios como nodos de la red ...	95
Figura 5.9 Visión general de la ubicación de nodos de la red Zigbee de prueba	95
Figura 5.10 Visión de nodos ubicados en luminarias del circuito 192A	96
Figura 5.11 Resumen de características y ubicación de radios para la prueba bajo Zigbee	96
Figura 5.12 Formato de información de cada nodo.....	97
Figura 5.13 Formación 1 de red Zigbee	97
Figura 5.14 Estructura de red para la formación 1	97
Figura 5.15 Formación 2 de red Zigbee	98
Figura 5.16 Estructura de red para la formación 2	98
Figura 5.17 Formación 3 de red Zigbee	98
Figura 5.18 Estructura de red para la formación 3	98
Figura 5.19 Formación 4 de red Zigbee	99

Figura 5.20 Estructura de red para la formación 4	99
Figura 5.21 Formación 5 de red Zigbee	99
Figura 5.22 Estructura de red para la formación 5	99
Figura 5.23 Formación 6 de red Zigbee	100
Figura 5.24 Estructura de red para la formación 6	100
Figura 5.25 Resultados de las pruebas de comunicación en la red Zigbee de prueba.....	100
Figura 5.26 Parámetros de operación de los nodos de la red prototipo.....	103
Figura 5.27 Código de acciones de monitoreo y control	106
Figura 5.28 Formato de la trama Zigbee Transmit Request	106
Figura 5.29 Formato del paquete de datos de la luminaria	107
Figura 5.30 Formato de la trama Zigbee Receive Packet	107
Figura 5.31 Descripción de la trama de descubrimiento de nodos (ND).....	108
Figura 5.32 Descripción de la trama de respuesta al descubrimiento de nodos, trama 1.....	108

INTRODUCCIÓN

El departamento de Ingeniería Electrónica de la División de Ingeniería Eléctrica de la Facultad de Ingeniería de la UNAM, ha participado en el Macroproyecto “La Ciudad Universitaria y la Energía” con el proyecto denominado “Alumbrado Público con Energía Solar y Sistema de Autodiagnóstico”.

Este proyecto plantea entre otras cosas, la necesidad de desarrollar un sistema remoto de monitoreo y control para el alumbrado Público, con el objeto de poder administrar de una manera más eficiente la energía y recursos utilizados para su correcto funcionamiento. Una opción para la comunicación entre las luminarias y una central de comunicaciones, es que ésta se realice de manera inalámbrica, ya que actualmente la tecnología de redes inalámbricas permite implementar sistemas de comunicación seguros y confiables de una manera rápida, efectiva y a un bajo costo en comparación con los sistemas cableados.

El estándar Zigbee/802.15.4 es una reciente tecnología inalámbrica diseñada principalmente para aplicaciones de monitoreo y control remoto. Los dispositivos de una red Zigbee se forman, organizan y mantienen de una manera autónoma sin necesidad de la intervención humana, formando redes con topología en estrella, cluster tree o mesh. Una red Zigbee puede contener una gran cantidad de nodos, permitiendo escalar hasta alrededor de 65,000 nodos si es necesario. Además Zigbee al ser un estándar mundial, permite la interoperabilidad de dispositivos de diferentes fabricantes y garantiza su evolución y permanencia en el mercado.

Es por esto que en este trabajo de tesis, se plantea el uso de la tecnología Zigbee para implementar una red de comunicación de datos para el monitoreo y control de las luminarias del alumbrado público dentro de Ciudad Universitaria.

Este trabajo de tesis está dividido en 6 capítulos: El primero de ellos hace una descripción de la situación actual del alumbrado público de Ciudad Universitaria, menciona ejemplos de países alrededor del mundo que están implementando sistemas inteligentes de alumbrado público y describe el proyecto “Alumbrado Público con Energía Solar y Sistema de Autodiagnóstico”. El segundo capítulo hace referencia a las comunicaciones inalámbricas, menciona como se utiliza el espectro de radiofrecuencia en México, hace una descripción de los tipos de redes inalámbricas y tecnologías utilizadas pasando por las redes WAN, MAN, LAN y PAN, para finalizar con una comparación de todas estas y así determinar la más conveniente para la red de monitoreo y control del alumbrado público. En el tercer capítulo se hace una descripción detallada de las características y funcionamiento de las redes Zigbee. El cuarto capítulo hace referencia a la tecnología de los radios XBee, describe sus principales características y funcionamiento. En el quinto capítulo se detalla lo referente a la implementación de una red prototipo de comunicaciones, bajo el estándar Zigbee para el control y monitoreo de

luminarias dentro de Ciudad Universitaria, se describen la selección y pruebas realizadas con los radios XBee, así como las características de la red prototipo. Por último en el capítulo 6, se establecen las conclusiones a las que se ha llegado en función de la investigación y resultados obtenidos en el desarrollo de esta tesis.

Así bien, en su conjunto este escrito también pretende servir de referencia a estudiantes de licenciatura y/o maestría que deseen conocer más acerca de las redes Zigbee, ya que actualmente no existe mucha bibliografía que haga una descripción más a fondo de la operación de estas redes, así como también busca sentar un antecedente en el uso de tecnología XBee para aplicaciones de control y monitoreo.

CAPÍTULO 1

Planteamiento del problema

1.1 Antecedentes

El campus de Ciudad universitaria, actualmente alberga a una población mayor a 200 mil habitantes entre investigadores, académicos, docentes, estudiantes, y trabajadores, que diariamente desarrollan diferentes actividades dentro del campus, contribuyendo al esfuerzo de la UNAM de generar conocimiento y profesionistas capaces de sustentar el desarrollo del país. Como se puede ver en la figura 1.1, el campus es comparable en dimensión a una pequeña ciudad, la cual cuenta con diferentes servicios que ofrecen tanto a sus habitantes como visitantes las condiciones necesarias para que tengan una armoniosa estancia y correcto desempeño de actividades dentro de sus instalaciones, por lo tanto, es necesario que cada uno de estos servicios opere correctamente y de la mejor manera, cumpliendo así cabalmente con su objetivo.

Uno de los servicios que tiene gran importancia en ciudad universitaria es el de alumbrado público, tal y como lo es en cualquier ciudad, pues proporciona la iluminación necesaria durante los periodos de oscuridad en espacios públicos (calles, estacionamientos, áreas verdes, zonas de esparcimiento, pasillos, etc.), contribuyendo a brindar seguridad en la movilidad y estancia de las personas, por lo tanto es fundamental que funcione de una manera óptima y confiable.

1.1.1 Situación del alumbrado público en Ciudad Universitaria

Actualmente el servicio de alumbrado público representa un egreso considerable para el campus, pues según datos de la Dirección General de Obras y Conservación¹ de la UNAM, más de un 20% del consumo de la energía eléctrica es utilizado por el sistema de alumbrado público.

¹ La Dirección General de Obras y Conservación, es una dependencia administrativa y de servicio, cuyo objetivo fundamental es coadyuvar en el cumplimiento de los fines sustantivos de la Universidad Nacional Autónoma de México, mediante la planeación, proyecto y construcción de las obras de ampliación requeridas; así como la conservación, rehabilitación y mantenimiento de las edificaciones, espacios abiertos, equipos e instalaciones electromecánicas existentes que forman parte del patrimonio inmobiliario institucional.

Hoy día el sistema cuenta con alrededor de 3000 luminarias del tipo convencional, pues en su mayoría usan lámparas de vapor de sodio controladas por foto-controles y/o temporizadores que las prenden al máximo de su potencia o las apagan.

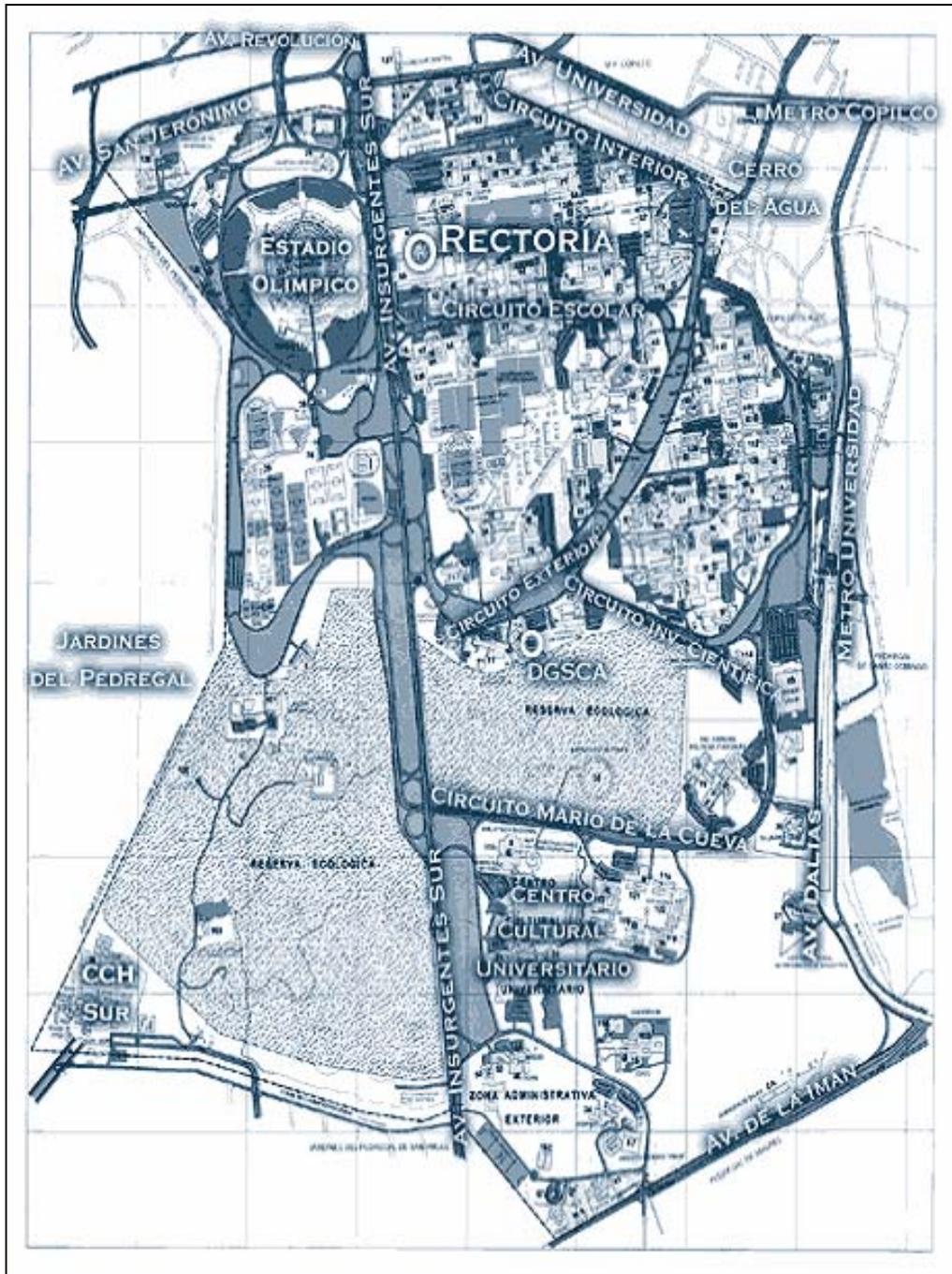


Figura 1.1 Ciudad Universitaria UNAM

En consecuencia se generan grandes costos de operación y mantenimiento, ya que no hacen un uso eficiente de la energía ni optimizan su funcionamiento. Un control de este tipo, en ocasiones pone en riesgo la seguridad de las personas al moverse o permanecer en espacios

públicos dentro del campus, o bien, desperdicia la energía ya que ocurre que los foto-controles llegan a fallar, dejando apagada la luminaria en periodos de oscuridad o en caso contrario la mantienen encendida en horas de luz.

Por otro lado, el uso de temporizadores posibilita el ahorro de la energía eléctrica mediante el encendido o apagado de las lámparas por intervalos de tiempo fijo (ver figura 1.2), lo cual se lleva a cabo sin considerar el tránsito de personas o automóviles a su alrededor; esto ocasiona que a veces se apague la lámpara cuando es necesario que ilumine o se prenda cuando no se requiere. Otra circunstancia que también ocurre en las luminarias de alumbrado público, es que en cierto momento dejan de funcionar a consecuencia a una falla o debido al agotamiento del tiempo de vida de la lámpara, situación que no se conocerá si no hasta que el personal encargado realice un rondín nocturno de servicio para inspeccionar visualmente el estado de las luminarias, y se percate de la falla corrigiéndola en el momento o pasando un reporte para su futura corrección.

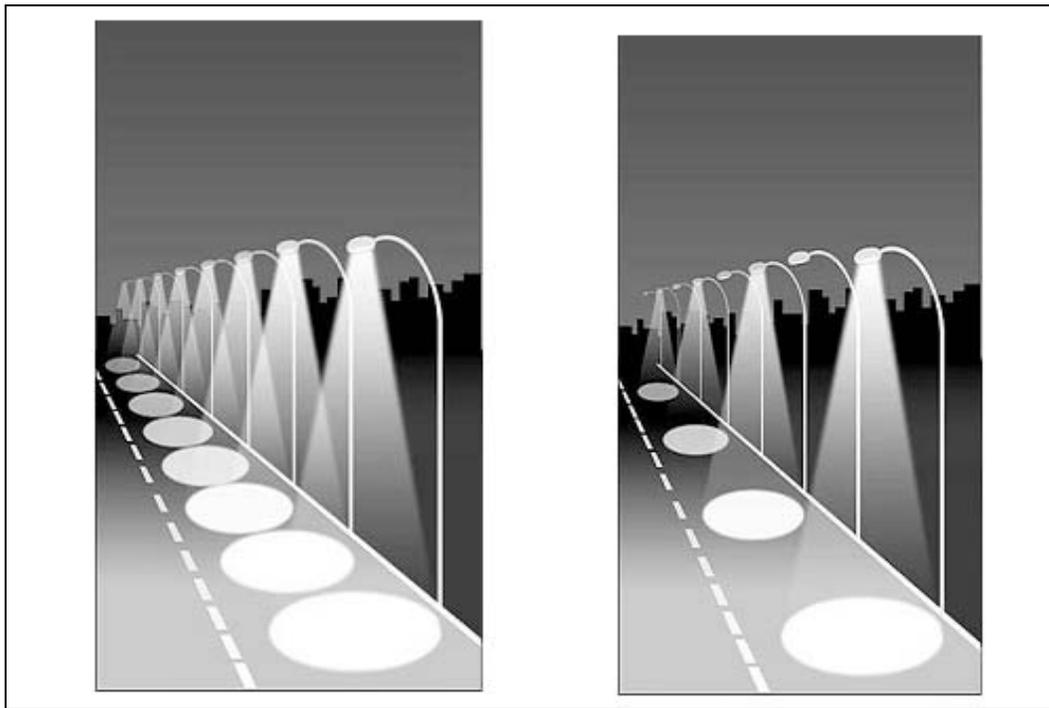


Figura 1.2 Uso de foto-controles (imagen izquierda), ejemplo de uso de temporizadores en luminarias, una de dos luminarias son apagadas por periodos de tiempo fijos (imagen derecha).

La problemática del alumbrado público en Ciudad Universitaria, es la misma prácticamente en todas las ciudades alrededor del mundo, por lo que varios países considerando la importancia de resolver esta situación, han invertido parte de sus recursos económicos en la investigación y desarrollo de sistemas inteligentes que empleen de una manera más eficiente la energía utilizada y los recursos económicos y humanos para su operación. En algunas ciudades del mundo ya se han desarrollado sistemas de este tipo, los cuales se han implementado en zonas de prueba con el objeto de observar su funcionamiento y los beneficios.

1.1.2 Países desarrollando sistemas de alumbrado inteligente

A continuación se mencionan los países que están desarrollando e implementando sistemas inteligentes de alumbrado público, que en mayor o menor medida están beneficiando a las ciudades debido a los ahorros energéticos y de operación que esto conlleva, con la ventaja de ofrecer un servicio más eficiente en beneficio de sus habitantes.

1.1.2.1 Noruega

A lo largo de 5 años la empresa Hafslund ASA, quien es la operadora del alumbrado público en la ciudad de Oslo, capital de Noruega, ha estado probando e implementando un avanzado sistema de alumbrado público, que ha sido acompañado con un plan de rediseño y sustitución de lámparas de mercurio por lámparas de sodio a alta presión, y de balastos electromagnéticos por electrónicos. Este sistema es capaz de monitorear y controlar individualmente el funcionamiento de cada luminaria de manera remota, utilizando como medio de comunicación la línea de potencia, cumpliendo dos objetivos principales: ahorrar en el uso de la energía e incrementar el nivel de seguridad de la ciudadanía. Así bien, la intensidad de luz de cada lámpara se puede controlar de manera individual al atenuarse o incrementarse en niveles iluminación usando balastos electrónicos, lo que se realiza dependiendo del tráfico, condiciones climáticas y cantidad de luz natural. Por ejemplo en periodos donde el tránsito de vehículos es poco o cuando la nieve cubre las calles, la necesidad de la luz disminuye y la intensidad de la luz puede ser reducida².

El sistema permite analizar el comportamiento de cada lámpara así como identificar sus fallas de manera remota ya que en cada luminaria se monitorea información sobre si está o no prendida la lámpara, horas de uso, energía consumida, voltaje, temperatura y nivel de atenuación. Toda esta información es transmitida por la línea de potencia a una subcentral que actúa como un controlador de segmento, administrando la información de varias luminarias así como también utilizando la información proveniente de sensores de tráfico y de estado del tiempo ubicados en el lugar para que automáticamente atenúe la luz de algunas o todas las luminarias. Toda esta información es comunicada de manera inalámbrica por medio de la red de telefonía celular a una central de monitoreo y control ubicada a varios kilómetros del lugar, en donde se puede visualizar y controlar la operación de las luminarias. Ver figura 1.3

Los principales beneficios al usar este sistema han sido:

- El consumo de energía se ha reducido un 62 %, por tanto se ha generado menos CO₂.
- Se ha mejorado el servicio del alumbrado público y la calidad de luz en las calles.
- Mayor seguridad de las personas que transitan en la ciudad.
- Los costos y tiempos de mantenimiento se han reducido, además se tiene un registro real del consumo energético del alumbrado público.

² Se ha probado que cuando la intensidad de la luminaria es atenuada se incrementa el tiempo de vida de la lámpara y demás componentes.

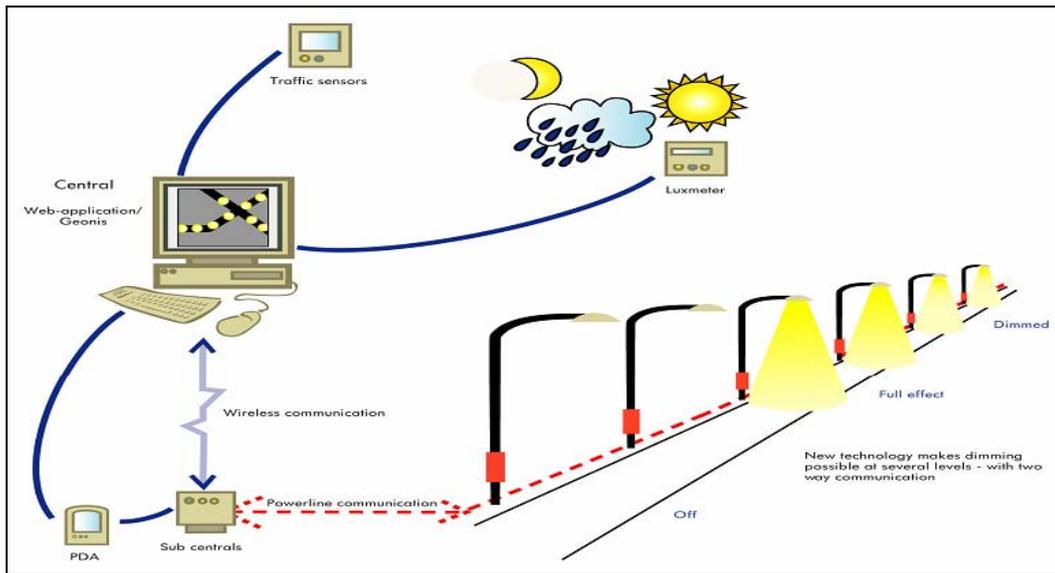


Figura 1.3 Sistema de Alumbrado Inteligente, Oslo Noruega

1.1.2.2 Suecia

La ciudad de Gotemburgo está localizada en la costa oriente de Suecia y cuenta con alrededor de medio millón de habitantes, siendo la segunda ciudad más grande de Suecia. Esta ciudad cuenta con un sistema inteligente de alumbrado público que está siendo distribuido en dos de sus distritos, Tuveleden y Högsboleden.

Para este sistema se instalarán un total de 550 luminarias inteligentes y 5 controladores locales en el tramo que abarca estos dos distritos. Para abril del 2007 ya se habían instalado 300 luminarias inteligentes en Tuveleden, faltando 250 para el distrito de Högsboleden, las cuales terminarían de ser instaladas para diciembre del 2007.

El sistema funciona mediante una red LON³, que controla y monitorea de manera remota la operación de las luminarias de una manera individual a lo largo de las calles. Desde un sitio Web se accede a una computadora central que se comunica de manera inalámbrica con unidades de control local, las cuales a su vez se comunican con las luminarias empleando la línea de potencia.

³ Las redes LON (Local Operating Network) constituyen una clase de tecnología que permite a dispositivos como actuadores, sensores, válvulas y prácticamente cualquier dispositivo, comunicarse con otro con tan solo usar un elemento extra llamado Neuron Chip que trabaja bajo un protocolo estándar. La tecnología LON soporta comunicaciones distribuidas uno a uno (peer to peer) usando alguno de diferentes medios de transmisión como pueden ser par trenzado, cable coaxial, fibra óptica, radiofrecuencia o línea de potencia.

Así bien son 3 los elementos principales que componen el sistema:

- Un **sistema de control y monitoreo (ÖSÖ)** basado en un sistema de información geográfica (GIS) que se accede mediante un sitio Web, y tiene como funciones principales mostrar en un mapa una visión general de la condición de las luminarias, donde se pueda controlar el encendido, nivel de atenuación y apagado de cada luminaria. El sistema puede mostrar estadísticas y reportes de datos recolectados de las luminarias (energía consumida, horas de uso, etc.), supervisar fallas y en su caso distribuir avisos pertinentes al personal vía SMS.
- **Controladores locales (MP-01)**, cada uno de estos controla un grupo de luminarias, sus principales funciones son manejar una base de datos de las luminarias que le corresponden, tener comunicación con cada una usando la línea de potencia así como también con el ÖSÖ por medio de una conexión inalámbrica GSM/GPRS. Además puede controlar de manera individual los niveles de atenuación, encendido y apagado de las luminarias a partir de peticiones del ÖSÖ, configurar los parámetros de operación de cada luminaria de manera automática dependiendo de la hora, es decir horas pico u horas de poco tránsito, o bien de la cantidad de luz natural disponible, y supervisar alarmas de las luminarias en caso de alguna falla.
- **Controlador de lámpara (LC-20D)** que es instalado en cada lámpara y tiene como funciones prender o apagar la luminaria dependiendo de las ordenes provenientes del MP-01, monitorear de manera momentánea el estatus prendido/apagado de la lámpara, su voltaje, corriente, potencia consumida, nivel de atenuación y frecuencia, así como realizar medidas de consumo de energía acumulada y horas de uso. Además si la comunicación entre el LC-20D y el MP-01 falla, el controlador de lámpara hace que automáticamente se opere bajo las condiciones a la misma hora del día anterior.

Después de 6 meses de la operación de este sistema se ha generado una reducción del 74% en el consumo de energía a comparación con el viejo sistema de alumbrado público. (LonMark International, 2008)

1.1.2.3 República Checa

A lo largo de la República Checa están siendo probados e implementados varios sistemas de alumbrado público inteligente, entre ellos se puede mencionar el sistema de Luxicom, donde la comunicación se lleva a cabo por la línea de potencia y cada lámpara es manejada por un controlador denominado UDC (Output Lighting Control). El sistema permite el control de cada lámpara en tiempo real, ya que supervisa la red completa del alumbrado público, maneja datos actualizados y optimiza la intervención humana con un eficiente método. Durante el 2007 en la ciudad de Praga se han instalados 60 controladores UDC y 60 balastos electrónicos Ecolum EC3 que pueden atenuar la intensidad de las lámparas, actualmente se están analizando los resultados.

En la ciudad de Brno se está implementado un sistema de alumbrado llamado DATMO que ha beneficiado a la ciudad al ahorrar considerablemente en el uso de la energía eléctrica, y al reducir los costos de mantenimiento. Mediante un enlace de radiofrecuencia un software de

aplicación se comunica con unidades de control distribuido las cuales gestionan la información y operación de las luminarias de circuitos conectados a ellas, estas luminarias evalúan sus condiciones como son el voltaje, la corriente y el corrimiento en fase, y se lo comunican a dicha unidad de control usando la línea de potencia como medio. En la ciudad de Brno 270 unidades de control han sido instaladas a lo largo de la ciudad donde 60 cuentan con reguladores de voltaje, que en consecuencia disminuyen la intensidad por circuito de las luminarias.

Un sistema similar llamado SERVO opera en la ciudad de Plzen con 29 unidades inteligentes de control distribuido; otro sistema con controladores de voltaje de la marca Reverbi opera en la ciudad de Zlín, disminuyendo la intensidad de las luminarias de acuerdo a la densidad de tráfico.

1.1.2.4 Polonia

La ciudad de Varsovia en Polonia tiene implementado un sistema de gabinetes para la iluminación que ahorran en el consumo de la energía eléctrica. Un 89% de las luminarias de la ciudad utilizan lámparas de vapor de sodio a alta presión, un 10% usan lámparas de alta presión de mercurio y el resto lo ocupan lámparas de vapor de sodio a baja presión, lámparas incandescentes, fluorescentes y halógeno.

El sistema antes mencionado permite tener ahorros en el consumo de la energía eléctrica durante el periodo en que operan las luminarias de hasta un 40%, con un ahorro potencial anual alrededor del 16%, lo cual se logra disminuyendo el consumo de energía a través de la atenuación de las lámparas cuando un nivel de iluminación más bajo es requerido y cuando la densidad de tránsito es mínima, situación que ocurre entre las 11 pm y 5 am. Actualmente el sistema utiliza 55 gabinetes instalados dentro de la ciudad de Varsovia, pero se está desarrollando un mapa del alumbrado público para conocer en que otros sitios dentro de la ciudad puede implementarse este sistema.

1.1.2.5 Países Bajos

En la ciudad de Eindhoven ubicada en la provincia de Brabante Septentrional en los Países Bajos, se ha empezado la realización de un proyecto para un nuevo sistema de alumbrado público adaptable. Desde el año 1995 los países bajos han instalado y operado un camino iluminado dinámicamente que puede ser ajustado a uno de tres niveles de iluminación, dependiendo del la cantidad de tránsito, hora del día y condiciones climáticas. El nivel más bajo de iluminación es de 0.2 cd/m^2 , el nivel normal es de 1 cd/m^2 y el nivel más alto es de 2 cd/m^2 , donde los diferentes niveles de iluminación son resultado del uso de balastos controlados electrónicamente para lámparas de vapor de sodio a alta presión. El nuevo sistema está en proceso y se espera tener grandes beneficios en el ahorro de la energía.

1.1.2.6 Bulgaria

Varias ciudades en Bulgaria están desarrollando e implementado sistemas más eficientes para el alumbrado público. En la capital de Bulgaria, Sofía se tiene planeado implementar un proyecto piloto de alumbrado público inteligente. Por otro lado la empresa SIEMENS ha desarrollado un proyecto de alumbrado inteligente para la ciudad de Sliven, el cual actualmente está parcialmente realizado.

En la ciudad de Varna y Smolian también se están diseñando sistemas similares, los cuales contarán con un centro de información y control, controladores de segmento y controladores de lámpara para el uso con balastos electrónicos con capacidades de atenuación, o bien para el uso con balastos electromagnéticos. Dichos sistemas medirán el consumo de electricidad en diferentes puntos de la red del alumbrado, además realizarán un monitoreo de cada luminaria, empleando como medio de comunicación tanto a las líneas de potencia como a la red de telefonía móvil GSM (GPRS). También en la ciudad de Karlovo se planea la reconstrucción y modernización del alumbrado público, así como la introducción de un sistema automatizado de control centralizado vía radio.

Por último, en la ciudad de Vratza existe un proyecto de reconstrucción del alumbrado público, con el cual se espera controlar de manera remota la iluminación de la ciudad, a través de un centro de control usando un sistema de información geográfica (GIS), en el cual se visualice la situación del alumbrado público. Este sistema funcionará usando controladores de segmento que podrán actuar independientemente siguiendo una rutina establecida con anterioridad, o bien en consecuencia a una orden desde un centro de control, que le indicará la conexión o desconexión de diferentes líneas de potencia conectadas a él. Este controlador también recolectará datos del estado del módulo (como por ejemplo la corriente promedio en un intervalo de tiempo de 15 minutos de cada línea de potencia), que almacenará en su memoria y luego los enviará al centro de control a intervalos fijos de tiempo por medio de un dispositivo GSM. En caso de actos de vandalismo sobre los módulos o líneas de potencia, robo o desvío de los parámetros estándar en la línea se alarmará al centro de control.

1.1.2.7 Reino Unido

En el condado de Lancashire del Reino Unido, la autopista M65, que corre de oeste a este pasando por los poblados de Blackburn y Burnley, ha sido la primera autopista en el Reino Unido que incorpora un sistema de alumbrado inteligente, el cual atenúa la intensidad de luz en las luminarias dependiendo de la hora y el flujo de automóviles, contando con capacidades de telemetría. El sistema hace uso de la línea de potencia para comunicarse y controlar remotamente a las luminarias, las cuales usan balastos electrónicos de alta frecuencia para lámparas de vapor de sodio a alta presión de potencias entre 50 W y 250 W, permitiendo atenuar hasta un 30% la intensidad de la luz, además de alargar la vida de las lámparas y mejorar el factor de potencia. Las luminarias pueden ser controladas individualmente, identificando fallas y guardando datos de mantenimiento, asegurando un completo y constante control en su operación.

Este sistema de monitoreo y control del alumbrado público en la autopista M65 fue instalado por el Lancashire County Council Engineering Services, y es un modelo para el desarrollo de la

iluminación de las autopistas del futuro ya que contribuye en el ahorro del uso de la energía eléctrica, reduciendo las emisiones de CO₂, así como también hace más seguras las condiciones de manejo en las autopistas durante la noche.

1.1.2.8 Finlandia

En el otoño del 2005 un sistema de alumbrado inteligente se instaló en la carretera Ring Road III de la ciudad de Helsinki, con el cual 492 luminarias son controladas sobre 4 km de camino y 4 áreas de intercambio. El sistema recolecta información del tráfico, estado del tiempo y luminancia, que es utilizada para controlar el alumbrado público en el camino.

El uso de este sistema garantiza la calidad del alumbrado en el camino, ahorrando energía y optimizando los costos de mantenimiento, a la vez que incrementa la seguridad en el tránsito.

1.1.2.9 Austria

La ciudad de Graz ubicada al sureste de Austria cuenta con aproximadamente 24,000 luminarias, que son controladas directamente por 1400 tableros de conexión. Varias de las instalaciones de la iluminación cuentan con una antigüedad de hasta 40 años, por lo que se requiere un plan de modernización para optimizar en los recursos económicos y energéticos utilizados en su mantenimiento y operación.

En el año 2005 se realizó un proyecto piloto denominado "Green Light Graz I" con el objeto de modernizar el alumbrado público de las principales vialidades de la ciudad, por lo que la Agencia de Energía de Graz se encargó de dicho proyecto renovando y dotando con lo último en tecnología e ingeniería de control a 718 luminarias a lo largo de las principales calles.

Las nuevas luminarias contaron con las siguientes características:

- Cápsula de aluminio para la lámpara con protección IP 66⁴ que no requieren uso de herramienta para abrirse, facilitando el remplazo del equipo.
- Reflector y cristal de alta eficiencia
- Control de encendido/atenuación/apagado para las lámparas durante la noche.

Los resultados obtenidos del proyecto mostraron que el uso anual promedio de las luminarias en la ciudad es de 4161 horas, donde las nuevas luminarias generaron ahorros energéticos del 59% con respecto al consumo de potencia anterior al proyecto. En consecuencia la Agencia de Energía de Graz estima que medidas de ahorro de este tipo pueden ser tomadas en alrededor

⁴ IP (Ingress Protection). Es un estándar internacional que clasifica el nivel de protección que provee un contenedor de dispositivo eléctrico contra la intrusión de objetos sólidos, agua o impactos mecánicos. Este índice es indicado por dos o tres números seguidos de las letras IP, ejemplo IP 66, el primer dígito indica protección completa contra la intrusión de polvo, el segundo dígito indica protección contra potentes chorros de agua en cualquier dirección.

de 15,000 luminarias, con la posibilidad de incorporar inclusive tecnología LED y energía solar para alimentar las luminarias.

1.1.2.10 China

La universidad de la ciudad de Hong Kong, en China ha desarrollado y aplicado con éxito un sistema de alumbrado público que opera mediante una central de control que atenúa la intensidad de luz en las luminarias. Este sistema bien puede aplicarse en sistemas de iluminación interna y grandes sistemas de iluminación exterior, como el alumbrado en carreteras y autopistas, parques, jardines, estacionamientos, espacios de vivienda pública, instalaciones industriales y comerciales, aeropuertos, hoteles, universidades, estadios, etc.

Este sistema de control central ha sido probado desde septiembre del 2004 registrando un ahorro promedio en el consumo de energía eléctrica equivalente al 30%. Actualmente se está instalando este sistema en la ciudad de Heshan, en la provincia de Guandong, con el objeto de controlar alrededor de 7000 luminarias.

1.1.2.11 Canadá

Como parte de un proyecto, en la ciudad de Prince George ubicada en la provincia de British Columbia en Canadá se instaló un sistema de alumbrado inteligente, el cual constó de 170 luminarias con tecnología de la empresa Street Light Intelligence que fueron instaladas a lo largo de la calle conocida como 15th Street (arteria principal de la ciudad). El sistema tiene la capacidad de monitorear las condiciones de las luminarias de manera individual y controlar de manera remota su encendido, apagado o nivel de atenuación, dependiendo de la densidad de tránsito en el lugar. Ver figura 1.4

La razón por la cual se implementó este sistema en la calle 15 fue porque el tránsito del lugar es conocido, comportándose de manera similar día a día, lo cual permitió establecer diferentes intensidades de luz en las luminarias dependiendo de la hora sin afectar a la población.

El sistema consta de unidades que al ser instaladas en cada luminaria pueden controlar su operación, es decir el encendido, apagado y atenuación se efectúa basándose en una programación o en reacción a un sensor de luz, reduciendo su intensidad hasta un máximo del 31% de su totalidad. Esta unidad también tiene la capacidad de monitorear el estado de operación, consumo de energía e identificar fallas de la luminaria, contando con comunicación inalámbrica con un colector de datos y con las unidades que le rodean, las cuales le pueden servir de enlace con el colector de datos.

El colector de datos maneja la información recolectada de un grupo de luminarias comunicándose con ellas de forma inalámbrica, así como también con un servidor central usando la red de telefonía celular.

Implementación de una red inalámbrica de comunicación empleando el estándar Zigbee/802.15.4.

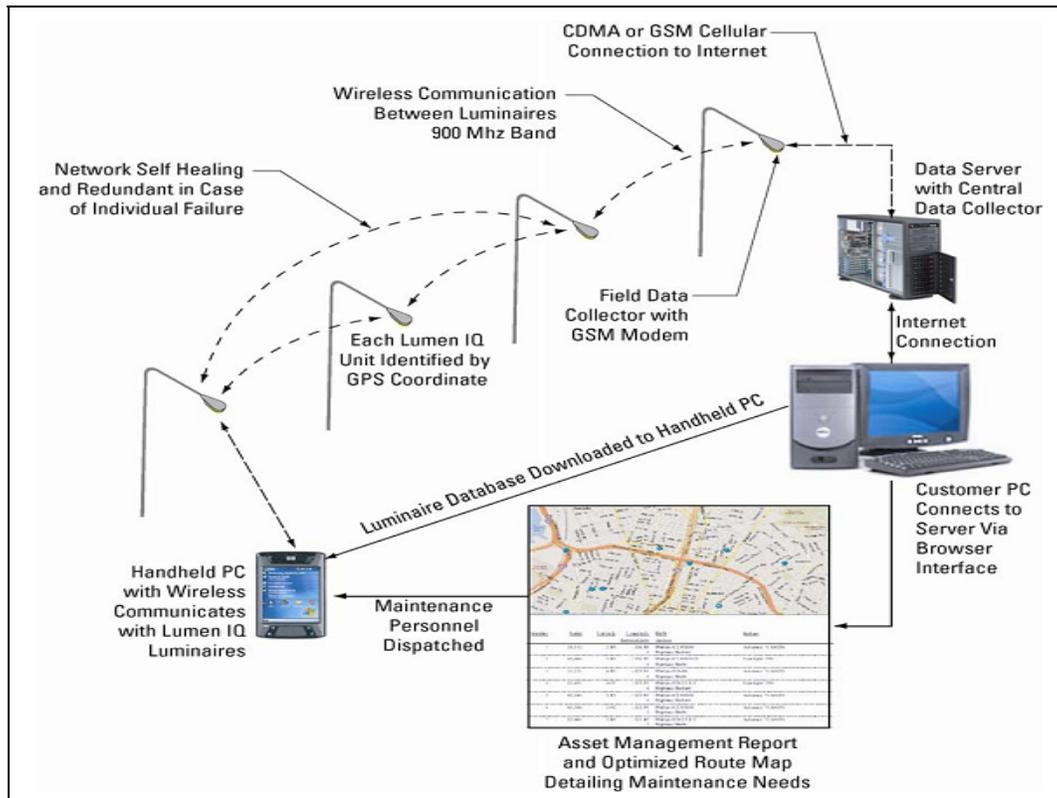


Figura 1.4 Modo de operación del sistema

Al servidor se puede acceder mediante una aplicación en Web donde se puede visualizar la información de las luminarias en tiempo real.

Los beneficios que se obtuvieron con la aplicación de este sistema fueron varios, entre ellos el ahorro de energía, optimización de luz en luminarias, mantenimiento más eficiente, obtención de un registro de funcionamiento de las luminarias, así como precisión en la medida de potencia usada.

1.1.2.12 India

Bangalore es la tercera ciudad más poblada en la India y se encuentra en constante expansión, por lo cual se ha venido implementando un sistema de alumbrado público en la ciudad que tiene la capacidad de controlar y monitorear de manera remota las condiciones de la red en todo momento, posibilitando entre otras cosas, medir el consumo energético de las luminarias, controlar el encendido, apagado e intensidad de las lámparas. El uso de este sistema ha generado un ahorro energético del 50%, así como una reducción del 20 % en costos de mantenimiento.

1.1.2.13 Península Arábiga

En las ciudades de Dubai, Mascate, Dammam, Riad y Jeddah de la península arábiga se probaron varios sistemas de administración y control para el alumbrado público, los cuales mostraron ahorros energéticos de hasta un 40%, por lo que se decidió instalar un gran sistema de administración y control para la red de alumbrado público. Con esto se ahorrará en el consumo de la energía eléctrica y se tendrá un control eficiente del alumbrado público a lo largo de estas ciudades.

Como se puede observar, actualmente varias ciudades alrededor del mundo están aprovechando los avances tecnológicos para desarrollar e implementar sistemas más eficientes de iluminación, que optimizan el uso de la energía y los recursos empleados para su funcionamiento; en la medida que se sigan desarrollando estos sistemas se podrá brindar un mejor servicio, con beneficios económicos, sociales y ambientales a corto, mediano y largo plazo. Por lo tanto es necesario que en México se impulse el desarrollo e implementación de este tipo de sistemas para el alumbrado público, ya que esto traerá consigo beneficios a la sociedad.

1.2 Proyecto “Alumbrado Público con Energía Solar y Sistema de Autodiagnóstico”

En este contexto la UNAM por medio del programa transdisciplinario en investigación y desarrollo para escuelas y facultades, creó el Macroproyecto *La Ciudad Universitaria y la Energía*, cuyos objetivos son diseñar y desarrollar infraestructura, tecnología y cultura para el uso eficiente de la energía, así como también transformar a la ciudad universitaria en un modelo de uso eficiente de la energía y servir de ejemplo a otras ciudades del país.

