



Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica

**ANÁLISIS TÉCNICO DE REDES SENSORIALES
IMPLEMENTADAS CON EL ESTÁNDAR ZIGBEE**

Sol María Girón Cordón

Asesorado por el PhD. Enrique Edmundo Ruiz Carballo

Guatemala, junio de 2009

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**ANÁLISIS TÉCNICO DE REDES SENSORIALES
IMPLEMENTADAS CON EL ESTÁNDAR ZIGBEE**

TRABAJO DE GRADUACIÓN
PRESENTADO A JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA
POR:

SOL MARÍA GIRÓN CORDÓN

ASESORADO POR EL PHD. ENRIQUE EDMUNDO RUIZ CARBALLO

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERA ELECTRÓNICA

GUATEMALA, JUNIO DE 2009

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
VOCAL I	Inga. Glenda Patricia García Soria
VOCAL II	Inga. Alba Maritza Guerrero de López
VOCAL III	Ing. Miguel Ángel Dávila Calderón
VOCAL IV	Br. José Milton De León Bran
VOCAL V	Br. Isaac Sultán Mejía
SECRETARIA	Inga. Marcia Ivónne Véliz Vargas

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANO	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
EXAMINADOR	Ing. Francisco Javier González López
EXAMINADOR	Ing. Carlos Eduardo Guzmán Salazar
EXAMINADOR	Ing. Julio César Solares Peñate
SECRETARIA	Inga. Marcia Ivónne Véliz Vargas

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

Cumpliendo con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

**ANÁLISIS TÉCNICO DE REDES SENSORIALES
IMPLEMENTADAS CON EL ESTÁNDAR ZIGBEE,**

tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, con fecha 17 de septiembre de 2008.



Sol María Girón Córdón

Guatemala, 11 de mayo de 2009

Ingeniero
Julio Cesar Solares Peñate
Coordinador Área de Electrónica
Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica
Facultad de Ingeniería
Universidad de San Carlos
Guatemala

Ingeniero Solares:

Por medio de la presente, le informo que he asesorado y revisado el trabajo de graduación con título: **ANÁLISIS TÉCNICO DE REDES SENSORIALES IMPLEMENTADAS CON EL ESTÁNDAR ZIGBEE**, desarrollado por la estudiante **Sol María Girón Cordón**, con carné 200412705. Después de revisar su contenido final considero que satisface el objetivo del mismo y lo apruebo como trabajo de graduación.

Al agradecer su amable atención y colaboración, me suscribo atentamente.


PhD. Enrique Edmundo Ruiz Carballo
Colegiado No. 2225



UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS
DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERIA

REF. EIME 31.2009.

El Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, después de conocer el dictamen del Asesor, con el Visto Bueno del Coordinador de Area, al trabajo de Graduación del estudiante; Sol Maria Giròn Cordòn titulado: ANÁLISIS TÉCNICO DE REDES SENSORIALES IMPLEMENTADAS CON EL ESTANDAR ZIG BEE, procede a la autorización del mismo.

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'M. R. Escóbedo Martínez'.

Ing. Mario Renato Escóbedo Martínez

DIRECTOR



GUATEMALA, 20 DE MAYO 2,009.

Universidad de San Carlos
de Guatemala



Facultad de Ingeniería
Decanato

Ref. DTG. 181.2009

El Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, al trabajo de graduación titulado: **ANÁLISIS TÉCNICO DE REDES SENSORIALES IMPLEMENTADAS CON EL ESTÁNDAR ZIGBEE**, presentado por la estudiante universitaria **Sol María Girón Cordón**, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE.

Ing. Murphy Olimpo Paiz Rea
DECANO



Guatemala, junio de 2009

/cc

AGRADECIMIENTOS A:

MI FAMILIA

Especialmente a:

Gilberto Alcides Girón Sandoval
Ofelia Cordón Orellana de Girón
María del Mar Girón Cordón
Marilú Girón Cordón
Teresa Girón Cordón

MIS AMIGOS Y COMPAÑEROS DE PROYECTOS

Especialmente a:

Marcos Morales
Manuel Ríos
German Chew
Juan Carlos González

AMIGAS DE INFANCIA

Especialmente a:

Astrid García
María Luisa Hernández
Marcela Dubón

DEPARTAMENTO DE MATEMÁTICA, FACULTAD DE INGENIERÍA

Especialmente a:

Ing. Arturo Samayoa
Inga. Glenda García
Inga. Vera Marroquín
Inga. Ericka Cano
Ing. Carlos Bolaños

ESCUELA DE MECÁNICA ELÉCTRICA, FACULTAD DE INGENIERÍA

Especialmente a:

PhD. Enrique Edmundo Ruiz Carballo

A DIOS, quien para mí se encuentra reflejado en todos los mencionados.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES	VII
LISTA DE ABREVIATURAS	XI
GLOSARIO	XV
RESUMEN	XIX
OBJETIVOS	XXI
INTRODUCCIÓN	XXIII
1. FUNDAMENTOS DE ZIGBEE	1
1.1. Redes sensoriales inalámbricas	1
1.1.1. Descripción y características	1
1.1.2. Tipos de aplicaciones	3
1.1.3. Requerimientos característicos	5
1.1.4. Aplicaciones	9
1.2. Características generales de <i>ZigBee</i>	11
1.2.1. Tipo de dispositivos	12
1.2.2. Roles de los dispositivos	12
1.2.3. Capas del protocolo	13
1.2.4. Topologías de red	14
1.3. Tecnologías de comunicación	19
1.3.1. Espectro ensanchado por secuencia directa	20
1.3.2. Modulación	27
1.3.3. CSMA – CA	29
1.4. Ejemplos de aplicación	31

1.4.1. Automatización del hogar	31
1.4.2. Control remoto en la industria electrónica	33
1.4.3. Automatización industrial	33
1.4.4. Aplicaciones de salud	35
2. CAPAS DEL PROTOCOLO	37
2.1. Capa física (PHY)	38
2.1.1. Asignación de canales	39
2.1.2. Detección de energía (ED)	40
2.1.3. Medición de portadora (CS)	40
2.1.4. Indicador de calidad de enlace (LQI)	41
2.1.5. Determinación de canal libre	42
2.1.6. Constantes y atributos de la capa física	43
2.1.7. Servicios de la capa física	44
2.1.7.1. Servicio de datos	44
2.1.7.2. Servicio de administración	45
2.1.8. Primitivas de servicio	47
2.1.9. Formato del paquete de la PHY	48
2.2. Capa de acceso al medio (MAC)	49
2.2.1. Habilitación del uso de trama guía	49
2.2.2. Espaciado entre tramas	52
2.2.3. Servicios de la MAC	53
2.2.3.1. Servicio de datos	53
2.2.3.2. Servicio de administración	54
2.2.4. Formato de trama de la MAC	63
2.2.4.1. Formato de trama guía	65
2.2.4.2. Formato de trama de datos	66
2.2.4.3. Formato de la trama de reconocimiento	67

2.2.4.4.	Formato de la trama de comandos	67
2.3.	Capa de red (NWK)	68
2.3.1.	Difusión	70
2.3.2.	Multidifusión	71
2.3.3.	Monodifusión	72
2.3.4.	Servicios de la NWK	73
2.3.4.1.	Servicio de datos	73
2.3.4.2.	Servicios de administración	74
2.3.5.	Formato de trama de la NWK	77
2.4.	Capa de aplicación (APL)	80
2.4.1.	Subcapa de soporte a la aplicación (APS)	80
2.4.2.	Marco de aplicación	81
2.4.3.	Objetos – dispositivos de <i>ZigBee</i> (ZDO)	87
2.4.4.	Subcapa APS	90
3.	LA RED ZIGBEE	93
3.1.	Tipos de dispositivos	93
3.1.1.	Coordinador	94
3.1.2.	Enrutador	95
3.1.3.	Dispositivo terminal	96
3.2.	Topología de red	97
3.2.1.	Topología en estrella	97
3.2.2.	Topología en árbol	98
3.2.3.	Topología en malla	99
3.3.	Transreceptor	100
3.3.1.	Antena	100
3.3.2.	Unidad de microcontrolador (MCU)	110
3.3.3.	Memoria	111