Dentro del Macroproyecto se encuentra el proyecto 1/24 a cargo del Departamento de Ingeniería Electrónica de la Facultad de Ingeniería de la UNAM, con el nombre *Alumbrado Público con Energía Solar y Sistema de Autodiagnóstico*, que plantea la necesidad de implementar en Ciudad Universitaria un mejor sistema de alumbrado público que permita hacer un uso más eficiente de la energía sin dejar a un lado la seguridad de las personas, y que además pueda ser monitoreado y controlado de manera remota para brindar una mejor administración y mayor certeza en su funcionamiento, lo cual repercutirá en brindar un mejor servicio tanto a su comunidad como a sus visitantes.

Todo esto se puede lograr realizando una serie de acciones:

- Utilizar fuentes alternas de energía para el uso del alumbrado público, como lo es la energía solar.
- Emplear luminarias que optimicen el uso de la energía.
- Planear la colocación y altura de las luminarias de acuerdo a su empleo, tipo y potencia para que alumbren de manera eficiente los espacios públicos.

- Diseñar un sistema de alumbrado público que permita conocer las características de las luminarias así como las de su entorno en tiempo real de manera remota, las cuales sirvan para gestionar su operación.

1.2.1 Objetivos del Proyecto

1.2.1.1 Objetivo general

Así bien este proyecto tiene como objetivo general diseñar y desarrollar un arbotante inteligente alimentado con energía solar con capacidad de autodiagnóstico y comunicación inalámbrica con un centro de administración de arbotantes del mismo tipo, en donde se puedan visualizar de manera remota las características de operación y se tenga un control sobre los arbotantes.

El conjunto de estos elementos formarán un Sistema de Alumbrado Inteligente como se puede ver en la figura 1.5.

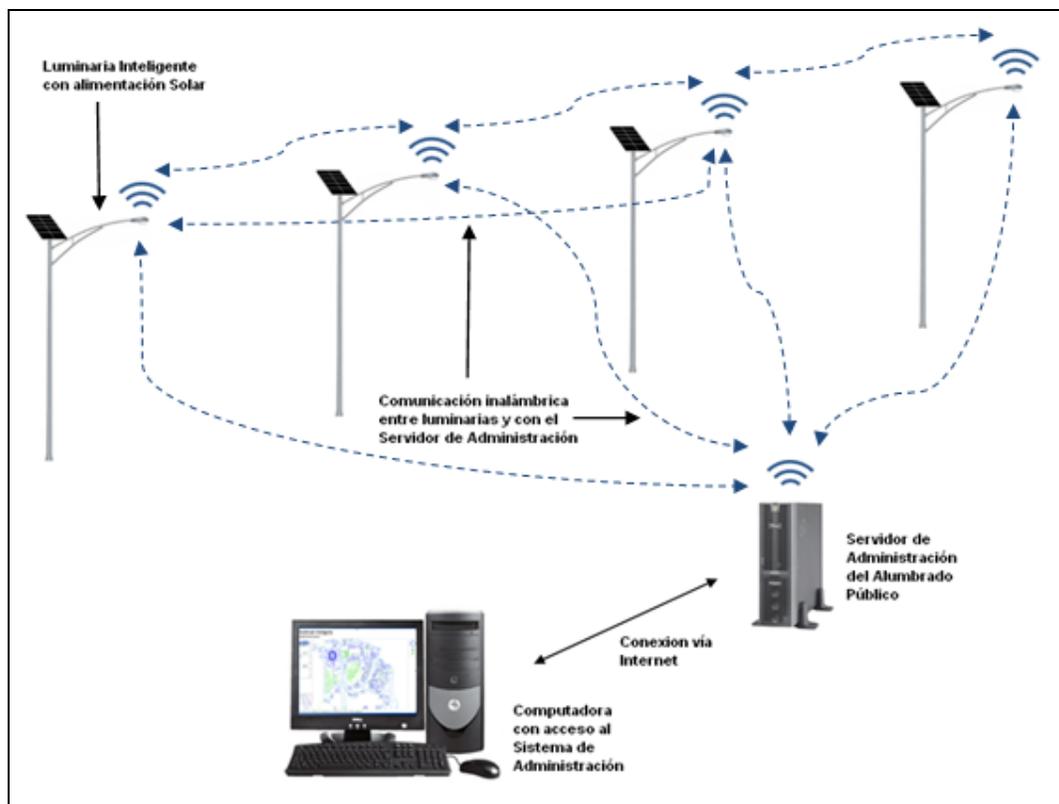


Figura 1.5 Visión General del Sistema de Alumbrado Público Inteligente

1.2.1.2 Objetivos particulares

Para lograr el objetivo general del proyecto es necesario plantear tres objetivos particulares, los cuales son:

- Diseñar un módulo de control y adquisición de datos para cada luminaria que supervise las condiciones eléctricas y externas de operación y que tenga capacidades de comunicación inalámbrica y que controle su funcionamiento.
- Diseñar una red inalámbrica de comunicación que sea confiable, segura, escalable, de bajo costo y de fácil implementación, la cual permita transferir información de una manera eficiente y rápida, entre las luminarias y un centro que administre y controle su operación.
- Diseñar una aplicación en software que permita administrar el funcionamiento del alumbrado público, en la cual se pueda visualizar y controlar la operación de las luminarias de manera individual.

1.2.2 Características del Sistema de Alumbrado Público Inteligente

El diseño de este sistema está concebido bajo la filosofía de las redes de sensores inalámbricos, con tres elementos principales:

- Un centro de administración, que será la ventana para visualizar la información de las luminarias y así tener un control de ellas de manera remota.
- Conjunto de luminarias que serán las que interactúen con su entorno.
- Donde el conjunto de los dos elementos formará una red de comunicaciones que permitirá un intercambio de información confiable y útil en tiempo real.

El centro de administración será una aplicación de software en internet, que permitirá el acceso a la información de un servidor, desplegando en un sistema de información geográfica las características del sistema de alumbrado público, con lo que se podrá monitorear y controlar individualmente y de manera remota a las luminarias. El servidor estará conectado a una estación base de comunicación inalámbrica que permitirá la comunicación con las luminarias.

Por otro lado cada luminaria será capaz de enviar información de su operación y recibir órdenes de manera remota, ya que contará con los siguientes elementos:

- un módulo de adquisición de parámetros de operación de la luminaria, que medirá las características eléctricas y obtendrá el estatus de la lámpara.
- sensores externos que puedan monitorear las condiciones del entorno (luz de día, proximidad de personas o automóviles).
- un microcontrolador que procesará los datos y controlará la operación de luminaria por medio de actuadores.

- Un dispositivo con capacidades de comunicación inalámbrica con sus vecinos o con la estación base para transferir información entre la luminaria y el servidor.

1.2.3 Alcances del Proyecto

Si a esto le sumamos el uso de balastos electrónicos con capacidades de atenuación para las lámparas de HPS y el uso de luminarias alimentadas por fuentes alternas de energía como la energía solar, se puede tener un uso eficiente y controlado de la energía empleada por cada luminaria a lo largo de Ciudad Universitaria, y por lo tanto se puede plantear un control de intensidad de iluminación de acuerdo a:

- El tránsito de personas o automóviles en el lugar
- La disponibilidad de luz natural y estado del tiempo
- Ubicación de la luminaria (cruce de caminos, estacionamientos, zonas peatonales)
- Ocurrencia de fechas o eventos especiales

Lo cual incrementará el tiempo de vida de la lámpara y demás componentes en la luminaria generando un menor consumo de energía.

Por otro lado con un sistema como el planteado se podrán identificar fallas en las luminarias en el mismo momento que se presenten, generando inmediatamente un reporte de mantenimiento que será enviado al personal encargado para que en el menor tiempo se corrija la falla, lo que en consecuencia evitará la necesidad de realizar inspecciones oculares en busca de fallas en las luminarias y disminuirá riesgos en la seguridad de las personas que utilizan el servicio.

Además se podrá tener un registro del funcionamiento de las luminarias, así como de su consumo y horas de uso.

En general este sistema optimizará el funcionamiento del alumbrado público y brindará un mejor servicio, más seguro y más confiable dentro de las instalaciones de Ciudad Universitaria reduciendo costos de operación y mantenimiento, al hacer un uso eficiente de la energía eléctrica, lo cual repercutirá en un ahorro energético que generará una disminución en las emisiones de CO₂ beneficiando al medio ambiente, donde los recursos económicos ahorrados se puedan utilizar en otros servicios en beneficio de la misma comunidad.

CAPÍTULO 2

Situación actual de las comunicaciones inalámbricas

2.1 Comunicaciones inalámbricas

Una comunicación inalámbrica es la que se lleva a cabo sin necesidad de cables donde la información entre dos sistemas se transmite a través del aire por medio de la modulación de ondas electromagnéticas; esto posibilita que los sistemas que participan en la comunicación puedan ubicarse en cualquier lugar sin necesidad de estar limitados por un cable, siempre y cuando el receptor se encuentren al alcance del transmisor.

Para las comunicaciones inalámbricas se emplea el espectro de radiofrecuencia (RF) que es la porción de ondas electromagnéticas que se encuentran dentro del rango de frecuencias de 9KHz – 300 GHz es decir dentro de la parte alta del rango de frecuencias perceptibles por el oído humano y por debajo de las frecuencias de la luz infrarroja. El uso de estas bandas en México está regulado por la COFETEL y se rige bajo las recomendaciones de la ITU (International Telecommunications Union) para permitir que tecnologías de otros países operen en México sin problemas en el uso de la frecuencia.

2.1.1 Bandas de frecuencia

Dentro del espectro de electromagnético existen varias bandas de frecuencia, donde cada banda se utiliza para distinto tipo de comunicaciones siendo que aquí están inmersas las bandas de radiofrecuencia. Debido a sus características físicas, las señales en las bandas de frecuencia baja se propagan a mayores distancias y atraviesan más fácilmente los obstáculos en su camino, por otro lado las señales en las bandas de frecuencia alta viajan a menores distancias y no tan fácilmente atraviesan los obstáculos.

Las ondas se pueden clasificar según su frecuencia, y de ahí su aplicación en diferentes tipos de comunicaciones como se ve a continuación:

- Frecuencias extremadamente bajas (ELF): Se encuentran en el intervalo de 30 a 300 Hz, en esta banda están incluidas las frecuencias de las líneas de energía de c.a. (50 y 60 Hz), como también las frecuencias bajas de captación del oído humano (20 a 300 Hz).

- Frecuencias de voz (VF): Son aquellas en el intervalo de 300 a 3KHz, donde este es el rango de frecuencias para la voz humana.
- Frecuencias muy bajas (VLF): Ubicadas en el rango de 3KHz a 30KHz, incluye la parte alta de la percepción del oído humano (300Hz – 20KHz), utilizadas para las comunicaciones de gobierno y militares, un ejemplo es la comunicación con submarinos y radionavegación.
- Frecuencias Bajas (LF): Las ondas en LF están entre 30 y 300 KHz y son utilizadas principalmente para la navegación aeronáutica y marítima.
- Frecuencias medias (MF): Las ondas en MF se encuentran entre 300 y 3000KHz utilizándose principalmente para la radiodifusión en AM (535 a 1705 KHz) y comunicaciones marítimas y aeronáuticas.
- Frecuencias altas (HF): Las ondas de HF están entre los 3 y 30 MHz, donde la aplicación de estas frecuencias se usan para varios tipos de comunicaciones, siendo las más destacadas la radio afición, la radiodifusión, comunicaciones aeronáuticas y marítimas.
- Frecuencias muy altas (VHF): Estas ondas se encuentran entre los 30 MHz y 300MHz, y se ocupan para muchos servicios como son la transmisión de televisión (canales del 2 al 13), radio FM (88 a 108 MHz), comunicación móvil y fija, telefonía inalámbrica analógica, comunicaciones marítimas y aeronáuticas y radio aficionados.
- Frecuencias ultra altas (UHF): Ondas con frecuencias en el rango de 300 MHz y 3000MHz, usadas principalmente para la emisión de televisión (canales del 14 al 69), radar, servicios fijos y móviles de comunicación como los servicios de comunicación personal y la telefonía celular. En esta banda están incluidas parcialmente las microondas pues estas van de 1 GHz a 30 GHz; las UHF se usan para las redes inalámbricas recientes como son las redes inalámbricas de área local (WLAN-802.11b/g), y últimamente se empiezan a utilizar para redes de área personal (WPAN-Bluetooth/802.15.1-Zigbee/802.15.4) y redes de área metropolitana (WMAN-WIMAX/802.16), que emplean las bandas de uso libre que COFETEL tiene disponible para esta banda de frecuencias.
- Frecuencias súper altas (SHF): Ondas dentro del rango de 3 y 30GHz, empleadas principalmente en comunicación por satélite, comunicaciones inalámbricas fijas y móviles, servicios de radiolocalización y algunas redes inalámbricas recientes WWAN (WIMAX/802.16), WLAN (802.11a) y WPAN (UWB/802.15.3) .
- Frecuencias extremadamente altas (EHF): Las ondas de EHF se ubican entre 30 y 300GHz y son empleadas para las comunicaciones por satélite y por radar principalmente; empiezan a usarse para comunicaciones de redes de última generación.

2.2 Redes inalámbricas

Actualmente más y mejores redes inalámbricas se están desarrollando debido a la posibilidad que brindan de comunicarse y acceder a aplicaciones e información sin importar el lugar en el que se esté, es decir, tener libertad de movimiento sin estar limitado por un cable. Además este tipo de redes se pueden implementar de manera relativamente fácil, en menor tiempo y a un menor costo en comparación con las redes cableadas, ya que la tecnología así lo permite, pues no es necesario considerar la manera de cablear un sistema para llevar a cabo una comunicación. Ya que usamos el término de red inalámbrica es necesario definir este concepto; una red inalámbrica es un conjunto de sistemas o terminales que posibilitan que información se comuniquen entre ellas utilizando como medio a ondas electromagnéticas que viajan a través del aire o el vacío, para ser interpretada de manera remota en cierto momento por un humano o una máquina. Dependiendo de su aplicación las redes manejan tecnologías con diversas velocidades de transmisión de información, las cuales se miden en bits por segundo; así entonces se pueden clasificar dependiendo de su velocidad de transmisión por: banda ultra ancha, banda ancha, banda media y banda estrecha; que implica una mayor o menor velocidad respectivamente. Ver figura 2.1

Denominación	Velocidad de transmisión
Banda ultra ancha	>100 Mbps
Banda ancha	2 – 100 Mbps
Banda media	100 – 2000 Kbps
Banda estrecha	10 – 100 Kbps

Figura 2.1 Clasificación de las tecnologías según su velocidad

2.2.1 Tipos de redes inalámbricas

Considerando que las ondas viajan a través del espacio, las redes inalámbricas se clasifican por el área física que son capaces de cubrir, siendo su clasificación la siguiente:

- Redes de área amplia (WWAN)
- Redes de área metropolitana (WMAN)
- Redes de área local (WLAN)
- Redes de área personal (WPAN)

Así bien las redes inalámbricas son usualmente una extensión de las redes cableadas, aunque no siempre, esto dependerá de la aplicación a la cual sea enfocada dicha red buscando satisfacer las diversas necesidades de quienes las usan. Las redes inalámbricas que actualmente se están utilizando se mencionan en la figura 2.2, y son las que se considerarán para este capítulo, en su mayoría están enfocadas a la movilidad y capacidad bidireccional, brindando así cada vez mejores características y mayores campos de aplicación.

Tipo	Cobertura	Velocidad de transmisión	Estándar/Tecnología	Aplicaciones
WWAN	Desde un país o continente hasta a nivel mundial	Baja a media	2G (GSM), 3G (UMTS).	Telefonía celular, comunicación de voz, datos y video.
WMAN	Ciudad	Alta	Propietaria (LMDS, MMDS), IEEE 802.16 (WIMAX).	Principalmente redes fijas inalámbricas entre casas y negocios y acceso a internet.
WLAN	Dentro de un edificio o campus	Alta	802.11 a/b/g (Wi-Fi), HiperLAN2.	Extensión de las redes LAN para brindar movilidad.
WPAN	Dentro del alcance de una persona o una casa	Baja a alta (según sea el caso)	802.15.1 (Bluetooth), 802.15.3 (UWB), 802.15.4 (Zigbee).	Reemplazo de cables para interconexión, redes de sensores.

Figura 2.2 Características de redes inalámbricas actuales

2.2.1.1 Redes de área amplia WWANs

Las redes inalámbricas de área amplia son las que cuentan con el mayor alcance de todos los tipos de redes, estas ofrecen aplicaciones móviles de gran cobertura, como puede ser un país, un continente o el planeta entero.

2.2.1.1.1 Telefonía celular

El sistema de telefonía móvil o celular se considera el ejemplo más representativo de este tipo de redes ya que puede transferir datos entre terminales o comunicar a personas aunque se encuentren a cientos o miles de kilómetros de distancia. El desplegar y mantener una infraestructura tal magnitud es muy costoso, algo que para los operadores de telecomunicaciones es posible, así entonces ellos son quienes proporcionan conectividad de largo alcance a sus usuarios por una tarifa establecida.

La extensa cobertura de esta red se ha logrado debido a la cooperación entre varias compañías de telecomunicaciones, la cuales se han puesto de acuerdo para ofrecer el servicio a cualquier usuario que así lo desee aun cuando este no se encuentre en la zona geográfica donde está registrado (roaming), ofreciendo en consecuencia conectividad continua para comunicación móvil de datos.

Actualmente se encuentran desplegadas redes de telefonía celular de segunda (2G) y tercera generación (3G) donde la tendencia de los proveedores del servicio será a emigrar gradualmente a la tercera generación de telefonía celular, lo cual tomara varios años.

Segunda generación

Los sistemas de segunda generación de telefonía celular actualmente cuentan con más de 2 billones de usuarios alrededor del mundo [Wireless communication, the future; Webb; pp. 15.], que se reparten entre las tecnologías de GSM, CdmaOne y D-AMPS, donde GSM cuenta con la mayoría de los usuarios. El sistema GSM trabaja bajo un esquema digital para voz y transferencia de datos. Con las mejoras que se han hecho a este sistema se pueden transmitir paquetes de datos a una mayor velocidad (GPRS-115Kbps, EDGE-384Kbps), ofrecer servicio de mensajes cortos (SMS), servicio de mensajes multimedia (MMS), llamadas en grupo y acceso a internet mediante el protocolo de aplicación inalámbrica (WAP).

Tercera generación

La tercera generación ya está siendo implementada y poco a poco se irá utilizando en vez de la tecnología 2G, en parte debido a las mayores prestaciones que presenta, y en gran medida a la situación de que los operadores empujarán a los usuarios a emigrar a 3G al adquirir un equipo nuevo aun sin que requieran usar los servicios que esta brinda. Entre las prestaciones que muestra están: un menor costo por llamada en comparación con 2G, conexión continua a la red, equipos más atractivos, acceso a banda ancha con velocidades de transmisión de 2Mbps para usuarios que permanecen fijos en un lugar o que van caminando, y 384 Kbps para los que van en un vehículo en movimiento, también brinda el servicio de videostreaming y videoconferencia, servicios multimedia, internet de alta velocidad.

Aun con todas estas ventajas para las redes WWAN, existe una desventaja: el no tener buena cobertura dentro de ciertas instalaciones, como pueden ser oficinas, aeropuertos, centros de convención, algunas casas, el metro, etc., ya que la señal de la telefonía celular pierde fuerza al penetrar ciertas construcciones. Estas redes son pensadas para trabajar en entornos "outdoor", es decir afuera de instalaciones, pues resulta costoso implementarlo dentro de instalaciones donde no siempre existe un costo-beneficio adecuado.

2.2.1.2 Redes de área metropolitana WMANs

Las redes inalámbricas de este tipo proporcionan comunicaciones inalámbricas dentro de un área metropolitana como puede ser una ciudad, un municipio, o un campus universitario. En la mayoría de los casos se utilizan para comunicaciones fijas, pero algunas tecnologías permiten las comunicaciones móviles. Estas redes se pueden ocupar como una alternativa al uso de las comunicaciones de banda ancha por fibra óptica, cable o línea telefónica las cuales soportan servicios de transmisión de voz, datos y video. Las velocidades de transmisión que manejan algunas redes WMAN pueden ir hasta los 155 Mbps (Comunicaciones inalámbricas, David Roldán).

Las redes WMAN se pueden usar para interconectar redes de área local (LAN) que forman parte de una empresa o institución a distancias considerables, así como también para brindar servicios de telefonía, televisión o internet de banda ancha a múltiples y diferentes tipos de usuarios. Las tres tecnologías que se usan son:

2.2.1.2.1 LMDS (Local Multipoint Distribution Service)

Es una tecnología de comunicación punto a multipunto de banda ancha aplicada principalmente para entornos corporativos, que puede brindar servicios fijos de videoconferencia, video bajo demanda, interconexión de redes LAN, telefonía, e internet. Estas redes operan en la banda de las microondas entre los 26 y 29 GHz para distancias regularmente de hasta 8 Km entre la estación base y las terminales de los usuarios. Debido a las frecuencias en que operan estas redes, las señales pierden energía al atravesar obstáculos por lo cual se requiere línea de vista entre las interfaces de radio, además de que la lluvia también merma su rendimiento.

2.2.1.2.2 MMDS (Multipoint Microwave Distribution Service)

Son redes de banda ancha similares a las LMDS, con la diferencia que operan a frecuencias de microondas menores (2 a 3 GHz) posibilitando una mayor área de cobertura de hasta 30 Km, aunque requieren para su buen funcionamiento línea de vista entre antenas, pues también sufren de atenuación de señal por obstáculos o condiciones climáticas, claro en menor grado que en los sistemas LMDS. Su principal uso es en entornos residenciales aunque también corporativos. Esta tecnología es una alternativa para la televisión por cable donde no es posible desplegar redes cableadas ya sea por cuestiones costo-beneficio o por la localización destino.

2.2.1.2.3 WiMAX (Worldwide Interoperability for Microwave Access)

Representa un estándar de última generación para las redes WMAN posibilitando la interoperabilidad entre equipos con la certificación WiMAX. Las redes WiMAX son redes para comunicaciones fijas y móviles de banda ancha que pueden operar bajo esquemas punto a multipunto o bien de red mallada, con un área de cobertura de hasta 50 Km a velocidades de transmisión de hasta 75 Mbps (ver figura 2.3). Estas redes presentan una gran ventaja al no requerir una línea de vista entre la estación base y la terminal de usuario para brindar conectividad, donde se pueden utilizar frecuencias que son de uso libre (5.8GHz) o que requieran licencia (2.5 y 3.5 GHz). Las redes WiMAX pueden coexistir con las redes Wi-Fi pues trabajan a diferentes frecuencias. Estas redes son una alternativa eficiente a las redes de acceso por cable a internet, como lo son los sistemas cable-modem o DSL (Digital Subscriber Line), por lo que de una manera fácil y económica puede habilitar miles si no es que hasta millones de accesos a internet, ya sea de manera fija o móvil.

Estándar	Frecuencia	Velocidad	Rango
WiMAX fijo (802.16-2004)	2-11 GHz (3.5 GHz en Europa)	75 Mbps	10 km
WiMAX móvil (802.16e)	2-6 GHz	30 Mbps	3,5 km

Figura 2.3 Características básicas de WiMAX

2.2.1.3 Redes de área local WLANs

Las redes inalámbricas de área local brindan acceso a servicios de banda ancha a dispositivos móviles para un alcance de hasta varios cientos de metros de manera omnidireccional y operan en las bandas de uso libre ISM. Estas redes se utilizan principalmente en entornos como oficinas, fabricas y casas para brindar conexión a internet de diferentes tipos de dispositivos de comunicación como son las computadoras portátiles (Laptop), computadoras personales (PC), asistentes digitales personales (PDA) y últimamente teléfonos celulares. Las redes WLAN pueden trabajar bajo dos esquemas: el primero y más común es el tipo infraestructura que usa una o varias estaciones base (roaming), llamadas puntos de acceso que atienden la conexión de varias terminales. Los puntos de acceso están conectados a las redes de área local cableadas y gestionan tanto la información recibida como la transmitida a las terminales. El otro esquema que es menos usado y no requiere puntos de acceso, pues lleva a cabo una comunicación de igual a igual (peer to peer) entre terminales en una topología de red ad-hoc; pueden participar los dispositivos que se encuentren dentro de sus respectivas áreas de cobertura.

2.2.1.3.1 Wi-Fi

Las redes WLAN trabajan principalmente bajo el estándar Wi-Fi que al ser un estándar garantiza la interoperabilidad entre redes iguales. Wi-Fi engloba el conjunto de variantes del estándar 802.11, dichas variantes para la conexión son:

- 11a: versión que trabaja en la banda de 5GHz a una velocidad máxima de 54Mbps con rangos de hasta 30 metros usando modulación OFDM. Esta versión no es compatible con las variantes 11b y 11g.
- 11b: este estándar opera en la banda de 2.4 GHz con una velocidad de transmisión máxima de 11 Mbps y un alcance de hasta 100 m, mayor que el logrado por 802.11a; esto debido en parte a la menor frecuencia en que opera. Utiliza una modulación por dispersión de espectro de secuencia directa DSSS.
- 11g: este estándar es una variante de alta velocidad del 11b, trabajando en la banda de 2.4 GHz a una tasa máxima de transferencia de 54 Mbps empleando OFDM. Es compatible con la versión 11b aunque para esto tiene que trabajar a 11 Mbps.

2.2.1.3.2 HIPERLAN

Cabe mencionar que existe otro estándar para redes WLAN llamado HiperLAN2 (High Performance Radio LAN2) que es el equivalente europeo del 802.11a y es definido por la ETSI (European Telecommunications Standards Institute). Trabaja en la banda de los 5GHz a una velocidad de 54 Mbps. HiperLAN2 tiene la capacidad de ser una interfaz con diferentes tipos de redes de alta velocidad como son las redes de telefonía celular 3G, redes ATM, y redes basadas en el protocolo IP (Internet Protocol). La realidad es que este estándar tiende a dejar de usarse debido a la gran penetración y el apoyo que se está brindando al contrincante Wi-Fi/802.11.

2.2.1.4 Redes de área personal WPANs

Una red de área personal es una red inalámbrica de corto alcance que interconecta a dispositivos dentro del espacio operacional de una persona, siendo que este espacio se puede considerar fijo o móvil. Este tipo de redes elimina el uso de cables para transferir información entre dispositivos relativamente cercanos que un individuo utiliza para llevar a cabo una comunicación, facilitando su comodidad y desplazamiento.

En la IEEE, el grupo de trabajo 802.15 es el encargado de desarrollar los estándares bajo consenso para redes inalámbricas de área personal o corto alcance. Así estas redes WPAN están dirigidas al funcionamiento en red de dispositivos electrónicos portátiles y móviles como son computadoras personales (PCs) y portátiles (Laptops), Asistentes Digitales Personales (PDAs), periféricos, teléfonos celulares, buscapersonas, y electrónica de consumo entre otros, permitiendo que estos puedan comunicarse e interoperar entre sí. Su tecnología debe usar de manera eficiente la energía pues estos dispositivos en su mayoría son alimentados por baterías.

Para este tipo de redes hay un gran abanico de aplicaciones pues muchas actividades cotidianas se encuentran dentro de un entorno de corta distancia (ver figura 2.4).

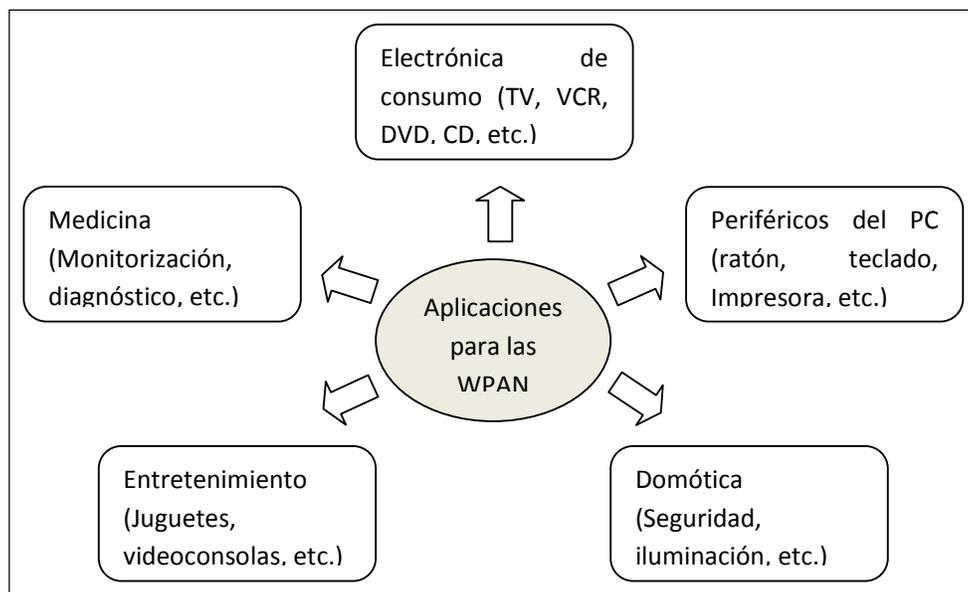


Figura 2.4 Aplicaciones para las WPAN

Actualmente existen varias aplicaciones usando estas redes y su uso se irá incrementando con el paso del tiempo al ir confeccionando más aplicaciones útiles dentro de un entorno personal.

A partir de las necesidades de comunicación, el grupo de trabajo IEEE 802.15 creó tres subgrupos de trabajo para definir los estándares para las redes WPAN:

Implementación de una red inalámbrica de comunicación empleando el estándar Zigbee/802.15.4.

- 802.15.1: Este grupo de trabajo definió en el año 2002 el estándar para redes WPAN basado en las especificaciones del SIG (Special Interest Group) de Bluetooth enfocado a la conectividad de dispositivos portátiles personales.
- 802.15.3: Es el grupo encargado de redactar y publicar un estándar de alta velocidad para WPANs con tasas de transmisión iguales o mayores a 20 Mbps, con dispositivos que consuman poca energía, sean de bajo costo y para aplicaciones multimedia.
- 802.15.4: Grupo creado para investigar desarrollar y definir un estándar para aplicaciones con bajas tasas de transmisión de datos, de muy bajo consumo de energía y baja complejidad que permita que la vida útil de las pilas se prolongue hasta por meses o inclusive años. Sus aplicaciones potenciales son sensores, control y automatización, tarjetas de identificación inteligentes, y juguetes interactivos entre otras. Dicho estándar ha sido publicado bajo el nombre del grupo, 802.15.4.

Con la creación de estos grupos de trabajo se enfocaron los esfuerzos para la realización de estándares mundiales que han definido en consecuencia tres tipos de redes WPAN cubriendo las diferentes necesidades de comunicación para aplicaciones específicas, tomando en cuenta la velocidad de transmisión (capacidad de transferencia de datos), consumo de energía y calidad de servicio (QoS).

Las redes WPAN para altas tasas de transmisión (802.15.3) diseñadas para aplicaciones multimedia que requieren altos niveles de QoS; WPANs con velocidades de transmisión medias (802.15.1) para aplicaciones en dispositivos portátiles personales, con QoS apropiados para la voz principalmente; y por ultimo redes WPAN para aplicaciones que requieran bajas tasas de transmisión (802.15.4) para aplicaciones de control y monitoreo.

Sobre estos estándares se desarrollan actualmente 3 tecnologías de aplicación para redes WPAN que son:

- Bluetooth sobre el estándar 802.15.1 promovida por el SIG de Bluetooth.
- UWB sobre el estándar 802.15.3 promovida por Wimedia Alliance.¹
- Y Zigbee sobre el estándar 802.15.4 promovida por Zigbee Alliance.

Las cuales están en constante desarrollo mejorando sus características de operación.

¹Los estándares que actualmente aplican a nivel mundial para la tecnología UWB son [ECMA-368](#) y [ECMA-369](#) aprobados por ECMA (European Computer Manufacturers Association) International y son basados en la plataforma de radio UWB de WiMedia.

2.2.1.4.1 Bluetooth

Bluetooth es una tecnología inalámbrica para comunicaciones de corto alcance, enfocado a aplicaciones de conectividad personal para una amplia gama de dispositivos electrónicos. Sus principales características se basan en el pequeño factor de forma del radio, bajo consumo, bajo costo, funciones de seguridad, robustez, fácil uso y habilidades para creación de redes ad-hoc.

Actualmente cuenta con cuatro versiones (v1.1, v1.2, v2.0, v2.1), las cuales utilizan la técnica de espectro ensanchado por salto de frecuencia (FHSS)² para transmitir sus datos, con velocidades de hasta 1 Mbps (versión 1.2) o hasta 3 Mbps (versión v.2), catalogando a Bluetooth como tecnología de banda media o banda ancha respectivamente. Bluetooth opera en la banda de frecuencias ISM a 2.4 GHz, y tiene un alcance de hasta 100 m dependiendo de la potencia de transmisión³, su principal aplicación es la sustitución de cables para transferencia de voz y datos.

Los dispositivos Bluetooth pueden crear entre sí redes de comunicación de manera temporal, a las cuales se les denomina piconets, y se forman con un máximo de 8 dispositivos (un maestro y hasta 7 esclavos activos). Sus comunicaciones pueden ser punto a punto (cuando solo dos dispositivos intervienen en la red, un maestro y un esclavo), o punto a multipunto (cuando más de un esclavo está asociado a la red), en donde el nodo maestro es el encargado de sincronizar y gestionar las comunicaciones de sus esclavos. Toda piconet tiene una secuencia de salto distinta a las demás por lo que pueden existir varias piconets en un mismo entorno o tener un solapamiento entre ellas, creando entonces una scatternet. (Ver figura 2.5)

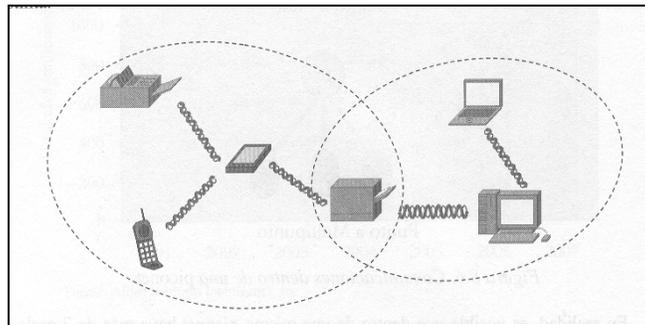


Figura 2.5 Esquema de una scatternet en Bluetooth

² FHSS. Bajo este método de espectro esparcido, los dispositivos transmiten por un pequeño periodo de tiempo en una frecuencia, periodo referido como dwell time, saltando después a otra frecuencia diferente para continuar la comunicación. El algoritmo de salto de frecuencia es conocido por cada dispositivo de la red, permitiendo que cada uno ajuste su transmisor o receptor de acuerdo al modo de operación.

³ Potencias de transmisión: 1mW (0 dBm) ~ 10m, 100mW (20 dBm) ~ 100 m.

Implementación de una red inalámbrica de comunicación empleando el estándar Zigbee/802.15.4.

Como se menciono antes, una piconet tiene un límite de dispositivos esclavos, pero en realidad pueden ser mas de 7, la condición es de que solo 7 pueden estar activos simultáneamente a los cuales se les asigna una dirección AMA (Active Member Address) de 3 bits, pero puede haber 256 dispositivos más que están de igual forma sincronizados pero inactivos a la espera de entrar en funcionamiento, a estos se les denomina esclavos aparcados y al estar asociados en la red reciben una dirección PMA (Parked Member Address) de 8 bits.

Cada piconet cuenta con una secuencia de salto específica para su comunicación definida por el dispositivo maestro y cada dispositivo cuenta con un transceptor que transmite y recibe en una frecuencia centrada en los 2.45 GHz, con un ancho de banda de 1 MHz que puede ir saltando de canal en canal según su secuencia en una banda de frecuencias que va desde los 2.402 GHz hasta 2.480 GHz (ver figura 2.6).

	Frecuencia (GHz)
Banda de guarda	2.400
Canal 0	2.402
Canal 1	2.403
Canal 2	2.404
...	...
...	...
Canal 77	4.479
Canal 78	2.480
Banda de guarda	2.481 GHz + 3.5MHz

Figura 2.6 Canalización física de Bluetooth

2.2.1.4.2 UWB (Ultra Wide Band)

UWB es una tecnología de banda ultra ancha, bajo consumo de potencia y alta calidad de servicio (QoS) enfocada a aplicaciones multimedia de distancia relativamente corta, como puede ser la distribución de audio y video que tiene requerimientos de al menos 20 Mbps de velocidad de transmisión.

Estas redes trabajan en bandas diferentes de uso libre (ISM) y pueden crear redes pequeñas con dispositivos a su alrededor bajo un esquema de red tipo ad-hoc, donde uno de estos dispositivos asume el papel de controlador o PNC, que es el que mantiene la sincronización, el control de admisión de nuevos dispositivos y de la asignación de los recursos de la piconet; o sea es el que se encarga de gestionar la red como tal.

Estas redes proporcionan QoS adecuados para audio y video además de diferentes esquemas de seguridad (sin seguridad, lista de control de acceso, autenticación criptográfica) y selección de canal dinámico. Una de las bandas en las que operan estas redes es la de 2.4 GHz con canales de ancho de banda de 15 MHz, y cinco posibles velocidades de transmisión de 11 Mbps, 22 Mbps, 33 Mbps, 44 Mbps y 55 Mbps con alcance de hasta 55 m.

La FCC liberó el uso de frecuencias en la banda de 3.1 – 10.6 GHz para el uso de UWB con canales de un ancho de banda con al menos 500 MHz tal y como lo muestra la figura 2.7, con ciertas restricciones en potencia.

Los dispositivos operando con UWB pueden trabajar en amplias bandas de frecuencia mientras su potencia sean tan bajas que no sean percibidas por las tecnologías (redes) de banda mas angosta como 802.11 a/b/g, lo cual lleva a que las redes UWB sean redes de alta velocidad pero de corto alcance.

Las UWB brindan una cobertura de hasta 20 m cuando los dispositivos se encuentran dentro de edificios, brindando tasas de 50 Mbps, y tasas mayores de hasta 1 Gbps a distancias más cortas.

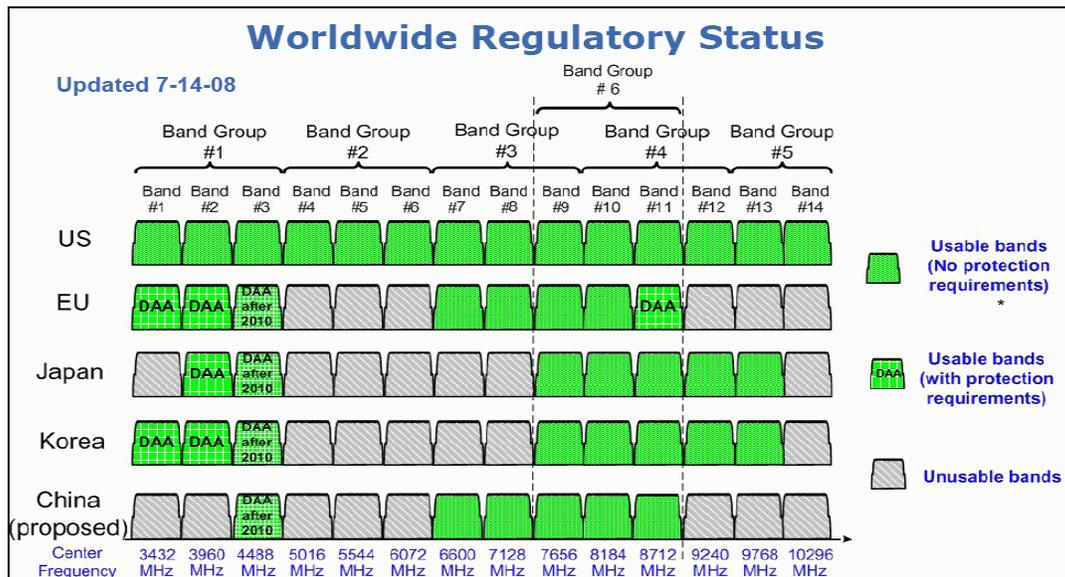


Figura 2.7 Bandas de frecuencia asignadas para UWB

La aplicaciones que tiene esta tecnología son la transmisión en tiempo real de audio, video e imágenes de alta calidad entre dispositivos, como son la distribución de señal de HDTV para uno o varios monitores de audio y video, electrónica de consumo y teléfonos celulares, también se aplica en sistemas de localización de gran precisión ya que pueden medir su posición relativa con respecto a otros transceptores, y radares de corto alcance.