3.3.4.	Cristal	112
3.3.5.	Convertidor analógico digital (ADC)	115
3.3.6.	Sensores	117
3.4.	Control energético	118
3.4.1.	Cálculo del tiempo de vida de una batería	120
3.4.2.	Técnicas de reducción de consumo	121
3.4.2.1.	Consideraciones para la selección de equipo	122
3.4.2.2.	Eficiencia de operación de la red	125
3.4.2.3.	Enrutamiento eficiente	127
3.5.	Ubicación de nodos	130
3.5.1.	Escenarios de ubicación	133
3.5.1.1.	Escenario centralizado	133
3.5.1.2.	Escenario seccionado	134
3.5.1.3.	Escenario distribuido	135
3.5.2.	Algoritmos basados en el RSS	136
3.5.2.1.	Triangularización RSS	137
3.5.2.2.	Mapeo del RSSI	142
4.	MONTAJE Y UTILIZACIÓN DE UNA RED ZIGBEE	149
4.1.	Módulos de desarrollo	150
4.2.	Aplicación del proveedor	155
4.2.1.	Configuración del dispositivo	165
4.3.	Programación del módulo	177
4.4.	Comunicación directa con el módulo	179
4.5.	Ejemplo de aplicación	184
4.5.1.	Descripción del problema	185
4.5.2.	Solución sugerida	185
4.5.3.	Implementación de la solución	187

CONCLUSIONES	197
RECOMENDACIONES	201
BIBLIOGRAFÍA	203
ANEXOS	205

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1	Topología de red en estrella	15
2	Topología de red en malla	16
3	Topología de red en árbol	17
4	Efecto del Espectro Ensanchado en Frecuencia	23
5	Diagrama de constelación de un sistema QPSK	28
6	Configuración de un sistema de monitoreo de pacientes	35
7	Organización de capas del Estándar IEEE 802.15.4 y <i>ZigBee</i>	37
8	Interacción PHY – MAC	46
9	Formato PPDU	48
10	Estructura de supertrama	50
11	Secuencia de asociación	56
12	Secuencia de disociación solicitada por el dispositivo	57
13	Secuencia de disociación solicitada por el coordinador	57
14	Asociación de GTS iniciada por el dispositivo	58
15	Liberación de GTS	59
16	Notificación de orfandad	60
17	Secuencia de sincronización	62
18	Secuencia de petición de datos	63
19	Formato general de trama de la MAC	64
20	Configuración de la trama de control	64
21	Campos de la trama guía	65
22	Configuración de la trama de datos	66

23	Formato de la trama de reconocimiento	67
24	Formato de la trama de comandos	68
25	Interfaz MAC – NWK - APL	69
26	Formato general de trama de la NWK	77
27	Trama de datos y trama de comandos	78
28	Capa de aplicación	80
29	Configuración del perfil de aplicación <i>ZigBee</i>	83
30	Organización jerárquica de los comandos del ZDO	89
31	Formato general de trama de la APS	91
32	Posición del nodo coordinador en las topologías de red	94
33	Posición del nodo enrutador en las topologías de red	96
34	Posición de los nodos terminales en las topologías de red	96
35	Transreceptor del estándar IEEE 802.15.4	100
36	Acople de impedancias entre antena y el bloque receptor	105
37	Equivalente eléctrico de un cristal piezoeléctrico	113
38	Diagrama de bloques de un oscilador de cristal	113
39	Oscilador de cristal con capacitores de carga	115
40	Diagrama de bloques de un ADC	116
41	Algoritmo de posición basado en el RSS	132
42	Escenario centralizado	133
43	Escenario seccionado	135
44	Escenario distribuido	136
45	Triangularización RSS	138
46	Mapeo del RSSI	143
47	Kit de desarrollo ZMN2405/HP	149
48	Diagrama de bloques de un módulo <i>ZigBee</i>	151
49	Ubicación real de los bloques funcionales	152
50	Pantalla inicial de la aplicación ZBDemo	156
51	Conexión de la aplicación ZBDemo con el módulo <i>ZigBee</i>	157

52	Pantalla de la configuración del puerto serial en el ZBDemo	158
53	Módulo local reconocido por la aplicación ZBDemo	159
54	Reconocimiento de los módulos	161
55	Ventana <i>ChildForm</i> de la aplicación	164
56	Función de mensajería de la aplicación ZBDemo	165
57	Opción <i>CONFIG</i>	167
58	Opción <i>CONFIG ENABLE OPTIONS</i>	169
59	Opción <i>MODULE I/O</i>	172
60	Opción <i>NETWORK</i>	173
61	Opción <i>RF</i>	176
62	Ventana de programación del ZProg	178
63	Ventana del mensaje del ZProg	178
64	Pines de transmisión serial en el módulo <i>ZigBee</i>	181
65	Diagrama de bloques de la solución sugerida	186
66	Transmisor IR	191
67	Receptor IR	191
68	Conexión del microcontrolador	193
69	Pantalla principal de la aplicación	
70	Formulario de resumen	

TABLAS

I	Distribución de páginas y canales de las bandas de frecuencia	39
II	Atributos de la capa física	43
III	Comandos de la MAC	68
IV	Campos del descriptor de nodo	84
V	Campos del descriptor de energía	86
VI	Campos del descriptor simple	86
VII	Tipos de antenas	107
VIII	Actividades de un nodo alimentado por baterías	120
IX	Pines de conexión del módulo ZMN2405/HP	153
X	Descripción de los pines del módulo ZMN2405/HP	154
XI	Valores del estado de enlace	175
XII	Estructura de la trama de comando	182
XIII	Estructura de la sección de argumentos	183
XIV	Formato del paquete de instrucción	187
XV	Formato del paquete de instrucción	188
XVI	Argumentos	188
XVII	Mapa de bits del registro	189
XVIII	Formato del paquete de instrucción	189
XIX	Paquete final	190
XX	Código del microcontrolador 16F877A	193
XXI	Registros del clúster módulo I / O	227
XXII	Registros del clúster de configuración	228
XXIII	Registros del clúster de reinicio	230
XXIV	Registros del clúster de red	230
XXV	Registros del clúster de RF	231
XVI	Registros del clúster de seguridad	233

LISTA DE ABREVIATURAS

ADC	Convertidor Analógico Digital
ADE	Administración Dinámica de Energía
AES	Métodos de Encriptación Avanzada
APL	Capa de Aplicación
BER	Razón de Error de Bit
BI	Intervalo de Trama Guía
BSN	Número de Secuencia de la Trama Guía
BTT	Tabla de Difusión de Transacciones
CA	Evasión de Colisiones
CAP	Período de Acceso de Contención
CCA	Determinación de Canal Libre
CDMA	Acceso Múltiple por División de Código
CFP	Período Libre de Contención
CS	Detección de Portadora
CSM	Módulo Estándar de Cirronet
CSMA – CA	Acceso Múltiple por Detección de Portadora
DSN	Número de Secuencia de Datos
DSP	Procesador Digital de Señales
DSSS	Espectro Ensanchado por Secuencia Directa
DU	Unidad de Datos
ED	Detección de Energía
FCS	Verificación de Secuencia de Trama
FDD	Dispositivos de Funcionalidad Completa

GPIO	Entradas / Salidas de Propósito General
GTS	Intervalos de Tiempo Garantizado
HVAC	Humedad Ventilación y Aire Acondicionado
IR	Infrarrojo
Jpb	Joules por bit
ISM	Industrial, Científico y Médico
LPS	Sistema de Posicionamiento Local
LQI	Indicador de Calidad de Señal
MAC – PIB	Base de Datos de la MACA
MAC	Capa de Acceso al Medio
MACA	Acelerador MAC
MCU	Unidad de Microcontrolador
MHR	Encabezado de la MAC
MLME	Entidad de Administración de la MAC
MPDU	Unidad de Datos del Paquete de la MAC
NLDE	Entidad de Datos de la Capa NWK
NLDE	Entidad de Datos de la NWK
NLME	Entidad de Administración de la NWK
NVM	Memoria no Volátil
NWK	Capa de Red
OSI	Interconexión de Sistemas Abiertos
PAN	Red de Área Personal
PER	Razón de Error del Paquete
PHR	Encabezado de la PHY
PHY – PIB	Base de Datos de la PHY
PHY	Capa Física
PIC	Circuito Integrado Programable
PLME	Entidad de Administración de la PHY
PPDU	Unidad de Datos de la PHY

PSDU	Unidad de Servicio de la Capa Física
PSK	Desplazamiento de Fase
RF	Radio Frecuencia
RFD	Dispositivos de Funcionalidad Reducida
RFID	Etiquetas de Identificación por Radio Frecuencia
RSS	Potencia de la Señal Recibida
RSSI	Indicador de Potencia de la Señal Recibida
SAP	Punto de Acceso de Servicio
SD	Duración de Supertrama
SFD	Delimitador de Inicio de Trama
SHR	Encabezado de Sincronización
SNR	Razón Señal a Ruido
SOP	Inicio de Paquete
SPI	Interfaz del Puerto Serial
TDMA	Acceso Múltiple por División de Tiempo
UART	Transmisor – Receptor Asíncrono Universal
WLAN	Red Inalámbrica de Área Local
ZDO	Objeto – Dispositivo <i>ZigBee</i>

GLOSARIO

Asociación	Establecimiento de enlace en una red inalámbrica.
Atributo	Valores que definen propiedades de de una capa del protocolo cuyos valores pueden variarse durante la operación del sistema.
Autenticación de Datos	Verificación de la fuente de información de determinado mensaje con el objetivo de asegurar que el mensaje no ha sido modificado durante la transmisión.
Ciclo de Trabajo	Medida de la cantidad de tiempo en que un dispositivo permanece energizado, expresada como un porcentaje del ciclo de trabajo completo de encendido y apagado del dispositivo.
Clúster	Localidad de memoria donde se almacenan las variables del sistema catalogadas, según su funcionalidad.

Constante	Término que define características propias de un paquete de datos. Tienen un valor definido que no puede ser cambiado durante el trabajo de la red.
Dispositivos de Funcionalidad Completa (FFD)	Dispositivo de red capaz de ejecutar cualquier tarea de red descrita en el estándar. Puede tener cualquier papel dentro de la red.
Descripción del Dispositivo	Sección perteneciente a un perfil de aplicación que muestra información correspondiente al dispositivo.
Descriptor	Estructura de datos que brinda información referente a la estructura y modo de operación de un dispositivo determinado.
Descubrimiento de Rutas	Mecanismo de búsqueda de rutas que permitan la transmisión de mensajes desde un dispositivo fuente hacia el destino.
Difusión	Mecanismo de comunicación mediante el cual un nodo envía un mensaje que será recibido por todos los nodos de la red.
Direccionamiento Indirecto	Mecanismo implementado por un dispositivo de funciones reducidas, con el objetivo de comunicarse con el resto de nodos en la red sin necesidad de conocer su dirección específica.

Disociación	Procedimiento generado por un dispositivo asociado a una red. Tiene por intención notificar al Coordinador el deseo de abandonar la red.
Dispositivo de Funcionalidad Reducida (RFD)	Dispositivo de capacidades limitadas cuya función de red se limita a la adquisición de datos y la respectiva transmisión de estos a dispositivos de funcionalidad superior.
Dispositivo Huérfano	Un dispositivo que ha perdido su conexión con su Coordinador asociado.
Encriptación	Acción de modificar un mensaje de forma tal que sólo receptores específicos sean capaces de recuperar el mensaje original.
Enrutador	Dispositivo encargado del enrutamiento de mensajes dentro de una red estructurada con una topología de malla o de árbol.
Escalabilidad	Habilidad de una red para crecer agregando más nodos y servicios, y adaptándose a circunstancias cambiantes sin que esto afecte su desempeño.
Topologías	Estructura lógica en que se define la comunicación de los nodos que conforman la red sensorial.

Microcontrolador	Circuito integrado que incluye en su interior las tres unidades funcionales de una computadora. Cumple funciones de recolección de información, procesamiento de datos y definición del comportamiento de los actuadores.
Octeto	Un byte, 8 bits.
Perfil	Un perfil <i>ZigBee</i> se refiere a una colección de descripciones referentes a dispositivos de aplicaciones específicas.
Primitiva	Funciones que permiten la comunicación entre capas adyacentes del protocolo de red. Especifican la acción que se ejecutará o proveen el resultado de una actividad realizada previamente.
Transreceptor	Dispositivo de comunicación que funciona para la transmisión y recepción de datos, almacenamiento y procesamiento de la información.
Tabla de Vecinos	Recurso utilizado por los dispositivos <i>ZigBee</i> para mantener la información correspondiente a los dispositivos que los rodean.

RESUMEN

Una red sensorial está integrada por elementos nodales que se comunican entre sí con una finalidad específica. El éxito de esta comunicación radica en que todos los nodos reconozcan el mismo estándar de comunicación, pues es éste el que define la estructura, el orden y el lenguaje en que se transmiten los mensajes. Los estándares disponibles son diversos, siendo la elección una función de las necesidades específicas de cada aplicación.

El estándar *ZigBee* se presenta como una especificación, relativamente nueva, destinada al desarrollo de redes sensoriales. Su éxito en este campo radica en características como el bajo costo de mantenimiento, los algoritmos de seguridad que utiliza, la flexibilidad, fiabilidad y sencillez que presenta su implementación y la integración de mecanismos de ahorro en el consumo energético y enrutamiento inteligente de mensajes.

El análisis técnico expuesto en el presente trabajo describe las características principales referentes al estándar *ZigBee*. Inicialmente se establecerán los fundamentos teóricos que respaldan el funcionamiento de una red sensorial implementada con el estándar *ZigBee*, se incluye aquí información como las técnicas de modulación utilizadas, los tipos de dispositivos que integran la red, ejemplos de aplicaciones, etc. La segunda parte del trabajo se centra en la descripción de la estructura de los paquetes de mensaje transmitidos y la secuencia correcta de éstos para el efectivo desarrollo de los

procesos. Se describirán luego las características físicas y lógicas de los dispositivos que operan como nodos sensoriales dentro de la red. Finalmente, se detalla el establecimiento de una red sensorial básica, ejemplificando los pasos mediante el uso de una pareja de módulos de prueba dedicados a la implementación del estándar *ZigBee*.

OBJETIVOS

General:

- Analizar las características técnicas que hacen de *ZigBee* un estándar abierto idóneo para la configuración de redes sensoriales inalámbricas.

Específicos:

1. Describir las características y recursos proporcionados por *ZigBee*, para la implementación de redes sensoriales.
2. Identificar los tipos de nodos, topologías y modos de direccionamiento utilizados en una red *ZigBee*.
3. Explicar la configuración de las capas de red que participan en el desarrollo de una aplicación *ZigBee*.
4. Evaluar las capacidades y posibilidades del estándar *ZigBee*, para la creación de redes sensoriales.
5. Crear una aplicación sencilla con elementos que incorporen el estándar *ZigBee* como ejemplificación para la creación de proyectos más complejos.

INTRODUCCIÓN

El estándar para redes sensoriales inalámbricas *ZigBee* es actualmente la especificación eficaz para la estructuración y puesta en marcha de sistemas de bajo costo, baja transmisión de datos, corto alcance entre nodos y un prolongado período de vida para los elementos alimentados con baterías. *ZigBee* ha sido producto de otros estándares que han evolucionado hacia esta nueva tecnología, que según se cree, debe su nombre al movimiento en zigzag que hacen las abejas al movilizarse entre las flores; *ZigBee* se mueve en ese “zigzag” al buscar las mejores rutas para la optimización de su sistema. *ZigBee* no es sólo un estándar más para redes sensoriales, es un estándar “inteligente” cuyo verdadero potencial está aún por verse.

El presente trabajo tiene como objetivo principal establecer los fundamentos y estructura del estándar *ZigBee*, las posibilidades que con él van emergiendo y los nuevos retos que se van presentando conforme se desarrolla más tecnología referente al trabajo con redes de sensores. En función de este objetivo se incluyeron cuatro capítulos.

El primer capítulo establece los fundamentos sobre los que se respalda el estándar *ZigBee*. Se inicia describiendo el conjunto de características y aplicaciones propias de toda red sensorial, para posteriormente presentar a *ZigBee* como una nueva tecnología destinada al manejo de redes sensoriales inalámbricas. Se describen aquí los tipos de dispositivos que forman parte de

una red *ZigBee*, la topología de red que implementa, las técnicas de modulación con que trabaja, etc. Finalmente se exponen algunas de las aplicaciones en las que *ZigBee* está sobresaliendo.

En el segundo capítulo se trata lo relativo al protocolo que implementa el estándar *ZigBee*. El capítulo está estructurado en cuatro secciones, cada una referente a cada capa de red que maneja el estándar. Se analiza y explica cómo se da la comunicación entre las capas de distintos dispositivos y cómo las capas de un mismo dispositivo interactúan entre sí. Se exponen las interfaces que hacen posible la comunicación, así como el formato adecuado para la correcta transmisión de mensajes.