2.2.1.4.3 Zigbee

Zigbee es una tecnología inalámbrica de corto alcance y bajo costo diseñada para aplicaciones de monitoreo y control⁴ que funciona sobre el estándar IEEE 802.15.4 que cuenta con bajas tasas de transmisión de datos y un consumo de energía extremadamente bajo. Esta tecnología tiene la ventaja de ofrecer una certificación mundial que garantiza la interoperabilidad entre dispositivos de diferentes fabricantes. Por la naturaleza de aplicación los dispositivos Zigbee son de dimensiones reducidas (ver figura 2.8), además de que pueden mantenerse en un estado de reposo mientras no reciben o transmiten datos, lo cual posibilita que la alimentación de los dispositivos Zigbee sea por medio de pilas que pueden prolongar su funcionamiento por varios meses o años, dependiendo de su patrón de tráfico de datos.

La tecnología Zigbee ocupa el método de espectro esparcido por secuencia directa (DSSS⁵) para su transmisión y utiliza tres bandas de frecuencias ISM para su operación; la primera de 868-868.6 MHz utilizada en Europa, con un solo canal y una velocidad de 20 Kbps, la segunda de 902-928 MHz usada en América, con 10 canales y una velocidad de transmisión de 40 Kbps, y la tercera de 2400 – 2483.5 MHz utilizada en todo el mundo con 16 canales y una tasa de transmisión de 250 Kbps.



Figura 2.8 Módulos Zigbee de diferentes fabricantes

⁴ Las necesidades de transferencia de datos para aplicaciones de monitoreo y control varían entre las decenas y centenas de kilobits por segundo.

⁵ DSSS Representa otra técnica espectro esparcido, desarrollada por los militares para evitar el jamming. Bajo DSSS un código esparcido de 0s y 1s es aplicado a cada bit para esparcir la transmisión. En el receptor una regla de mayoría es aplicada, es decir, si el código esparcido es de 5 bits y los bits recibidos son 10110, porque tres bits son 1, entonces el receptor asumirá que el bit correcto es un 1.

Los dispositivos Zigbee pueden operar tanto en ambientes Indoor/Urbanos así como en ambientes Outdoor logrando una muy buena cobertura, que puede variar desde unas decenas de metros hasta cerca de 1500 m dependiendo de la potencia de transmisión⁶, además una red Zigbee puede estar formada por hasta 65 000 nodos ya que cuenta con un direccionamiento de 16 bits, lo cual resulta muy útil si se utiliza en redes de sensores.

Los dispositivos Zigbee ofrecen confiabilidad en sus comunicaciones ya que cuentan con mecanismos que garantizan la entrega de los paquetes de datos mediante tramas de reconocimiento (acknowledgments) y reenvíos automáticos si no se concretara la transmisión exitosamente.

Las redes Zigbee fueron diseñadas con características auto-organización⁷ (self-organizing) y auto-sanación⁸ (self-healing) para funcionar adecuadamente sin la necesidad de intervención humana. Zigbee también considera la seguridad en sus transmisiones ya que emplea el método de cifrado AES 128-bit, métodos de autenticación y cifrado así como claves de red y enlace.

Las topologías soportadas por para las redes Zigbee son tres básicamente: estrella, árbol y malla, y los tipos de dispositivos que forman la red son tres (ver figura 2.9 y 2.10):

- **Coordinador Zigbee (ZC):** inicia la formación de la red, solo existe uno por red PAN, y mantiene en todo momento el control del sistema. Es el más sofisticado de los tipos de dispositivos, requiere más memoria y capacidad de computación que los otros, permite la asociación de otros dispositivos a él, se puede comunicar con cualquier dispositivo de la red, puede actuar como enrutador una vez que se formó la red, puede ser origen o destino de los mensajes, funciona en cualquier topología y de preferencia debe ser alimentado por la línea de energía eléctrica, no por pilas.
- **Enrutador Zigbee (ZR):** Es un elemento opcional que puede o no aparecer en una red Zigbee, requiere una capacidad media de memoria y computación, puede haber varios ZR en la red, participa en el enrutamiento de mensajes por salto múltiple (multihop), se puede asociar con un ZC o con otro ZR asociado previamente y puede permitir la asociación de otros dispositivos a él. Puede ser origen o destino de los mensajes, puede actuar como dispositivo final Zigbee y debe ser alimentado por la línea eléctrica de preferencia.

⁶ Alcances máximos para potencias de transmisión de 1 mW (0dBm) en Indoor hasta 30 m, y en Outdoor hasta 100 m, y a 100 mW (20 dBm) en Indoor hasta 100 m, y en Outdoor hasta 1500 m. Referencia Manual XBee Zigbee.

⁷ *Auto-organización: capacidad de los nodos de la red para detectar la presencia de otros nodos y organizarse de forma estructurada sin la intervención humana.

⁸ **Auto-sanación: Capacidad de la red para detectar y recuperarse de fallas que aparecen ya sea en los nodos de la red o en los enlaces de comunicación sin intervención humana.

- **Dispositivo Final Zigbee (ZED):** También es un componente opcional de la red que cuenta con capacidad y funcionalidad limitadas, siendo los dispositivos de red más simples y de bajo costo. Puede haber varios ZED en una PAN, no tienen capacidad de enrutamiento, se pueden asociar solo a un ZC o un ZR pero no permiten que otro se les asocie, pueden ser origen o destino de los mensajes. Estos dispositivos son los sensores/actuadores de la red y pueden ser alimentados por pilas.

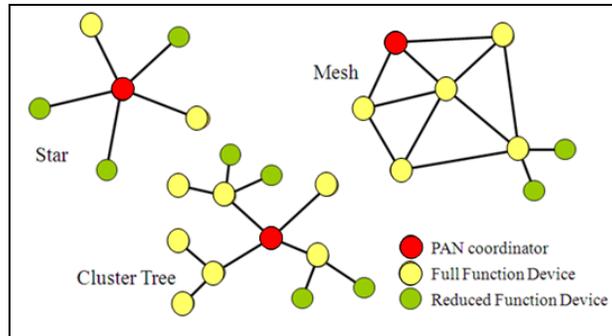


Figura 2.9 Topologías de red en Zigbee

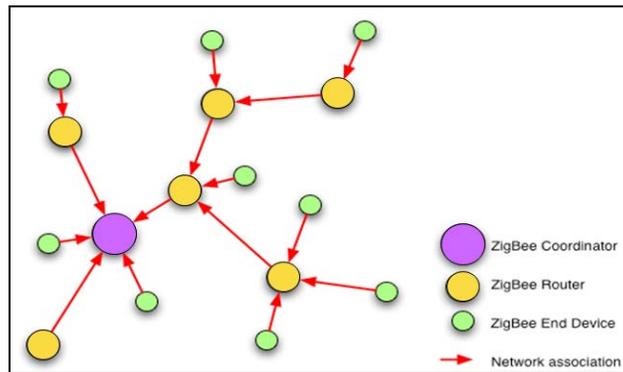


Figura 2.10 Estructura en la red Zigbee

2.2.1.4.4 WSN (Wireless Sensor Network)

Las redes de sensores están formadas por un conjunto de nodos inalámbricos de corto alcance distribuidos en una determinada área que tienen la capacidad de monitorear y controlar características del entorno que les rodea. Esto es posible pues dichos nodos están equipados con uno o más sensores, que se comunican con un microcontrolador que procesa y/o almacena esta información así como la recibida por medio del aire a través de la antena del transceptor de RF que contienen, con el objeto de ejecutar una acción en su entorno usando uno o varios actuadores. Cada nodo está alimentado por una fuente de energía que normalmente es una batería.

Las posibles aplicaciones de las redes de sensores inalámbricas son muchas y muy variadas con la gran ventaja de ofrecer información en tiempo real de lo que está ocurriendo alrededor

de sus nodos y ejecutar acciones de manera remota si es necesario. Entre las aplicaciones más importantes están: sensores ambientales, seguridad, control de tráfico, medicina, domótica⁹ e inmótica¹⁰.

Una red de WSN, en general, se divide en tres niveles funcionales, como muestra la figura en la figura 2.11.

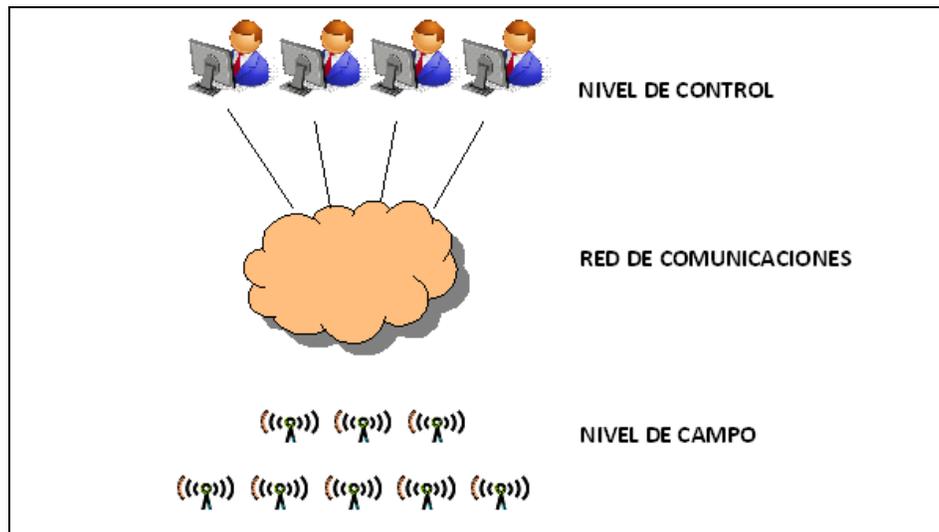


Figura 2.11 Arquitectura de una red WSN

El primero de ellos es el nivel de campo que está formado por el conjunto de sensores y actuadores que interactúan directamente con el entorno, mientras los sensores se encargan de observar un determinado fenómeno, los actuadores reciben órdenes y ejecutan acciones que son el resultado de procesar la información recogida por los sensores o bien resultado de una operación de control de manera remota.

Sobre el nivel de campo encontramos la red de comunicaciones que tiene como objetivo establecer un canal entre el nivel de campo y el nivel de control. Los sistemas de comunicación de los nodos forman la red de comunicaciones y se establecen en tres jerarquías:

- Puntos finales: Constituyen la interfaz con los sensores y actuadores, y son los encargados de convertir la información recogida por el sensor a una onda de radio que será transmitida por su antena a su destino, y que de igual manera recogerá la onda

⁹ Domótica es el conjunto de sistemas capaces de automatizar una vivienda, aportando servicios de gestión energética, seguridad, bienestar y comunicación, bajo redes interiores y exteriores de comunicación, cableadas o inalámbricas.

¹⁰ La inmótica se refiere al uso de sistemas de gestión técnica automatizada en las instalaciones de edificios de uso terciario o industrial (oficinas, edificios corporativos, hoteleros, empresariales y similares), con el objetivo de reducir el consumo de energía, aumentar el confort y la seguridad de los mismos.

electromagnética dirigida a él y la transformará para entregar una señal que interpretará el actuador para ejecutar una orden.

- Enrutadores: encaminan las señales recibidas por y para los diferentes puntos finales, posibilitando el establecimiento de diferentes rutas en caso de que alguna de estas no se pueda emplear.
- Pasarelas: interactúan con una red corporativa de datos, que hace que la WSN pueda tratarse como un segmento más de una red LAN

Por último está el nivel de control que está formado por uno o varios centros de control y monitorización que explotan la información proveniente de los sensores, con el fin de ejecutar órdenes que marquen el comportamiento de los actuadores, y almacenar datos para la generación de reportes y estadísticas si fuera necesario.

2.3 Comparación de tecnologías de comunicación inalámbrica por RF y elección para el uso en el monitoreo y control de luminarias

Como se vio en las secciones anteriores existe una variedad de tecnologías en redes inalámbricas, las cuales tienen características diferentes que satisfacen necesidades de comunicación distintas. Por lo cual a la hora de elegir una tecnología de entre todas las demás, es necesario conocer sus características de operación, ya que solo así sabremos si cubre los requerimientos de comunicación y funcionamiento para nuestra aplicación en específico.

Las características a considerar son:

- Velocidad de transmisión,
- Alcance máximo,
- Frecuencia de trabajo
- y costo tanto del equipo como de su uso.

La figura 2.12 muestra las características más importantes para las diferentes tecnologías de redes inalámbricas mencionadas en este capítulo.

Por otra parte hay ciertas aplicaciones donde el consumo de batería y en consecuencia la duración de la batería en los dispositivos es una característica importante a considerar, ya que su uso puede presentarse en situaciones que requieran de cierta movilidad, no exista la posibilidad de recargar su batería o bien no puedan ser alimentados por la línea eléctrica. En aplicaciones de este tipo se encuentran dispositivos de redes WPAN, WLAN y WWAN. En la figura 2.14 se muestran estas características.

Tipo de red	Tecnología/ Estándar	Velocidad de tx	Alcance máximo	Rango de frecuencias	Modulación	Aplicación	Costo dispositivos	Costo de datos
WWAN	Celular 2G	115 – 384 Kbps	Varios Km	850/900/1800/1900 MHz	GMSK	Comunicaciones de voz y datos	Más de 20 dlls	Si (mensualidad)
	Celular 3G	384-2000 Kbps		850/1900/2100 MHz		Comunicaciones de voz, datos, video e internet		
WMAN	LMDS	40 Mbps	8 km	26-29, 22-42 GHz	QAM	Voz datos y video, interconexión de LANs, telefonía, internet	-	Libre
	MMDS	2 Mbps	30 km	2-3GHz	QAM	Distribución de TV	-	Libre
	WIMAX	30-75 Mbps	50 km	2-11 GHz	OFDM	Internet móvil y fijo	25-40 dlls	Libre
WLAN	802.11a	54 Mbps	30 m	5 GHz	OFDM	Internet extensión de LANs	20 dlls	Libre
	802.11b	11 Mbps	100 m	2.4 GHz	DSSS			Libre
	802.11g	54 Mbps	100 m	2.4 GHz	OFDM			Libre
	HIPERLAN2	54 Mbps	100 m	5 GHz	OFDM			-
WPAN	BLUETOOTH	1-3 Mbps	100 m	2.4 GHz	AFHSS	Conectividad de dispositivos portátiles, transferencia de voz y datos.	3 dlls	Libre
	UWB	11-55 Mbps, 50 Mbps-1 Gbps	55 m, 20 m	2.4, 3.1-10.6 GHz	OFDM	Multimedia	5-10 dlls	Libre
	ZIGBEE	20/40 Kbps, 250 Kbps	30 a 1500 m	868/915 MHz, 2.4 GHz	DSSS	Monitoreo y control	1-3 dlls,	Libre

Figura 2.12 Características principales de las tecnologías de comunicación inalámbrica por RF

Tecnología	Duración de batería
2G y 3G	Horas
WLAN 802.11	Horas
Bluetooth	Horas
UWB	Horas a días
Zigbee	Semanas a meses

Figura 2.13 Tecnologías inalámbricas que usan batería¹¹

Por lo tanto analizando todas las características de las diferentes tecnologías inalámbricas antes mencionadas, el tipo de red más adecuada para una aplicación donde se requiera monitorear y controlar a distancia las características y el funcionamiento de un conjunto de elementos (luminarias) es una WPAN utilizando tecnología Zigbee.

Las redes Zigbee son por mucho la tecnología más adecuada para las redes de sensores, ya que en principio es una tecnología basada en un estándar que garantiza la interoperabilidad entre

¹¹ Referencia: Webb, W. (2007). *Wireless Communication, the future*. Inglaterra: Wiley. pp 31

Implementación de una red inalámbrica de comunicación empleando el estándar Zigbee/802.15.4.

dispositivos que trabajen bajo Zigbee sin importar el fabricante; ofrece tasas muy adecuadas para la transmisión de datos de control y monitoreo, como es nuestro caso; operan en frecuencias de uso libre (ISM) evitando la necesidad de pagar por el uso del espectro; el alcance de comunicación entre nodos es excelente, presentan un consumo de energía extremadamente bajo, posibilitando que los dispositivos finales se alimenten usando baterías que tengan prolongados tiempos de vida; son de fácil y rápida implementación ya que la red se crea, organiza y mantiene de manera autónoma y estructurada; admite una gran cantidad de nodos como miembros de la red, permitiendo así su escalabilidad tanto en cantidad como en espacio ya que las redes Zigbee pueden permitir la comunicación en grandes extensiones de área usando alguna de sus tres topologías (estrella, árbol o malla¹²), son redes que cuentan con esquemas de seguridad a diferentes niveles, y que ofrecen comunicaciones confiables, y además Zigbee es la tecnología de mas bajo costo.

¹² Usando la red en malla los nodos tiene varias rutas para transmitir los datos.

CAPÍTULO 3

Zigbee/IEEE 802.15.4

3.1 Generalidades de Zigbee e IEEE 802.15.4

3.1.1 Zigbee e IEEE 802.15.4

Zigbee es el nombre comercial de la tecnología basada en un protocolo estándar para redes de comunicación inalámbrica de baja velocidad de datos, bajo consumo de potencia y bajo costo, dirigido a aplicaciones de monitoreo y control remoto.

IEEE 802.15.4 fue el grupo creado para investigar, desarrollar y definir un estándar para aplicaciones que requieren bajas tasas de transmisión de datos, con muy bajo consumo de energía y baja complejidad, en donde la vida útil de las pilas empleadas en los dispositivos de aplicación se pueda prologar por meses o inclusive años.

Zigbee Alliance es una asociación de compañías trabajando juntas para promover el uso de productos de monitoreo y control confiables, rentables, de baja potencia conectados en red de manera inalámbrica basándose en un estándar mundialmente abierto.

Así bien la tecnología Zigbee es el resultado de la unión de los esfuerzos de trabajo del grupo de trabajo IEEE 802.15.4 y la Zigbee Alliance (ver figura 3.1), ya que la primera se ha encargado de desarrollar las especificaciones de las capas más bajas del protocolo, que son la capa física (PHY) y la de control de acceso al medio (MAC), y la segunda se ha dirigido al diseño de las capas superiores, es decir desde la capa de red (NWK) hasta la de aplicación (APL), para crear redes de datos interoperables, servicios de seguridad, y una gran variedad de soluciones inalámbricas de monitoreo y control. Además de esto Zigbee Alliance se encarga de verificar la interoperabilidad entre equipos de distintos fabricantes, realizar la mercadotecnia necesaria para promover el estándar a nivel mundial y proporcionar los medios necesarios para la evolución del estándar.

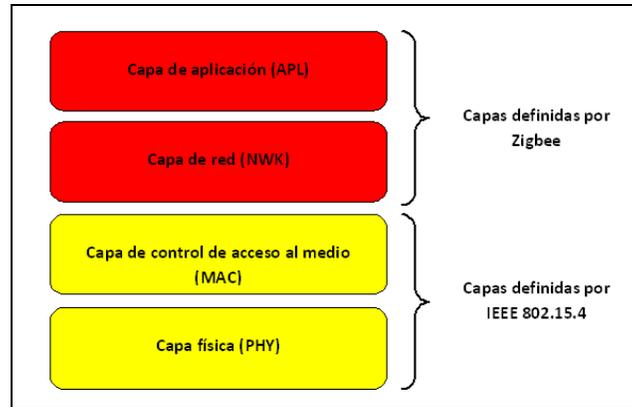


Figura 3.1 Modelo de las capas de Zigbee

3.1.2 Aplicaciones y mercados de Zigbee

Las aplicaciones y mercados en que se puede utilizar la tecnología Zigbee son muy variadas, ya que este tipo de redes se pueden usar para solucionar muchas necesidades en nuestro entorno, con el principal objetivo de facilitarnos la vida. A continuación se mencionan dichos mercados y aplicaciones:

- Automatización de edificios: Sistemas de seguridad, HVAC¹ (Heating, Ventilating and Air Conditioning), AMR² (Automatic Meter Reading), control de iluminación y control de acceso.
- Gestión y eficiencia de la energía: Sistemas AMI³ (Advanced Metering Infrastructure), SCADA⁴ (Supervisory Control and Data Acquisition), etc.
- Electrónica de consumo y electrodomésticos: controles universales para TV, VCR, DVD/CD e interacción entre electrodomésticos.
- Computadora y periféricos: Ratón, teclado, Joystick, etc.
- Domótica: Sistemas de seguridad, HVAC, control de iluminación, control de acceso e irrigación.
- Servicios de telecomunicaciones: M-commerce⁵, servicios de información (tráfico, clima, etc.) e interacción de objetos (Internet of things⁶).

¹ HVAC, se refiere a los sistemas de calefacción, ventilación y aire acondicionado.

² AMR, son los sistemas de lectura automática que se utilizan para medir el consumo de agua, gas y electricidad de manera remota.

³ AMI, es la infraestructura dedicada a realizar lecturas de medición de manera remota con el objetivo de mejorar la eficiencia en el uso de la energía.

⁴ SCADA, es un sistema de adquisición de datos para el control y supervisión de algún proceso.

⁵ M-commerce se refiere al comercio electrónico inalámbrico a través de dispositivos móviles, sobre todo el teléfono.

⁶ "Internet of things" se refiere a la interacción de toda clase de cosas u objetos de manera inalámbrica con su entorno a manera que se tiene control de su ubicación en todo momento.

- Control Industrial: Gestión de activos, control de procesos, gestión de la energía y el medio ambiente.
- Atención de salud personal: Monitoreo de pacientes por medio de sensores inalámbricos sobre el cuerpo, supervisión de estado físico, etc.

3.1.3 Características generales de Zigbee

Los dispositivos Zigbee pueden operar en alguna de las tres bandas de frecuencia de uso libre, a 2.4 GHz a nivel mundial, a 915 MHz en Estados Unidos y algunos países de América o a 868 MHz en Europa. Las velocidades de datos que maneja son: 250 Kbps a 2.4 GHz, 40 Kbps a 915 MHz y 20 Kbps a 868 MHz, empleando en todos los casos la técnica de espectro esparcido por secuencia directa (DSSS) para transmitir los bits de información.

Los dispositivos Zigbee cuentan con dos mecanismos de acceso al canal, uno con el uso de “beacons” y otro sin el uso de ellos. El primero se basa en la transmisión de “beacons” de manera periódica por parte de un nodo coordinador de PAN, con los que sincroniza a los nodos pertenecientes a la red, otorgándoles acceso al canal a través de time slots. El segundo utiliza solo el mecanismo de CSMA-CA y el uso de ACKs, es decir confirmaciones de recepción exitosa.

Las comunicaciones entre dispositivos de una red Zigbee se efectúan empleando tres niveles de seguridad que son: sin seguridad, con seguridad mediante listas de control de acceso a la red y por medio de una clave simétrica AES- 128 compartida entre los dispositivos de la red.

Los nodos Zigbee poseen la opción de configurarse como una red estrella, cluster tree o mesh, donde dependiendo de la aplicación se puede elegir la opción más adecuada, así bien se puede formar desde una pequeña red de área personal hasta una red de comunicaciones a lo largo de grandes extensiones de área, donde los mensajes transmitidos llegan a su destino empleando un enrutamiento por salto múltiple (multi-hop) que permite el uso de rutas alternas (multipath) si la ruta anteriormente usada para el enlace presenta alguna falla. Ver figura 3.2

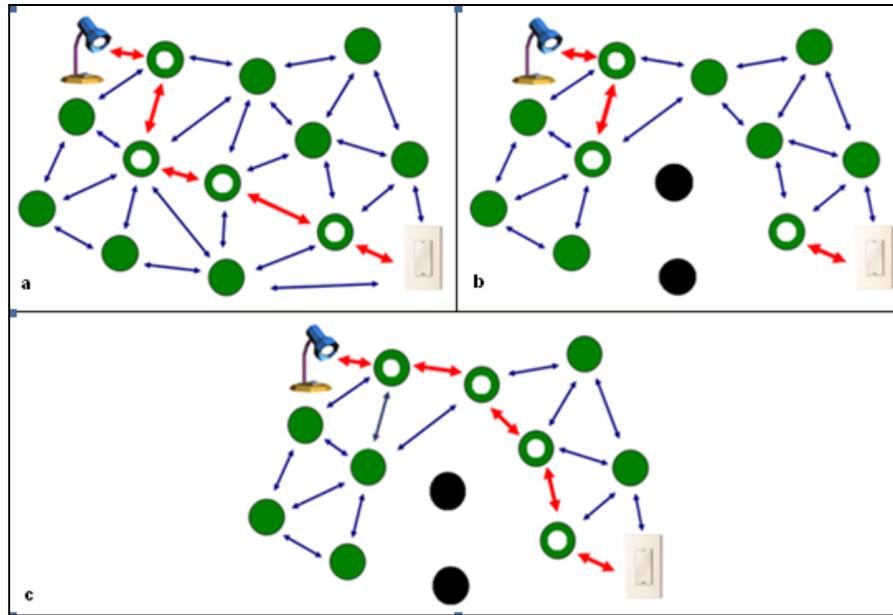


Figura 3.2 Ruta asignada para envío de mensaje (a), pérdida de nodos de ruta asignada (b), generación de la nueva ruta asignada (c).

Cada dispositivo Zigbee tiene un rango de alcance entre 10 y 75 m cuando no se usa amplificador y se transmite a una potencia de 1mW, donde el alcance depende del entorno, el medio ambiente, la potencia del transmisor y la sensibilidad del receptor. Los dispositivos Zigbee ahorran en el consumo de la batería ya que en principio utilizan muy poca potencia para su operación y además tienen la opción de permanecer en un estado de reposo mientras no reciban o transmitan información.

Los nodos Zigbee cuentan con dos tipos de direcciones, una dirección de 64 bits que es asignada de fábrica, es única y no puede modificarse, y otra dirección de 16 bits que es temporal, se asigna al momento ingresar a la red, y se mantiene mientras el nodo forme parte de la misma; la dirección de 16 bits posibilita que una sola red Zigbee esté formada por hasta alrededor de 65,000 nodos (2^{16}). Además la tecnología Zigbee cuenta con un excelente rendimiento para entornos con baja relación señal a ruido (ver figura 3.3) y donde se requiere poca latencia en las transmisiones, lo cual resulta muy conveniente para aplicaciones de redes de sensores.

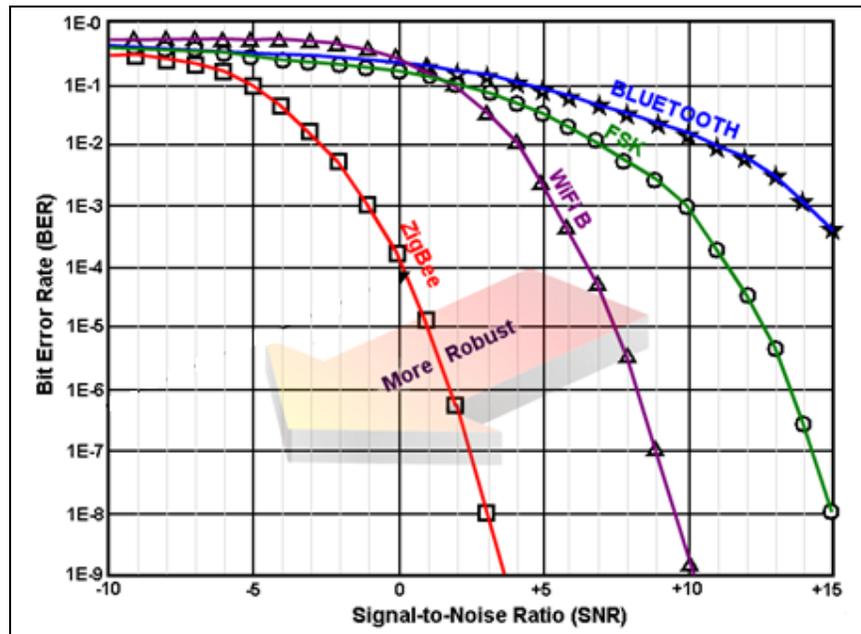


Figura 3.3 Comportamiento de BER respecto a SNR

La tecnología Zigbee resuelve la necesidad de nuevos sistemas de monitoreo y control remoto ya que:

- Es fácil de instalar y mantener (organización autónoma).
- Mantiene comunicaciones confiables (self-healing) y seguras.
- Tiene la capacidad de escalar a miles de dispositivos (alrededor de 65000 nodos)
- Alarga la vida útil de la batería (por varios meses o años con pilas AA).
- Es de bajo costo (estándar abierto, disponibilidad de múltiples vendedores, elimina la necesidad de emplear cables y opera en frecuencias ISM).

3.2 WPAN Zigbee

Como se menciona anteriormente la base para la tecnología Zigbee es el estándar IEEE 802.15.4, donde sus principales características son la flexibilidad de red, bajo costo, con muy poco consumo de potencia y baja velocidad de datos en redes ad hoc con capacidades de auto-organización para dispositivos fijos, portátiles y móviles .

3.2.1 Componentes de una WPAN Zigbee

La especificación IEEE 802.15.4 considera dos tipos de dispositivos dentro de una LR-WPAN, que son el dispositivo de función completa (FFD) y el dispositivo de función reducida (RFD). Una LR-WPAN debe de contener al menos un FFD operando como coordinador PAN.

El FFD tiene implementado el protocolo completo IEEE 802.15.4 por tanto puede operar en tres modos distintos, sirviendo como coordinador de red de área personal (PAN), enrutador o dispositivo final. Así bien un FFD tiene por tanto capacidades extendidas y puede hablar con otros RFDs o FFDs.

Por otro lado un RFD tiene la mínima implementación del protocolo, y por tanto tiene capacidades limitadas por lo que solo puede hablar con un FFD. Un RFD está destinado a aplicaciones extremadamente simples como pueden ser un interruptor de luz o un sensor de proximidad donde no es necesario enviar grandes cantidades de datos.

Zigbee toma de IEEE 802.15.4 los conceptos de FFD y RFD para identificar a sus propios dispositivos, el Coordinador Zigbee (ZC), el Dispositivo Final Zigbee (ZED) y el Enrutador Zigbee (ZR).

El coordinador Zigbee es un FFD que funciona como coordinador principal de una WPAN. Se encarga de iniciar, formar y gestionar la red, asignar las direcciones de red a los dispositivos que desean unirse a la misma, y mantener las tablas de entradas de enlace. Un ZC también tiene la capacidad de enrutar mensajes dentro de la red. Solo hay un ZC por red Zigbee.

El Dispositivo Final Zigbee (ZED) puede ser un FFD o RFD dependiendo de la aplicación a la que este destinado. Es un nodo que cuenta con una interfaz a los sensores o actuadores de la red, es decir es dispositivo de aplicación.

El enrutador Zigbee (ZR) puede estar o no presente en una red Zigbee. Es un FFD que permite la extensión de cobertura de una red Zigbee mediante la asociación de más nodos a su alrededor. Un enrutador Zigbee tiene la capacidad de enrutar mensajes entre dispositivos y puede también ser usado para realizar funciones de un Dispositivo Final Zigbee, como puede ser el monitoreo de sensores y la ejecución de funciones de control.

3.2.2 Topologías de Red Zigbee

Las redes Zigbee pueden implementarse bajo tres topologías distintas (ver figura 3.4):

- Estrella: Esta compuesta por un ZC y varios ZED, los cuales se encuentran aislados entre si y solo tienen comunicación directa con el ZC. Si dos ZED requieren comunicarse entre sí solo pueden hacerlo a través del ZC, el cual transfiere el mensaje entre los ZEDs, es por esto que la red en estrella es considerada de salto simple.
- Cluster tree: En esta topología hay un ZC el cual tiene asociados varios ZEDs y ZRs. Los ZRs a su vez pueden tener asociados uno o más ZRs y ZEDs, formando así como ramas de árbol donde las hojas son los ZEDs. Esta topología permite incrementar la cobertura de área de la red con el costo de incrementar algo la latencia en los mensajes

transmitidos. Así entonces una red Cluster Tree se puede ver como la conexión de múltiples redes estrella enlazadas al ZC a través de uno o más ZRs, y como un mensaje transmitido puede pasar por varios dispositivos antes de llegar a su destino, la topología Cluster Tree es considerada una topología multi-hop (multi-salto).

- Mesh: Es una modificación a la topología Cluster tree, donde se ofrece una redundancia de rutas hacia un nodo destino, es decir cuenta con un coordinador Zigbee, varios ZRs y ZEDs, en donde los ZRs y los ZEDs con un estatus de FFD pueden comunicarse directamente con otros nodos en la red (ZC, ZRs y ZEDs) por medio de varios saltos y diferentes rutas. Los únicos dispositivos que requieren de los servicios de enrutamiento por parte de los ZRs y el ZC para comunicarse con los demás nodos de la red son los ZED con prestaciones de RFD. Una red Mesh puede ser del tipo Ad-hoc, con prestaciones de auto-organización y auto-sanación.

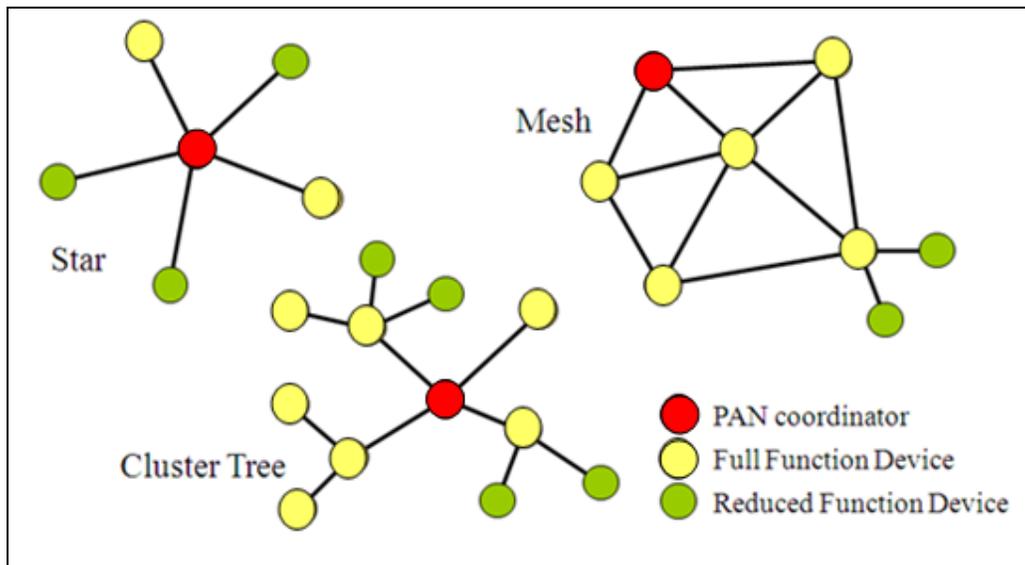


Figura 3.4 Topologías Zigbee

3.2.3 Arquitectura Zigbee

La arquitectura LR-WPAN (Zigbee) está definida por medio de capas, donde cada capa es responsable de una parte del estándar y ofrece servicios a las capas superiores. Así bien la capa física (PHY), es la que implica el transceptor de radio frecuencia (RF) junto con sus mecanismos de control de bajo nivel, la capa MAC es la que controla y proporciona el acceso al canal de radio para todo tipo de transferencia, la capa de red (NWK) es la que proporciona la configuración de red, manipulación y enrutado de mensajes, y la capa de aplicación (APL) es la que proporciona la función destinada del dispositivo. Dicha arquitectura puede ser implementada en un dispositivo embebido o en dispositivos que requieren el soporte de un dispositivo externo como una PC.

3.3 IEEE 802.15.4 PHY

La capa más baja del estándar Zigbee es la capa física (PHY) que tiene como función proporcionar una interfaz entre la MAC y el canal físico de radio. La PHY es responsable de las siguientes tareas:

- Activación y desactivación del radio transceptor
- Detección de la energía dentro del canal de radio (ED, Energy Detection)
- Medición de la intensidad y/o calidad del paquete recibido (LQI, Link Quality Indicator)
- Evaluación de canal despejado (CCA, Clear Channel Assessment) para CSMA-CA
- Selección de canal de frecuencia
- Transmisión y recepción de datos

El estándar cuenta con 2 opciones de PHY basadas en las bandas de frecuencia de 868/915 MHz y 2.4 GHz (ver figura 3.5). Ambas utilizan la técnica de transmisión de espectro esparcido por secuencia directa (DSSS), donde las velocidades de transmisión para 2.4 GHz, 915MHz y 868 MHz son de 250 Kbps, 40 Kbps y 20 Kbps respectivamente. La mayor velocidad de datos en 2.4 GHz es debida a un esquema de modulación de mayor orden (16-ary ortogonal O-QPSK), pero el uso de una frecuencia menor proporciona mayor alcance debido a las bajas pérdidas de propagación. También es importante mencionar que una velocidad de datos menor puede ser traducida a una mejor sensibilidad y en consecuencia mayor área de cobertura. Por otro lado velocidades mayores de datos significan mayor rendimiento, reducción tanto en la latencia como en el ciclo de trabajo.

PHY	Banda de frecuencia MHz	Parámetros de los Datos			Parámetros del chip	
		Velocidad de Bits (Kb/s)	Velocidad de símbolos (ksímbolos/s)	Símbolos	Velocidad de chip (kchip/s)	Modulación
868/915 MHz	868 – 868.6	20	20	Binario	300	BPSK
	902 – 928	40	40	Binario	600	BPSK
2.4 GHz	2400 – 2483.5	250	62.5	16 – ary orthogonal	2000	O-QPSK

Figura 3.5 Características de las capas físicas

Un total de 27 canales numerados del 0 al 26 están a lo largo de las tres bandas. La capa física a 868/915 MHz soporta un solo canal entre 868 y 868.6 MHz, y 10 canales entre 902 y 928 MHz con un espaciamiento de 2 MHz entre frecuencias centrales de canales adyacentes. La capa física a 2.4 GHz contiene 16 canales entre 2.4 y 2.4835 GHz con un espaciamiento de 5MHz entre frecuencias centrales de canales adyacentes y un ancho de banda de 2 MHz en cada canal. Ver figura 3.6

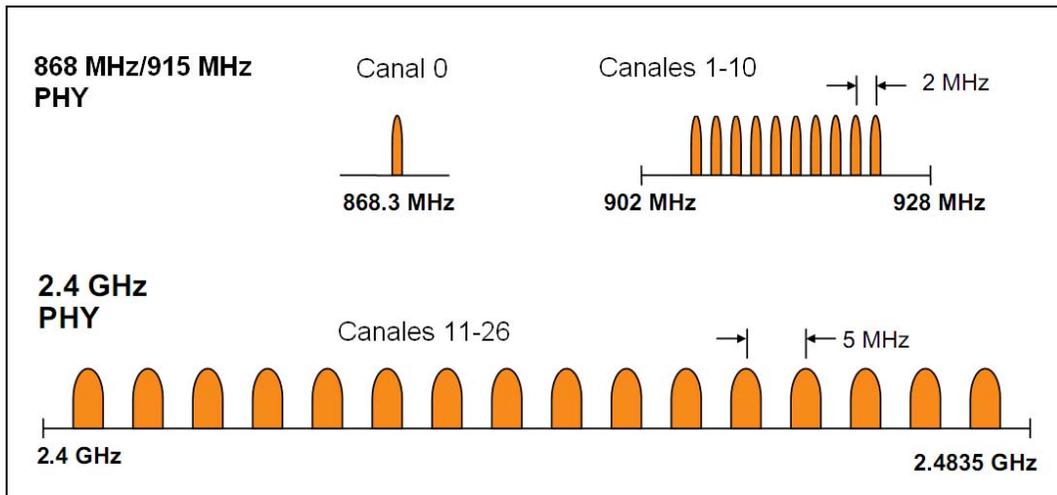


Figura 3.6 Canales IEEE 802.15.4

La existencia de varios canales en frecuencias de banda diferentes permite la ubicación y reubicación de varias redes de comunicación dentro del mismo espectro, lo cual es posible pues el estándar permite una selección dinámica de canal, mediante una función de exploración (escaneo) que camina a través de una lista de canales establecidos en búsqueda de un “beacon” (señal que indica las características de una red Zigbee), detección de energía, y calidad de enlace (LQI).

La sensibilidad mínima de los dispositivos que marca el estándar es de -85 dBm para 2.4 GHz y -92 dBm para 868/915 MHz, en donde la ventaja de 6-8 dB en 868/915 MHz se debe a la menor velocidad de datos. Cabe mencionar que el alcance de una señal depende de la sensibilidad de los receptores y de la potencia de transmisión.

3.3.1 Receiver Energy Detection

La medida ED es una estimación de la potencia de la señal recibida dentro del ancho de banda de un canal IEEE 802.15.4, por tanto no intenta identificar o decodificar las señales en el canal, solo medir la potencia presente.