El tercer capítulo está dedicado a los elementos que constituyen los nodos de la red, los transreceptores. Se inicia exponiendo los distintos papeles que un transreceptor puede desempeñar dentro de la red en función de la topología implementada y su posición en la misma. A continuación se detallarán los bloques funcionales que constituyen el *hardware* del transreceptor utilizado. Finalmente se presentan los mecanismos de optimización de energía y enrutamiento de paquetes.

En el cuarto capítulo se ejemplifica el desarrollo de una red sensorial de dos nodos. En este capítulo se trabaja con una pareja de módulos de prueba desarrollados por la empresa Cirronet. Se iniciará haciendo la presentación del equipo utilizado para posteriormente explicar el montaje de una red sensorial que tiene por objetivo el control de una luz. En el desarrollo se abarcan temas como la estructuración de los mensajes que se envían entre los módulos y la interfaz que se hace del equipo *ZigBee* adquirido con un microcontrolador de uso general.

Al finalizar el trabajo se encuentran las conclusiones y recomendaciones desarrolladas a lo largo del trabajo, así como la bibliografía consultada. En los anexos, último apartado del trabajo, se incluye el código para elaborar una aplicación que calcule el tiempo de vida que tendrá una batería realizando determinadas actividades, y el conjunto de clústeres y tipos de mensajes que se manejan en la estructuración de tramas de mensaje del protocolo. Se espera que este trabajo brinde suficiente información para funcionar como punto de partida en la investigación e implementación de nuevas tecnologías, especialmente en el área de redes de sensores.

1. FUNDAMENTOS DE ZIGBEE

1.1 Redes sensoriales inalámbricas

1.1.1 Descripción y características

Los fenómenos físicos, ya sean naturales o generados por procesos artificiales, son fieles seguidores de la causa y el efecto pues en ellos pueden identificarse condiciones, que de una u otra forma, servirán como detonantes en la generación de otra etapa más del fenómeno que se considera. La búsqueda de herramientas que permitan utilizar estas condiciones detonantes ha sido la que impulsa el desarrollo de las redes sensoriales como un mecanismo para lograr generar un ambiente inteligente que pueda controlarse en función de eventos específicos.

Las computadoras son los principales agentes en la implementación de redes sensoriales y generación de un ambiente inteligente. Su funcionamiento se basa en el trabajo conjunto de diversos dispositivos que reúnen y procesan información de varias fuentes, a fin de controlar procesos físicos e interactuar con los usuarios humanos. Es aquí que la interacción con el mundo físico se muestra más importante que la mera manipulación de datos.

Para lograr que la información necesaria para el control llegue al destino esperado se necesitan fuentes de información, actuadores o usuarios, que colaboren presentando una imagen, con la mayor precisión posible, del mundo real en el que se trabaja. Dada la complejidad de la red de sensores que debiera instalarse para lograr este objetivo, se opta por trabajar con redes inalámbricas pues estas obvian problemas como el precio del cableado, mantenimiento y la falta de movilidad. Las **Redes Sensoriales Inalámbricas** (WSN, *Wireless Sensor Networks*) están formadas por nodos capaces de interactuar con su ambiente ya sea midiendo o controlando parámetros físicos.

Las redes sensoriales centran su interacción con el ambiente en que se encuentran, los humanos se vuelven actores secundarios en la obtención y manipulación de los datos. Algunos elementos característicos de éstas son:

- La red está embebida en el ambiente.
- Los nodos que conforman la red están equipadas con equipo de sensores y actuadores que le permiten medir e influenciar el ambiente.
- Los nodos procesan información y se comunican entre sí inalámbricamente.
- Los avances en este campo han llevado al desarrollo de sensores activos pequeños, de bajo costo y bajo consumo energético. Todos los sensores que se implementan observan algún fenómeno físico, como temperatura, humedad, etc., y realizan algún proceso como el filtrado de los datos medidos. Los sensores se distribuyen sobre una región, para formar la red sensorial, y cooperan entre sí para medir, procesar, filtrar y direccionar la información al centro coordinador de la red. Usualmente un nodo en la red contiene una unidad de medición, procesamiento y comunicación y un sistema embebido para la localización y movilidad de la unidad.

De forma similar a las redes de computadoras comunes, las redes de sensores pueden ser analizadas en términos de sus capas OSI. Las redes

sensoriales difieren de las tradicionales dado el constante cambio que se tiene en los nodos que la conforman y por lo tanto, en su estructura general. Esto motiva a la generación de algoritmos robustos que busquen la estabilidad y garanticen la continuidad del trabajo aún ante el fallo de algún nodo. La mayoría de redes sensoriales implementan métodos de difusión de mensajes para lograr la comunicación, esto en contraposición a la comunicación punto a punto tradicional. Es por esto que también los protocolos de direccionamiento deben diseñarse cuidadosamente para considerar todas estas características.

1.1.2 Tipos de aplicaciones

Las redes sensoriales trabajan con dos elementos básicos, los nodos fuente que miden datos y los nodos sumidero a los que se debe entregar los datos, estos últimos pueden ser parte de la red o elementos completamente externos a la red. Usualmente se tendrán más nodos fuente que sumideros en una red. Existen patrones de interacción entre estos elementos que permiten clasificar sus aplicaciones según características especiales. Las interacciones pueden monitorearse espacial y temporalmente, los requisitos pueden cambiar dinámicamente y los sumideros deben tener una forma de informar a los nodos fuente sus peticiones específicas. A continuación se presentan los tipos básicos de interacciones entre estos elementos y los tipos de aplicaciones que en base a estas interacciones pueden desarrollarse.

- **Detección de eventos:** Los nodos fuente deben reportarle a los sumideros una vez detecten la presencia o ejecución de un evento específico. Los eventos simples pueden ser detectados localmente por un solo sensor aislado. Los eventos más complejos requieren la colaboración de sensores cercanos o remotos a fin de decidir si ha ocurrido cierto evento. Muchas aplicaciones pueden requerir la clasificación de eventos.
- **Mediciones periódicas:** Se puede asignar a los sensores la tarea de reportar periódicamente los valores que miden. Muchos de estos reportes pueden ser generados por los sensores y entregados a los sumideros ante la detección de cierto evento. Esta es una propiedad característica cuya definición depende directamente del tipo de aplicación que se lleve a cabo.
- **Funciones de aproximación y detección de bordes:** La forma en que el valor de un parámetro físico cambia de un punto a otro puede tratarse como una función de su ubicación. Una red sensorial puede utilizarse para aproximar esta función desconocida usando un número limitado de muestras tomadas de cada nodo individual. Este mapeo aproximado debe estar disponible para el nodo sumidero. Cómo y cuándo se actualizan estos mapas, depende de las necesidades de la aplicación.
- **Seguimiento:** La fuente de un evento puede ser móvil y la red sensorial puede utilizarse para reportar constantemente la posición de la fuente al sumidero, otorgando estimaciones de velocidad y dirección. Usualmente en este tipo de aplicaciones intervienen varios nodos de la red en cooperación.

1.1.3 Requerimientos característicos

Las siguientes características son compartidas por la mayoría de aplicaciones que hacen uso de redes sensoriales inalámbricas.

- **Tipo de servicio:** Las redes de comunicación convencionales se dedican a transportar bits de un lado a otro. Las redes sensoriales inalámbricas, por otro lado, son encargadas de brindar información, o ejecutar acciones, correspondientes a tareas programadas en ellas.
- **Calidad del servicio:** Los requerimientos tradicionales en redes de comunicación hacen referencia al retraso y al ancho de banda mínimo. Estos parámetros no adquieren tanta importancia cuando se trata de redes con períodos de latencia probablemente extensos y ancho de banda pequeño para los datos transmitidos. El retraso es un parámetro de importante consideración cuando de la red dependen actuadores que necesitan controlarse en tiempo real. Cobra más importancia la cantidad y calidad de información que puede extraerse de ciertas fuentes pues son éstas las que brindan información sobre los fenómenos observados en el área.
- **Tolerancia a las fallas:** Los nodos pueden quedarse sin energía, dañarse o quedarse incomunicados con respecto a otros nodos en la red. Es importante que este tipo de red, como un todo, sea capaz de tolerar tales faltas. Para tolerar las fallas en los nodos se necesita la transmisión redundante de mensajes, empleando incluso más nodos de los necesarios.
- **Tiempo de vida:** La definición del tiempo de vida depende de la aplicación que se pretenda desarrollar. Se puede aplicar como el tiempo en que tarde en fallar el primer nodo (o se quede sin energía), el tiempo que tarde la red en dividirse en dos secciones que no puedan comunicarse, el tiempo en que haya fallado el 50% de los nodos o el tiempo en que un sector del área

en observación no sea monitoreado por algún nodo. En la mayoría de escenarios de aplicación los nodos se sustentarán de una fuente de energía limitada. La situación se complica al ser necesario que la red se mantenga en actividad por un tiempo ilimitado, sumándose que el reemplazo de la fuente de energía puede no ser sencillo. Ante estos factores, el tiempo de vida de una red sensorial inalámbrica se vuelve de importancia sustancial. Sin embargo, éste factor puede discrepar con lo referente a la calidad de la red. Si se invierte más energía en las transacciones de la red se reducirá el tiempo de vida de la misma, si se invierte menos se obtiene más tiempo de vida pero una red de menor calidad. Las soluciones se encuentran con sistemas de energía alternativos o de respaldo. La implementación de cargadores de baterías pueden funcionar asegurando cierta operación prolongada, aunque no continua (por la interrupción entre los tiempos de carga y descarga).

- **Escalabilidad:** Este requerimiento hace referencia a la habilidad de una red para crecer, agregando más nodos o servicios, o adaptarse a circunstancias cambiantes sin que esto afecte la calidad del desempeño. Este tipo de propiedad es definida por el protocolo de la red.
- **Amplio rango de densidades:** La densidad de la red, número de nodos por unidad de área geográfica en consideración, es un aspecto variable. Diferentes aplicaciones tendrán distinta densidad de nodos. Las variaciones en este aspecto ocurren porque los nodos fallan o se movilizan. La densidad no tiene que ser homogénea en la red, ésta debe adaptarse naturalmente a las variaciones.
- **Programación:** Los nodos deben ser capaces de procesar información y reaccionar flexiblemente ante cambios que se den en sus tareas. Los nodos deben ser programables y su programación debe poder cambiarse durante su trabajo en función de las características del ambiente.

- **Auto-mantenimiento:** El sistema de la red debe ser adaptable. Debe monitorear su propia salud y estado para cambiar parámetros operacionales, como por ejemplo ceder más energía en función del desempeño. Debe ser capaz de interactuar con otros mecanismos externos de mantenimiento para asegurar su operación prolongada con cierto nivel de calidad.

Para la obtención de las características descritas, se necesita implementar mecanismos específicos. Algunos mecanismos que serán un elemento típico en una red sensorial son:

- **Salto múltiple :** La técnica básica de transmisión la constituye la comunicación inalámbrica. Usualmente, la transmisión a largas distancias se logra incrementando la potencia de la transmisión. En este caso, se logra utilizando nodos intermedios que van traspasando los mensajes de uno en uno hasta el destino. Este tipo de transmisión reduce la necesidad de transmisiones que signifiquen un desgaste energético, por lo que es una necesidad en la implementación de redes sensoriales.
- **Auto-configuración:** Una red sensorial inalámbrica deberá configurar autónomamente la mayoría de sus parámetros operacionales. Como ejemplo, los nodos deberán ser capaces de determinar su posición geográfica utilizando los otros nodos en la red, esto se conoce como “auto-localización”. La red debe ser capaz de tolerar nodos defectuosos (por algún fallo de energía, por ejemplo) o la integración de nuevos nodos (debido al incremento necesario ante un fallo, por ejemplo).
- **Colaboración y procesos de red:** En algunas aplicaciones, un solo sensor no es capaz de decidir si un evento ha ocurrido, se necesita la colaboración de varios sensores para detectar un evento y sólo los datos conjuntos de

muchos sensores proveerán suficiente información. La información es procesada en la red en varias formas para lograr esta colaboración. Un ejemplo de ello puede ser la determinación de la temperatura promedio en un área dada y reporte de la información a un sumidero. Para llevar a cabo esta tarea eficientemente, la lectura de sensores individuales puede ir siendo agregada mientras la información se propaga en la red, reduciendo la cantidad de datos que se transmiten, y por lo tanto, mejorando el desempeño de la red.

- **Red centrada en los datos:** En las redes sensoriales inalámbricas, donde los nodos están implementados de forma redundante para protección de la red ante alguna falla de un nodo o compensar la baja calidad de un equipo de medición con un solo nodo, la identidad de un nodo proveedor de datos se vuelve irrelevante. Lo que adquiere mucha importancia son las respuestas y valores en sí, no el nodo que los genera. Es en esto que se aplica la frase “red centrada en los datos”, pues la red y sus protocolos de comunicación se diseñan de forma que se da prominencia a los datos. Un ejemplo puede ser, nuevamente, la determinación de la temperatura promedio en un área dada, pues no se solicita la lectura precisa de un sensor determinado, sino el dato conjunto que caracteriza a la región. Este tipo de arquitectura puede utilizarse para establecer las condiciones o eventos que generarán alertas.
- **Localización:** Los mecanismos de localización de nodos deben ser estudiados cuidadosamente para lograr, principalmente, la escalabilidad de la red. Los nodos, elementos limitados en recursos, principalmente memoria, deben reducir la cantidad de datos que acumulan durante procesos del protocolo a información referente únicamente a sus vecinos. Se espera que con ello la red pueda crecer a escalas mayores (mayor número de nodos) sin tener que implementar mecanismos de procesamiento muy complejos.

- **Concesiones:** Las redes sensoriales inalámbricas deberán invertir en mecanismos de concesión ante objetivos, quizá contradictorios, de la red. Ejemplos de estas concesiones, algunas ya mencionadas, pueden ser: el uso de mayor energía en las transmisiones que incrementará la precisión de los resultados y la calidad de la red, pero amenazará el tiempo de vida de los nodos considerados individualmente y de la red en su totalidad.

1.1.4 Aplicaciones

A continuación se presentan algunos ejemplos donde la implementación de redes sensoriales se presenta como la alternativa más lógica.

- **Detección de desastres**
 - Lanzar nodos sensoriales desde un avión sobre un incendio.
 - Cada nodo medirá la temperatura.
 - Generar un mapa de temperatura de la región.
 - Mediante el análisis del mapa, determinar el mecanismo de acción.
- **Mapeo de biodiversidad**
 - Utilizar nodos sensoriales para observar especies (fauna y flora), interacciones entre ella y el ambiente.
- **Edificios inteligentes (o puentes)**
 - Reducir el consumo energético mediante el monitoreo efectivo de factores como humedad, ventilación y aire acondicionado (control HVAC).
 - Medida de ocupación, temperatura y corriente de aire en una habitación.
 - Monitoreo de estrés mecánico producido por temblores o terremotos.
- **Administración de instalaciones**

- Detección de intrusos en instalaciones industriales.
- Control de fugas en plantas químicas.
- **Supervisión de maquinaria y mantenimiento preventivo**
 - Sensores embebidos para el control de funciones donde el cableado no es posible.
 - Monitoreo de presión de aire en neumáticos.
- **Precisión en la agricultura**
 - Distribución de pesticidas, fertilizantes o irrigación únicamente dónde y cuándo se necesite.
- **Medicina y cuidado de la salud**
 - Cuidado intensivo o post-operatorio de un paciente.
 - Supervisión prolongada de pacientes con enfermedades crónicas o cuidado de ancianos.
- **Logística**
 - Equipar parcelas o contenedores con nodos sensoriales y hacer un seguimiento de su ubicación (*tracking*).
- **Telemática**
 - Proveer un control de tráfico efectivo mediante la adquisición de las condiciones precisas del tráfico. (En este caso se podrían equipar los automóviles con sensores, éstos funcionarían como los nodos informando posición relativa).

La idea de utilizar comunicación inalámbrica para obtener información o desarrollar ciertas tareas de control dentro de una casa o fábrica no es nueva. Existen numerosos estándares destinados a la conformación de redes inalámbricas de corto alcance, incluyéndose las Redes Locales Inalámbricas (*WLAN*) y *Bluetooth*. Cada uno de estos estándares tiene sus ventajas y aplicaciones en particular. El presente trabajo centra su estudio en la

tecnología *ZigBee*, un estándar relativamente nuevo que se ha desarrollado específicamente para satisfacer la necesidad de trabajar con redes de bajo costo de implementación, manejo de una razón de datos baja y poco consumo de energía.