Esta medida está destinada para ser usada por la capa de red (NWK) como parte del algoritmo de selección de canal.

3.3.2 Link Quality Indication

La medida LQI es una caracterización de la intensidad de la señal y/o calidad del paquete recibido. Esta medida es usada por las capas de red o aplicación y su valor mínimo y máximo están asociados a la más baja y más alta intensidad de señal IEEE 802.15.4 detectable por el receptor, donde dichos valores están uniformemente distribuidos entre estos dos límites.

3.3.3 Clear Channel Assessment (CCA)

La evaluación del canal libre es realizada de acuerdo a uno de los tres siguientes métodos:

- Modo 1: Energía por encima del umbral. Reportará que el medio está ocupado tras la detección de cualquier energía por encima del umbral ED.
- Modo 2: Solo detección de portadora. Reportará que el medio está ocupado tras la detección de una señal con características de modulación y esparcimiento de IEEE 802.15.4.
- Modo 3: Detección de portadora con energía por encima del umbral. Reportará que el medio está ocupado solo tras la detección de una señal con las características de modulación y esparcimiento de IEEE 802.15.4 con energía por encima del umbral ED.

3.3.4 Estructura PPDU (PHY Protocol Data Unit)

La trama que se transmite por el canal físico de radio es aquella con el nombre de PPDU, que es la unidad de datos del protocolo PHY. Cada paquete PPDU está compuesto de los siguientes elementos:

- Una cabecera de sincronización SHR, que permite al dispositivo receptor sincronizarse y amarrarse al recibir un paquete de bits.
- Una cabecera de capa física PHR, que contiene información de la longitud de la trama.
- Y una carga útil (payload) llamada PSDU (PHY Service Data Unit) que es la unidad de datos de servicio de la PHY, la cual tiene longitud variable y contiene a la trama MAC.

La estructura de cada paquete PPDU cuenta con un formato como el mostrado en la figura 3.7

Octets: 4	1	1		variable
Preamble	SFD	Frame length (7 bits)	Reserved (1 bit)	PSDU
SHR		PHR		PHY payload

Figura 3.7 Formato del paquete PPDU

Donde el **campo de preámbulo** es usado por el transceptor para obtener la sincronización del chip y el símbolo con un mensaje entrante, el campo de preámbulo está compuesto por 32 ceros binarios.

El **campo SFD** (Start-of-frame delimiter) está compuesto de 8 bits e indica el fin del campo de sincronización y el inicio del paquete de datos.

El **campo Frame length** está compuesto por 7 bits y especifica el número total de octetos (bytes) contenidos en el PSDU, es decir la carga útil de la PHY. Un paquete PSDU puede contener hasta 127 bytes, por lo cual su longitud puede ser representada con 7 bits.

El **campo PSDU** es la carga útil de la PHY, la cual es llamada MPDU (Mac Protocol Data Unit) desde el dominio de la MAC, es decir cuando la MAC desea transmitir un paquete de datos (MPDU), necesita transferirlo a la PHY (PSDU), la cual le agrega sus cabeceras y la convierte en paquete PPDU, el cual ya se puede transmitir por el canal de radiofrecuencia.

3.4 IEEE 802.15.4 MAC

La subcapa MAC tiene como objetivo servir como interfaz entre la subcapa NWK de Zigbee y la capa PHY. Además maneja todo acceso al canal físico de radio y es responsable de las siguientes tareas:

- Generación de beacons de red si el dispositivo es un coordinador.
- Sincronización de beacons.
- Asociación y disociación de la PAN.
- Soportar la seguridad en el dispositivo.
- Emplear el mecanismo CSMA-CA para el acceso al canal.
- Manejar y mantener el mecanismo GTS (Guaranteed Time Slot).
- Proporcionar un enlace confiable entre dos entidades iguales MAC.

3.4.1 Estructura de tramas MAC

Una red Zigbee define cuatro estructuras de tramas MAC:

- Trama de datos (Data Frame), usada para todo tipo de transferencia de datos
- Trama de reconocimiento (Acknowledgement Frame), utilizada para confirmar una recepción exitosa de una trama de datos o de comando MAC.
- Trama de comando MAC, usada para manejar las transferencias de control de todas las entidades iguales MAC.
- Trama de "Beacon" (Beacon Frame), empleada por el coordinador para transmitir beacons.

Una trama MAC (MPDU) puede contener hasta 127 bytes como máximo y en general está formada por los siguientes componentes básicos:

- Una cabecera MAC (MHR), que contiene la trama de control, el número de secuencia e información de las direcciones de origen y destino.

- Una carga útil MAC (Mac payload) la cual es denominada MSDU (Mac Service Data Unit), es de longitud variable y contiene información específica del tipo de trama. Las tramas de ACKs no contienen carga útil.
- Y un campo final (MFR, Mac Footer), el cual contiene secuencia de comprobación de trama (FCS, Frame Check Sequence)

Los campos en el MHR aparecen en un orden fijo, sin embargo, los campos de dirección pueden no estar incluidos en todas las tramas. Ver figura 3.8

Octets: 2	1	0/2	0/2/8	0/2	0/2/8	variable	2
Frame control	Sequence number	Destination PAN identifier	Destination address	Source PAN identifier	Source address	Frame payload	FCS
		Addressing fields					
MHR						MAC payload	MFR

Figura 3.8 Formato general de la trama MAC

El campo *Frame control* contiene bits de control que indican el tipo de trama MAC que se pretende transmitir, si hay seguridad criptográfica habilitada, si hay tramas pendientes por transmitir después de la actual, si el destino requiere regresar un ACK al recibir la trama, si la transmisión es dentro de la PAN o fuera de, y el tipo de direccionamiento del origen y destino.

El campo *Sequence number* es un número de secuencia único que identifica a la trama, puede ser *Data Sequence Number* (DSN) el cual es usado por las tramas de datos, comando MAC y Acknowledgement, o *Beacon Sequence Number* (BSN) el cual es utilizado exclusivamente por la trama beacon. En ambos casos el *Sequence Number* tiene un valor aleatorio que es exclusivo para el dispositivo que en ese momento transmite. Para una trama de datos o comando MAC el DSN se inicializa en dicho valor aleatorio y va incrementando su valor si el dato transmitido es enviado en varias tramas MAC. En el caso de la trama ACK, el DSN es usado para relacionarlo con la trama de datos o comando MAC que la generó y así exista una integridad si es que el dato se envió en varias tramas.

Los campos de dirección incluyen las direcciones del nodo origen y del nodo destino que intervendrán en la comunicación, así bien el uso y tamaño de estos campos puede variar dependiendo del tipo de trama utilizada⁷, y del tipo de direccionamiento marcado en el campo *Frame control* (transmisión fuera o dentro de la PAN y direccionamiento de 16 bits ó 64 bits).

El campo *Frame payload*, es decir la MSDU es la carga útil de la trama, es de longitud variable y contiene información específica del tipo de trama en particular. Si la seguridad está habilitada en el campo *Frame control field*, la MSDU es protegida según se haya definido en la suite de seguridad seleccionada para la comunicación.

⁷ La trama ACK no contiene datos de dirección, y la trama beacon solo contiene datos de dirección del origen.

Considerando un esquema donde todos los campos de dirección de una trama se encuentren a su máxima capacidad nos deja la posibilidad de tener una carga útil de 102 bytes.

El campo *FCS* es una trama de comprobación de redundancia cíclica (CRC, Cyclic Redundancy Check) de 16 bits que sirve para detectar errores en la trama generalmente ocasionados por ruido en el canal. CRC realiza una suma de comprobación con el objeto de verificar la integridad del contenido de la MPDU, es decir el cálculo se realiza sobre los valores del MHR y el MSDU.

Así bien las estructuras de las tramas MAC han sido diseñadas para mantener la complejidad al mínimo, ya que se optimiza el uso de los campos dentro de la estructura general de la trama MAC dependiendo del tipo de trama utilizada, al tiempo de hacerlas lo suficientemente robustas para su transmisión en un canal ruidoso. A continuación se muestra la estructura de los diferentes tipos de tramas MAC.

3.4.1.1 Trama de datos (Data Frame)

La trama de datos tiene su origen en las capas superiores ya que la carga útil de datos son generados en las capas superiores, luego son pasados a la subcapa MAC donde es referida como MSDU. En este punto a la MSDU se le agregan un MHR al inicio y un MFR al final lo que la convierte en MPDU. La MPDU se pasa a la PHY convirtiéndose en la PSDU, ahí la PHY le agrega al inicio un SHR y PHR. El conjunto del SHR, PHR y la PSDU forman el paquete de datos PHY, es decir la PPDU. Ver figura 3.9

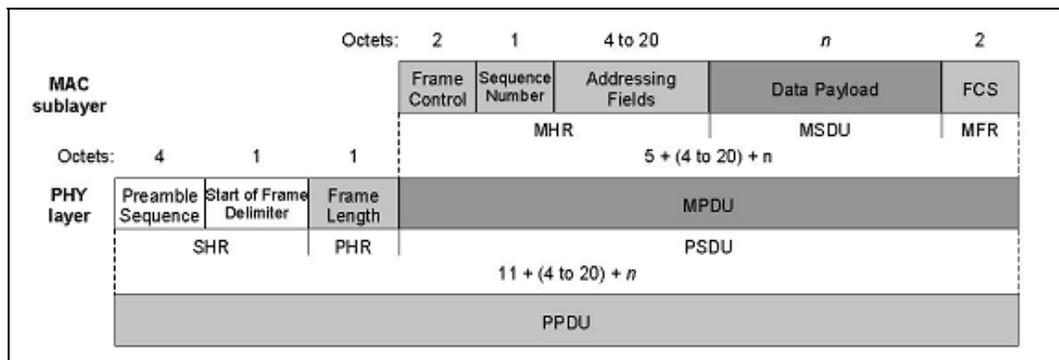


Figura 3.9 Estructura de la trama de datos

3.4.1.2 Trama de reconocimiento (Acknowledgement Frame)

La trama de confirmación es enviada por el dispositivo receptor de una trama de datos o comando MAC, y sirve para informar al dispositivo que la originó, que se recibió la trama MAC o de datos exitosamente y sin errores. Este pequeña trama aprovecha el tiempo de silencio (quiet time) especificado por la norma para su transmisión. Esta trama es originada desde la subcapa MAC. Ver figura 3.10

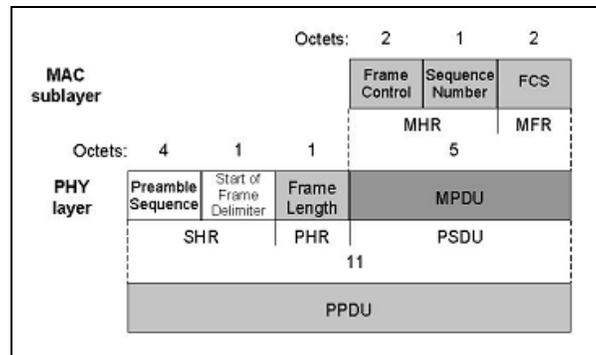


Figura 3.10 Estructura de la trama de reconocimiento (ACK)

3.4.1.3 Trama de comando MAC (Mac Command Frame)

La trama de comandos MAC es usada para la configuración o control de la entidad MAC de los dispositivos de manera local o remota, permitiendo configurar a los dispositivos individualmente sin importar lo grande que sea la red. Esta trama es originada desde la subcapa MAC, donde el MSDU contiene un campo adicional *Command Type*⁸, y la carga útil del comando, la cual contiene los parámetros del comando MAC. Ver figura 3.10

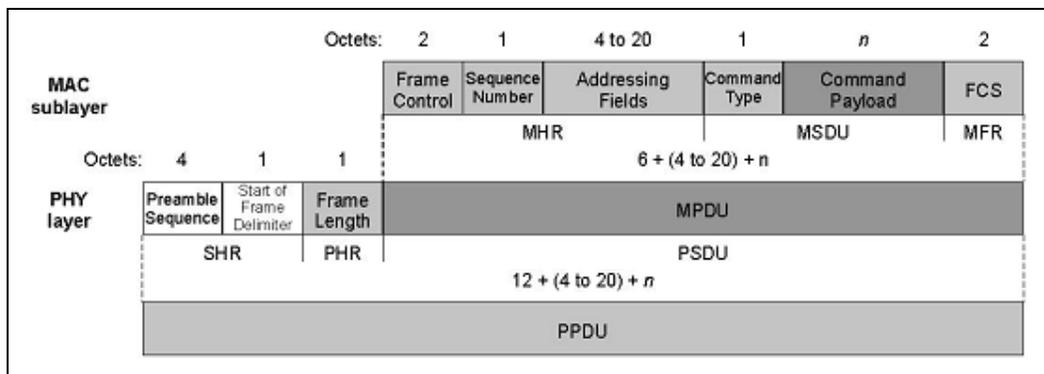


Figura 3.11 Estructura de la trama de comandos MAC

3.4.1.4 Trama de Beacon (Beacon Frame)

La trama de beacon es originada en la subcapa MAC y es transmitida por un coordinador (el cual puede ser el coordinador de la PAN o un enrutador), ya sea en intervalos de tiempo definido, es decir de manera periódica, o en consecuencia a una solicitud de beacon por parte de otro dispositivo. El uso de *beacons* añade un nuevo nivel de funcionalidad en la red, ya que permite a los nodos de la red permanecer en un estado de bajo consumo de energía por periodos de tiempo determinados, sin perder su capacidad de comunicación, al sincronizarse en cada emisión de beacon. El campo de direcciones contiene el identificador de PAN y la

⁸ El command type indica el tipo de comando MAC que contiene la trama que puede ser: una solicitud de asociación, respuesta de asociación, notificación de disociación, solicitud de datos, notificación de conflicto con el identificador de PAN, notificación de orfandad, solicitud de beacon, reajuste de coordinador, solicitud de GTS.

Implementación de una red inalámbrica de comunicación empleando el estándar Zigbee/802.15.4.

dirección del dispositivo que transmite el beacon. La MSDU de este tipo de trama contiene el campo de *Superframe Specification*, el cual especifica las características de la **supertrama** que está contenida en la trama beacon y de quien la emite, los campos *GTS* indica si se usan GTSs (Guaranteed time slots) y en su caso describen las características de cada uno de ellos, el campo *Pending Address* indica el numero y direcciones de dispositivos que actualmente tienen mensajes pendientes con el coordinador, y por último el campo *Beacon Payload* es una secuencia de uso opcional para ser transmitida en la trama de beacon por la capa superior siguiente. Ver figura 3.12

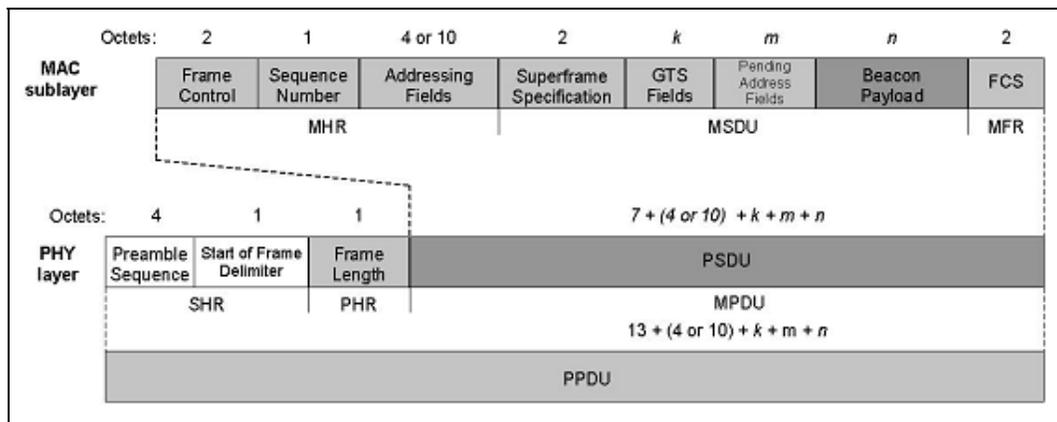


Figura 3.12 Estructura de la trama Beacon

3.4.2 Acceso al canal

Hay dos mecanismos de acceso al canal en las redes de este tipo dependiendo de la configuración de la red. Las redes que usan beacons (Beacon-enabled networks), es decir guías que son transmitidas de manera periódica por parte de los coordinadores que sincronizan a los nodos agregados a la red y les permiten el acceso al canal a través de ranuras en el tiempo (time slots) empleando CSMA-CA y/o GTS, y las redes que no usan beacons (Nonbeacon-enabled networks) en donde el acceso al canal es solo por medio del mecanismo de contención CSMA-CA y tramas de reconocimiento (ACKs), por tanto cada nodo que desea transmitir debe disputar el uso del canal con los demás.

Cuando un coordinador utiliza la opción de emitir beacons en intervalos definidos, se utiliza una estructura de **supertrama** (ver figura 3.13). La supertrama está limitada por la transmisión de una trama beacon, y puede tener una porción activa (SD, Superframe Duration) y una porción inactiva (BI, Beacon Interval). Si es el caso, el coordinador puede interactuar con su PAN solo durante la porción activa de la supertrama y, por tanto, él y los nodos de la red pueden entrar en un modo de bajo consumo (sleep) durante la porción inactiva. La porción activa está dividida en 16 slots de igual tamaño, los cuales conforman el periodo acceso por contención (CAP, Contention Access Period), y el periodo libre de contención (CFP, Contention Free Period). El beacon es transmitido al inicio del primer time slot de cada supertrama sin el uso de CSMA-CA. Los beacons son usados para sincronizar a los dispositivos de la red,

identificar la PAN, y describir la estructura de las supertramas. Cualquier dispositivo que desee comunicarse durante el periodo de acceso por contención (CAP), deberá competir con otros dispositivos con la misma intención usando un mecanismo CSMA-CA ranurado. Por otro lado, el periodo libre de contención (CFP) si es que existe, está formado por ranuras de tiempo garantizado (GTSs) que sirven para dedicar porciones de la parte activa de la supertrama a un dispositivo en específico. Los GTSs siempre aparecen después del último slot del CAP. El coordinador puede asignar hasta 7 GTSs dentro de una supertrama, donde un GTS puede ocupar más de un time slot. Sin embargo, una porción suficiente de CAP deberá existir para el acceso de otros dispositivos en la red o la aparición de nuevos dispositivos deseando unirse a la red. Todas las transacciones de los dispositivos basadas en el acceso por contención (CAP) deben ser completadas antes de que el CFP inicie, así como también un dispositivo transmitiendo en un GTS debe asegurarse que su transacción se ha completado antes de que inicie el siguiente GTS o llegue el final del CFP.

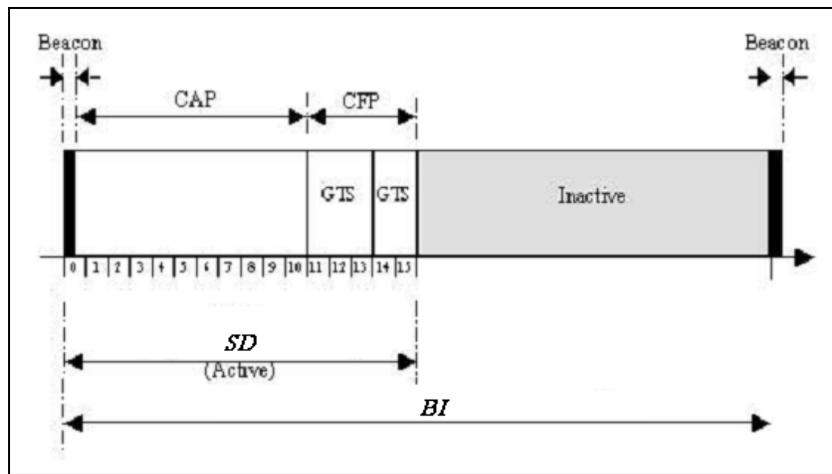


Figura 3.13 Ejemplo de supertrama

Por otro lado si el coordinador no desea usar una estructura de supertrama, este puede apagar la transmisión de beacons, lo cual impedirá el uso de GTS, y en consecuencia todas las transmisiones (exceptuando las tramas de acknowledgement) efectuadas por los dispositivos de la red, usarán el mecanismo de CSMA-CA no ranurado.

3.4.3 Mecanismos CSMA-CA

Si en una PAN el coordinador no emite beacons (Nonbeacon-enabled networks) o el beacon en una red con beacons no es localizado, se emplea el mecanismo CSMA-CA no ranurado. Por otro lado si el coordinador emite beacons entonces la estructura de supertrama es usada y en consecuencia el mecanismo CSMA-CA ranurado debe ser empleado para la transmisión dentro del CAP. En ambos casos el algoritmo es implementado usando unidades de tiempo llamadas "backoff periods".

En el mecanismo CSMA-CA no ranurado cada vez que un dispositivo desea transmitir tramas de datos o comandos MAC, este debe esperar por un tiempo aleatorio (backoff periods). Si el canal se encuentra disponible tras haber transcurrido el tiempo aleatorio, el dispositivo puede

efectuar una transmisión, pero si el canal se encuentra ocupado, al terminar el tiempo backoff, el dispositivo debe esperar por otro tiempo aleatorio antes de intentar acceder al canal de nuevo. Las tramas de reconocimiento (ACKs) se envían sin emplear el mecanismo CSMA-CA.

En el mecanismo de acceso al canal CSMA-CA ranurado, los límites del periodo backoff de cada dispositivo en la PAN son alineados con los límites de las ranuras de la supertrama, es decir el inicio del primer periodo backoff de cada dispositivo es alineado con el inicio de la transmisión del beacon, así cada vez que un dispositivo desea transmitir tramas de datos durante el CAP, este deberá localizar el límite de la siguiente ranura backoff y después esperar un número aleatorio de ranuras backoff. Si el canal está ocupado tras haber transcurrido este tiempo aleatorio backoff, el dispositivo deberá esperar por otro número aleatorio de ranuras backoff antes de tratar de acceder al canal de nuevo. Por otro lado si el canal está disponible, el dispositivo puede iniciar la transmisión en el siguiente límite de ranura backoff disponible. En este caso también los tramas ACKs y beacons se envían si el uso de CSMA-CA.

3.4.4 Modelos de Transferencia de datos

Existen tres tipos de transferencia de datos entre dispositivos Zigbee, una efectuada desde un dispositivo hacia un coordinador, otra desde un coordinador hacia un dispositivo, y por último la efectuada entre dispositivos de igual a igual. Los mecanismos para cada una de estas transferencias dependerá de si la red soporta o no la transmisión de beacons de manera periódica. En la topología en estrella solo las dos primeras son empleadas, ya que solo existe un coordinador y varios dispositivos asociados a él, pero tanto en la topología cluster tree como en la mesh se puede emplear cualquiera de los tres tipos de transferencia.

Transferencia de datos hacia un coordinador. Cuando la transferencia de datos desde un nodo se efectúa en una red que emplea beacons, éste primero escucha el canal para encontrar el beacon, efectuado esto el dispositivo se sincroniza con la estructura de supertrama. Luego en el momento adecuado transmite su trama de datos hacia el coordinador empleando CSMA-CA ranurado, con el opcional retorno de un ACK por parte del coordinador. Cuando un dispositivo desea transferir datos en una red que no emplea beacons, simplemente transmite la trama de datos hacia el coordinador utilizando CSMA-CA no ranurado. El coordinador tiene la opción de transmitir o no una trama ACK tras la recepción exitosa.

Transferencia de datos desde el coordinador. Cuando un coordinador desea transferir datos hacia un dispositivo en una red con beacons, este indica en la trama beacon que un mensaje de datos está pendiente para dicho dispositivo. El dispositivo periódicamente escucha el beacon y si hay un mensaje pendiente, transmite mediante CSMA-CA ranurado un comando MAC requiriendo los datos, el coordinador opcionalmente transmite el ACK tras la recepción de esta trama y posteriormente transmite la trama de datos empleando CSMA-CA ranurado. Luego el dispositivo envía un ACK tras haber recibido exitosamente los datos, el coordinador recibe el ACK y por último borra el mensaje de datos de la lista de mensajes pendientes en la trama beacon. Por otro lado en una red sin beacons cuando un coordinador desea transferir datos hacia un dispositivo, este guarda los datos para que el dispositivo apropiado haga

contacto y se los solicite. Este dispositivo puede hacer contacto con el coordinador mediante la transmisión de un comando MAC solicitando dichos datos usando CSMA-CA no ranurado. El coordinador al recibir esta trama MAC, enviará el ACK correspondiente, luego si hay datos pendientes los transmitirá usando CSMA-CA no ranurado, pero si no los hay, transmitirá una trama de datos con una carga de datos útil nula para indicar que no hay datos pendientes. Por último el dispositivo tras haber recibido esta trama de datos, transmitirá un ACK.

Transferencia de datos de igual a igual. En una red de igual a igual, cada dispositivo puede comunicarse con cualquier otro dentro de su radio de alcance. Para realizar esto se cuenta con dos opciones. Una en donde los nodos que desean comunicarse están constantemente escuchando el canal y uno transmite sus datos empleando CSMA-CA no ranurado y el otro los recibe. La otra opción es que los nodos que quieren comunicarse se sincronicen entre sí permitiéndoles ahorrar energía mientras no se comunican.

3.4.5 Sincronización

Para las redes PAN que usan beacons, la sincronización de los dispositivos se lleva a cabo al recibir y decodificar la trama Beacon por parte de su coordinador con el objeto de detectar mensajes pendientes o enviar mensajes.

Para las redes que no soportan el uso de beacons, la sincronización de los dispositivos se efectúa mediante la indagación (polling) de datos a su coordinador.

3.5 Inicio y formación de una red Zigbee

En una red Zigbee todos los dispositivos tienen la capacidad de realizar un escaneo a través de una lista específica de canales con el objeto de identificar a los dispositivos a su alrededor. Además de esto un FFD tiene la capacidad de realizar escaneos ED y escaneos activos, donde el escaneo activo le permitirá a un FFD localizar los beacons de coordinadores dentro de su espacio de operación personal (POS). Una red Zigbee solo se concibe cuando existe un coordinador de PAN. Para iniciar la red el coordinador PAN debe seleccionar un canal y un identificador de red llamado PAN ID. Después de esto se puede iniciar la formación de la red mediante la unión de enrutadores y dispositivos finales, los cuales si son aceptados trabajarán en el mismo canal y con el mismo PAN ID que su coordinador.

3.5.1 Inicio de una red Zigbee

Como el coordinador de la PAN es responsable del inicio de la red Zigbee, realiza una serie de escaneos para lograrlo, uno para detectar el nivel de energía en los canales configurados (ED-scan), y otro para descubrir a las redes Zigbee cercanas (Active scan).

Cuando el coordinador se inicia por primera vez, primero efectúa un ED-scan en cada uno de los canales configurados para descartar a los canales con demasiada actividad y ordenar a los demás de menor a mayor energía detectada para considerar su posible uso en las comunicaciones de la nueva red. Después de efectuar el ED-scan en todos los canales, ahora el

coordinador realiza un escaneo activo en cada uno de los canales sin energía detectada y con energía aceptable, con el objeto de encontrar redes Zigbee a su alrededor. Para hacer esto, el coordinador transmite una trama de comando MAC de solicitud de beacon (beacon request) a todos los nodos vecinos (broadcast), siendo que si hay coordinadores o enrutadores a su alrededor le responderán con el envío de sus respectivas tramas de beacon (ver figura 3.14).

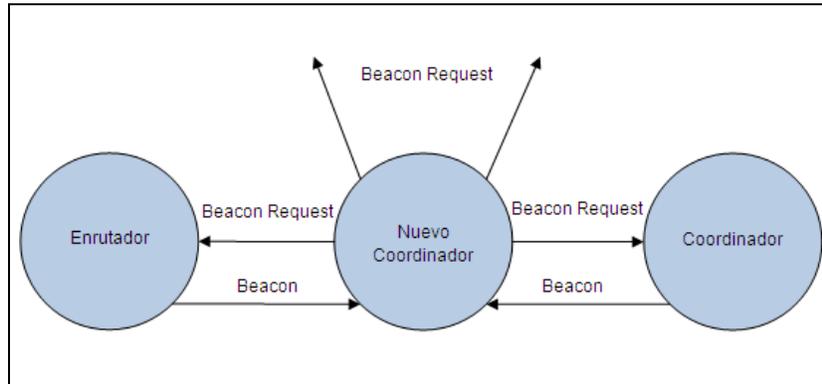


Figura 3.14 Operación del escaneo activo.

Cada trama de beacon contiene información referente a la red PAN a la que pertenecen o comandan los coordinadores o enrutadores vecinos, e incluye información del PAN ID, dirección del dispositivo, si éste acepta o no asociación, etc. Una vez que el coordinador a completado el active scan, analiza los beacons recibidos en cada canal y elige el canal más adecuado, es decir en el que no se haya detectado red alguna o en el que exista menor número de redes operando. Luego establece un PAN ID aleatorio exclusivo y diferente al de las demás redes. Una vez que el coordinador ha realizado esto se inicia la formación de la red Zigbee, permitiendo la asociación de enrutadores o dispositivos finales⁹ a su alrededor. Cabe mencionar que un coordinador retiene su canal y PAN ID aún cuando ocurran cortes en su alimentación.

3.5.2 Formación de una red Zigbee

Para formar parte de una red Zigbee los nuevos enrutadores y los dispositivos finales deben asociarse a un coordinador o enrutador anteriormente incorporado a la red que permita la unión de nuevos dispositivos. De esta manera se va formando la red de comunicaciones. Una vez que existe un coordinador PAN, los enrutadores y dispositivos finales tienen que realizar primero una búsqueda de las redes Zigbee que estén a su alrededor, para después seleccionar la más adecuada y posteriormente tener la capacidad de comunicarse dentro de la red. Así que, tanto los enrutadores como los dispositivos finales que desean pertenecer a una red, primero deben efectuar un *active scan*, tal y como lo hace un coordinador cuando inicia una

⁹ Tanto los coordinadores como los enrutadores (FFDs) cuentan con un atributo que indica que tipo de asociación permitirán. Pueden permitir la asociación en todo momento, por un tiempo finito, o no permitir la asociación.

PAN. A consecuencia del *active scan*, se reciben los beacons de los dispositivos Zigbee cercanos, luego estos beacons son analizados con el objeto de encontrar una red Zigbee válida a la cual unirse¹⁰.

Una vez que el nodo (enrutador o dispositivo final) con deseos de incorporarse a una red descubre a un dispositivo que acepta la asociación y que opera en una red Zigbee válida, primero le envía a éste una solicitud de asociación (association request). El dispositivo al recibir dicha solicitud, la analiza y responde regresando una respuesta de asociación (Association Response) en la cual indicará si aceptó o no la asociación, dependiendo de si dicho nodo tiene o no restricciones de profundidad de red y capacidad máxima de nodos hijos¹¹. Ver figura 3.15

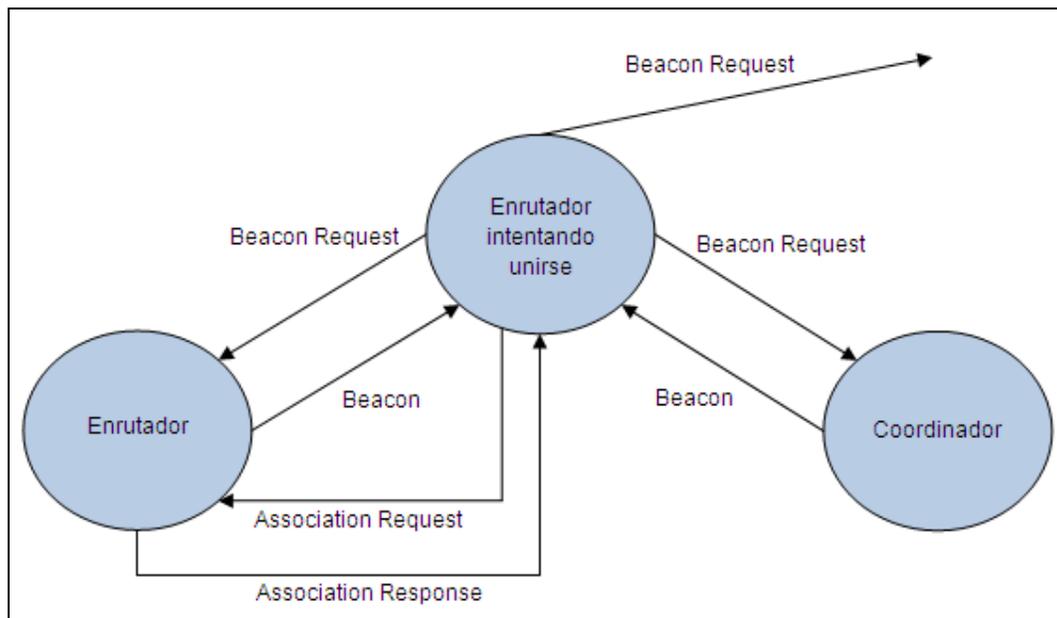


Figura 3.15 Proceso de unión en una PAN

Si la asociación fue exitosa, entonces se genera una relación padre-hijo (parent-child relationship) entre los dos dispositivos, donde el padre es el coordinador o enrutador que aceptó la asociación y el hijo es el dispositivo al cual se le concedió la asociación. Por último el padre le asigna una dirección de red (dirección de 16 bits) al hijo. Si el hijo es un enrutador, este puede tener también la capacidad de asociar a más dispositivos y en consecuencia convertirse en padre de ellos y así extender el alcance de la red. De este modo se va formando una red Zigbee, que dependiendo de la cantidad, del tipo de nodos asociados y su ubicación puede lograrse desde una red de comunicaciones pequeña hasta una gran red que cubra un área extensa.

¹⁰ Tanto enrutadores como dispositivos finales pueden ser configurados para unirse a cualquier red Zigbee o bien unirse a una red en un canal y/o con un PAN ID específico.

¹¹ En el caso de que un dispositivo que permite la asociación tenga restricciones de este tipo, solo un número finito de dispositivos se pueden asociar a él.

3.6 Comunicaciones de red Zigbee

3.6.1 Direccionamiento en Zigbee

La transferencia de información entre dispositivos Zigbee se efectúa empleando dos tipos de direccionamiento, un direccionamiento de dispositivo y un direccionamiento de aplicación. El direccionamiento de dispositivo especifica la dirección del dispositivo destino al cual se envía un paquete de datos. Por otro lado el direccionamiento de aplicación indica la dirección de una aplicación específica (conocida como Zigbee End Point) en un dispositivo Zigbee, junto con un tipo de mensaje llamado Cluster ID.

3.6.1.1 Direccionamiento de Dispositivo Zigbee

La especificación 802.15.4 sobre la cual está construido el protocolo de Zigbee especifica dos tipos de direcciones:

- Dirección de red de 16 bits: Esta dirección es asignada cuando un dispositivo se une a una red; esta dirección en el caso del coordinador Zigbee siempre tiene el valor de 0, y en el caso de los enrutadores y dispositivos finales es asignada por su padre. Esta dirección de red es única para cada nodo en la red, mas sin embargo no es estática ya que puede cambiar. Una causa que hace que un nodo cambie de dirección de red es que éste sea un dispositivo final que no pueda comunicarse con su padre y por lo tanto se vea en la necesidad de salir de la red para asociarse a un nuevo padre. Otra causa es que si el dispositivo cambia de tipo, es decir se convierte de enrutador a dispositivo final o viceversa, éste tendrá que salir de la red y reintegrarse nuevamente. Cabe mencionar que para transferir mensajes entre dispositivos de una red Zigbee, es necesario conocer la dirección de red de 16 bits del dispositivo destino, por lo tanto es forzoso que antes de transmitir cualquier tipo de dato se conozca la dirección de 16 bits del nodo destino.
- Dirección de 64 bits: Es una dirección única, exclusiva y permanente que se le asigna a cada nodo 802.15.4 al momento de su fabricación.

3.6.1.2 Direccionamiento de Aplicación Zigbee

Las capas de aplicación Zigbee definen el uso de puntos finales (endpoints, también conocidos como objetos de aplicación o terminales) e identificadores de cluster (cluster IDs) los cuales sirven para direccionar aplicaciones u objetos individuales conteniendo mensajes específicos en un dispositivo Zigbee.

Los perfiles de aplicación son acuerdos que se toman sobre los mensajes, formato de mensajes, y acciones producidas, que permiten a distintos diseñadores crear aplicaciones interoperables basándose en una solución específica para un mercado, con lo cual todos los mensajes enviados entre objetos de aplicación ubicados en dispositivos distantes son interpretados de igual manera.

Un endpoint es una aplicación específica que corre en un dispositivo Zigbee, donde cada dispositivo Zigbee puede soportar hasta 240 endpoints, cada uno identificado por una dirección de endpoint que va desde la 1 hasta la 240.

Los cluster IDs definen mensajes que fluyen hacia o desde un dispositivo indicando una acción o función particular para ser efectuada en un endpoint ubicado en otro dispositivo Zigbee.

Un ejemplo del uso de endpoints y cluster IDs se podría ocupar para un perfil de aplicación para el control de iluminación de una casa, así que si un dispositivo Zigbee B controla un dimmer y uno o varios apagadores de luz, estos objetos de aplicación pueden ser asignados a diferentes valores endpoint en ese dispositivo. En este caso para enviar un mensaje a ese dimmer desde un dispositivo remoto A, éste último tendría que transmitirle dicho mensaje al endpoint asociado a es dimmer. En este ejemplo el radio B podría soportar los cluster IDs de “Prende la luz”, “Apaga la luz”, o “Atenúa la luz”, y por lo tanto si el dispositivo A deseará apagar la luz en un switch del dispositivo B, el radio A tendría que enviar un mensaje al endpoint asociado a ese switch en el radio B, usando el cluster ID “Apaga la luz”. Ver figura 3.16

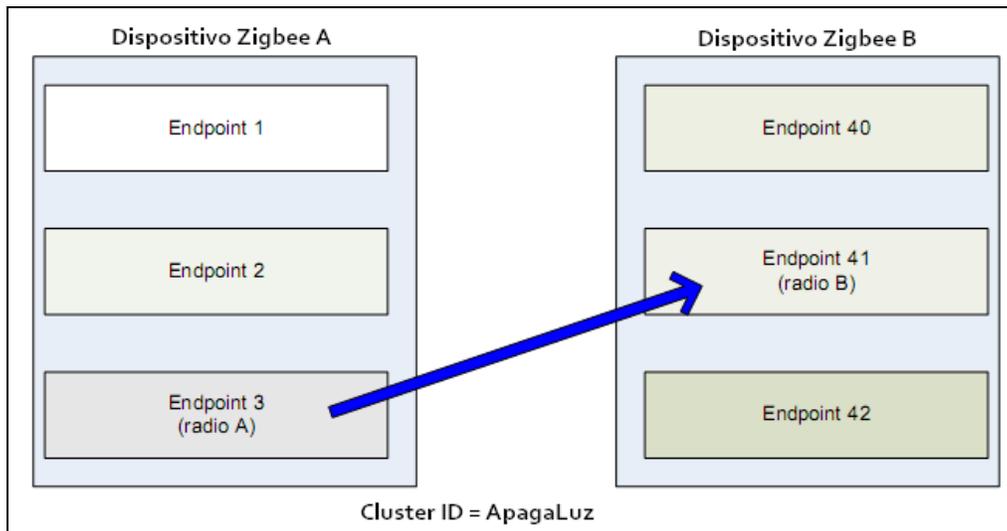


Figura 3.16 Ejemplo de direccionamiento de aplicación Zigbee

3.6.2 Transmisión y enrutamiento de paquetes en Zigbee

La transmisión de mensajes en una red Zigbee puede ser broadcast o unicast, esto dependerá del tipo de mensaje que se envíe y la intención del mismo.

3.6.2.1 Transmisión Broadcast

Una transmisión broadcast tiene como objetivo enviar un mensaje a todos los nodos que forman parte de la red (dirección broadcast: 0xFFFF), esta puede ser efectuada por un coordinador, un enrutador o un dispositivo final a través de su padre. Un mensaje broadcast utiliza un mecanismo de acknowledgement pasivo, ya que cada coordinador o enrutador que participa en este proceso espera un determinado tiempo para verificar que cada uno de sus

vecinos haya retransmitido el mensaje, si no es así, realiza un número determinado de reintentos (de 1 a 5, por default 3).

El nodo que origina el mensaje broadcast lo transmite primero a todos los nodos que estén en su alcance, donde solo los que son coordinadores y enrutadores retransmiten el mensaje a sus vecinos, estos a su vez efectúan el mismo proceso bajo la misma condición hasta que el número de saltos máximos configurados en el nodo originador del broadcast se cumpla, ver figura 3.17.