1.2 Características generales de ZigBee

ZigBee se presenta como un estándar que define un conjunto de protocolos de comunicación destinados al manejo de redes inalámbricas que trabajen con una baja tasa de datos y un rango de cobertura poco extenso. Como características principales se tienen dispositivos que operan en las bandas de 868 MHz., 915 MHz. y 2.4 GHz. La tasa máxima de transferencia es de 250 kbps. El tiempo total que cualquier dispositivo de la red permanecerá en cualquier tipo de actividad es bastante limitado, la mayor parte del tiempo estará en adormecido, un modo de operación para de ahorro energético. Es de esta forma que los dispositivos *ZigBee* son capaces de mantenerse operando por varios años hasta que sus baterías necesiten ser reemplazadas.

El estándar *ZigBee* es desarrollado por la Alianza *ZigBee*, organismo que cuenta ya con la colaboración de cientos de compañías, principalmente de la industria de semiconductores y desarrolladores de *software*. La alianza fue conformada en el 2002 como una organización no lucrativa, abierta a cualquiera que deseara unirse. El estándar *ZigBee* ha adoptado la Capas Física (PHY) y la Capa de Acceso al Medio (MAC) del protocolo IEEE 802.15.4. Por lo tanto, los elementos pertenecientes a *ZigBee* son compatibles también con el estándar IEEE 802.15.4.

En los siguientes apartados se describirán, a grandes rasgos, algunas de las características de este estándar. La descripción detallada se deja para capítulos posteriores.

1.2.1 Tipo de dispositivos

En una red basada en el estándar IEEE 802.15.4 se trabaja con dos tipos de dispositivos básicos: los FFD (dispositivos de funcionalidad completa) y los RFD (dispositivos de funcionalidad reducida). Un dispositivo FFD es capaz de ejecutar cualquier tarea de red descrita en el estándar, y puede aceptar cualquier papel dentro de la misma. Un RFD tiene capacidades limitadas.

Por ejemplo, un FFD puede comunicarse con cualquier otro dispositivo en la red, mientras que un RFD puede hablar sólo con otros FFD. Los RFD tienen como objetivo el desarrollo de aplicaciones simples. Sus capacidades de procesamiento y tamaño de memoria son usualmente menores a las de los FFD.

1.2.2 Roles de los dispositivos

En una red *ZigBee*, un FFD puede asumir uno de tres papeles distintos: Coordinador, Enrutador o Dispositivo Terminal. Un Coordinador es el encargado de iniciar la red y definir el canal de comunicación a usar, administrar los nodos de la red y almacenar información sobre estos. Un Enrutador será el responsable de dirigir el encaminamiento de los mensajes entre los nodos de la red. Un Dispositivo Terminal es un dispositivo simple, su papel puede ser

asumido por un RFD, trabaja con la adquisición directa de los datos y la comunicación de estos a su dispositivo superior inmediato (Enrutador o Coordinador).

1.2.3 Capas del protocolo

ZigBee ofrece funcionalidades de alto nivel en lo referente a estructura de red, enrutamiento de mensajes y seguridad. Estas funcionalidades son respaldadas por la estructura en capas de su protocolo.

La Capa Física (PHY) y la Capa de Acceso al Medio (MAC) están basadas en el estándar IEEE 802.15.4, el cual brinda muchos de los principios en los que se fundamenta *ZigBee*, como lo son:

- Consumo energético bajo.
- Uso de frecuencias libres.
- Instalación sencilla.
- Bajo costo.

ZigBee se construye sobre estas funcionalidades del estándar IEEE 802.15.4, agregando características que permiten topologías de red más flexibles, un direccionamiento de mensajes más inteligente y medidas de seguridad más estrictas y confiables.

- **Capa Física (PHY):** Es la capa más baja del protocolo. Es la más cercana al *hardware* y se comunica y controla, directamente, al transreceptor de radio. Es la responsable de la activación del equipo que transmite o recibe los paquetes. Se encarga también de la selección de los canales de frecuencia y de asegurarse que estos no estén ocupados.

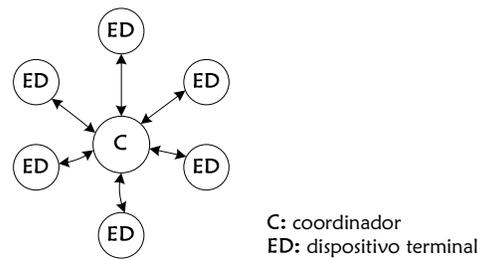
- **Capa de Acceso al Medio (MAC):** Provee la interfaz entre la PHY y la capa de red. Responsable del direccionamiento de los datos salientes y la identificación de la fuente de los datos entrantes. Se encarga del ensamblaje de paquetes de datos (tramas) que se transmiten y el desembalaje de los paquetes de datos recibidos.
- **Capa de Red (NWK):** Es la interfaz entre la MAC y la capa de aplicación. Responsable de la inicialización de la red y la configuración de entrada y salida a la misma. Configura los dispositivos nuevos que se unen a la red. Distribuye las direcciones, desde el Coordinador, a los dispositivos que integran la red. Su principal función es la del direccionamiento de las tramas de datos hacia el destino preciso.
- **Capa de Aplicación (APL):** Esta capa está constituida por tres secciones principales: el soporte a la aplicación, los objetos-dispositivos de *ZigBee* (ZDO) y las funciones definidas por la empresa que desarrolló el dispositivo. Aquí se ofrecen servicios de descubrimiento y asociación. En la primera sección se descubren otros puntos activos en la esfera de alcance del dispositivo que hace el sondeo. En la segunda sección se unen dos o más dispositivos considerando sus necesidades y servicios. El ZDO es donde se define el papel del dispositivo en la red (si actuará como Coordinador, Enrutador o Dispositivo Terminal). Además de esto, es aquí donde se define el método de seguridad que se usa en la red y el inicio de las solicitudes de asociación.

1.2.4 Topologías de red

La formación de la red es coordinada por la capa de red del protocolo. La red debe estar en una de dos topologías principales, ambas especificadas en el

estándar IEEE 802.15.4: Topología en Estrella o Topología de Punto a Punto. En una Topología en Estrella, cada dispositivo en la red puede comunicarse solamente con el Coordinador de la misma. Típicamente, un FFD programado como Coordinador se activaría e iniciaría la formación de su red. Su primera tarea sería la selección de un identificador de red único, que no sea utilizado por otra red establecida dentro de su esfera de influencia. La figura 1 muestra la configuración conceptual de la Topología de Red en Estrella.

Figura 1. Topología de Red en Estrella



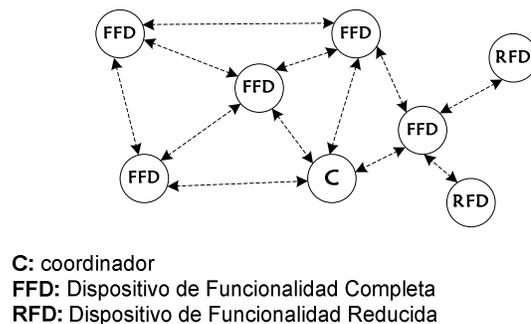
En una Topología de Punto a Punto, cada dispositivo se puede comunicar directamente con cualquier otro dispositivo de la red si está lo suficientemente cerca como para establecer una comunicación exitosa. Cualquier FFD en una topología de este tipo puede desempeñar el papel de Coordinador de la red. Los dispositivos que participen entregando los mensajes deben ser FFDs, dado que los RFDs no pueden entregar mensajes. Sin embargo, un RFD puede ser parte de la red comunicándose únicamente con un tipo particular de dispositivo (un Coordinador o un Enrutador).

Una Red Punto a Punto puede tomar distintas formas según la definición de restricciones que se haga en los dispositivos que se pretende se comuniquen ente sí. Si no existe restricción, la topología de la red se conoce como Topología en Malla. En una Topología en Malla, cada Enrutador está

conectado, como mínimo, a través de dos caminos distintos que le permiten distribuir mensajes a sus vecinos. Se trabajará con un Coordinador y múltiples Enrutadores y Dispositivos Terminales. Es con esta topología que se implementan las redes basadas en *ZigBee*, entre sus beneficios se tiene:

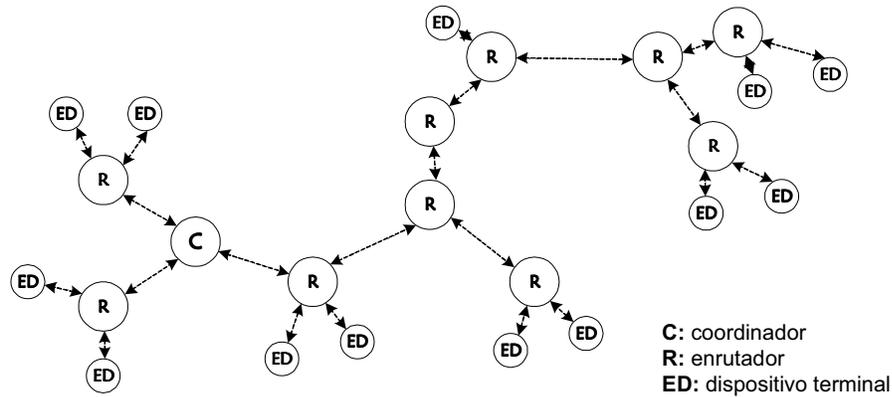
- Es rentable y robusta. Si un camino se vuelve inaccesible para un enrutador, tendrá vías alternas que le permitirán cumplir con su tarea.
- El uso de dispositivos intermediarios significa que la red puede ser expandida a necesidad.
- Las zonas muertas o con señales de baja potencia pueden ser reforzadas agregando enrutadores extra.

Figura 2. Topología de Red en Malla



Otro tipo de red punto a punto es la Topología en Árbol, donde un Coordinador establece inicialmente la red, los Enrutadores forman las ramas al encargarse de la entrega de los mensajes, y los Dispositivos Terminales constituyen las hojas.

Figura 3. Topología de Red en Árbol



Los dispositivos pertenecientes al estándar IEEE 802.15.4 y *ZigBee* presentan el beneficio de un bajo consumo energético. Estos dispositivos son energizados por medio de fuentes internas como paquetes de baterías o celdas solares, por lo tanto no se hace necesaria una fuente externa o cableado. Existen numerosas aplicaciones inalámbricas que se benefician con esta característica. Los dispositivos autoalimentados presentan las siguientes ventajas:

- Sencillez y bajo costo de la instalación de los dispositivos, no se necesita conectar una fuente de alimentación externa.
- Ubicación flexible de los dispositivos. Pueden instalarse en sitios de difícil acceso y donde no está disponible una fuente de alimentación inmediata. Pueden utilizarse incluso como dispositivos móviles.
- Red de sencilla modificación, dado que los dispositivos pueden ser fácilmente agregados y retirados.
- La autonomía puede lograrse con las siguientes técnicas de alimentación:
 - Uso de dispositivos alimentados con baterías. Dado que las terminales son usualmente pequeñas utilizan baterías de baja capacidad. Se hace

necesario trabajar con dispositivos de uso no frecuente, esto posibilita períodos largos entre reemplazos consecutivos de baterías.

- Implementación de dispositivos alimentados con energía solar, estos absorben y guardan la energía que utilizan de su ambiente.

El consumo energético de estos dispositivos debe ser evaluado cuidadosamente y administrado a fin de optimizar el uso de fuentes energéticas poco potentes durante períodos de tiempo prolongados. Los dispositivos implementan métodos de ahorro energético que mantienen bajo su consumo energético. Entre estos pueden contarse los siguientes.

- **Bajo ciclo de trabajo:** La mayor parte del consumo energético de un dispositivo de red se presenta en los períodos de tiempo en que está activo, cuando está en transmisión o recepción. El ciclo de trabajo es la razón entre el intervalo de tiempo de actividad y el intervalo de duración de un ciclo completo. El consumo energético se optimiza utilizando ciclos de trabajo extremadamente cortos, de forma que el dispositivo esté activo sólo durante un intervalo muy corto de tiempo. Esto se implementa haciendo corto el tiempo de transmisión/recepción y muy largo el período entre ambas actividades.
- **Modo adormecido:** Cuando el dispositivo no está enviando o transmitiendo, debe encontrarse en un modo adormecido en el cual el consumo de energía es mínimo.
- **Modulación:** Los esquemas de modulación utilizados para transmitir datos están diseñados para reducir el consumo de energía haciendo iguales su potencia promedio y su potencia pico.

En la práctica, no todos los dispositivos en la red pueden ser autoalimentados, particularmente aquellos que necesitan ser conmutados continuamente y no pueden “dormir”, como los Enrutadores y Coordinadores. Estos dispositivos deben ubicarse en sitios que permitan su conexión constante a la línea de alimentación principal de una residencia.

1.3 Tecnologías de comunicación

Existen tres bandas de frecuencia en las versiones más recientes del estándar IEEE 802.15.4, dadas a conocer en septiembre de 2006.

- 868-868.6 MHz. (Banda de 868 MHz.), utilizada en Europa.
- 902-928 MHz. (Banda de 915 MHz.), utilizada principalmente en Norte América.
- 2400-2483.5 MHz. (Banda de 2.4 GHz.), utilizada en las localidades restantes.

Las bandas de los 915 MHz. y los 2.4 GHz. son parte de las bandas de frecuencia utilizadas en la industria, en aplicaciones científicas y médicas (ISM). El estándar IEEE 802.15.4 requiere que si un transreceptor soporta la banda de 868 MHz., deberá soportar también la de 915 MHz. y viceversa. Por lo tanto, estas bandas se trabajan siempre como las frecuencias de operación 868/915 MHz. Un transreceptor de 2.4 GHz. puede soportar las bandas de 868/915 MHz. pero no es obligatorio.

Se describen a continuación los métodos empleados en lo referente al tratamiento (transmisión y recepción) de los datos a procesar en las diferentes capas del estándar *ZigBee*.

1.3.1 Espectro ensanchado por secuencia directa

El estándar IEEE 802.15.4 hace uso de métodos de ensanchado de la señal a fin de mejorar el nivel de sensibilidad del receptor, incrementar su resistencia a intrusos y reducir el efecto producido por las múltiples reflexiones de las que puede ser objeto la señal. El método de ensanchado requerido es el Espectro Ensanchado por Secuencia Directa (DSSS, por sus siglas en inglés), el cual forma parte del grupo de técnica de espectro ensanchado. Las técnicas de espectro ensanchado o disperso son necesarias pues presentan las siguientes ventajas:

- Resisten todo tipo de interferencia.
- Alivian o eliminan el efecto de las interferencias multisenda.
- Permiten compartir la misma banda de frecuencia con otros usuarios.
- Aseguran confidencialidad de la información transmitida pues utilizan códigos pseudoaleatorios.

Sin embargo, presentan ciertas desventajas que deben considerarse:

- Ineficiencia del ancho de banda.
- La implementación de algunos circuitos es complicada.
- Presentan una banda de amplitud mayor a la que realmente se necesitaría para la transmisión de información. Ésta puede obtenerse de dos formas:
- Codificación de la información por medio de una señal aleatoria.

- Codificación de la portadora (frecuencia de trabajo) con una señal aleatoria, por lo que se logrará una frecuencia aleatoria en constante cambio. En cada frecuencia se enviará un trozo de información. Este mecanismo es lo que se conoce como “Salto en Frecuencia” o *frequency hopping* en inglés.

En el espectro ensanchado o disperso se trabaja con receptores de banda ancha que incorporen un decodificador apropiado que transforme la señal del emisor en información. La potencia de emisión que se utilice se difundirá sobre una banda ancha que pueda utilizarse sobre bandas de frecuencias en uso, sin interferir la recepción de banda angosta. Como consecuencia de esto se admitirán más usuarios en una banda de frecuencias. Se tienen diversas versiones de las técnicas de espectro disperso, a continuación se mencionan algunas de éstas.

- **Sistema de secuencia directa**

Éste es el sistema más utilizado y de sencilla implementación, aplicado por el estándar IEEE 802.15.4 y por lo tanto por *ZigBee*. Presenta una portadora, en banda estrecha, modulada por una secuencia pseudoaleatoria similar al ruido. El incremento del ensanchado depende de la tasa de bits por bits de información que se maneje en la secuencia pseudoaleatoria. En el receptor, la información será recuperada multiplicando la señal con una réplica generada localmente de la secuencia de código.

El estándar IEEE 802.15.4 requiere que cada 4 bits de información original se agrupen y se denominen símbolo. Posteriormente se utiliza una tabla para mapear cada símbolo en una secuencia única de 32 bits. Esta secuencia es la que se conoce como ruido pseudoaleatorio o *chirp*. Dado que cada 4 bits se mapearán en una secuencia única, la tabla de referencia contiene 16

secuencias distintas. A primera vista, cada secuencia parecerá una secuencia aleatoria de ceros y unos, pero cada una será seleccionada por un procedimiento que pretende disminuir su similitud con respecto a las otras. La similitud de dos secuencias se mide calculando la correlación cruzada entre las dos secuencias.