Cada vez que un dispositivo que realiza la transmisión de un mensaje broadcast ya sea que el originador sea él u otro dispositivo en la red, éste debe crear una entrada que contenga datos de al menos el numero de secuencia y dirección de red del iniciador del mensaje broadcast. Estos datos se guardan en una tabla llamada *broadcast transmission table* y sirven para compararse con los datos de otros mensajes broadcast recibidos, siendo que si estos valores coinciden, no es necesario retransmitir el mensaje pues ya se transmitió con anterioridad. En caso contrario el nuevo mensaje broadcast recibido pertenece a otro origen y debe retransmitirse.

Para cada transmisión broadcast la pila Zigbee debe reservar espacio en el buffer para guardar temporalmente una copia del paquete de datos (mensaje), la cual será usada para la retransmisión si a caso es necesario.

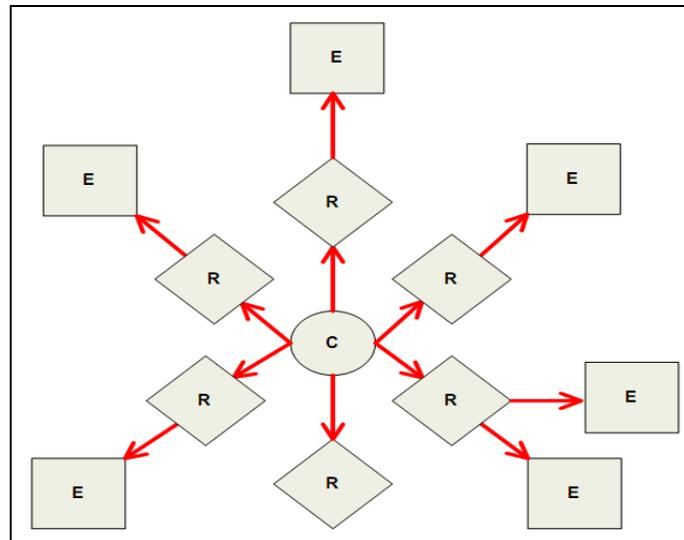


Figura 3.17 Ejemplo de transmisión broadcast

Como las transmisiones broadcast son retransmitidas por el coordinador o enrutadores de la red, este tipo de mensajes deben ser usados con mesura.

3.6.2.2 Transmisión Unicast

Una transmisión unicast tiene como objetivo enviar un mensaje a un nodo específico de la red ya sea de manera directa (single hop), o pasando por varios nodos intermedios (multi-hop)

hasta llegar a su destino. Para ejecutarse una transmisión unicast se utiliza la dirección de red de 16 bits del dispositivo destino. Como se mencionó anteriormente esta dirección no es estática y puede cambiar, por lo tanto si los dispositivos que quieren transmitir una mensaje unicast no conocen la dirección de red del nodo destino pero si conocen su dirección de 64 bits, pueden emplear un método llamado *Network address discovery* para conocerla. Cuando el originador del mensaje conoce ya la dirección de 16 bits del nodo destino, ahora debe saber la ruta que el mensaje debe seguir para llegar al él; si no la conoce, el originador debe efectuar un procedimiento de descubrimiento de ruta (*route discovery*).

3.6.2.2.1 Descubrimiento de dirección de red

Para conocer la dirección de red de un dispositivo destino, el dispositivo que desea transmitirle un mensaje, realiza antes una transmisión broadcast de un paquete de descubrimiento de dirección de red. Este paquete contiene la dirección de 64 bits del dispositivo al cual se dirigirá el mensaje. Los dispositivos que reciben esta transmisión broadcast verifican si la dirección de 64 bits del paquete coincide con la suya. Si es así, éste dispositivo envía de vuelta un paquete de respuesta al originador de esta transmisión broadcast, proporcionándole su dirección de red. En el caso contrario, este dispositivo retransmite este paquete a sus vecinos, y así sucesivamente hasta que algún dispositivo produzca la respuesta al paquete de descubrimiento. Cuando la respuesta al descubrimiento de dirección de red es recibida por el originador, éste puede transmitir el mensaje al dispositivo destino si es que ya conoce la ruta hacia él, o en su defecto, primero efectuar un descubrimiento de ruta.

3.6.2.2.2 Descubrimiento de ruta

El descubrimiento de rutas para la comunicación entre dispositivos Zigbee en una red mesh se realiza por medio del protocolo de enrutamiento AODV¹². AODV permite a los paquetes de datos viajar a través de múltiples nodos (hops) para llegar a su destino. Tanto los enrutadores como el coordinador de una red participan en el establecimiento de rutas para la transferencia de mensajes de datos entre nodos de la red.

El enrutamiento bajo AODV emplea tablas de descubrimiento de ruta y de enrutamiento, las cuales se encuentran guardadas en cada enrutador o coordinador de la red. Como solamente un número limitado de rutas pueden ser guardadas en este tipo de nodos, entonces el descubrimiento de ruta se realiza más frecuentemente en una red grande con comunicación entre diferentes nodos.

El proceso de descubrimiento de ruta se presenta cuando un nodo que va a transmitir un mensaje de datos ya cuenta con la dirección de red del nodo destino pero no cuenta con una

¹² AODV (Ad hoc On Demand Distance Vector) es un protocolo de enrutamiento que se utiliza en las redes inalámbricas ad hoc, entre las cuales se encuentran las redes ad hoc móviles (MANETs, Mobile Ad hoc Networks), las redes inalámbricas Mesh (WMN, Wireless Mesh Network) y las redes inalámbricas de sensores (WSN, Wireless Sensor Network). Como su nombre lo indica es un algoritmo que crea rutas bajo demanda, es decir establece rutas solo cuando un nodo origen las necesita para comunicarse con otros nodos, y las mantiene tanto tiempo como sean necesarias por el nodo origen.

ruta para hacerlo. Así bien el nodo origen transmite en broadcast una trama de comando de solicitud de ruta (*route request command*). Ver ejemplo de la figura 3.18

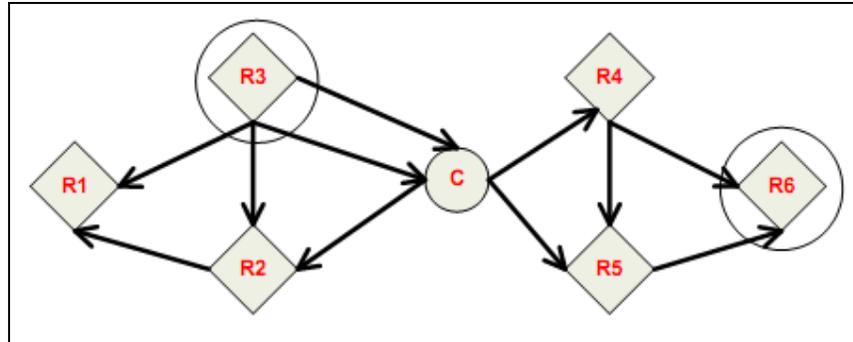


Figura 3.18 Ejemplo de broadcast de Route Request Command, búsqueda de ruta de R3 a R6

La trama *route request command* contiene un identificador de solicitud de ruta, la dirección de red del origen y destino de la ruta (con la opción de contener también la dirección destino de 64 bits), y un campo de costo de ruta (*path cost field*, el cual es una medida acumulativa que indica la calidad de enlace en una ruta a través de los saltos efectuados).

Así bien mientras la trama *route request command* se va propagando por la red, cada nodo que recibe esta trama, compara su dirección de red con la contenida en la trama. Si no coinciden, el nodo receptor tiene que retransmitir la trama pues no está destinada para él. Antes de retransmitir la trama *route request command*, verifica que no se tenga registro alguno de esa misma trama en su tabla de descubrimiento de ruta, es decir un registro con el mismo *route request ID* y mismo *Source address*. Si no existen registros de esta trama, el dispositivo genera dos registros nuevos, uno en su tabla de descubrimiento de ruta y otro en su tabla de enrutamiento¹³, los cuales servirán para el descubrimiento de ruta, el uso y mantenimiento de esta. Pero si ya existe un registro previo de esta trama, compara el *forward cost* del registro con el resultado de la suma del *path cost* de la trama con el costo de enlace del dispositivo previo. Si el valor de la suma es mayor que el *forward cost* del registro, entonces esta trama se desecha y no se retransmite; pero si es menor, los campos *forward cost* y *sender address* de ese registro de descubrimiento de ruta son actualizados con el nuevo costo de ruta (la suma) y la dirección del dispositivo previo que mando la trama *route request command*.

¹³ Un registro en la tabla de descubrimiento de ruta es de carácter temporal ya que dura solo un tiempo específico llamado *Route Discovery Time* y contiene los siguientes datos: el identificador de solicitud de ruta (*Route request ID*), la dirección del originador de la solicitud (*Source address*), la dirección del dispositivo anterior (*Sender address*, la cual sirve para determinar la ruta que una eventual trama *route reply command* debe seguir) que envió la trama *route request command*, y el costo de ruta acumulado del dispositivo originador al dispositivo receptor (*forward cost*) así como de este al dispositivo destino (*residual cost*). Por otro lado un registro en la tabla de enrutamiento contiene entre otros datos la información de la dirección destino del mensaje de datos y la dirección del nodo en el próximo salto (*next-hop*), es decir la correspondiente al siguiente nodo en el camino hacia el destino.

Independientemente de si hay o no registro de la trama *route request command* recibida, el dispositivo actualiza el *path cost field* de la trama¹⁴ y posteriormente efectúa su retransmisión en la búsqueda del destino.

En el proceso de descubrimiento de ruta habrá un nodo que al comparar su dirección o la de sus hijos (dispositivos finales) con la del destino de la trama *route request command* verificará que estas coinciden, por lo tanto será el último salto de la ruta y la trama habrá llegado a su nodo destino. Debido a la naturaleza de la transmisión broadcast, posiblemente el nodo destino ya haya recibido la misma trama por medio de otras rutas, así que el nodo destino tendrá que comparar el *path cost field* de la última trama recibida con en de las otras recibidas con anterioridad. Si el *path cost field* de la última trama es mejor que el de la anteriores, el nodo destino transmitirá en unicast una trama de respuesta llamada *route reply command* hacia el nodo que originó la trama *route request command* a través de los nodos marcados en la ruta correspondiente (ver figura 3.19). Así bien los nodos intermedios recibirán y retransmitirán la trama *route reply command* hasta llegar al nodo origen y con esto se dará por terminado el proceso de descubrimiento de ruta y el mensaje de datos se enviará del nodo origen al nodo destino siguiendo la secuencia de salto marcada para la mejor ruta, ver figura 3.20.

Zigbee utiliza tramas de confirmación de recepción (ACKs) a nivel de la capa MAC y de la subcapa de soporte de aplicación (APS). Cuando un mensaje es transmitido a un dispositivo remoto, este puede viajar a través de múltiples saltos hasta alcanzar su destino. Cuando el mensaje es transmitido de un nodo a su vecino, un acknowledgement es transmitido en sentido opuesto para indicar que la transmisión fue recibida exitosamente. Si el ACK no es recibido, el dispositivo que transmite enviará el mensaje de nuevo, en un rango de 0 a 7 veces según la configuración. Este ACK corresponde a la capa MAC.

Sumado a esto, el dispositivo que originó el mensaje de datos, espera recibir un ACK por parte del nodo destino (Network ACK¹⁵). Este ACK viaja por la misma ruta que el paquete de datos, pero en sentido opuesto, es decir del nodo destino hacia el nodo origen. Si el originador no recibe este ACK, entonces retransmite el mensaje de datos como máximo tres veces, hasta que el respectivo ACK sea recibido.

Cuando el Network ACK viaja hacia el origen, genera en cada nodo por el que pasa un ACK a nivel de MAC, que confirma la transmisión exitosa. Ver figura 3.21

¹⁴ La actualización del *path cost field* se realiza sustituyendo el valor que trae la trama por la suma del costo de enlace del dispositivo previo que le transmitió la trama al valor del *path cost field* de la trama recibida.

¹⁵ Aunque se puede considerar un ACK de red, este es generado en la subcapa de APS de Zigbee.

Implementación de una red inalámbrica de comunicación empleando el estándar Zigbee/802.15.4.

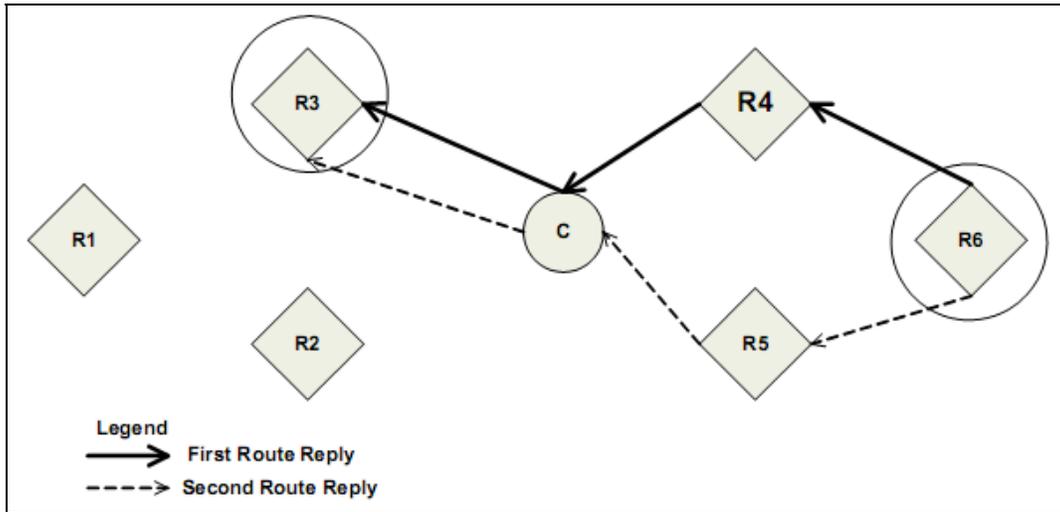


Figura 3.19 Ejemplo de Route Reply Command, R6 puede enviar más de un Route Reply si este identifica una mejor ruta

Nodo	Dirección destino	Dirección del próximo nodo
R3	Router 6	Coordinador
C	Router 6	Router 5
R5	Router 6	Router 6

Figura 3.20 Secuencia de salto para ruta de R3 a R6 después de haber efectuado el descubrimiento de ruta.

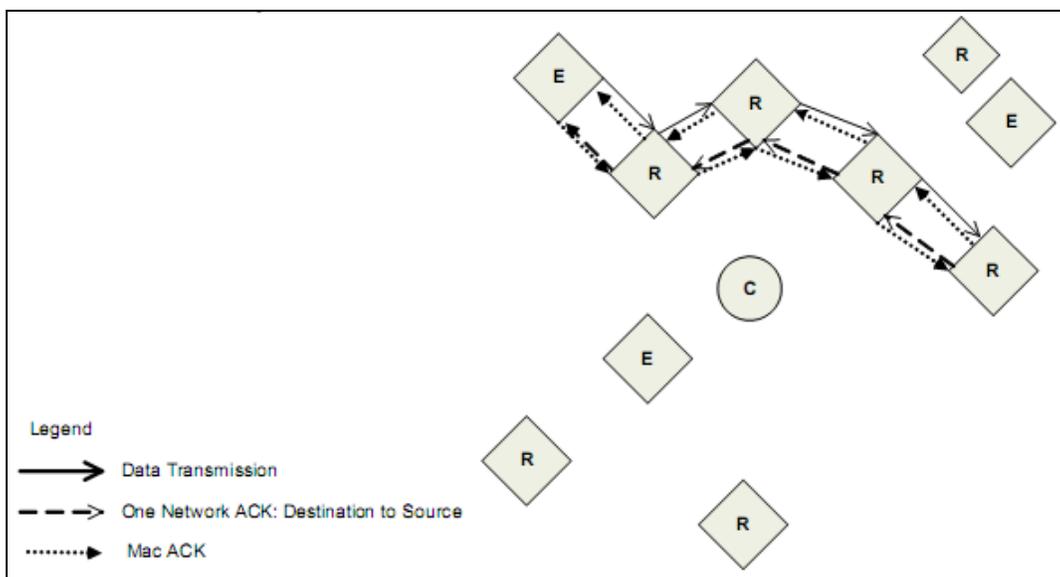


Figura 3.21 Proceso de transmisión de datos en entre nodos Zigbee.

CAPÍTULO 4

Tecnología XBee

Los módulos de radiofrecuencia XBee y XBee-Pro proporcionan una implementación sencilla, de bajo costo y con baja potencia de operación, ya que fueron diseñados para operar como redes 802.15.4 o redes Zigbee. Estos cuentan con una comunicación confiable y segura donde pueden ser empleados en comunicaciones punto a punto, punto a multipunto y topologías mesh. Por su pequeño tamaño y excelente rendimiento son adecuados para su uso en aplicaciones de corto, mediano y largo alcance dependiendo del entorno en que se encuentren, siendo que pueden utilizarse para aplicaciones que pueden ir desde la sustitución de cables en comunicaciones seriales, pasando por la domótica, redes de sensores y hasta sistemas de monitoreo y control distribuido.

Ambos módulos operan dentro de la banda de frecuencia de 2.4 GHz y son completamente compatibles entre sí ya que cuentan con el mismo número de pines donde la asignación de señales en cada pin es la misma. Ver figura 4.1



Figura 4.1 Vista de los módulos XBee

4.1 Principales características

La serie 1 de los radios XBee/XBee-Pro cuentan con un alto rendimiento ya que sus características de alcance, potencia de transmisión y sensibilidad de recepción son bastante buenas. En la figura 4.2 se muestran estas características.

Características		XBee	XBee-Pro
ALCANCE	Interiores o medio urbano	Hasta 30 m	Hasta 100 m
	Exteriores con línea de vista	Hasta 100 m	Hasta 1500 m
Potencia de transmisión		1 mW (0dBm)	60 mW (18 dBm)
Sensibilidad de recepción		-92 dBm	-100 dBm

Figura 4.2 Características de rendimiento de los radios de la familia XBee

Ambos radios cuentan con una velocidad de transmisión de datos por RF de 250,000 bps y una tasa de transferencia de datos seriales que va de 1200 a 115200 bps. Los radios pueden operar con una fuente de voltaje entre 2.8 y 3.4 V. Además pueden operar bajo el protocolo 802.15.4 o el estándar Zigbee, lo cual dependerá de la versión del firmware cargado en el radio.

La familia de los radios XBee soportan retransmisiones automáticas y ACKs, lo que garantiza una entrega confiable al nodo destino, emplean la técnica de modulación DSSS para disminuir la interferencia de otros dispositivos en el medio y permitir la operación de múltiples redes en el mismo canal.

En lo que respecta a las características de red y seguridad, los radios soportan topologías de red punto a punto, punto a multipunto, de igual a igual y mesh, donde los radios XBee pueden operar en alguno de 16 canales disponibles (numerados del 11 al 26) tanto para las redes 802.15.4 como para las redes Zigbee, y los XBee-Pro pueden funcionar en alguno de los 12 canales permitidos (numerados del 12 al 23). La manera de dirigir un paquete de datos a uno o varios radios destino depende del identificador de red (PAN ID), canal, la dirección de 16 y 64 bits.

Ambos radios cuentan con tres opciones de antena: antena dipolar (2.15 dBi), de chip (-1.5dBi) y monopolar (1.5 dBi), donde sólo las dos últimas vienen integradas a los radios.

Los radios XBee/XBee-Pro tienen aceptación mundial ya que cuentan con las aprobaciones de la FCC (Federal Communications Commission), IC (Industry Canada) y CE (*Conformité Européene*), pues cumplen con los requerimientos para operar en Estados Unidos, Canadá y la Unión Europea respectivamente, además de poder operar en Australia, Israel y Japón.

4.2 Disposición y asignación de señales en pines

Los módulos XBee y XBee-Pro cuentan con el mismo número de pines, y son completamente compatibles entre sí. La disposición de pines y las señales asignadas en cada pin se muestran en las figura 4.3 y 4.4 respectivamente.

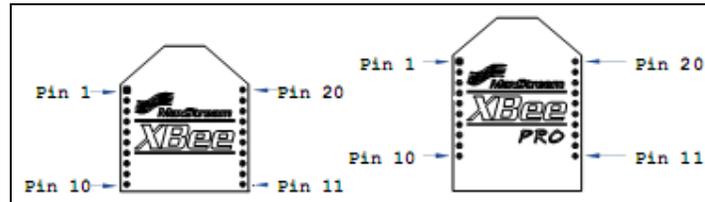


Figura 4.3 Disposición de pines en los radios XBee

No. Pin	Nombre	Dirección ¹	Descripción
1	VCC	-	Fuente de alimentación
2	DOUT	Salida	Salida de datos UART
3	DIN / CONFIG	Entrada	Entrada de datos UART
4	DO8*	Salida	Salida digital 8
5	RESET	Entrada	Reset del módulo (pulso de al menos 200ns)
6	PWM0/RSSI	Salida	Salida PWM 0 / Indicador de fuerza de señal RX
7	[reservado]	-	No conectar
8	[reservado]	-	No conectar
9	DTR / SLEEP_RQ* / DI8	Entrada	Pin de línea de control para dormir o entrada digital 8
10	GND	-	Tierra
11	AD4*/DIO4*	Ambas	Entrada analógica 4 o E/S digital 4
12	CTS /DIO7*	Ambas	Flujo de control Clear to send o E/S digital 4
13	ON / SLEEP	Salida	Indicador de estatus del módulo
14	VREF	Entrada	Voltaje de referencia para entradas A/D
15	Associate / AD5* / DIO5*	Ambas	Indicador de Asociación, Entrada analógica 5 o E/S digital 5
16	RTS * / AD6* /DIO6*	Ambas	Flujo de control Request to send, Entrada analógica 6 o E/S digital 6
17	AD3* / DIO3*	Ambas	Entrada analógica 3 o E/S digital 3
18	AD2* / DIO2*	Ambas	Entrada analógica 2 o E/S digital 2
19	AD1* / DIO1*	Ambas	Entrada analógica 1 o E/S digital 1
20	AD0* / DIO0*	Ambas	Entrada analógica 0 o E/S digital 0

Figura 4.4 Asignación de señales en los pines de los radios XBee.

*Funciones no soportadas en la versión 8.x17 (Zigbee).

Como mínimo deben conectarse los pines VCC, GND, DIN y DOUT para que pueda operar el radio.

¹ La dirección es con respecto al radio XBee

4.3 Operación de módulos XBee/XBee-Pro

4.3.1 Comunicaciones seriales

Los radios XBee/XBee-Pro se comunican con un dispositivo externo a través de un puerto serial asíncrono de nivel lógico. Por medio de este puerto serial el módulo de RF XBee se puede comunicar con cualquier dispositivo que cuente con comunicación UART (Universal Asynchronous Receiver Transmitter) compatible en lógica y voltaje; o a por medio de un convertidor de nivel a cualquier dispositivo serial.

4.3.1.1 Flujo de datos UART

Los dispositivos externos que cuentan con interface UART se pueden conectar directamente a los pines del módulo de RF XBee como se muestra en la figura 4.5.

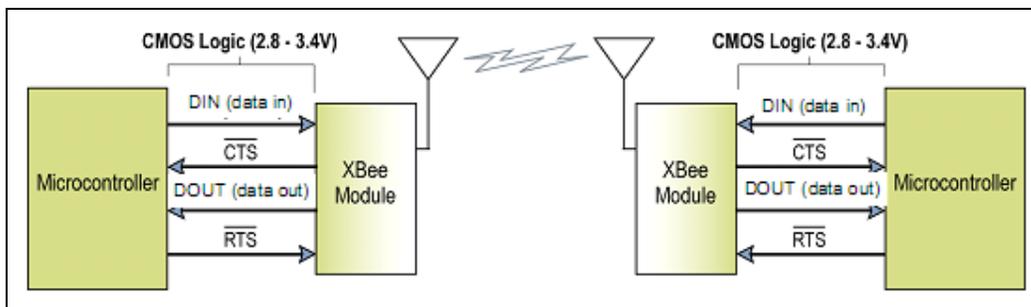


Figura 4.5 Diagrama de flujo de datos en dispositivos con interface UART

4.3.1.1.1 Datos seriales

Los datos entrantes y salientes del modulo UART del XBee pasan por los pines DIN y DOUT respectivamente como una señal serial asíncrona, la cual debe permanecer en un nivel alto mientras no se transmiten ni reciben datos.

Cada paquete UART está compuesto de un bit de inicio (nivel bajo), 8 bits de datos (bit menos significativo primero) y un bit de parada (nivel alto). La figura 4.6 muestra el patrón serial de bits de datos con formato UART.

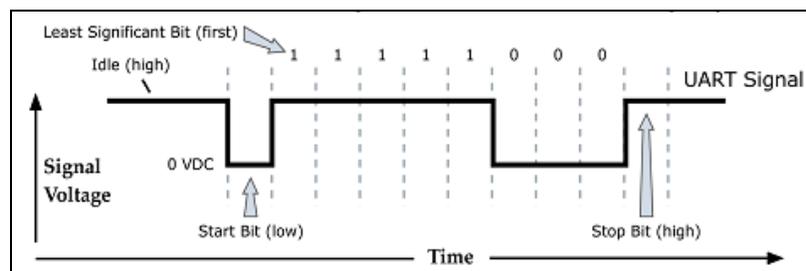


Figura 4.6 Paquete de datos UART 0x1F (valor decimal "31").

El modulo UART del XBee realiza las tareas de sincronización y comprobación de paridad, las cuales son necesarias para las comunicaciones de datos. La comunicación serial depende de

que los dos módulos UART (XBee y dispositivo host) se encuentren configurados con el mismo valor en los parámetros de Baud rate, paridad, bits de inicio, bits de parada y bits de datos.

4.3.1.2 Buffers seriales

Los módulos XBee cuentan con buffers que recogen los datos seriales o de RF recibidos. El buffer de recepción serial recoge los caracteres seriales entrantes y los mantiene hasta que puedan ser procesados. El buffer de transmisión serial almacena temporalmente los datos recibidos vía RF para después transmitirlos fuera del modulo UART del XBee. Ver figura 4.7

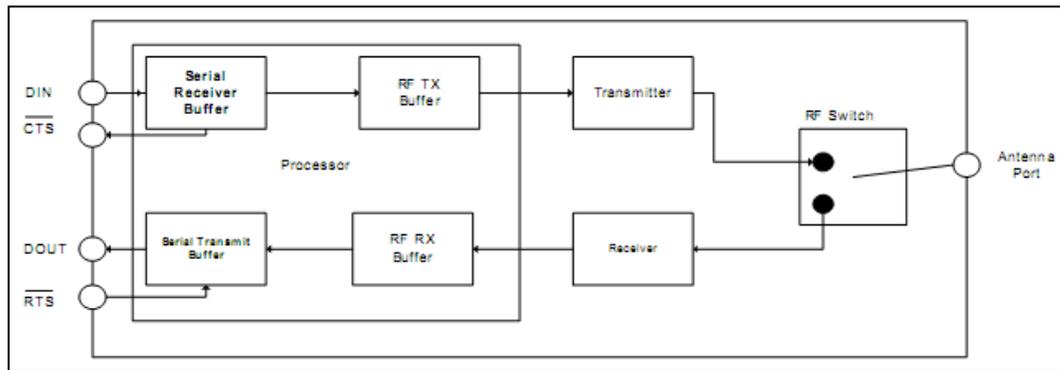


Figura 4.7 Diagrama interno de flujo de datos

4.3.1.2.1 Buffer de recepción serial

Los datos seriales con formato UART entran al radio XBee a través de pin DIN (pin 3) y son almacenados en el buffer de recepción serial hasta que puedan ser procesados.

4.3.1.2.2 Buffer de transmisión serial

Cuando el radio XBee recibe datos RF, los datos son movidos al buffer de transmisión serial y posteriormente son enviados en formato UART por el pin DOUT (pin 2).

4.3.1.3 Protocolos de comunicación serial

Un módulo XBee soporta dos modos distintos de comunicación serial con otro dispositivo UART, un modo transparente y un modo API.

4.3.1.3.1 Operación transparente

Bajo el modo transparente, los módulos de RF actúan como un reemplazo del cable serial. Todos los datos UART recibidos a través de pin DIN son puestos en cola para transmitirse por RF y los datos recibidos por RF son enviados fuera por el pin DOUT. Los parámetros de operación del radio se configuran entrando un Modo Comando.

Los datos seriales entrantes son almacenados en el buffer de recepción serial hasta que alguna de las siguientes circunstancias genera que los datos sean empaquetados y transmitidos:

- No se reciban caracteres seriales por una cantidad de tiempo determinada por el parámetro RO. Si RO = 0 el empaquetamiento se realiza al momento de recibir un caracter.
- El máximo número de caracteres (bytes) que puede contener un paquete RF se cumpla².
- La secuencia para entrar en modo comando se reciba.

4.3.1.3.2 Operación API

La operación bajo API (Application Programming Interface), es una alternativa al modo transparente, que establece una comunicación serial basada en tramas con estructura definida (API Frames), permitiendo que una aplicación puede interactuar con las capacidades de red que tienen los radios.

Bajo API todos los datos entrantes y salientes del módulo están contenidos en tramas que definen operaciones o eventos dentro del módulo.

Las tramas de datos transmitidas (recibidas por el modulo a través del pin DIN) incluyen:

- Trama de datos para transmitirse por RF a un radio destino
- Trama de comando (equivalente a los comando AT en el modo transparente)

Las tramas de datos recibidas (enviadas al host por el pin DOUT) incluyen:

- Trama de datos recibidas por RF
- Respuesta a un comando
- Notificaciones de eventos (reset, asociación, disociación, etc.)

La ventaja de utilizar tramas API es que se pueden configurar los parámetros de operación del radio y enviar paquetes de datos a múltiples radios de manera rápida y dinámica, sin tener que entrar al modo comando para modificar la dirección destino. El empleo de tramas API habilita la recepción de tramas de estatus de los paquetes enviados, tanto de tramas de comando como de tramas de datos transmitidos por RF. Si se reciben tramas de datos provenientes de un radio remoto, dicha trama contendrá información del origen y fuerza de la señal del paquete recibido (aplica solo para módulos configurados para operar bajo el protocolo 802.15.4), así como una carga útil de datos desde el origen.

² En los radios XBee el tamaño máximo de los paquetes de datos RF son de: 100 bytes bajo el protocolo 802.15.4 y 72 bytes bajo el protocolo Zigbee.

4.3.2 Estados de operación

El estado de operación de un módulo XBee en un instante dado puede encontrarse en alguno de los 4 modos mostrados en la figura 4.8

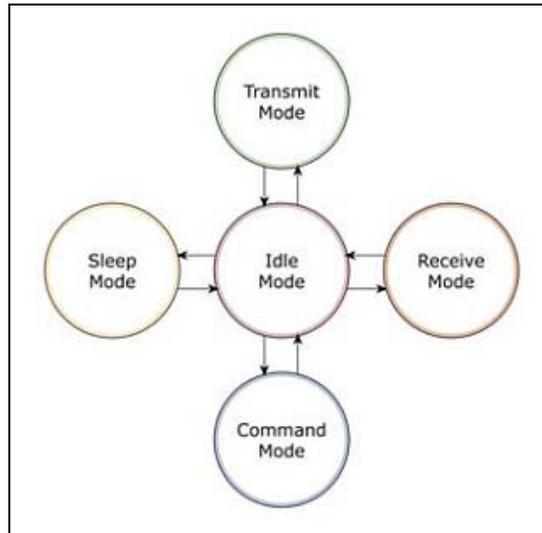


Figura 4.8 Modos de operación en módulos XBee.

4.3.2.1 Estado de inactividad (Idle mode)

Cuando un módulo de RF no está recibiendo o transmitiendo datos, este se encuentra en el estado de inactividad. Mientras el módulo se encuentra en este estado, también está comprobando la existencia de datos RF válidos en el medio, es decir que tengan características de una red 802.15.4 o Zigbee, según sea el caso.

El módulo solo cambia a alguno de los siguientes modos de operación bajo alguna de las siguientes circunstancias:

- **Modo de transmisión:** Datos seriales en el buffer de recepción serial están listos para ser empaquetados y transmitidos al nodo destino.
- **Modo de recepción:** Datos RF validos son recibidos a través de la antena.
- **Modo de reposo:** Los dispositivos finales se encuentran en un modo de bajo consumo de energía por lo tanto no reciben datos seriales ni datos RF³.
- **Modo comando:** Después de ejecutar una secuencia de caracteres el radio entra al modo comando.

³ En los módulos XBee Serie 1, el modo reposo solo lo soportan los dispositivos que no cuentan con capacidades de enrutamiento y están operando bajo el protocolo 802.15.4.

4.3.2.2 Modo de transmisión

Cuando datos seriales son recibidos y están listos para ser empaquetados, el módulo RF sale del Modo de Inactividad e intenta transmitir los datos. La dirección destino determina que nodo o nodos recibirán los datos.

Antes de transmitir los datos, el módulo se asegura de que la dirección de red de 16 bits del destino y la ruta hacia este ya se haya establecido. En el caso de no conocer la dirección de red, se realiza un descubrimiento de dirección de red (Network address discovery). Si la ruta no es conocida, entonces se realiza un descubrimiento de ruta (Route discovery), tal cual lo establece el protocolo Zigbee. Si la dirección de red o la ruta hacia el nodo destino no pueden ser establecidas, el paquete a transmitir es descartado. Ver figura 4.9

Cuando los datos son transmitidos de un nodo a otro, un acknowledgement a nivel de red es transmitido de vuelta a través de la ruta establecida hacia el nodo origen. Este paquete de acknowledgement le indica al nodo origen que el paquete de datos fue recibido por el nodo destino. En caso de que no fuera recibido el acknowledgement de red, el nodo origen retransmite los datos hasta tres veces si es necesario.

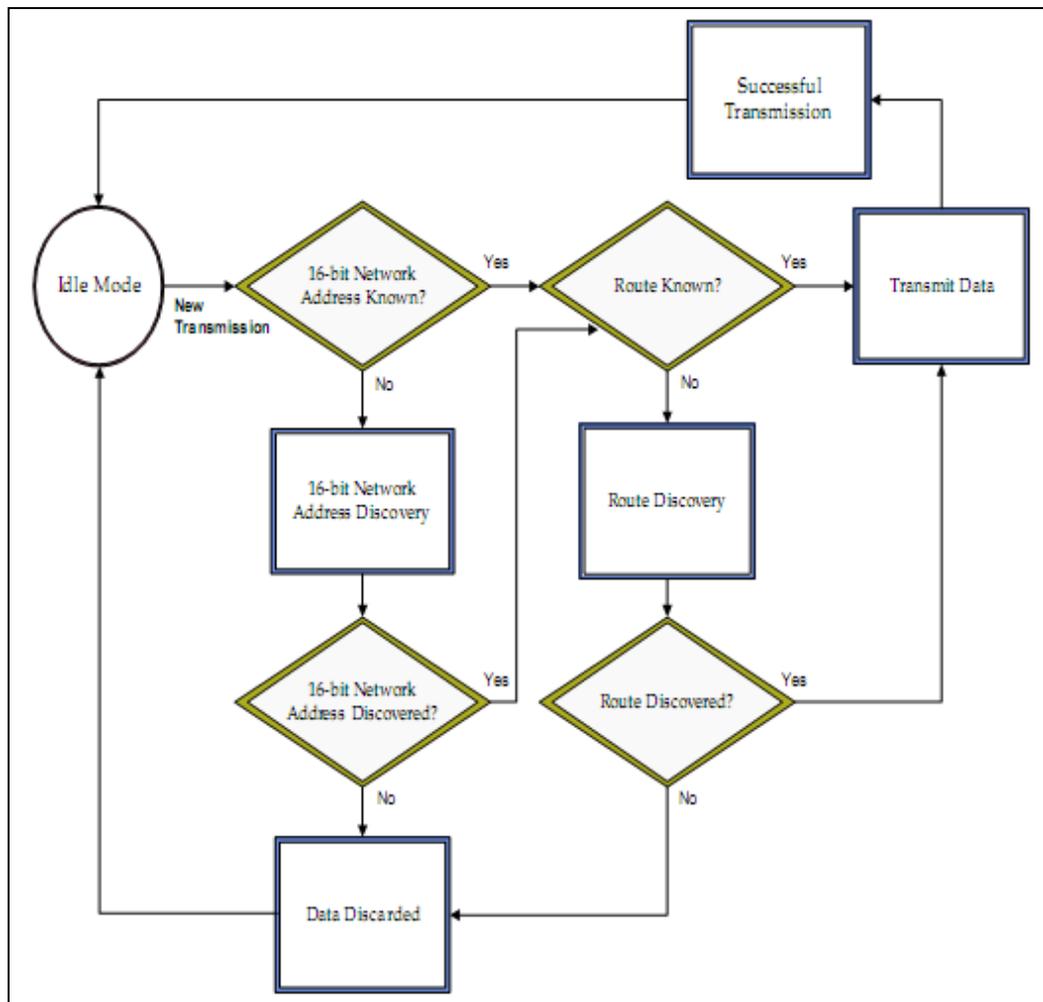


Figura 4.9 Modo de secuencia de transmisión

4.3.2.3 Modo de recepción

Si son recibidos paquetes de RF válidos y su dirección coincide con el parámetro MY (dirección de red de 16 bits) del módulo de RF, entonces los datos son transferidos al buffer de transmisión serial y enviados fuera por el pin DOUT.

4.3.2.4 Modo de reposo

Los radios se pueden configurar para pasar a este estado de reposo a través de una señal con un nivel de voltaje bajo aplicado a un pin, o bien despertarse a un determinado intervalo de tiempo, o haciendo uso de la combinación de ambas opciones.

4.3.2.5 Modo comando

Este modo solo aplica cuando el radio se encuentra bajo el modo transparente de operación. Sirve para modificar o leer los parámetros de un radio. Bajo el modo comando los caracteres seriales entrantes por el pin DIN son interpretados como parte de un comando y no como parte de datos a transmitir vía RF.

Para entrar al modo comando se debe realizar lo siguiente:

1. Durante un tiempo establecido por el parámetro GT (Guard Times) no se envía ningún carácter.
2. Se introduce dentro de un segundo tres veces el carácter de secuencia de comando establecido por el parámetro CC (Command Sequence Character).
3. Durante el tiempo establecido por el parámetro GT (Guard Times) no se envía ningún carácter.

El módulo de RF confirma que se ha entrado al modo comando con el envío de un "OK" seguido de un retorno de carro. En ese momento el módulo está habilitado para recibir comandos AT por el pin DIN y así leer o modificar sus parámetros. Si ningún comando es recibido dentro del tiempo determinado por el parámetro CT (Command mode timer) el módulo regresa al modo de inactividad (Idle).

En la figura 4.10 se puede observar la sintaxis para enviar un comando AT.

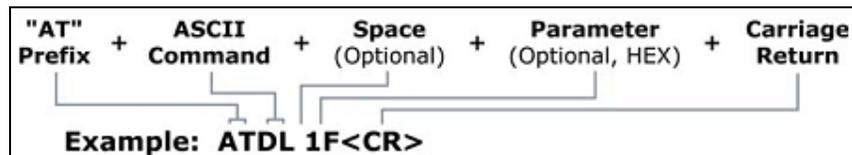


Figura 4.10 Sintaxis para enviar un comando AT

El campo "Parameter" es opcional ya que se omite cuando solo se desea leer el valor de un parámetro en el módulo de RF. Fuera del modo comando todos los datos seriales entrantes al módulo son transmitidos por RF al radio cuya dirección de 64 bits (SH y SL respectivamente) corresponda a la dirección destino del módulo que transmite (DH y DL respectivamente).

4.3.3 Redes XBee/XBee-Pro

Las redes formadas con los módulos XBee y XBee-Pro Serie 1 pueden operar bajo el protocolo estándar 802.15.4 o bajo la pila de protocolos de Zigbee, por lo tanto su formación y funcionamiento se basa en estos protocolos. En el caso de operar bajo Zigbee, los módulos XBee y XBee-Pro solo pueden operar como coordinadores o enrutadores. A continuación se describe el funcionamiento de las redes Zigbee bajo el firmware Beta de Zigbee 8x17.

4.3.3.1 Formación de una red Zigbee

Para formar una red, el coordinador selecciona de manera automática un canal de operación donde las condiciones de comunicación sean las mejores, también selecciona un identificador de PAN (PAN ID) único y exclusivo para su red. Para esto el coordinador primero lleva a cabo un escaneo de energía sobre los canales establecidos por su parámetro SC (Scan Channels), con el objeto de conocer cuanta actividad existe en cada canal. Luego efectúa un escaneo activo en cada canal establecido por SC para identificar a otros coordinadores y enrutadores activos, con el objeto de conocer entre otras cosas su ID (PAN ID). Con los resultados del escaneo de energía y el escaneo activo el módulo selecciona sus parámetros de operación, es decir canal (CH) y PAN ID (ID). En el caso de que el parámetro ID este configurado con un valor igual a 0xFFFF, el coordinador seleccionará un valor aleatorio de PAN ID que no esté ocupado por otra red; en caso contrario tomará el valor guardado del parámetro ID. Después de que el nodo coordinador se ha iniciado como tal, mandará una señal parpadeante por el pin 15 a razón de una vez por segundo y permitirá que otros nodos se le asocien, basándose en el tiempo establecido por el parámetro NJ (Node Join Time) y de acuerdo al número máximo de hijos permitidos. La dirección de 16 bits del coordinador de una red XBee siempre es 0x0000.

Cuando el modo API está habilitado en el módulo XBee, al iniciarse el módulo de RF como coordinador enviará por el pin DOUT una trama con el estatus del Modem indicando "Coordinator started". El comando AI (Association Indication) puede ser usado en cualquier momento durante la inicialización del coordinador para conocer su estatus de asociación.

En el caso de un enrutador, para poder iniciarse, debe localizar y asociarse a un enrutador en su área de cobertura que ya se haya unido con anterioridad a la red o a un coordinador al cual asociarse. Para hacer esto realiza el mismo procedimiento de escaneo activo que el coordinador. Una vez que identifica a los coordinadores y enrutadores a su alrededor, el enrutador de acuerdo a su parámetro ID intentará asociarse a alguno de ellos para convertirlo en su padre. Si el PAN ID del enrutador tiene configurado el valor de 0xFFFF, intentará asociarse a un padre en cualquier red (PAN ID) que permita asociación. De otro modo, el enrutador solo intentará asociarse a un coordinador o enrutador que opere en su mismo PAN ID. Si encuentra un coordinador o enrutador válido y se asocia a él, el enrutador se iniciará como tal dentro de la red y mandará por el pin 15 una señal parpadeante a razón de 2 veces por segundo. El padre le asignará una dirección de red exclusiva, la cual podrá ser leída a través del comando MY. El nuevo enrutador permitirá que otros nodos se le asocien, basándose en el tiempo establecido por el parámetro NJ, de acuerdo a su profundidad en la red y número máximo de hijos permitidos. Cuando el modo API está habilitado en el módulo XBee, el módulo al iniciarse como enrutador envía por el pin DOUT una trama con el estatus

del Modem indicando "Joined". El comando AI (Association Indication) puede ser usado en cualquier momento durante la inicialización del enrutador para conocer su estatus de asociación.

4.3.3.2 Limitaciones de red Zigbee

La formación de una red Zigbee con módulos XBee y XBee-Pro Serie 1 está gobernada por una **máxima profundidad de red**, un **máximo número de hijos enrutadores e hijos dispositivos finales**.

- **Máximo número de Hijos:** El coordinador y cada enrutador que se une a la red puede soportar hasta 20 hijos, de los cuales 6 pueden ser enrutadores y 14 dispositivos finales⁴. Ver figura 4.11
- **Máxima profundidad de red:** Es el número de niveles de descendencia a partir del coordinador y se puede extender hasta 5 niveles. Ver figura 4.12

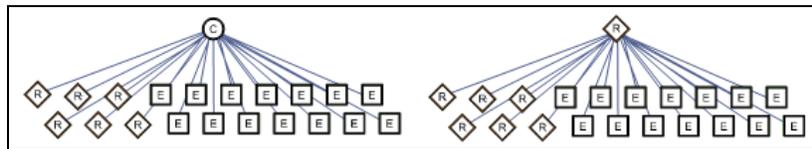


Figura 4.11 Máximo número de Hijos por Padre

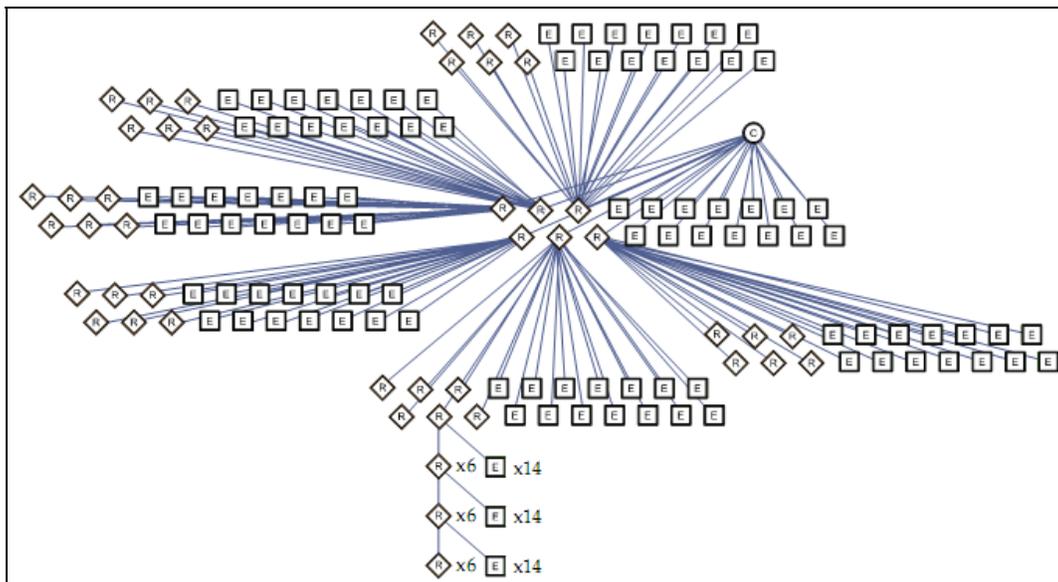


Figura 4.12 Profundidad Máxima de Red

⁴ La versión Zigbee 8.x17 utilizada en los módulos XBee y XBee-Pro no soporta dispositivos finales.

4.3.3.3 Direccionamiento bajo Zigbee

El direccionamiento sirve para enviar paquetes de datos a un nodo o nodos específicos. Bajo Zigbee cada módulo de XBee cuenta con tres maneras de ser identificado en la red:

- una dirección única de 64 bits que es asignada de fábrica, la cual es única e irreplicable y se obtiene mediante el uso de los comandos SH (Serial Number High) y SL (Serial Number Low).
- Una dirección de red de 16 bits que le es asignada por el padre al momento de unirse a la red, la cual puede ser leída empleando el comando MY.
- Y una opción extra que permite identificar a un módulo mediante una cadena de caracteres ASCII denominada NI (Node Identifier), la cual es guardada en el módulo de RF y puede leída empleando el comando NI.

Cada módulo de RF tiene la capacidad de guardar hasta 7 direcciones de 64 bits con sus respectivas direcciones de red de 16 bits.

4.3.3.3.1 Envío de paquetes de datos en el modo transparente

Para enviar paquetes de datos bajo el modo transparente es necesario primero direccionar los paquetes al nodo destino ya sea través de su dirección de 64 bits o por medio de su identificador de nodo NI.

En el primer caso al entrar al modo comando, se configuran los parámetros DH y DL en el nodo origen con el valor de los parámetros SH y SL del nodo destino, para posteriormente bajo el modo de transmisión enviar los paquetes de datos al nodo destino. En el segundo caso, es decir para direccionar a través de NI, en el nodo origen se efectúa el comando DN (Destination Node) con un valor de parámetro igual al NI que identifica al nodo destino. Esto genera que de manera automática en el nodo origen se configuren los parámetros DH y DL con los valores de los parámetros SH y SL (dirección de 64 bits) del nodo destino. Posteriormente puede efectuarse la transmisión de datos al nodo destino.

4.3.3.3.2 Envío de paquetes de datos en el modo API

Para enviar un paquete de datos bajo API de manera directa se emplea la estructura de trama *Zigbee Transmit Request* (ver figura 4.21), o de manera indirecta se utiliza el NI del nodo destino.

Para el caso de la manera directa, se envía al radio una trama *Zigbee Transmit Request* por el pin DIN, la cual cuenta con dos campos de dirección destino, uno para la dirección de 64 bits (SH y SL del nodo destino) y otro para la dirección de red de 16 bits (MY del nodo destino) la cual necesariamente debe conocerse antes de efectuar la transmisión de datos. En caso de que sea desconocida la dirección de red del nodo destino, se coloca el valor de 0xFFFE en el campo de dirección de red. Esto generará que el radio intentando transmitir el paquete de datos efectúe un descubrimiento de dirección de red a partir de la dirección de 64 bits del nodo destino y establezca la ruta a seguir si es necesario. Una vez realizado esto enviará por RF el paquete de datos al nodo destino.

Si en la trama *Zigbee Transmit Request* se especifican la direcciones correctas de 64 y 16 bits del nodo destino, el módulo origen saltará el proceso de descubrimiento de dirección de red e inmediatamente intentará enrutar el paquete de datos al nodo remoto. En el caso de que la dirección de red del nodo destino haya cambiado, tanto el descubrimiento de dirección de red como el descubrimiento de ruta se efectuarán para dirigir y establecer la ruta más adecuada hacia el nodo destino. Efectuado esto se enviará por RF el paquete de datos al nodo destino.

En cualquiera de los dos casos anteriores, el nodo que transmitió el paquete de datos generará una trama *Zigbee Transmit Status* que enviará por el pin DOUT. Esta trama contendrá entre otros datos, la dirección de red actualizada del nodo destino, el numero de retransmisiones que tomaron lugar, el estatus de entrega (exitosa o con algún tipo de falla) y el estatus de descubrimiento (tipos de descubrimiento que se efectuaron), ver figura 4.22.

Cuando se direcciona de manera indirecta (a partir del NI del nodo destino) se envía por el pin DIN del nodo origen una trama *AT Command* (ver figura 4.18). Esta trama debe contener al comando DN (Destination Node) con un valor de parámetro equivalente al NI del nodo destino, el modulo RF al recibir esta trama realizará un proceso de descubrimiento de direcciones y luego generará una trama de respuesta *AT Command Response* que enviará por el pin DOUT, esta trama contendrá la dirección de red de 16 bits y la dirección de 64 bits del nodo asociado al NI utilizado. Procesando estos datos de manera externa puede transmitirse posteriormente una trama *Zigbee Transmit Request* hacia el nodo destino.

4.3.3.3 Direccionamiento del coordinador

La dirección de 16 bits del coordinador de la red siempre es igual a "0", por lo tanto un paquete de datos puede ser direccionado asignando a los parámetros DL y DH del nodo origen el valor de "0".

4.3.3.4 Direccionamiento para transmisión Broadcast

La transmisión de paquetes de datos en broadcast se efectúa utilizando la dirección broadcast (0x000000000000FFFF), es decir en el módulo RF que realizará esta transmisión se asignan los valores de DH = 0x00000000 y DL = 0x0000FFFF. Un paquete de datos con esta dirección estará destinado a todos los demás nodos de la red, y por su naturaleza broadcast no generará ACKs.

4.4 Operación API

Bajo la operación API (Application Programming Interface) se requiere que la comunicación con el módulo de RF sea a través de tramas con una estructura definida, es decir tramas con una secuencia ordenada de bytes. API especifica como los datos a transmitir, comandos, las respuestas de los comandos y mensajes de estatus del módulo de RF tienen que ser enviados y recibidos por el modulo XBee usando tramas de datos UART.

4.4.1 Especificaciones de trama API

Dos modos API son soportados y ambos pueden ser habilitados empleando el comando AP. El valor del parámetro AP configura el módulo para operar en un modo en particular:

- AP = 1: Operación API básica
- AP = 2: Operación API con caracteres de escape⁵

4.4.1.1 Operación API básica

Cuando en un módulo de RF está habilitado el modo API básico (AP = 1), la estructura de la trama de datos UART se define de la manera mostrada en la figura 4.13.

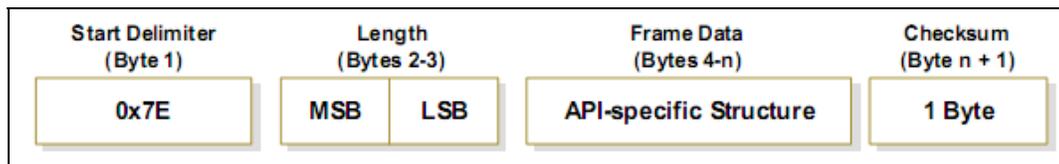


Figura 4.13 Estructura de trama de datos UART con AP = 1. MSB = More Significant Byte, LSB = Less Significant Byte.

4.4.1.2 Operación API con caracteres de escape

En el modo de operación API con caracteres de escape (AP = 2), la estructura de la trama de datos UART se muestra en la figura 4.14.

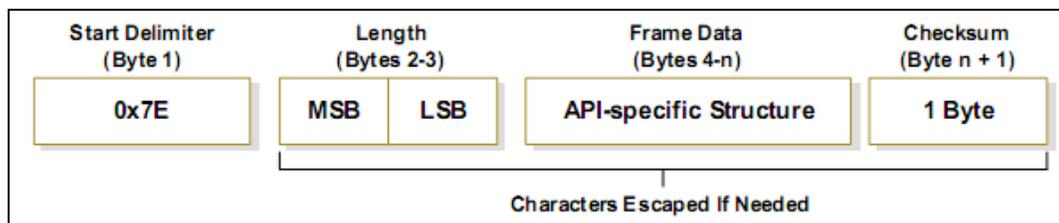


Figura 4.14 Estructura de trama de datos UART con AP = 2.

Cuando el módulo de RF envía o recibe una trama de datos UART, existen valores específicos (caracteres de escape) que de no ser evadidos pueden interferir con la secuencia de la trama de datos. Para evadir un carácter de escape, se necesita insertar en la trama de datos UART un 0x7D seguido del resultado del XOR del carácter de escape con 0x20. Los bytes de datos que necesitan ser evadidos son:

- 0x7E – Delimitador de inicio
- 0x7D – Escape
- 0x11 – XON
- 0x13 – XOFF

⁵ Los caracteres de escape (**control**) son aquellos caracteres que tienen una interpretación y función específica en los sistemas de comunicaciones.

4.4.1.3 Descripción de la trama de datos UART

La trama de datos UART está compuesta por cuatro campos: *Start delimiter*, *Length*, *Frame Data* y *Checksum*, los cuales se describen a continuación.

4.4.1.3.1 Start delimiter

El Delimitador de inicio de la trama de datos UART tiene un valor de 0x7E. Cualquier dato recibido antes del delimitador de inicio es ignorado.

4.4.1.3.2 Length

El campo **Length** tiene un valor de dos bytes y especifica el número de bytes que estarán contenidos en el campo **Frame Data**, por lo tanto no incluye al campo **Checksum**.

4.4.1.3.3 Frame data

El campo **Frame Data** de la trama de datos UART consta de una estructura específica como se puede ver en la figura 4.15

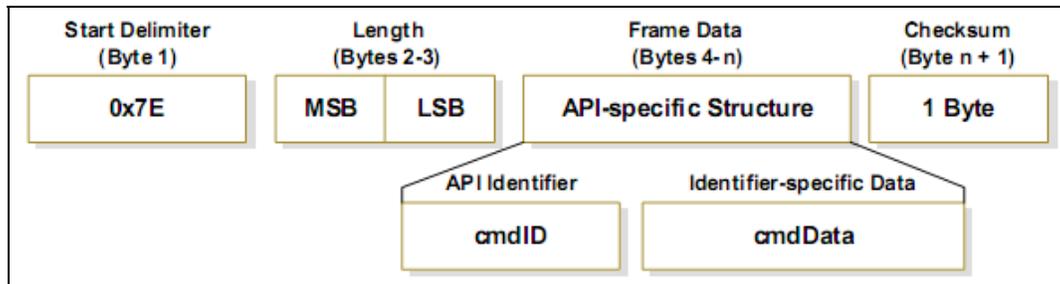


Figura 4.15 Trama de datos UART y estructura específica API

El valor del **cmdID** (**API Identifier**) indica que tipo de mensaje API estará contenido en la trama **cmdData** (**Identifier-specific Data**).

4.4.1.3.4 Checksum

Para verificar la integridad de los datos (**Frame Data**), una suma de verificación (checksum) es calculada y verificada a partir de los bytes del Frame Data.

Para calcular el valor del Checksum no se incluye al delimitador de inicio ni a la longitud de la trama, es decir se suman solo los bytes del Frame Data y del resultado solo se consideran los 8 bits menos significativos, los cuales se restan de 0xFF.

Para verificar el valor del checksum se suman todos los bytes (incluyendo el checksum, pero no el delimitador de inicio ni la longitud). Para que la suma sea correcta esta debe dar por resultado 0xFF.

Si la trama no es recibida correctamente o si la suma de comprobación falla, el módulo de RF responderá con una trama indicando el error o simplemente se descartará la trama.

4.4.1.4 Tipos de tramas API

Los tipos de tramas API son explicados a continuación, sus identificadores y respectivos nombres se muestran en la figura 4.16.

Identificador de trama API	Nombre de trama API
0x8A	Modem Status
0x08	AT Command
0x09	AT Command - Queue Parameter Value
0x88	AT Command Response
0x10	Zigbee Transmit Request
0x8B	Zigbee Transmit Status
0x90	Zigbee Receive Packet

Figura 4.16 Tipos de tramas API

4.4.1.4.1 Modem Status

Identificador API: 0x8A

Las tramas de estatus del módulo son enviadas por el módulo en respuesta a condiciones específicas. Ver figura 4.17

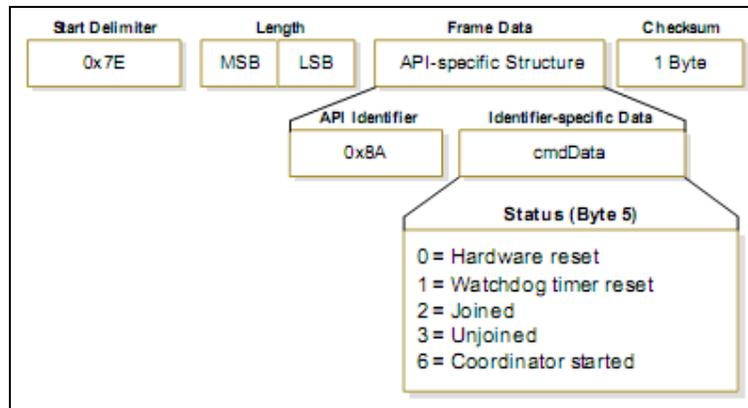


Figura 4.17 Trama Modem Status

4.4.1.4.2 AT Command

Identificador API: 0x08

Esta trama es enviada al módulo y permite que los valores de los parámetros de éste sean consultados o configurados. Ver figura 4.18

Implementación de una red inalámbrica de comunicación empleando el estándar Zigbee/802.15.4.

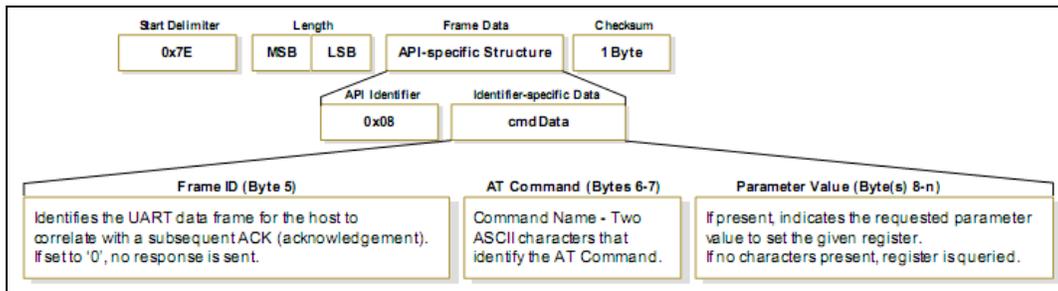


Figura 4.18 Trama AT Command

4.4.1.4.3 AT Command – Queue Parameter Value

Identificador API: 0x09

Este trama API es enviada al módulo y permite que los valores de sus parámetros sean consultados o configurados, pero a diferencia con la trama *AT Command*, los valores de los parámetros son puestos en cola y no son aplicados hasta que una trama tipo *AT Command* o un comando AC (Apply Changes) se efectúe. Cuando solo se realiza la lectura del parámetro, este es regresado inmediatamente. Ver figura 4.19

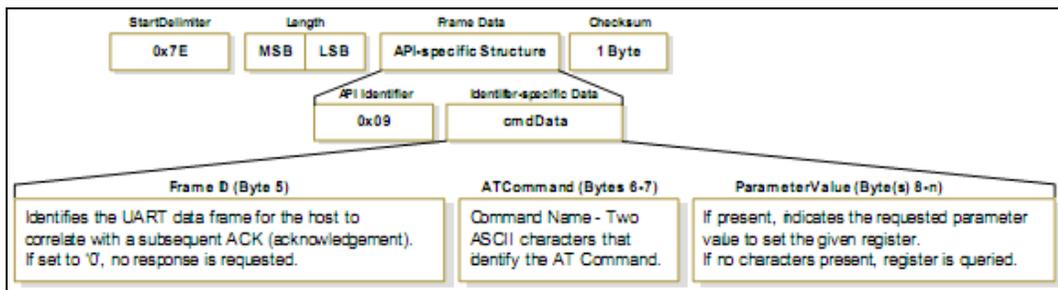


Figura 4.19 Trama AT Command con valor en cola. La trama es igual que la *AT Command* a excepción del identificador API.

4.4.1.4.4 AT Command Response

Identificador API: 0x88

Esta trama es enviada por el módulo de RF y es la respuesta a un comando previo, es decir a una trama *AT Command* (ver figura 4.20). Algunos comandos mandarán de vuelta varias tramas *AT command response*, un ejemplo es el comando ND (Node Discovery), donde la última trama *AT Command Response* sólo contendrá un estatus de "OK" sin más datos.

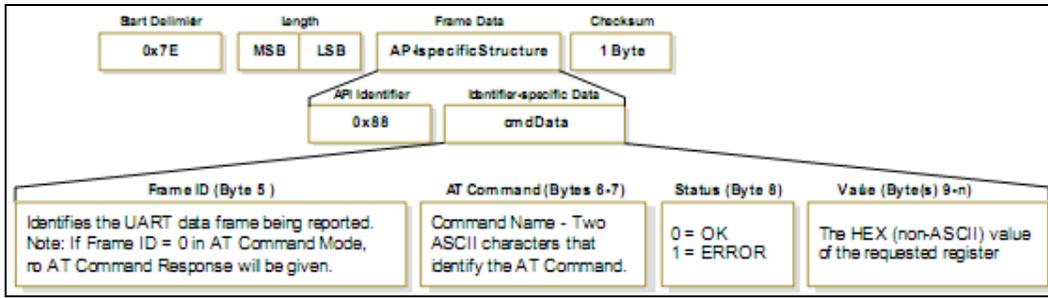


Figura 4.20 Trama AT Command Response

4.4.1.4.5 Zigbee Transmit Request

Identificador API: 0x 10

La trama Zigbee Transmit Request es enviada al XBee y causará que éste envíe un paquete de datos por RF a un módulo destino. Ver figura 4.21

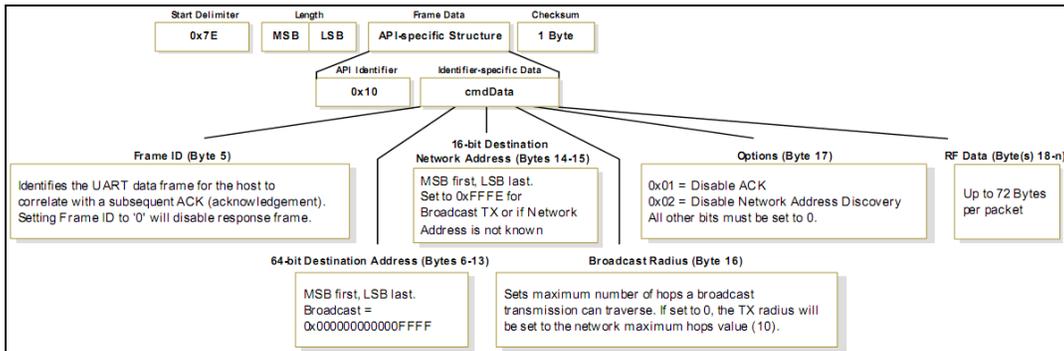


Figura 4.21 Trama Zigbee Transmit Request

4.4.1.4.6 Zigbee Transmit Status

Identificador API: 0x 8B

Cuando la transmisión de un mensaje Zigbee Transmit Request se ha completado, el módulo envía un mensaje de estatus de transmisión. Este mensaje indicará si el paquete de datos fue recibido exitosamente o si hubo una falla. Ver figura 4.22

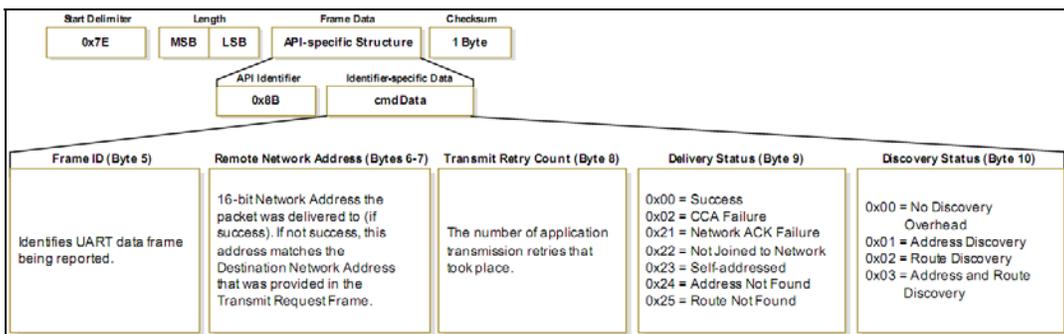


Figura 4.22 Zigbee Transmit Status

4.4.1.4.7 Zigbee Receive Packet

Identificador API: 0x90

Cuando el módulo recibe un paquete RF, éste es enviado por el módulo empleando este tipo de mensaje. Ver figura 4.23

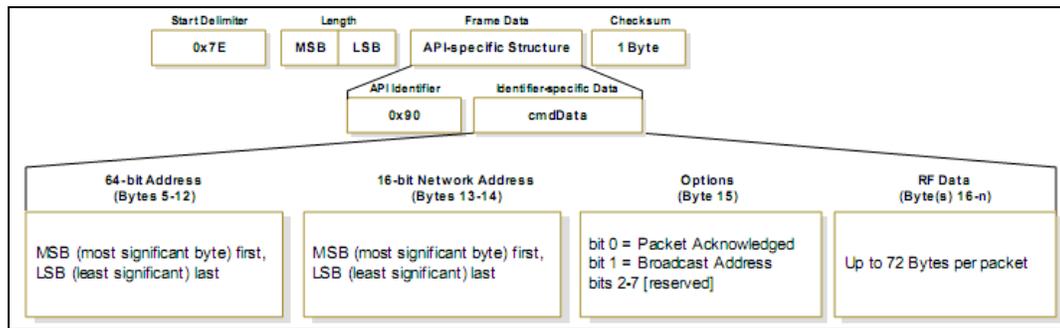


Figura 4.23 Zigbee Receive Packet

CAPÍTULO 5

Pruebas, características e implementación de red prototipo

El diseño de la red de comunicaciones para el control y monitoreo de luminarias se realizó en base al uso de los radios de la familia XBee operando bajo el estándar Zigbee, para lo cual fue necesario realizar lo siguiente:

- Efectuar una selección del tipo de radios que se utilizarán en base a sus características y a la aplicación a la que serán destinados.
- Planear y llevar a cabo pruebas de comunicación entre radios para conocer su funcionamiento y desempeño bajo condiciones reales de operación, y así determinar la factibilidad del uso de esta tecnología.
- Establecer las condiciones en que operará la red y sus características de funcionamiento.
- Realizar la integración de los radios de comunicación con los módulos de control y adquisición de datos ubicados en las luminarias, y con el servidor del Sistema Control y Monitoreo del Alumbrado Público.

En los apartados siguientes se describen estas etapas.

5.1 Selección de radios

Para realizar una correcta elección de los radios que servirán para la red de comunicaciones para el control y monitoreo de las luminarias, fue necesario llevar a cabo una comparación entre las características físicas y de operación de la familia de los radios XBee. En los apartados siguientes se muestran dichas características.

5.1.1 Diferencias entre radios XBee y XBee-Pro

Como ya se ha mencionado los radios XBee y XBee-Pro son transceptores pequeños, de alto desempeño y bajo costo, que operan en la frecuencia ISM de la banda de 2.4 GHz, lo cual implica que no requieren licencia de uso de la frecuencia para su operación.

Aunque son compatibles en los pines, los XBee-Pro son ligeramente más largos que los XBee, además su máxima potencia de transmisión es mayor que la de los XBee, lo cual implica que cuentan con un mayor alcance a cambio de un consumo de corriente ligeramente mayor que los XBee. Sumado a esto los XBee-Pro son capaces de recibir señales más débiles que los XBee, es decir tienen mayor sensibilidad de recepción.

Debido a que un radio XBee-Pro cuenta con mayor sensibilidad de recepción y transmite a mayor potencia, este puede enviar y recibir datos a distancias mayores que el XBee. Por otro lado los XBee-Pro solo pueden usar 12 canales de frecuencia, a diferencia de los XBee que pueden emplear los 16 canales disponibles. Las diferencias entre los radios se muestran en la figura 5.1

Característica		XBee	XBee-Pro
Alcance con línea de vista RF		Hasta 100 m	Hasta 1500 m
Potencia máxima de transmisión		1 mW	60 mW
Consumo de corriente	Tx	45mA (a 3.3 V)	215mA (a 60 mW y 3.3 V)
	Idle/Rx	50mA (a 3.3 V)	55mA (a 3.3 V)
Sensibilidad de recepción		-92 dBm	-100 dBm
Dimensiones		2.438 cm x 2.761 cm	2.438 cm x 3.294 cm
Número de canales		16 canales	12 canales

Figura 5.1 Diferencias entre radios XBee y XBee-Pro

5.1.2 Opciones de antena en los radios XBee/XBee-Pro

Ambos radios están disponibles en tres versiones (ver figura 5.2):

- Con una antena de chip: Los radios con antena de chip son la mejor opción donde el espacio y la mecánica son más importantes que el alcance. La antena de chip tiene una ganancia de -1.5 dBi y un alcance aproximado del 70% de lo que tiene la antena de látigo. La desventaja de este tipo de antena es que su patrón de radiación no es muy uniforme, por lo tanto cierta orientación logra mejor desempeño.
- Con una antena monopolar tipo látigo. Los radios con antena de látigo utilizan un alambre de $\frac{1}{4}$ de la longitud de onda soldado directamente al circuito impreso del radio. Este tipo de antena tiene una ganancia de 1.5 dBi y cuenta con mayor alcance que la antena de chip, además tiene un patrón de radiación más uniforme por lo cual el desempeño del radio prácticamente no se ve afectado por su orientación.
- Con conector U.FL: Los radios con conector U.FL permiten la conexión de una antena externa que puede ser una antena dipolar con conector U. FL, o un cable adaptador de U. FL a antena RP-SMA. Si se conecta una antena dipolar al radio, la cual tiene una ganancia de 2.15 dBi, su alcance de comunicación es un poco mayor que el logrado por el de antena de látigo, además su desempeño prácticamente no se ve afectado por la orientación de la antena en el plano perpendicular al eje de la misma.

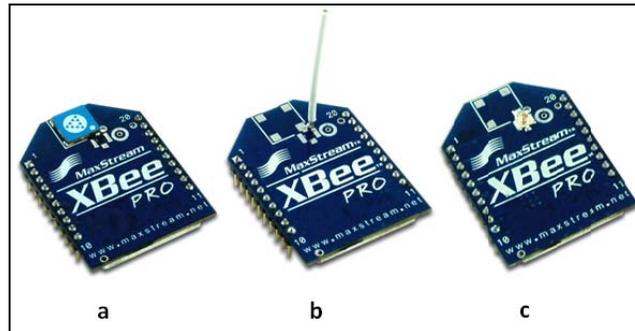


Figura 5.2 Tipos de antena en radios XBee/XBee-Pro, a) antena de chip, b) antena de látigo y c) conector U.FL

Considerando que estos radios se utilizarán para una aplicación en exteriores como lo es el control y monitoreo de luminarias de alumbrado público, se ha elegido el radio y opción de antena con mejores prestaciones, ya que para garantizar una comunicación confiable entre los nodos de la red (ubicados en luminarias y azoteas de edificios del campus universitario) se tiene que sortear una serie de condiciones adversas en espacio y tiempo. Ejemplo de esto son el cambio en las condiciones climáticas (lluvia, neblina, viento) y los obstáculos en la línea de vista de los radios (edificios, árboles, vehículos, etc.). Por lo tanto se ha elegido usar los radios XBee-Pro, con antena dipolar o con antena de látigo, dependiendo del gabinete que se utilice para contenerlos, es decir gabinete de metal o de plástico respectivamente.

5.2 Pruebas de comunicación

Las pruebas de comunicación realizadas entre radios XBee-Pro se basaron en el protocolo estándar IEEE 802.15.4 y el estándar Zigbee. Dichas pruebas fueron realizadas en Ciudad Universitaria en instalaciones de las siguientes zonas:

- Campus Central o Circuito Escolar
- Estadio olímpico y zonas aledañas
- Circuito exterior

El objetivo de efectuar estas pruebas fue tener una referencia de la calidad de enlace y confiabilidad de comunicación de una red Zigbee con radios XBee-Pro, que al someterse a condiciones reales de operación justifiquen su uso en una red de comunicaciones para el control y monitoreo de las luminarias dentro del campus universitario.

5.2.1 Pruebas de comunicación punto a punto con radios bajo el protocolo estándar 802.15.4

Las pruebas consistieron en verificar la calidad de enlace, así como la confiabilidad de una comunicación punto a punto entre un nodo central ubicado en la azotea del edificio B del principal de la Facultad de Ingeniería y varios nodos circundantes dentro del campus ubicados

a diferentes distancias y condiciones de línea de vista. Cabe mencionar que se realizó una prueba por cada sitio.

Debido a la ubicación de la Facultad de Ingeniería dentro del campus, se considero al edificio B del Principal como sitio adecuado para tomarlo como punto central en las pruebas bajo el estándar 802.15.4 (capa PHY y MAC del estándar Zigbee), ya que cuenta con una línea de vista adecuada con las principales instalaciones en las zonas mencionadas en el apartado anterior, y por lo tanto se puede considerar como sitio potencial para colocar un nodo de la red Zigbee. Esto se verificará de manera práctica con los resultados obtenidos.

5.2.1.1 Características y ubicación de los radios utilizados en las pruebas

Los radios utilizados para las pruebas fueron dos radios XBee-Pro con antena dipolar de $\frac{1}{2}$ onda con ganancia de 2.15 dBi. Es importante mencionar que ambos radios fueron configurados para operar a su máxima potencia (18 dBm), y para no efectuar ninguna retransmisión en caso de no recibir ACK por parte del nodo destino, tal como lo marca el protocolo 802.15.4.

Los radios se cargaron con el firmware del protocolo 802.15.4 (versión 10A1) y por practicidad se utilizó el protocolo de comunicación serial AT para la comunicación en la red. Los parámetros de operación en los radios se configuraron con los valores mostrados en la figura 5.3 que están expresados en hexadecimal (los parámetros no mostrados están configurados con el valor por default).

Radio Central	Radio Móvil
CH = F	CH=F
ID=3332	ID=3332
DH=0013A200	DH=0013A200
DL=40001230	DL=40091F9E
MY=1234	MY=4321
SH=0013A200	SH=0013A200
SL=40091F9E	SL=40001230

Figura 5.3 Parámetros de operación de los radios utilizados para la prueba bajo 802.15.4.

Para conseguir una interferencia menor debida a la operación de redes 802.11b en los lugares de prueba, se eligió el canal 15 (0xF) para la comunicación, ya que este es uno de los cuatro canales del protocolo 802.15.4¹ que se encuentran ubicados en las bandas de guarda de los tres canales del 802.11b (1, 6 y 11).

El radio ubicado en la azotea del edificio B del principal de la facultad de Ingeniería (Radio Central) se configuró para reenviar los paquetes de datos recibidos hacia el originador de los mismos.

Otro radio (Radio Móvil) ubicado en diferentes instalaciones alrededor del edificio B, se conectó a una computadora portátil, en la cual por medio del software de prueba X-CTU se configuraron las características de los paquetes a transmitir y se observó la cantidad de

¹ Los canales 15, 20, 25 y 26 del protocolo 802.15.4 se encuentran en las bandas de guarda de los canales del 802.11b

paquetes recibidos por el Radio Móvil con su respectivo RSSI² (Indicador de fuerza de la señal recibida).

La figura 5.4 muestra la ubicación del radio central y del radio móvil al realizar las pruebas de comunicación punto a punto, mientras que en la figura 5.5 se especifica la ubicación de dichos sitios con su respectiva distancia con el Radio Central.

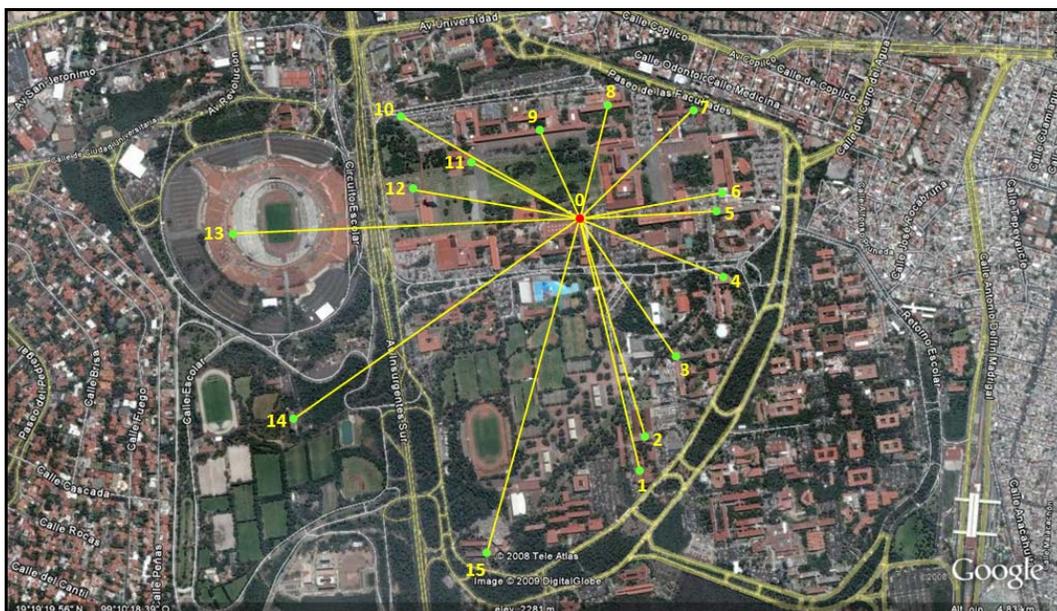


Figura 5.4 Ubicación visual de los radios XBee-Pro dentro del campus

Sitio	Lugar	Distancia [m]
0	Nodo central: Edificio B del Principal de la facultad de Ingeniería, azotea	NA
1	Biblioteca Anexo FI, azotea	717
2	Edificio de la DIMEI, azotea	492
3	Posgrado FI, azotea ala norte	456
4	IIMAS, azotea ala norte	422
5	Facultad de Química, azotea Edificio B	375
6	Facultad de Medicina, Azotea de la biblioteca	395
7	Facultad de Odontología, edificio D 3er piso	430
8	Facultad de Economía, 3er piso	307
9	Facultad de Derecho, edificio D 3er piso	258
10	Facultad de Filosofía y Letras, entrada del estacionamiento	570
11	Biblioteca Central, planta principal ala oriente	334
12	Explanada de Rectoría, ala oriente	465
13	Estadio Olímpico, azotea del palomar lado sur	952
14	Multifamiliar de Maestros, azotea	953
15	Escuela Nacional de Trabajo Social, azotea del edificio B	950

Figura 5.5 Ubicación de los radios para las pruebas bajo 802.15.4

² El software de prueba Range Test del X-CTU despliega el RSSI del paquete recibido solo si los radios están configurados bajo 802.15.4.

5.2.1.2 Características de los paquetes enviados

Las características de los paquetes enviados se muestran a continuación:

- Paquetes enviados por cada sitio: 1000
- Envío de paquetes cada 100 ms
- Cantidad de bytes por paquete: 72³
- Timeout de recepción de datos: 1000 ms

5.2.1.3 Calculo de la potencia máxima de la señal recibida

A partir de la ecuación de transmisión de potencia de Friis que se muestra a continuación:

$$P_R = \frac{P_T G_T G_R \lambda^2}{(4\pi R)^2}$$

Se calculó la potencia de la señal que deben recibir los radios XBee-Pro al estar ubicados en los sitios marcados alrededor del edificio B del principal de la Facultad de Ingeniería bajo condiciones ideales de propagación, es decir tomando en cuenta solo la atenuación de la potencia de la señal debida a la distancia entre el transmisor y el receptor (modelo de propagación en el espacio libre).

La ecuación de Friis considera el modelo más simple de propagación electromagnética para enlaces de microondas, o sea el modelo de propagación en el espacio libre, y sirve para calcular la potencia recibida (P_R) por una antena de ganancia G_R que está separada una distancia R de una antena con ganancia G_T transmitiendo señales de longitud de onda λ a una potencia P_T a través de una ruta de espacio libre⁴.

Para las pruebas efectuadas, en todos los casos $P_T = 18$ dBm (≈ 60 mW), $G_T = G_R = 2.15$ dBi y $\lambda = 0.12491$ m, donde solo cambia la distancia entre transmisor y receptor.

5.2.1.4 Resultados obtenidos

Con los resultados obtenidos del cálculo de la potencia de señal recibida en el espacio libre y la potencia real recibida (RSSI) en cada uno de los sitios mencionados se conocieron las características reales de comunicación para los radios XBee considerando los demás factores de atenuación de la señal.

La figura 5.6 muestra el resumen de las condiciones en que se realizaron las pruebas y los resultados obtenidos.

³ La cantidad de 72 bytes por paquete se eligió tomando como referencia la cantidad máxima de bytes que soporta un paquete RF transmitido por radios de la familia XBee operando bajo el estándar Zigbee.

⁴ Se le considera ruta de espacio libre a aquella que no tiene obstáculo alguno en su camino.

Implementación de una red inalámbrica de comunicación empleando el estándar Zigbee/802.15.4.

CONDICIONES					RESULTADOS		
Sitio	Lugar	Distancia [m]	LOS	RFLOS	Paquetes recibidos	Pr teórica [dBm]	RSSI Promedio [dBm]
0	Nodo central: Edificio principal de la facultad de Ingeniería	NA ⁵	NA	NA	NA	NA	NA
1	Biblioteca Anexo FI, azotea	717	Si	Si	1000	-74.863	-76
2	Edificio de la DIMEI, azotea	492	Si	Si	1000	-71.592	-76
3	Posgrado FI, azotea ala norte	456	Si	No (parcialmente obstruida por edificios y la torre de Ingeniería)	1000	-70.932	-80
4	IIMAS, azotea ala norte	422	Si	No (Obstruida levemente por arboles)	1000	-70.258	-72
5	Facultad de Química, azotea Edificio B	375	No	No (obstruida por el edificio A de la facultad de Química)	1000	-69.233	-72
6	Facultad de Medicina, Azotea de la biblioteca	395	Si	Si	1000	-69.684	-70
7	Facultad de Odontología, edificio D 3er piso	430	No	No (pocos árboles)	1000	-70.422	-72
8	Facultad de Economía, 3er piso	307	No	No (algunos árboles)	1000	-67.495	-72
9	Facultad de Derecho, 3er piso edificio D	258	Si	Si	1000	-65.985	-72
10	Facultad de Filosofía y Letras, entrada del estacionamiento	570	Si	No (obstruida parcialmente por arboles y Biblioteca Central)	912	-72.87	-84
11	Biblioteca Central, planta principal ala oriente	334	Si	No (Obstruida por pocos árboles)	997	-68.227	-73
12	Explanada de Rectoría, ala oriente	465	No	No (obstruida por varios árboles)	472	-71.101	-85
13	Estadio Olímpico, azotea del palomar lado sur	952	Si	No (obstruida por muy pocos árboles)	947	-77.325	-78
14	Multifamiliar de Maestros, azotea	953	Si	Si	1000	-77.334	-76
15	ENTS, azotea del edificio B	950	No	No (Obstruida por árboles)	973	-77.307	-83

Figura 5.6 Condiciones y resultados obtenidos en pruebas bajo 802.15.4

Se puede observar que la comunicación del punto central con cada uno de los puntos circundantes es en su mayoría exitosa (100% de paquetes recibidos con respecto al total de enviados), pero en algunos sitios se ve merma debido a que no se tiene una línea de vista completamente libre e influye la distancia entre el transmisor y el receptor.

⁵ NA: No aplica

5.2.2 Pruebas de comunicación con radios bajo Zigbee

Las pruebas realizadas con los radios operando bajo el estándar Zigbee sirvieron para identificar la manera en que se asocian los nodos al formar la red, así como para conocer la confiabilidad de comunicación entre el coordinador y los demás nodos; lo anterior bajo un entorno real de operación, es decir al estar ubicados en edificios y luminarias de un circuito de prueba dentro del campus universitario.

Las pruebas consistieron en establecer una red Zigbee con un nodo coordinador y ocho enrutadores. Se colocó al coordinador y a 3 nodos más en lugares con calidad de enlace conocida y probada⁶; los 5 nodos restantes se colocaron en las luminarias del circuito 192A del alumbrado público. A partir del nodo coordinador de la red, se generó la formación de 6 redes Zigbee distintas. Bajo la última configuración de red Zigbee se efectuaron las pruebas de comunicación para conocer la confiabilidad del sistema, donde el coordinador estuvo transmitiendo paquetes de datos a cada uno de los nodos restantes. Cada enrutador de la red se sometió a 10 pruebas de comunicación.

5.2.2.1 Características y ubicación de los radios utilizados en las pruebas

Para estas pruebas se utilizaron 9 radios XBee-Pro, 4 con antena dipolar de $\frac{1}{2}$ onda y 5 con antena de látigo. Todos los radios se configuraron para operar a su máxima potencia, es decir 18 dBm, y debido al estándar Zigbee que soportan los radios XBee, el número de retransmisiones efectuadas a falta de ACK por parte del nodo destino es igual a 3. Por practicidad se utilizó el protocolo de comunicación serial AT para la comunicación en la red, por tanto el radio que fungió como coordinador Zigbee se cargo con la versión firmware 8017 y a los demás radios que funcionaron como enrutadores se les cargo con la versión 8217.

Los parámetros configurados se muestran en la figura 5.7 con los valores expresados en hexadecimal a excepción del NI que esta expresado en ASCII.

Coordinador	Enrutadores
ID=1234	ID=1234
DH= valor SH del enrutador destino	DH= No Aplica
DL= valor SL del enrutador destino	DL= No aplica
SC=200 ⁷	SC=200
NI= COORDINADOR	NI= identificador especificado para cada radio

Figura 5.7 Parámetros configurados en los XBee-Pro en las pruebas bajo Zigbee

Se eligió el valor del parámetro SC = 200 y ID = 1234 para limitar el proceso de escaneo solamente al canal 20⁸ y establecer el identificador de PAN con ese valor de ID, con el objeto de obligar al coordinador a establecer su red en este canal y bajo ese Pan ID, y forzar a los

⁶ Sitios de las pruebas de comunicación bajo protocolo 802.15.4

⁷ Con el valor de 0x200 en el parámetro SC (Scan Channels) se limitó a los radios a realizar un escaneo solo en canal 20

⁸ Canal ubicado en la banda de guarda de los canales 6 y 11 del protocolo 802.11b por lo tanto presenta menos interferencias debidas a otros sistemas operando en la banda de los 2.4 GHz

enrutadores a buscar nodos a los cuales asociarse solo en el canal 20 y operando en una red con ese ID.

La configuración de los parámetros mostrados en la figura 5.7 tiene como consecuencia que los marcados en **negrita** en la figura 5.8 sean asignados automáticamente por el estándar Zigbee al momento de que el coordinador y los enrutadores forman parte de la red.

Coordinador	Enrutadores
CH=14	CH=14
ID=1234	ID=1234
DH= valor SH del enrutador destino	DH= 0
DL= valor SL del enrutador destino	DL= 0
SH=0013A200	SH= valor respectivo de cada enrutador
SL=40001230	SL= valor respectivo de cada enrutador
MY= 0 (se asigna automáticamente)	MY= dirección de red del enrutador asignada por su respectivo padre)
-----	MP= dirección de red del padre
SC=200	SC=200

Figura 5.8 Configuración automática de parámetros al establecerse los radios como nodos de la red

Todos los enrutadores fueron configurados para reenviar al coordinador los paquetes de datos recibidos por RF destinados a ellos. El nodo coordinador se conectó a una computadora portátil en donde por medio del software de prueba X-CTU se definieron las características y la cantidad de paquetes de datos a transmitir, y se pudieron observar la cantidad de paquetes recibidos en cada prueba.

La ubicación de los nodos de la red Zigbee de prueba se muestra en las figuras 5.9 y 5.10, donde la última indica la ubicación a detalle de los nodos en las luminarias del circuito 192A.



Figura 5.9 Visión general de la ubicación de nodos de la red Zigbee de prueba



Figura 5.10 Visión de nodos ubicados en luminarias del circuito 192A

Un resumen de las ubicación y características de los radios utilizados para estas pruebas se muestran en la figura 5.11

ID del nodo	Ubicación	Tipo de radio	Tipo de nodo
COORDINADOR	Biblioteca Central	XBee-Pro, antena dipolar de $\frac{1}{2}$ onda	C
PRINCIPAL	Facultad de Ingeniería, edificio B	XBee-Pro, antena dipolar de $\frac{1}{2}$ onda	R
DIMEI	Edificio de la DIMEI	XBee-Pro, antena dipolar de $\frac{1}{2}$ onda	R
BIBLIOANX	Biblioteca del Anexo de Ingeniería	XBee-Pro, antena dipolar de $\frac{1}{2}$ onda	R
192A-1	Luminaria 1 del circuito 192A, estacionamiento de la DIMEI	XBee-Pro, antena de látigo	R
192A-2	Luminaria 2 del circuito 192A, estacionamiento de la DIMEI	XBee-Pro, antena de látigo	R
192A-3	Luminaria 3 del circuito 192A, estacionamiento de la DIMEI	XBee-Pro, antena de látigo	R
192A-4	Luminaria 4 del circuito 192A, estacionamiento de la DIMEI	XBee-Pro, antena de látigo	R
192A-5	Luminaria 5 del circuito 192A, estacionamiento de la DIMEI	XBee-Pro, antena de látigo	R

Figura 5.11 Resumen de características y ubicación de radios para la prueba bajo ZigBee

5.2.2.2 Características de los paquetes enviados

- Paquetes enviados a cada nodo: 100
- Envío de paquetes continuos
- Cantidad de bytes enviados por paquete: 72
- Timeout de recepción de datos: 2000 ms

5.2.2.3 Resultados obtenidos

A continuación se muestran las diferentes formaciones de red efectuadas de manera autónoma por el estándar Zigbee, así como los resultados de las pruebas de comunicación entre el coordinador y los 8 enrutadores de la red formada.

5.2.2.3.1 Formaciones de red Zigbee

La información de los enrutadores de la red que se obtuvo para las distintas formaciones de red a través del descubrimiento de nodos a partir del coordinador, se presenta en las figuras 5.13, 5.15, 5.17, 5.19, 5.21, 5.23, donde la información de cada enrutador se encuentra en el formato mostrado en la figura 5.12. También se muestra la estructura de red respectiva partiendo de la asociación entre nodos.

MY: Dirección de red de 16 bits
 SH: 32 bits más significativos de la dirección de 64 bits
 SL: 32 bits menos significativos de la dirección de 64 bits
 NI: Identificador del nodo
 MP: Dirección del padre
 Tipo de nodo: Coordinador 00, Enrutador 01
 Estatus: 00, es de uso reservado
 Profile ID: identificador del perfil del dispositivo
 Fabricante: identificador del fabricante

Figura 5.12 Formato de información de cada nodo

Formación 1

0001	035F	0002	03ED	047 ^a	0360	0507	0594
0013A200	0013A200	0013A200	0013A200	0013A200	0013A200	0013A200	0013A200
40091F9E	4008C0E2	40091FA7	40087BD6	40010CED	4001A6A9	40087BDB	4001E190
PRINCIPAL	DIMEI	BIBLIOANX	192A-5	192A-4	192A-3	192A-2	192A-1
0000	0001	0001	035F	035F	035F	035F	035F
01	01	01	01	01	01	01	01
00	00	00	00	00	00	00	00
C105	C105	C105	C105	C105	C105	C105	C105
101E	101E	101E	101E	101E	101E	101E	101E

Figura 5.13 Formación 1 de red Zigbee

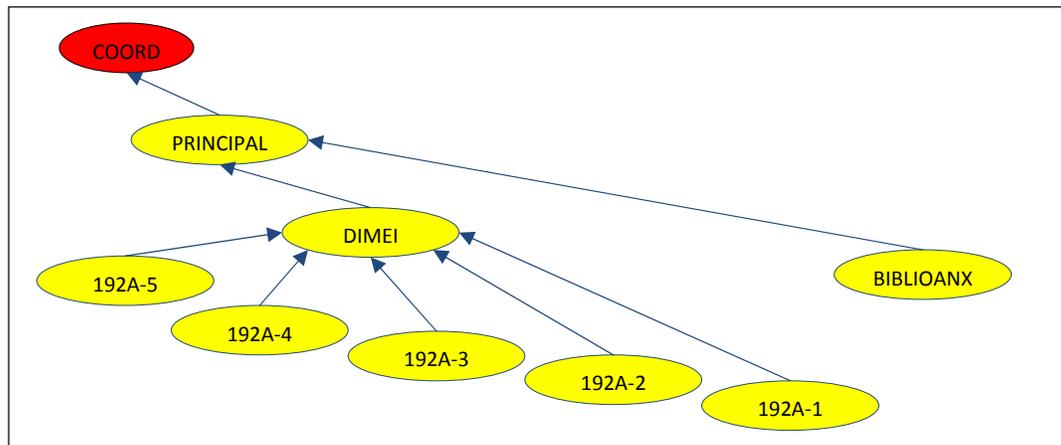


Figura 5.14 Estructura de red para la formación 1

Formación 2

0001	035F	0002	03ED	0090	011D	0360	0003
0013A200	0013A200	0013A200	0013A200	0013A200	0013A200	0013A200	0013A200
40091F9E	4008C0E2	40091FA7	40087BD6	40010CED	4001A6A9	40087BDB	4001E190
PRINCIPAL	DIMEI	BIBLIOANX	192A-5	192A-4	192A-3	192A-2	192A-1
0000	0001	0001	035F	0002	0002	035F	0002
01	01	01	01	01	01	01	01
00	00	00	00	00	00	00	00
C105	C105	C105	C105	C105	C105	C105	C105
101E	101E	101E	101E	101E	101E	101E	101E

Figura 5.15 Formación 2 de red Zigbee

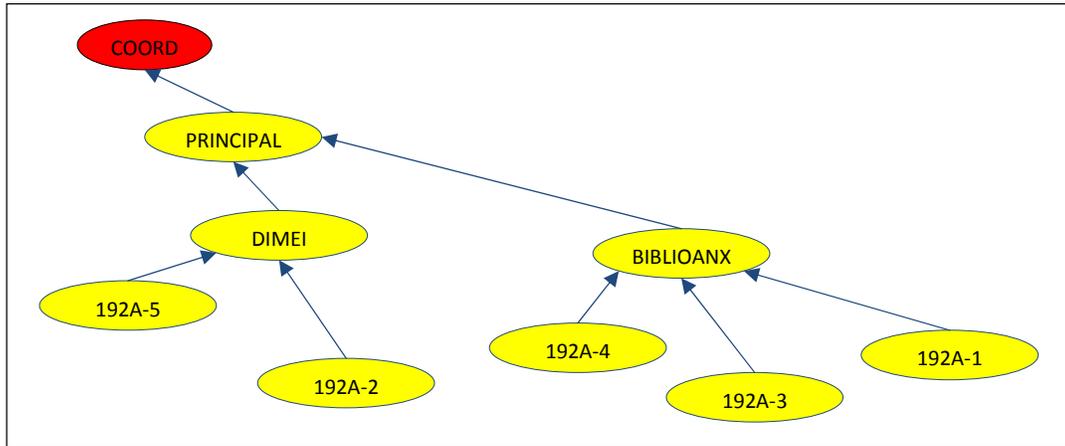


Figura 5.16 Estructura de red para la formación 2

Formación 3

0001	035F	0002	0360	011D	01AA	0003	0090
0013A200	0013A200	0013A200	0013A200	0013A200	0013A200	0013A200	0013A200
40091F9E	4008C0E2	40091FA7	40087BD6	40010CED	4001A6A9	40087BDB	4001E190
PRINCIPAL	DIMEI	BIBLIOANX	192A-5	192A-4	192A-3	192A-2	192A-1
0000	0001	0001	035F	0002	0002	0002	0002
01	01	01	01	01	01	01	01
00	00	00	00	00	00	00	00
C105	C105	C105	C105	C105	C105	C105	C105
101E	101E	101E	101E	101E	101E	101E	101E

Figura 5.17 Formación 3 de red Zigbee

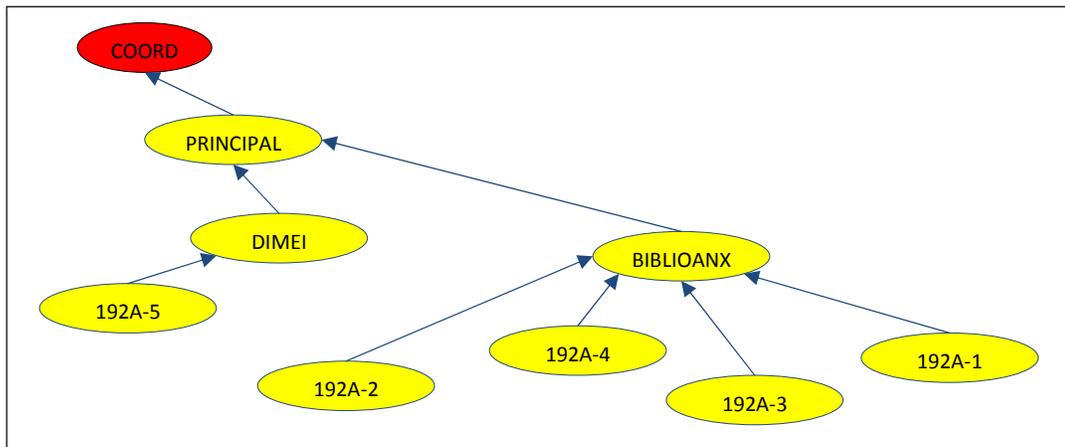


Figura 5.18 Estructura de red para la formación 3

Formación 4

0001 0013A200 40091F9E PRINCIPAL 0000 01 00 C105 101E	0002 0013A200 4008COE2 DIMEI 0001 01 00 C105 101E	035F 0013A200 40091FA7 BIBLIOANX 0001 01 00 C105 101E	011D 0013A200 40087BD6 192A-5 0002 01 00 C105 101E	0003 0013A200 40010CED 192A-4 0002 01 00 C105 101E	0090 0013A200 4001A6A9 192A-3 0002 01 00 C105 101E	01AA 0013A200 40087BDB 192A-2 0002 01 00 C105 101E	0360 0013A200 4001E190 192A-1 035F 01 00 C105 101E
---	---	---	--	--	--	--	--

Figura 5.19 Formación 4 de red Zigbee

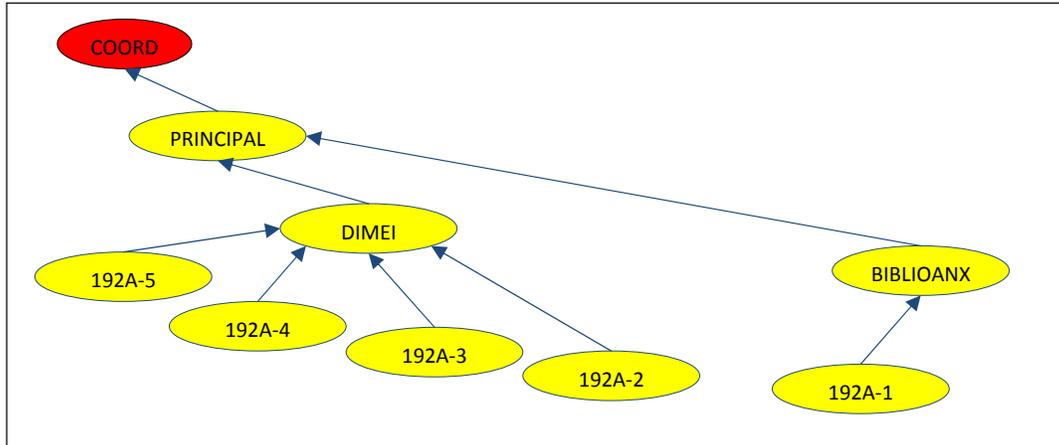


Figura 5.20 Estructura de red para la formación 4

Formación 5

0001 0013A200 40091F9E PRINCIPAL 0000 01 00 C105 101E	0002 0013A200 4008COE2 DIMEI 0001 01 00 C105 101E	035F 0013A200 40091FA7 BIBLIOANX 0001 01 00 C105 101E	0090 0013A200 40087BD6 192A-5 0002 01 00 C105 101E	0004 0013A200 40010CED 192A-4 0003 01 00 C105 101E	011D 0013A200 4001A6A9 192A-3 0002 01 00 C105 101E	0003 0013A200 40087BDB 192A-2 0002 01 00 C105 101E	0360 0013A200 4001E190 192A-1 035F 01 00 C105 101E
---	---	---	--	--	--	--	--

Figura 5.21 Formación 5 de red Zigbee

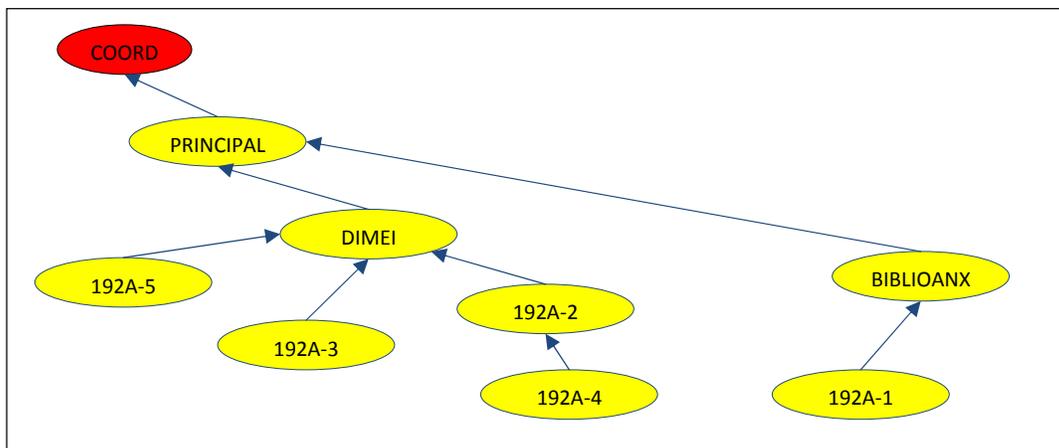


Figura 5.22 Estructura de red para la formación 5

Formación 6

0001	0002	035F	011D	0237	01AA	0090	0003
0013A200	0013A200	0013A200	0013A200	0013A200	0013A200	0013A200	0013A200
40091F9E	4008C0E2	40091FA7	40087BD6	40010CED	4001A6A9	40087BDB	4001E190
PRI NCI PAL	DI MEI	BI BLI OANX	192A-5	192A-4	192A-3	192A-2	192A-1
0000	0001	0001	0002	0002	0002	0002	0002
01	01	01	01	01	01	01	01
00	00	00	00	00	00	00	00
C105	C105	C105	C105	C105	C105	C105	C105
101E	101E	101E	101E	101E	101E	101E	101E

Figura 5.23 Formación 6 de red Zigbee

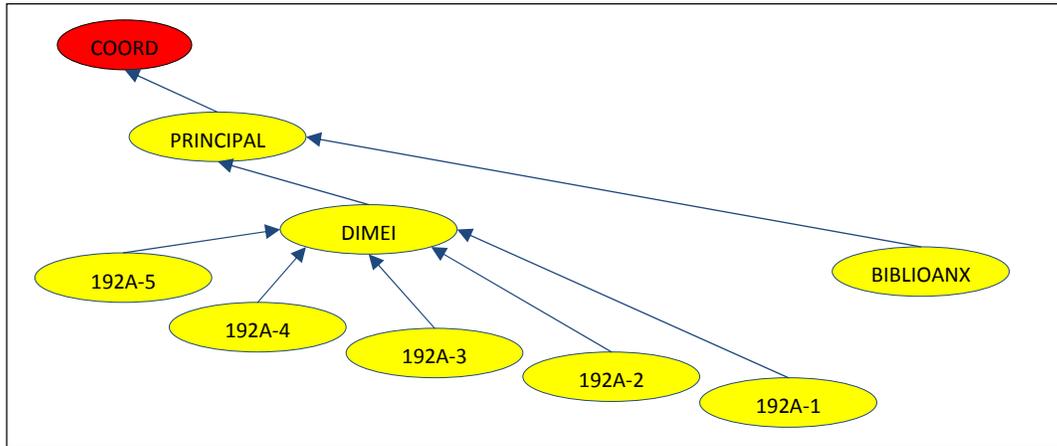


Figura 5.24 Estructura de red para la formación 6

5.2.2.3.2 Comunicación entre coordinador y enrutadores de la red Zigbee

Bajo la formación 6 de la red Zigbee, se efectuaron las pruebas para conocer la confiabilidad en la comunicación del coordinador con los 8 enrutadores de la red. En la figura 5.25 se presenta el porcentaje de paquetes recibidos por el coordinador a partir del total de los paquetes enviados a cada uno de los enrutadores en cada prueba.

No. de Prueba	Identificador del nodo							
	PRI NCI PAL	DI MEI	BI BLI OANX	192A-5	192A-4	192A-3	192A-2	192A-1
1	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
2	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
3	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
4	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
5	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
6	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
7	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
8	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
9	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
10	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%

Figura 5.25 Resultados de las pruebas de comunicación en la red Zigbee de prueba

De lo anterior se puede observar que la comunicación en una red Zigbee es muy confiable, ya que en todos los casos el 100% de paquetes transmitidos fueron recibidos por cada enrutador y reenviados hacia el coordinador, donde en algunos casos los paquetes tuvieron que pasar por otros enrutadores para llegar a su destino. El contar con redundancia de rutas al transmitir un paquete de datos a un nodo destino así como la retransmisión del paquete en ausencia de la confirmación por parte del nodo destino incrementa la confiabilidad del sistema de comunicación, por lo tanto se comprueba que un escenario real de operación la comunicación de una red Zigbee es muy confiable.

5.3 Características de la red prototipo

Utilizando los resultados de las pruebas realizadas a los módulos de RF y tomando en cuenta su funcionamiento bajo el estándar Zigbee, a continuación se establecen las condiciones y características de operación de una red prototipo con 4 luminarias.

5.3.1 Tipos de nodos y escalabilidad de la red

Para la red prototipo de monitoreo y control del alumbrado público se utilizarán 5 radios XBee-Pro con antena dipolar o de látigo a una potencia de transmisión de 18 dBm, trabajando bajo el firmware Beta de Zigbee 8x17⁹ que se basa en el estándar Zigbee 2006, por lo tanto los radios solo pueden operar como coordinadores de red o como enrutadores. Debido a esto la descendencia a partir del coordinador puede ser de hasta 5 niveles (profundidad de red) donde cada nodo en la red puede tener como máximo 6 enrutadores como hijos. Estas limitaciones hacen que una red Zigbee establecida por radios XBee pueda contener hasta 9330 nodos. Considerando que actualmente existen aproximadamente 3000 luminarias dentro del campus universitario, la futura escalabilidad del sistema de alumbrado público queda garantizada empleando esta tecnología.

5.3.2 Ubicación de los nodos

En lo que respecta a la ubicación de los radios XBee, estos deben colocarse a una altura pertinente para lograr en la medida de lo posible que un 60% del radio de la primera zona de Fresnel esté libre de obstáculos en línea de vista hacia los nodos circundantes, ya que bajo esta situación la atenuación de la señal transmitida debida a obstáculos se considera nula. Tomando en cuenta esto, los radios pueden ubicarse en dos entornos diferentes:

- En edificios, donde un solo nodo operará como coordinador de red y los demás exclusivamente como enrutadores.
- En las luminarias, donde los nodos también actuarán como enrutadores pero a la vez serán parte del módulo de control y adquisición de datos de las luminarias.

En el caso de los nodos ubicados en los edificios, debido a su altura y condiciones favorables de línea de vista con otros nodos, establecerán relaciones padre-hijo a mayores distancias a comparación con los ubicados en las luminarias, es decir se asociarán con nodos ubicados en edificios más distantes, sacándole un mayor provecho a la profundidad de red definida por Zigbee; pero también permitirán la asociación de varios nodos ubicados en las luminarias cercanas. Por lo tanto el coordinador de la red Zigbee se debe ubicar preferentemente en el centro del área que abarcará la red de comunicaciones.

⁹ Las características de operación bajo este firmware se describen en el capítulo 4.

Por otro lado los nodos ubicados en las luminarias se deberán colocar a una distancia no mayor a 1 metro a partir del tope del poste de la luminaria, esto en principio para que los radios libren la mayoría de los obstáculos en la línea de vista hacia sus nodos vecinos ubicados en edificios y otras luminarias, y para también para evitar que los transeúntes tengan acceso a los módulos de control y adquisición de datos.

Sabiendo que las condiciones del entorno en los nodos no siempre serán las mejores, se debe considerar un margen de atenuación¹⁰ (**FM**) adecuado para garantizar que la potencia de la señal recibida en el nodo destino no exceda en ningún caso el valor mínimo bajo el cual opera de manera optima, es decir, que no exceda su sensibilidad de recepción (**S_R**). Considerando lo anterior se puede lograr un enlace confiable en cada salto de la red Zigbee. El margen de atenuación (FM) se calcula de la siguiente manera:

$$FM = P_R - S_R$$

Como regla general en el diseño de enlaces por RF, se considera un margen de atenuación entre 20 y 30 dB. A partir de la ecuación de Friis y considerando el uso de antenas dipolares en los radios y una distancia máxima entre nodos vecinos de 1000 m, se obtiene una potencia de la señal recibida en el nodo destino igual a -78 dBm. Sabiendo que la sensibilidad de recepción de los radios XBee-Pro es de -100 dBm y considerando esta potencia de recepción se obtiene un margen de atenuación de 22 dBm.

En ciudad Universitaria la distancia entre las luminarias contiguas se encuentra en el rango de 30 a 60 m, por otro lado las distancias entre luminarias y los edificios próximos no exceden los 1000 metros; por lo tanto es factible que bajo las condiciones arriba mencionadas se implemente una red Zigbee con comunicaciones confiables dentro del campus.

5.3.3 Comunicación serial del coordinador y los enrutadores

Debido a que el coordinador de la red Zigbee se ha conectado de manera serial a una computadora (servidor) la cual servirá para monitorear y controlar a las luminarias; se necesita conocer y especificar la dirección de las tramas de datos entrantes y salientes, es decir se requiere un direccionamiento dinámico. Por lo tanto el coordinador se ha cargado con el firmware 8117 que utiliza el protocolo de comunicación serial API.

Los enrutadores por su parte solo recibirán tramas de datos desde el coordinador y le transmitirán datos seriales por parte del microcontrolador del módulo de control y adquisición de datos de la luminaria, por lo tanto no se requiere un direccionamiento dinámico. Debido a esto los enrutadores han sido cargados con el firmware 8217 que proporciona una comunicación serial transparente.

¹⁰ El margen de atenuación (Fading Margin) equivale a la diferencia en dB entre la potencia recibida en el receptor y la sensibilidad de recepción de un radio. El margen de atenuación es una pérdida de potencia extra que se agrega al sistema y considera las posibles pérdidas en la señal de radio debidas a obstrucciones en la línea de vista hacia los nodos vecinos y/o a consecuencia de condiciones climáticas adversas.

5.3.4 Parámetros de operación de los radios

Por medio del software de aplicación X-CTU se ha instalado el firmware y se han configurado los parámetros de operación en cada radio. En lo que respecta a la comunicación serial entre el coordinador y el servidor, así como de los enrutadores con los respectivos módulos de control y adquisición de datos, se ha establecido una tasa de transferencia de 9600 bps (BD = 0x03), sin paridad (NB = 0x00), 1 bit de inicio, 1 bit de paro y 8 bits de datos.

Debido a que dentro del campus universitario operan varias redes inalámbricas bajo el estándar 802.11, se eligió el canal 20¹¹ (CH = 0x14) del estándar Zigbee para las comunicaciones de la red con el objeto de minimizar al máximo la interferencia con estas redes, para lo que se estableció un SC = 0x200 para limitar el escaneo a solo ese canal. Además se ha elegido indistintamente que el identificador de la red (PAN ID) sea igual a 0x1234.

Los parámetros de operación de los nodos de la red prototipo se mencionan en la figura 5.26.

Parámetro	Coordinador (API firmware 8117)	Enrutador (AT firmware 8217)
CH – Operating Channel	0x14	0x14
ID – PAN ID	0x1234	0x1234
MY – 16-bit Network Address	0x0000	Asignada por el padre
SH – Serial Number High	32 bits más significativos de la dirección física del coordinador	32 bits más significativos de la dirección física del enrutador
SL – Serial Number Low	32 bits menos significativos de la dirección física del coordinador	32 bits menos significativos de la dirección física del enrutador
DH – Destination Address High	No aplica	0x0000
DL – Destination Address Low	No aplica	0x0000
SC – Scan Channels	0x200	0x200
SD – Scan Duration	0x07	0x07
NJ – Node Join time	0xFF	0xFF
NI – Node Identifier	COORD	NI del enrutador en cuestión
NT – Node Discovery Timeout	0x3C	0x3C
PL – Power Level	0x04	0x04
CA – CCA Threshold	0x40	0x40
BD – Baud Rate	0x03	0x03
NB – Parity	0x00	0x00

Figura 5.26 Parámetros de operación de los nodos de la red prototipo

¹¹ El canal 20 es uno de los cuatro canales que se encuentran en las bandas de guarda de los canales del estándar 802.11b

De la figura anterior se puede ver que la dirección destino de 64 bits en los enrutadores corresponde a la dirección de red del coordinador; pero DH y DH no aplican para el coordinador pues la dirección destino de 64 bits se especifica en la trama *Zigbee Transmit Request*.

Por otro lado se eligió que todos los nodos (coordinador y enrutadores) de la red permitieran la asociación en todo momento (NJ = 0xFF) y contarán con un tiempo límite de descubrimiento de nodos de 6 segundos (NT¹² = 0x3C). Además cada nodo de la red contará con un identificador (NI) el cual hará referencia a la ubicación o función del nodo y se utilizará para conocer su dirección física y de red.

Por último la potencia de transmisión de los radios se estableció en 18 dBm (PL = 4), y se consideró un umbral CCA de -64 dBm (CA = 0x40), implicando que si la energía detectada en el canal antes de transmitir excede los -64 dBm no se transmitirá el paquete de datos en ese intento y se efectuará de nuevo tras haber transcurrido un tiempo de espera de acuerdo al mecanismo CSMA-CA.

5.3.5 Integración de la red Zigbee con el Sistema de Administración para el Control y Monitoreo de Alumbrado Público

Para implementar el sistema de monitoreo y control del alumbrado público fue necesario desarrollar un software de aplicación como interfaz entre el operador y el conjunto de luminarias de la red. Para el empleo de este software fue necesario definir la información y acciones útiles para el operador del Sistema. Por lo tanto se concluyó que la consola de operación del sistema:

- Mostrara el nombre y ubicación de las luminarias a través de un mapa de ciudad universitaria,
- Desplegara información de las luminarias y de sus parámetros de operación, a través de una solicitud por parte del operador y por medio de un registro periódico automático.
- Permitiera ejecutar acciones de monitoreo y control remoto.

Así bien la consola de operación muestra la información base de cada luminaria como sigue:

- Nombre de la luminaria (que se compone nombre del circuito y numero de luminaria, ej. 192A-5)
- Zona a la que pertenece (ej. Circuito escolar)
- Tipo de lámpara (ej. Vapor de sodio)
- Y Fase a la que está conectada (ej. AC)

¹² El tiempo que marca NT aplica para el descubrimiento de nodos a partir del comando ND (Node Discovery) y para el descubrimiento de direcciones del nodo destino a través del comando DN (Destination Node).

Con los parámetros de operación siguientes:

- Estatus de lámpara (preendida/apagada)
- Voltaje
- Corriente
- Potencia
- Flujo luminoso

Y las acciones de monitoreo y control que siguen:

- **Prender** luminaria
- **Apagar** luminaria
- **Desplegar** bitácora de operación
- **Actualizar** parámetros de operación

La información base de cada luminaria es fija y se obtiene de una base de datos contenida en el servidor del sistema. Los parámetros de operación de cada luminaria son obtenidos de la comunicación entre el coordinador ubicado en el servidor y los enrutadores ubicados en los módulos de control y adquisición de datos ubicados de cada luminaria, y son el resultado de las acciones de control y monitoreo remoto que se realizan a través de la aplicación de software del sistema.

5.3.5.1 Protocolo de comunicación de datos

Debido a lo anterior fue necesario establecer un protocolo de comunicación entre las luminarias y el Sistema de Administración para transferir información de los parámetros de operación y las acciones de control y monitoreo de las luminarias. A continuación se explica dicho protocolo.

5.3.5.1.1 Establecimiento de las características de la red

Antes de iniciar cualquier tipo de comunicaciones entre el software del sistema y las luminarias, el servidor se comunica con el coordinador para verificar que éste se encuentre activo, esto lo realiza empleando una trama *AT Command* con el comando AI (Association Indication). Si la respuesta al comando indica que el coordinador está activo (Status = 0x00), procede a realizar un descubrimiento de los nodos en la red por medio del comando ND (Node Discovery), el cual le regresará las características de cada nodo contenidas en una trama *AT Command Response*¹³. La última trama de respuesta al descubrimiento de nodos (ND), será una trama *AT Command Response* con un estatus de "Ok". El servidor almacenará en una base de datos estas características para hacer uso de ellas en la futura comunicación con los enrutadores.

¹³ Las características del nodo contenidas en la trama *AT Command Response* son: Dirección de 16 bits (MY), Dirección de 64 bits (SH y SL respectivamente), Identificador de Nodo (NI), Dirección del padre (MP), tipo de dispositivo (enrutador = 0x01), etc.

5.3.5.1.2 Transmisión desde radio base/recepción en radio remoto

En lo que respecta a la comunicación del Sistema con las luminarias se definieron dos tipos de acciones sobre cada una de ellas:

- Acción de monitoreo: Solicitud de diagnóstico de operación por parte del operador o de manera automática.
- Acción de control: Cambio de estado (prender/apagar)

Para lo cual se utilizaron 2 bytes para la codificación tal y como se muestra en la figura 5.27

Posición del byte	Descripción	(valor)
MSB	Tipo de acción	❖ Diagnóstico= 0x00 ❖ Cambio de estado= 0x01
LSB	Cambio de estado	❖ Diagnóstico= Indistinto ❖ Cambio de estado: ➤ Apagar= 0x00 ➤ Prender= 0x01

Figura 5.27 Código de acciones de monitoreo y control

Existiendo así tres posibles paquetes de datos a transmitir:

- Diagnóstico de operación: 0x0000
- Cambio de estado:
 - Apagar: 0x0100
 - Prender: 0x0101

Este paquete de datos está contenido en la carga útil (datos RF) de una trama *Zigbee Transmit Request* que se genera en el servidor y se transfiere de manera serial al coordinador para que éste la transmita vía RF al enrutador asociado de la luminaria destino.

El formato de la trama *Zigbee Transmit Request* se muestra en la figura 5.28.

Delimitador de inicio	Longitud	ID API	ID de trama	Dirección destino de 64 bits	Dirección destino de 16 bits	Radio broadcast	Opciones	Datos RF	Suma de verificación
0x7E	0x0010	0x10	1 Byte	8 Bytes	2 Bytes	0x00	0x00	2 Bytes	1 Byte

Figura 5.28 Formato de la trama Zigbee Transmit Request

Donde la longitud de la trama es fija y es de 16 bytes, el ID API tiene un valor de 0x10 indicando que se trata de una trama *Zigbee Transmit Request*, la direcciones destino de 64 y 16 bits corresponden a las respectivas direcciones del nodo asociado a la luminaria en cuestión. El radio broadcast con valor igual a 0x00 indica que se permite el máximo número de saltos en la red (10 saltos) en la transmisión, el byte de opciones indica que se habilita el uso de ACKs y el descubrimiento de la dirección de red del nodo destino.

Por otro lado cuando el nodo destino recibe los bytes de datos RF de la trama *Zigbee Transmit Request*, se llevan a cabo dos eventos:

- El coordinador recibe una confirmación (ACK) del nodo destino indicando que ha recibido el paquete de datos, y a consecuencia de esto genera una trama *Zigbee*

Transmit Status (ver capítulo 4) que envía de manera serial al servidor de comunicaciones.

- El nodo destino transfiere de manera serial el paquete de datos RF recibido al microcontrolador del módulo de control y adquisición de datos de la luminaria, para que éste los procese y ejecute la acción respectiva.

5.3.5.1.3 Recepción en radio base/transmisión desde radio remoto

Si se solicitó un cambio de estado en la luminaria, el módulo de control apaga o prende la luminaria según sea el caso y se termina el proceso.

Si se solicita un diagnóstico de operación de la luminaria, el módulo de control y adquisición de datos recaba la información del estatus de la lámpara, el voltaje, la corriente, la potencia y flujo luminoso, para después enviarla al radio en un paquete de datos con el formato mostrado en la figura 5.29. Por último el radio transmite el paquete de datos vía RF al coordinador de la red.

Posición del byte ¹⁴	Descripción	Valor	Rango de operación
0	Acción	Diagnóstico= 0x00	NA
1	Estado	Apagada= 0x00 Prendida= 0x01	NA
2	Corriente	1 byte	1.562 A
3	Voltaje	1 byte	0 – 295 V
4	Potencia	1 byte	0 – 150 W
5	Flujo luminoso	1 byte	0 – 14,220 lm

Figura 5.29 Formato del paquete de datos de la luminaria

Este paquete de datos está dispuesto de la siguiente manera:

Acción	Estatus	Corriente	Voltaje	Potencia	Flujo luminoso
0x00	0x00 ó 0x01	1 byte	1 byte	1 byte	1 byte

Cuando el coordinador recibe el paquete de datos RF, éste envía una trama Zigbee Receive Packet de manera serial al servidor del Sistema con el formato mostrado en la figura 5.30.

Delimitador de inicio	Longitud	ID API	Dirección destino de 64 bits	Dirección destino de 16 bits	Opciones	Datos RF	Suma de verificación
0x7E	0x0012	0x90	8 Bytes	2 Bytes	0x01	6 Bytes	1 Byte

Figura 5.30 Formato de la trama Zigbee Receive Packet

¹⁴ Posición referida de izquierda a derecha dentro del paquete de datos.

De lo cual se puede observar que la longitud de la trama es de 18 bytes y corresponde a una trama Zigbee Receive Packet (ID API = 0x90), que proviene de un nodo con ciertas direcciones de 64 y 16 bits, y que la recepción de dicho paquete ha sido informada al nodo que lo transmitió (ACK del coordinador al nodo ubicado en la luminaria).

Esta trama que contiene los parámetros de operación de la luminaria es procesada por el servidor de comunicaciones para presentarlos posteriormente en la consola de operación del software de monitoreo y control del sistema, ya sea en el campo de información de la luminaria o en el registro periódico de operación de esta.

5.3.5.1.4 Ejemplos de tramas de comunicación de la red prototipo

Descubrimiento de nodos (ND): 7E 00 04 08 01 4E 44 64

Posición del byte	Descripción	Valor
0	Delimitador de inicio	7E
1-2	Longitud de la trama	00 04
3	Identificador API: AT Command Response	08
4	Identificador de trama	01
5-6	Comando AT (ND)	4E 44
7	Suma de verificación	64

Figura 5.31 Descripción de la trama de descubrimiento de nodos (ND)

Respuesta al descubrimiento de nodos (5 tramas AT Command Response): 7E 00 1E 88 01 4E 44 00 00 01 00 13 A2 00 40 01 E1 90 31 39 32 41 2D 31 00 00 00 01 00 C1 05 10 1E 4C 7E 00 1E 88 01 4E 44 00 3C B8 00 13 A2 00 40 01 0C ED 31 39 32 41 2D 34 00 00 00 01 00 C1 05 10 1E CE 7E 00 1E 88 01 4E 44 00 14 3E 00 13 A2 00 40 08 7B DB 31 39 32 41 2D 32 00 00 00 01 00 C1 05 10 1E 0E 7E 00 1E 88 01 4E 44 00 28 7B 00 13 A2 00 40 01 A6 A9 31 39 32 41 2D 33 00 00 00 01 00 C1 05 10 1E CA 7E 00 05 88 01 4E 44 00 E4

Trama 1: 7E 00 1E 88 01 4E 44 00 00 01 00 13 A2 00 40 01 E1 90 31 39 32 41 2D 31 00 00 00 01 00 C1 05 10 1E 4C

Posición del byte	Descripción	Valor
0	Delimitador de inicio	7E
2-3	Longitud de la trama	00 1E
4	Identificador API: AT Command Response	88
5	Identificador de la trama	01
6-7	Comando AT (ND)	4E 44
8	Estatus de la trama (Ok)	00
9-10	Dirección de red (MY)	00 01
11-18	Dirección de 64 bytes	00 13 A2 00 40 01 E1 90
19-25	Identificador del nodo (NI+00)	31 39 32 41 2D 31 00
26-27	Dirección de red del padre (MP)	00 00
28	Tipo de dispositivo (Enrutador: 01)	01
29	Estatus (Uso reservado)	00
30-31	Profile ID	C1 05
32-33	Fabricante	10 1E
34	Suma de verificación	4C

Figura 5.32 Descripción de la trama de respuesta al descubrimiento de nodos, trama 1

Trama 2: 7E 00 1E 88 01 4E 44 00 3C B8 00 13 A2 00 40 01 0C ED 31 39 32 41 2D 34 00 00 00 01 00 C1 05 10 1E CE

Trama 3: 7E 00 1E 88 01 4E 44 00 14 3E 00 13 A2 00 40 08 7B DB 31 39 32 41 2D 32 00 00 00 01 00 C1 05 10 1E 0E

Trama 4: 7E 00 1E 88 01 4E 44 00 28 7B 00 13 A2 00 40 01 A6 A9 31 39 32 41 2D 33 00 00 00 01 00 C1 05 10 1E CA

Trama 5 (Trama que indica el fin al Descubrimiento de nodos): 7E 00 05 88 01 4E 44 00 E4

Comunicación con los nodos

Luminaria 192A-1

Diagnóstico de luminaria: 7E 00 10 10 01 00 13 A2 00 40 01 E1 90 FF FE 00 00 00 00 8A

Zigbee transmit status: 7E 00 07 8B 01 00 01 00 00 01 71

Respuesta al diagnóstico: 7E 00 12 90 00 13 A2 00 40 01 E1 90 00 01 01 00 00 00 6F 5B 69 D3

Cambio de estado (Prendido): 7E 00 10 10 01 00 13 A2 00 40 01 E1 90 FF FE 00 00 01 01 88

Zigbee transmit status: 7E 00 07 8B 01 00 01 00 00 00 72

Cambio de estado (Apagado): 7E 00 10 10 01 00 13 A2 00 40 01 E1 90 FF FE 00 00 01 00 89

Zigbee transmit status: 7E 00 07 8B 01 00 01 00 00 00 72

Luminaria 192A-2

Diagnóstico de luminaria: 7E 00 10 10 01 00 13 A2 00 40 08 7B DB FF FE 00 00 00 00 9E

Zigbee transmit status: 7E 00 07 8B 01 14 3E 00 00 01 20

Respuesta al diagnóstico: 7E 00 12 90 00 13 A2 00 40 08 7B DB 14 3E 01 00 00 00 6C 5B 62 A0

Cambio de estado (Prendido): 7E 00 10 10 01 00 13 A2 00 40 08 7B DB FF FE 00 00 01 01 9C

Zigbee transmit status: 7E 00 07 8B 01 14 3E 00 00 00 21

Cambio de estado (Apagado): 7E 00 10 10 01 00 13 A2 00 40 08 7B DB FF FE 00 00 01 00 9D

Zigbee transmit status: 7E 00 07 8B 01 14 3E 00 00 00 21

Luminaria 192A-3

Diagnóstico de luminaria: 7E 00 10 10 01 00 13 A2 00 40 01 A6 A9 FF FE 00 00 00 00 AC

Zigbee transmit status: 7E 00 07 8B 01 28 7B 00 00 01 CF

Respuesta al diagnóstico: 7E 00 12 90 00 13 A2 00 40 01 A6 A9 28 7B 01 00 00 00 75 5B 60 56

Cambio de estado (Prendido): 7E 00 10 10 01 00 13 A2 00 40 01 A6 A9 FF FE 00 00 01 01 AA

Zigbee transmit status: 7E 00 07 8B 01 28 7B 00 00 00 D0

Cambio de estado (Apagado): 7E 00 10 10 01 00 13 A2 00 40 01 A6 A9 FF FE 00 00 01 00 AB

Zigbee transmit status: 7E 00 07 8B 01 28 7B 00 00 00 D0

Luminaria 192A-4

Diagnóstico de luminaria: 7E 00 10 10 01 00 13 A2 00 40 01 0C ED FF FE 00 00 00 00 02

Zigbee transmit status: 7E 00 07 8B 01 3C B8 00 00 01 7E

Respuesta al diagnóstico: 7E 00 12 90 00 13 A2 00 40 01 0C ED 3C B8 01 00 00 0E 6C 5B 5E 58

Cambio de estado (Prendido): 7E 00 10 10 01 00 13 A2 00 40 01 0C ED FF FE 00 00 01 01 00

Zigbee transmit status: 7E 00 07 8B 01 3C B8 00 00 00 7F

Cambio de estado (Apagado): 7E 00 10 10 01 00 13 A2 00 40 01 0C ED FF FE 00 00 01 00 01

Zigbee transmit status: 7E 00 07 8B 01 3C B8 00 00 00 7F

CAPÍTULO 6

Conclusiones

Debido al uso desmesurado que se ha hecho de los recursos naturales y de la poca conciencia que se ha tenido a lo largo de los años en el uso de la energía con tal de generarnos confort, hoy día nos encontramos inmersos en una situación crítica donde no podemos negar que hemos afectado grandemente el lugar donde habitamos todos, el planeta tierra. Por lo tanto es de prioridad atender esta situación y buscar soluciones inteligentes que frenen el deterioro ambiental; de no ser así en un futuro no muy lejano será muy difícil que la raza humana subsista en este planeta.

Tomando conciencia de esta realidad y considerando que actualmente el servicio de alumbrado público en Ciudad Universitaria no hace un uso eficiente de la energía eléctrica (y por ende tampoco de los recursos naturales para producirla), y genera grandes costos de operación y mantenimiento; a lo largo de este trabajo de tesis se llegó a la conclusión de que es necesario y factible implementar un sistema de control y monitoreo que gestione la operación del alumbrado público de manera remota utilizando la tecnología que hoy está presente. Acciones como esta traerá consigo beneficios económicos (ahorro de recursos económicos), sociales (mejorará el servicio del alumbrado y por tanto la seguridad) y ambientales (generará una disminución de CO₂).

A partir de la investigación que se realizó sobre las tecnologías de comunicación inalámbrica actuales y considerando:

- Sus características de operación (velocidad de transmisión, alcance máximo entre nodos, topologías de red, frecuencia de operación, confiabilidad, seguridad y escalabilidad de red)
- Costo del equipo y de la transferencia de datos
- Facilidad y rapidez de implementación

Se llegó a la conclusión de que la tecnología de redes Zigbee es la más adecuada para la implementación de una red de comunicaciones para el control y monitoreo remoto de luminarias de alumbrado público.

Además en este trabajo se hizo una descripción detallada del estándar Zigbee y de las características y funcionamiento de los radios XBee, los cuales basan su operación en este estándar.

Tomando como referencia lo anterior y considerando el entorno en que se establecerá la red de comunicaciones para el monitoreo y control del alumbrado público, se decidió usar los radios XBee-Pro con antena de látigo o dipolar, ya que estos pueden trabajar a mayor potencia y cuentan con mayor sensibilidad de recepción, lo que en su conjunto implica mayor alcance (hasta 1500 m), donde la antena de látigo o dipolar cuenta con un patrón de radiación más uniforme y con mayor ganancia que la antena de chip. Esto permitirá un mejor desempeño en la comunicación de los nodos que formen la red de comunicaciones, pues se sortearán más fácilmente las condiciones adversas de comunicación en el espacio y tiempo, es decir, los obstáculos en la línea de vista entre los radios y las condiciones climáticas del lugar.

Debido a que la capa física (PHY) y la capa de control de acceso al medio (MAC) del estándar IEEE 802.15.4, 3wson la base de las capas de red (NWK) y aplicación (APL) del estándar Zigbee, se realizaron dos tipos de pruebas con los radios XBee-Pro:

1. Operando bajo en protocolo estándar IEEE 802.15.4
2. Operando bajo el estándar Zigbee

Las pruebas de comunicación que se efectuaron con los radios XBee-Pro operando bajo el protocolo estándar 802.15.4, permitieron tener una referencia de la calidad de enlace y confiabilidad de una comunicación punto a punto entre un nodo ubicado en el edificio principal de ingeniería y varios nodos circundantes dentro del campus, ubicados a diferentes distancias (menores a 1 km) y diversas condiciones de línea de vista. Los resultados de estas pruebas mostraron que en la mayoría de los casos la comunicación fue confiable (100% de los paquetes de datos enviados por un nodo origen son recibidos por el nodo destino), donde la calidad de enlace varió dependiendo de la condición de la línea de vista y la distancia entre transmisor y receptor.

Las pruebas realizadas con los radios XBee-Pro operando bajo el estándar Zigbee sirvieron para identificar la forma en que se asocian los nodos al formar la red, y para conocer la confiabilidad de comunicación dentro de una topología mesh, entre el coordinador de la red y varios enrutadores esparcidos dentro del campus. De los resultados se puede concluir que la comunicación en una red Zigbee es muy confiable, ya que en todos los casos, el 100% de los paquetes enviados por el coordinador a cada enrutador, fueron recibidos exitosamente; donde en algunos casos los paquetes pasaron por otros enrutadores para llegar a su destino final.

El contar con redundancia de rutas al transmitir un paquete de datos a un nodo destino, así como la retransmisión de paquetes cuando no se recibe el ACK por parte del nodo destino, incrementa la confiabilidad de una red de comunicaciones, tal como es el caso de una red Zigbee.

Una vez validada la confiabilidad de la comunicación de los radios XBee-Pro, se establecieron las características de la red prototipo (tipos de nodos, escalabilidad, recomendaciones de ubicación, distancias entre nodos y margen de atenuación), sus parámetros de operación, y en colaboración con los encargados del diseño del módulo de control y adquisición de datos y del software de monitoreo y control, se establecieron las condiciones de integración y los protocolos de comunicación entre los radios XBee-Pro y estos sistemas.

Por último se logró poner en operación una red de comunicación de datos para el monitoreo y control remoto de 4 luminarias de alumbrado público, la cual se encuentra operando correcta y confiablemente.

Debido a que los dispositivos Zigbee emplean las bandas de frecuencia de uso libre ISM, tienen la capacidad de crear redes mesh de manera autónoma (self-organizing) con un alto número de miembros (hasta 65, 000) que se pueden distribuir en grandes extensiones de área, cuentan con comunicaciones muy confiables (self-healing) aun en entornos muy ruidosos (baja relación señal a ruido) y pueden operar hasta 2 años con un par de pilas AA dependiendo de la carga de trabajo; es importante considerar esta tecnología para el desarrollo de futuras aplicaciones que hagan nuestra vida más confortable sin afectar nuestro entorno.

APÉNDICE A

Acrónimos y Abreviaturas

2G	Segunda Generación
3G	Tercera Generación
ACK	Acknowledgement
AES	Advanced Encryption Standard
AFHSS	Adaptive Frequency Hopping Spread Spectrum
AMI	Automatic Meter Reading
AMR	Advanced Metering Infrastructure
AODV	Ad Hoc On-Demand distance Vector
API	Application Programming Interface
APL	Application Layer
APS	Application Support sublayer
ASCII	American Standard Code for Information Interchange
ATM	Asynchronous Transfer Mode
BI	Beacon Interval
BPSK	Binary Phase Shift Keying
BSN	Beacon Sequence Number
CAP	Contention Access Period
CCA	Clear Channel Assessment
CDMA	Code Division Multiple Access
CFP	Contention Free Period
COFETEL	Comisión Federal de Telecomunicaciones
CRC	Cyclic Redundancy Check
CSMA-CA	Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance
D-AMPS	Digital Advanced Mobile System
DSL	Digital Subscriber Line
DSN	Data Sequence Number
DSSS	Direct Sequence Spread Spectrum
ED	Energy Detection
EDGE	Enhanced Data Rates for GSM Evolution
ETSI	European Telecommunications Standards Institute
FCC	Federal Communications Commission
FCS	Frame Check Sequence
FFD	Full Function Device
FHSS	Frequency Hopping Spread Spectrum
GIS	Geographic Information System

GMSK	Gaussian Minimum Shift Keying
GPRS	General Packet Radio Service
GSM	Global System for Mobile communications
GTS	Guaranteed Time Slot
HIPERLAN	High Performance Radio Local Area Network
HPS	High Pressure Sodium
HVAC	Heating, Ventilating and Air Conditioning
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
ISM	Industrial, Scientific and Medical
ITU	International Telecommunications Union
LED	Light Emitting Diode
LMDS	Local Multipoint Distribution Service
LON	Local Operating Network
LOS	Line of Sight
LQI	Link Quality Indication
LR-WPAN	Low Rate Wireless Personal Area Network
LSB	Less Significant Byte
MAC	Medium Access Control
MANET	Mobile Ad hoc Network
MFR	MAC Footer
MHR	MAC Header
MMDS	Multipoint Microwave Distribution Service
MMS	Multimedia Messaging Service
MPDU	MAC Protocol Data Unit
MSB	More Significant Byte
MSDU	MAC Service Data Unit
NWK	Network
OFDM	Orthogonal Frequency Division Multiplexing
O-QPSK	Offset Quadrature Phase Shift Keying
PAN ID	Personal Area Network Identification
PHR	PHY Header
PHY	Physical layer
POS	Personal Operating Space
PPDU	PHY Protocol Data Unit
PSDU	PHY Service Data Unit
QAM	Quadrature Amplitude Modulation
QoS	Quality of Service
RF	Radio frecuencia
RFD	Reduced Function Device
RFLOS	RF Line of Sight
RP-SMA	Reverse Polarity SMA
RSSI	Received Signal Strength Indicator
SCADA	Supervisory Control and Data Acquisition
SD	Superframe Duration
SFD	Start of Frame Delimiter
SHR	Synchronization Header

SMS	Short Message Service
UART	Asynchronous Receiver Transmitter
UMTS	Universal Mobile Telecommunications System
UWB	Ultra-Wideband
WAP	Wireless Application Protocol
WiMAX	Worldwide interoperability for Microwave Access
WLAN	Wireless Local Area Network
WMAN	Wireless Metropolitan Area Network
WMN	Wireless Mesh Network
WPAN	Wireless Personal Area Network
WSN	Wireless Sensor Network
WWAN	Wireless Wide Area Network
ZC	Zigbee Coordinator
ZED	Zigbee End Device
ZR	Zigbee Router

APÉNDICE B

Tablas de referencia de comandos de radio XBee

4.2. Command Reference Tables

XBee/XBee-PRO RF Modules expect numerical values in hexadecimal. Hexadecimal values are designated by a "0x" prefix. Decimal equivalents are designated by a "d" suffix. Table rows are sorted by command category, then by logic of most commonly used.

Special

Table 4-02. Special Commands

AT Command	Command Category	Name and Description	Node Type ¹	Parameter Range	Default
WR	Special	Write. Write parameter values to non-volatile memory so that parameter modifications persist through a subsequent resets. Note: Once WR is issued, no additional characters should be sent to the module until after the "OK" response is received.	CRE	--	--
RE	Special	Restore Defaults. Restore module parameters to factory defaults. RE command does not reset the ID parameter.	CRE	--	--
FR	Special	Software Reset. Reset module. Responds immediately with an "OK" then performs a reset ~100ms later. Use of the FR command will cause a network layer restart on the node if SC or ID were modified since the last reset.	CRE	--	--
NR	Special	Network Reset. Reset network layer parameters on one or more modules within a PAN. Responds immediately with an "OK" then causes a network restart. All network configuration and routing information is consequently lost. If NR = 0: Resets network layer parameters on the node issuing the command. This option is only supported on Routers and End Devices and must be used with caution. Refer to the "Resetting Coordinator" section for more information. If NR = 1: Sends broadcast transmission to reset network layer parameters on all nodes in the PAN.	RE (when NR=0), CRE (when NR=1)	0 - 1	--

1. Node types that support the command: C = Coordinator, R = Router, E = End Device

Networking & Security

Table 4-03. Networking Commands (Sub-categories designated within [brackets])

AT Command	Command Category	Name and Description	Node Type ¹	Parameter Range	Default
CH	Networking (Addressing)	Operating Channel. Read the channel number used for transmitting and receiving between RF modules. Uses 802.15.4 channel numbers.	CRE	0, 0x0B-0x1A (XBee) 0, 0x0C-0x17 (XBee-PRO) [read-only]	0
ID	Networking (Addressing)	PAN ID. Set/Get the PAN (Personal Area Network) ID. Coordinator. - Set the preferred Pan ID. Set (ID = 0xFFFF) to auto-select. Router / End Device. - Set the desired Pan ID. When the device searches for a Coordinator, it attempts to only join to a parent that has a matching Pan ID. Set (ID = 0xFFFF) to join a parent operating on any Pan ID. Changes to ID should be written to non-volatile memory using the WR command. ID changes are not used until the module is reset (FR, NR or power-up).	CRE	0 - 0x3FFF, 0xFFFF	0x0123 (291d)
DH ²	Networking (Addressing)	Destination Address High. Set/Get the upper 32 bits of the 64-bit destination address. When combined with DL, it defines the destination address used for transmission. 0x0000000000000000 is the broadcast address for the PAN. DH is not supported in API Mode. 0x0000000000000000 is the Coordinator's 16-bit Network Address.	CRE	0 - 0xFFFFFFFF	0
DL ²	Networking (Addressing)	Destination Address Low. Set/Get the lower 32 bits of the 64-bit destination address. When combined with DH, DL defines the destination address used for transmission. 0x0000000000000000 is the broadcast address for the PAN. DL is not supported in API Mode. 0x0000000000000000 is the Coordinator's 16-bit Network Address.	CRE	0 - 0xFFFFFFFF	0xFFFF (Coordinator) 0 (Router/End Device)
MY	Networking (Addressing)	16-bit Network Address. Get the 16-bit Network Address of the module.	CRE	0 - 0xFFFFE [read-only]	0xFFFFE
MP	Networking (Addressing)	16-bit Parent Network Address. Get the 16-bit parent Network Address of the module.	RE	0 - 0xFFFFE [read-only]	0xFFFFE
SH	Networking (Addressing)	Serial Number High. Read high 32 bits of the RF module's unique IEEE 64-bit address. 64-bit source address is always enabled.	CRE	0 - 0xFFFFFFFF [read-only]	factory-set
SL	Networking (Addressing)	Serial Number Low. Read low 32 bits of the RF module's unique IEEE 64-bit address. 64-bit source address is always enabled.	CRE	0 - 0xFFFFFFFF [read-only]	factory-set
RN	Networking (Addressing)	Random Delay Slots. Set/Read the minimum value of the back-off exponent in the CSMA-CA algorithm (used for collision avoidance). If RN = 0, collision avoidance is disabled during the first iteration of the algorithm (802.15.4 - macMinBE).	CRE	0 - 3 [exponent]	3
NI	Networking (Identification)	Node Identifier. Stores a string identifier. The register only accepts printable ASCII data. In AT Command Mode, a string can not start with a space. A carriage return ends the command. Command will automatically end when maximum bytes for the string have been entered. This string is returned as part of the ND (Node Discover) command. This identifier is also used with the DN (Destination Node) command.	CRE	20-Byte printable ASCII string	--
BH	Networking (Identification)	Broadcast Hops. Set/Read the maximum number of hops for each broadcast data transmission. Setting this to 0 will use the maximum number of hops.	CRE	0 - 7	
NT	Networking (Identification)	Node Discover Timeout. Set/Read the amount of time a node will spend discovering other nodes when ND or DN is issued.	CRE	0 - 0xFC [x 100 msec]	0x3C (60d)
ND	Networking (Identification)	Node Discover. Discovers and reports all RF modules found. The following information is reported for each module discovered. MY<CR> SH<CR> SL<CR> NI<CR> (Variable length) PARENT_NETWORK_ADDRESS (2 Bytes)<CR> DEVICE_TYPE<CR> (1 Byte: 0=Coord, 1=Router, 2=End Device) STATUS<CR> (1 Byte: Reserved) PROFILE_ID<CR> (2 Bytes) MANUFACTURER_ID<CR> (2 Bytes) <CR> After (NT * 100) milliseconds, the command ends by returning a <CR>. ND also accepts a Node Identifier (NI) as a parameter (optional). In this case, only a module that matches the supplied identifier will respond. If ND is sent through the API, each response is returned as a separate AT_CMD_Response packet. The data consists of the above listed bytes without the carriage return delimiters. The NI string will end in a "0x00" null character. Once the ND command has finished executing, the API will return one more AT_CMD_Response packet (with no data).	CE	optional 20-Byte NI or MY value	--
DN	Networking (Identification)	Destination Node. Resolves an NI (Node Identifier) string to a physical address (case-sensitive). The following events occur after the destination node is discovered: <AT Firmware> 1. DL & DH are set to the extended (64-bit) address of the module with the matching NI (Node Identifier) string. 2. OK (or ERROR) is returned. 3. Command Mode is exited to allow immediate communication <API Firmware> 1. The 16-bit network and 64-bit extended addresses are returned in an API Command Response frame. If there is no response from a module within (NT * 100) milliseconds or a parameter is not specified (left blank), the command is terminated and an "ERROR" message is returned. In the case of an ERROR, Command Mode is not exited.	CRE	up to 20-Byte printable ASCII string	--
SC	Networking (Joining)	Scan Channels. Set/Read the list of channels to scan. Coordinator. - Bit field list of channels to choose from prior to starting network. Router/End Device. - Bit field list of channels that will be scanned to find a Coordinator/Router to join. Changes to SC should be written using WR command. SC changes are not used until the module is reset (FR, NR or power-up). Bit (Channel): 0 (0x0B) 4 (0x0F) 8 (0x13) 12 (0x17) 1 (0x0C) 5 (0x10) 9 (0x14) 13 (0x18) 2 (0x0D) 6 (0x11) 10 (0x15) 14 (0x19) 3 (0x0E) 7 (0x12) 11 (0x16) 15 (0x1A)	CRE	1 - 0xFFFF [bitfield] (bits 0, 13, 14, 15 not allowed for XBee-PRO)	0x1FFE (All XBee-PRO channels)

Implementación de una red inalámbrica de comunicación empleando el estándar Zigbee/802.15.4.

Table 4-03. Networking Commands (Sub-categories designated within [brackets])

AT Command	Command Category	Name and Description	Node Type ¹	Parameter Range	Default
SD	Networking (Joining)	<p>Scan Duration. Set/Read the scan duration exponent. Changes to SD should be written using WR command.</p> <p>Coordinator - Duration of the Active and Energy Scans (on each channel) that are used to determine an acceptable channel and Pan ID for the Coordinator to startup on.</p> <p>Router / End Device - Duration of Active Scan (on each channel) used to locate an available Coordinator / Router to join during Association.</p> <p>Scan Time is measured as:(# Channels to Scan) * (2 ^ SD) * 15.36ms - The number of channels to scan is determined by the SC parameter. The XBee can scan up to 16 channels (SC = 0xFFFF) and the XBee-PRO can scan up to 12 channels (0x1FFE).</p> <p>Sample Scan Duration times (13 channel scan):</p> <p>If SD = 0, time = 0.200 sec SD = 2, time = 0.799 sec SD = 4, time = 3.190 sec SD = 6, time = 12.780 sec</p>	CRE	0 - 7 [exponent]	3
NJ	Networking (Joining)	<p>Node Join Time. Set/Read the time that a Coordinator/Router allows nodes to join. This value can be changed at run time without requiring a Coordinator or Router to restart. The time starts once the Coordinator or Router has started. The timer is reset on power-cycle or when NJ changes.</p>	CR	0 – 0x40, 0xFF [x 1 sec]	0xFF (always allows joining)
AI	Networking (Joining)	<p>Association Indication. Read information regarding last node join request:</p> <p>0x00 - Successful completion - Coordinator started or Router/End Device found and joined with a parent.</p> <p>0x21 - Scan found no PANs</p> <p>0x22 - Scan found no valid PANs based on current SC and ID settings</p> <p>0x23 - Valid Coordinator or Routers found, but they are not allowing joining (NJ expired)</p> <p>0x24 - Router Full - Allow Join set, but cannot allow any more Routers to join</p> <p>0x25 - Router Full - Allow Join set, but cannot allow any more End Devices to join</p> <p>0x26 - Cannot join to a node because it was a child or descendant of this device</p> <p>0x27 - Node Joining attempt failed</p> <p>0x28 - Device is orphaned and is looking for its parent using Orphan Scans</p> <p>0x29 - Router Start attempt failed</p> <p>0x2A - Coordinator Start attempt failed</p> <p>0xFF - Scanning for a Parent</p>	CRE	0 - 0xFF [read-only]	--

1. Node types that support the command: C=Coordinator, R=Router, E=End Device
2. Command supported by modules using AT Command firmware only

RF Interfacing

Table 4-04. RF Interfacing Commands

AT Command	Command Category	Name and Description	Node Type ¹	Parameter Range	Default
PL	RF Interfacing	<p>Power Level. Select/Read the power level at which the RF module transmits conducted power.</p>	CRE	0 - 4 (XBee / XBee-PRO) 0 = -10 / 10 dBm 1 = -6 / 12 dBm 2 = -4 / 14 dBm 3 = -2 / 16 dBm 4 = 0 / 18 dBm	4
CA	RF Interfacing	<p>CCA Threshold. Set/Read the CCA (Clear Channel Assessment) threshold. Prior to transmitting a packet, a CCA is performed to detect energy on the channel. If the detected energy is above the CCA Threshold, the module will not transmit the packet.</p>	CRE	0x24 - 0x50 [-dBm]	0x40 (-64d dBm)

1. Node types that support the command: C = Coordinator, R = Router, E = End Device

Serial Interfacing (I/O)

Table 4-05. Serial Interfacing Commands

AT Command	Command Category	Name and Description	Node Type ¹	Parameter Range	Default
Ap ²	Serial Interfacing	API Enable. Enable API Mode. The AP parameter is only applicable when using modules that contain the following firmware versions: 8.1xx (Coordinator), 8.3xx (Router), 8.5xx (End Device)	CRE	1 - 2 1 = API-enabled 2 = API-enabled (w/escaped control characters)	1
BD	Serial Interfacing	Interface Data Rate. Set/Read the serial interface data rate for communication between the module serial port and host. Any value above 0x07 will be interpreted as an actual baud rate. When a value above 0x07 is sent, the closest interface data rate represented by the number is stored in the BD register.	CRE	0 - 7 (standard baud rates) 0 = 1200 bps 1 = 2400 2 = 4800 3 = 9600 4 = 19200 5 = 38400 6 = 57600 7 = 115200 0x80 - 0x1C200 (non-standard rates)	3
RO	Serial Interfacing	Packetization Timeout. Set/Read number of character times of inter-character silence required before packetization. Set (RO=0) to transmit characters as they arrive instead of buffering them into one RF packet.	CRE	0 - 0xFF [x character times]	3
D7	Serial Interfacing	DIO7 Configuration. Select/Read options for the DIO7 line of the RF module.	CRE	0 - 1 0 = Disabled 1 = CTS Flow Control	1
D5	Serial Interfacing	DIO5 Configuration. Configure options for the DIO5 line of the RF module. Options include: Associated LED indicator (LED blinks 1x/sec when the module is powered and 2x/sec when module is associated to a Coordinator.).	CRE	0 - 1 0 = Disabled 1 = Associated Indication LED	1
P0	Serial Interfacing	PWM0 Configuration. Select/Read function for PWM0.	CRE	0 - 1 0 = Disabled 1 = RSSI PWM	1
RP	Diagnostics	RSSI PWM Timer. Time RSSI signal will be output after last transmission. When RP = 0xFF, output will always be on.	CRE	0 - 0xFF [x 100 ms]	0x28 (40d)

1. Node types that support the command: C = Coordinator, R = Router, E = End Device
2. Command supported by modules using API firmware only

Diagnostics

Table 4-06. Diagnostics Commands

AT Command	Command Category	Name and Description	Node Type ¹	Parameter Range	Default
VR	Diagnostics	Firmware Version. Read firmware version of the module.	CRE	0 - 0xFFFF [read-only]	Factory-set
HV	Diagnostics	Hardware Version. Read hardware version of the module.	CRE	0 - 0xFFFF [read-only]	Factory-set

1. Node types that support the command: C = Coordinator, R = Router, E = End Device

AT Command Options

Table 4-07. AT Command Options Commands

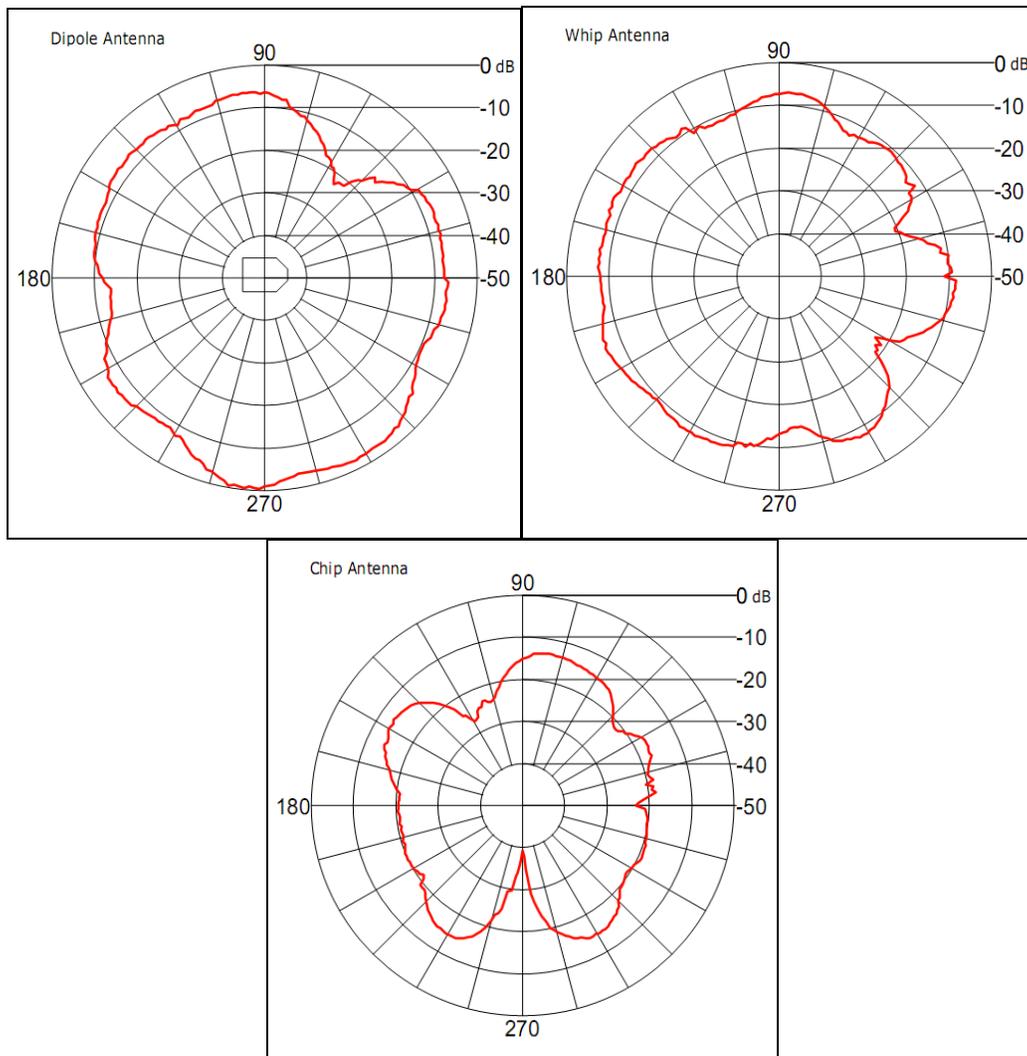
AT Command	Command Category	Name and Description	Node Type ¹	Parameter Range	Default
Ct ²	AT Command Mode Options	Command Mode Timeout. Set/Read the period of inactivity (no valid commands received) after which the RF module automatically exits AT Command Mode and returns to Idle Mode.	CRE	2 - 0x028F [x 100 ms]	0x64 (100d)
CN ²	AT Command Mode Options	Exit Command Mode. Explicitly exit the module from AT Command Mode.	CRE	--	--
Gt ²	AT Command Mode Options	Guard Times. Set required period of silence before and after the Command Sequence Characters of the AT Command Mode Sequence (GT + CC + GT). The period of silence is used to prevent inadvertent entrance into AT Command Mode.	CRE	1 - 0x0CE4 [x 1 ms] (max of 3.3 decimal sec)	0x3E8 (1000d)
CC ²	AT Command Mode Options	Command Sequence Character. Set/Read the ASCII character value to be used between Guard Times of the AT Command Mode Sequence (GT + CC + GT). The AT Command Mode Sequence enters the RF module into AT Command Mode. CC command is only applicable when using modules that contain the following "AT Command" firmware versions: 8.0xx (Coordinator), 8.2xx (Router), 8.4xx (End Device)	CRE	0 - 0xFF	0x2B ("+" ASCII)

1. Node types that support the command: C = Coordinator, R = Router, E = End Device
2. Command supported by modules using AT Command firmware only

APÉNDICE C

Patrón de radiación de antenas de los radios XBee

El patrón de radiación de la antena dipolar está normalizado a su valor máximo, y para el caso de la antena de látigo y de chip están normalizados al máximo valor de la antena dipolar para una fácil comparación.



BIBLIOGRAFÍA

- Frenzel, Louis E.; *Sistemas electrónicos de comunicaciones*; México: Alfaomega, 2003.
- Gralla, Preston; *Cómo funcionan las redes inalámbricas*; España: Anaya Multimedia, 2006.
- Tanenbaum, Andrew S.; *Redes de computadoras*; México: Pearson Educación, 2003.
- Roldán Martínez, David; *Comunicaciones inalámbricas: un enfoque aplicado*; México: Alfaomega, 2005.
- Webb, William; *Wireless Communications: The future*; Chichester: J. Wiley, 2007.
- Sweeney, Daniel; *WiMAX operator's manual: building 802.16 wireless networks*; Berkeley, California: Apress, 2006.
- Eady, Fred; *Hands-on ZigBee: implementing 802.15.4 with microcontrollers*; Amsterdam: Elsevier/Newnes, 2007.
- Pahlavan, Kaveh; *Principles of wireless networks: a unified approach*; New Jersey: Prentice Hall, 2002.
- Lehpamer, Harvey; *Microwave Transmission Networks: Planning, design and deployment*; New York: McGraw-Hill, 2004.
- Feher, Kamilo; *Wireless Digital Communications: modulation and spread spectrum applications*; New Jersey: Prentice Hall, 1995.
- Chang, Kai; *RF and Microwave Wireless Systems*; New York: J. Wiley, 2000.

Sitios de internet

http://www.cofetel.gob.mx/wb/Cofetel_2008/Cofe_imagenes_del_cnaf_2007 Cuadro nacional de atribución de frecuencias 2007.

<http://ieee802.org/15/index.html> IEEE 802.15 Working Group for WPAN, información de grupos de trabajo WPAN.

https://www.bluetooth.org/About/bluetooth_sig.htm SIG Bluetooth, información sobre estándar.

<http://en.wikipedia.org/wiki/Bluetooth> consulta de estándar Bluetooth.

<http://www.ecma-international.org> European Computer Manufacturers Association, estándar UWB.

<http://www.wimedia.org/en/index.asp> Promotor de UWB.

<http://www.zigbee.org/> Zigbee Alliance.

<http://www.digi.com/> Digi International Inc., fabricante de los radios XBee.