La correlación cruzada se determina con la multiplicación de dos secuencias y el posterior cálculo de la suma de sus resultados. Una secuencia que contiene 0 y 1 será reemplazada por su equivalente bipolar (-1 y 1) antes del cálculo. La representación de esta operación, utilizando $x(n)$ y $y(n)$ como las dos secuencias es:

$$r_{xy}(0) = \sum_{n=-\infty}^{n=+\infty} x(n)y(n)$$

Esta correlación se calcula cuando ni $x(n)$ ni $y(n)$ están desfasadas. Mientras mayor sea el valor absoluto de esta relación, mayor será la similitud entre las dos secuencias. Si la correlación es igual a cero, las secuencias se consideran completamente distintas y se conocen como secuencias ortogonales. Las 16 secuencias que constituyen la tabla de referencia para el mapeo de símbolos no son completamente ortogonales, por lo tanto se denominan secuencias cuasi-ortogonales.

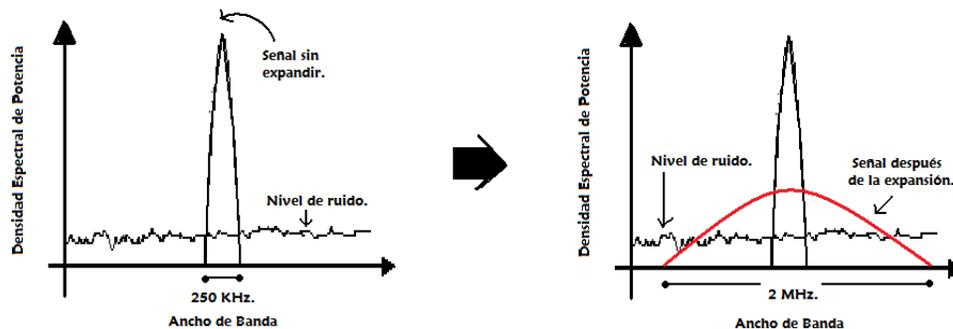
La correlación cruzada puede calcularse también con la siguiente expresión, donde $y(n-k)$ es la secuencia de $y(n)$ desplazada en k unidades:

$$r_{xy}(k) = \sum_{n=-\infty}^{n=+\infty} x(n)y(n-k)$$

En este caso se obtendrá la similitud entre $x(n)$ y $y(n-k)$.

Dado que cada 4 bits de información se mapean en una secuencia de 32 bits, la tasa efectiva de bits se incrementa por un factor de ocho. La tasa de bits es proporcional al ancho de banda de la señal y por ende el ancho de banda se incrementará por un factor de ocho. La siguiente gráfica muestra el efecto de este proceso. En ella se expone una señal con ancho de banda inicial de 250 KHz. que logra incrementar su ancho de banda hasta 2 MHz. después de la expansión.

Figura 4. Efecto del Espectro Ensanchado en Frecuencia.



Fuente: Shahin, Farahani, **ZigBee wireless networks and transceivers**, Pág. 146

Con la expansión no se agrega ninguna energía física a la señal y por lo tanto el pico máximo en la densidad espectral de potencia se verá reducido ante la distribución de la energía sobre un ancho de banda más amplio. Mientras la señal ensanchada viaja por el aire puede agregársele ruido no deseado. El receptor utilizará un mecanismo de desensanchamiento para recuperar la señal original. En este procedimiento, cada 32 bits de información recibida se compararán con las 16 secuencias posibles. La secuencia que tenga la mayor

similitud será la elegida para recuperar la señal, utilizando como apoyo la misma tabla de referencia empleada por el emisor.

Con el desensanchamiento, la señal volverá a concentrarse en su ancho de banda original sin que el procedimiento altere el nivel de ruido que se le haya agregado a la señal. La energía de la señal se incrementará en la banda deseada sin incrementar el nivel de ruido, esto aumentará la relación señal a ruido, SNR, mejorando la sensibilidad del receptor. Este incremento en la relación SNR se conoce como “Ganancia de Procesamiento”. Su valor se obtiene de la razón entre la tasa de bits después del ensanchado y la previa al ensanchado.

Este proceso de ensanchado y desensanchado colabora con la reducción del efecto producido por interferencias. Al revertir el efecto de ensanchado se difunde la señal de interferencia en un ancho de banda más amplio. Luego un filtro remueve las componentes espectrales que estén fuera de la banda de interés y la porción remanente de la señal interferente tendrá mucha menos potencia en comparación con la original. Esto es una muestra de que el método incrementa la resistencia del receptor a señales de interferencia.

- **Sistemas de salto de frecuencia**

Se obtiene con una portadora, en el transmisor, que cambia repentinamente según una secuencia pseudoaleatoria predefinida. El orden de las frecuencias que se vayan seleccionando por parte del transmisor será dictado por la secuencia de código. El receptor rastreará los cambios y producirá una señal de frecuencia intermedia constante.

- **Sistemas de salto temporal**

En esta técnica se variará, bajo el control de una secuencia pseudoaleatoria, el período y el ciclo de trabajo de una portadora. El salto temporal será usualmente acompañado con un salto en frecuencia generando un sistema híbrido de espectro ensanchado mediante acceso múltiple por división de tiempo, o TDMA.

Las siguientes características son comunes a todas las técnicas de ensanchado en frecuencia previamente descritas.

- **Direccionamiento selectivo:** Al asignar una secuencia pseudoaleatoria a un receptor particular, la información debe direccionarse de forma distinta con respecto a los demás receptores, que tienen asignada una secuencia distinta.
- **Multiplexación por división de código:** Las secuencias pueden elegirse tal que se minimice la interferencia entre grupos de receptores al elegir los que presenten una correlación cruzada baja. Así se puede transmitir a la vez más de una señal en la misma frecuencia.
- **Baja probabilidad de interceptación:** Los sistemas tienen capacidad para evitar interferencias intencionadas. Esto se logra dado que al transmitir una señal expandida sobre varios megahercios del espectro, su potencia espectral también se ensancha, haciendo que la potencia transmitida se ensanche sobre un amplio ancho de banda y se dificulte la detección normal de la señal. Los sistemas de espectro ensanchado pueden sobrevivir en medios adversos y coexistir con otros servicios en la misma banda de frecuencia.

Haciendo uso del teorema de Shannon:

$$C = W \log \left(1 + \frac{S}{N} \right)$$

Donde:

C = capacidad de transmisión

W = ancho de banda

S = potencia de la señal

N = potencia del ruido

Como se puede apreciar, la capacidad del canal es proporcional al ancho de banda y a la relación señal a ruido del canal. Por lo tanto, al expandir el ancho de banda en varios megahercios habrá más ancho de banda para transportar la tasa de datos pequeña, contrarrestando el ruido.

Las características que se enumeran a continuación hacen referencia a la naturaleza de la señal resultante al utilizar una de las técnicas de espectro ensanchado previamente mencionadas.

- Ganancia de procesamiento alta, definida por la relación entre el ancho de banda transmitido y el ancho de banda original. Al trabajar con portadoras impredecibles (generadas por secuencias pseudoaleatorias) se logra una baja probabilidad de interceptación si la potencia de la señal se expande uniformemente en todo el dominio de frecuencias.
- Las portadoras impredecibles aseguran una buena capacidad contra la interferencia generada por un *jammer* (persona dedicada a interferir señales) pues estos no pueden observar la señal y deberán utilizar técnicas especializadas para lograr interceptarla y por ende, interferirla.
- La detección de señales de banda ancha por su correlación otorga gran resolución temporal.

- Los transreceptores con portadoras independientes pueden operar en el mismo ancho de banda con interferencia mínima entre los canales. Se tienen sistemas de acceso múltiple por división de código (CDMA).
- Toma características criptográficas al no poderse distinguir la modulación de datos de la portadora. La portadora se modula con una secuencia aleatoria y por lo tanto el espectro ensanchado adquiere características de llave de un sistema cifrado.

1.3.2 Modulación

El estándar IEEE 802.15.4 requiere modulación OQPSK (por Desplazamiento de Fase en Cuadratura por Compensación), basada en el método PSK o desplazamiento de fase.

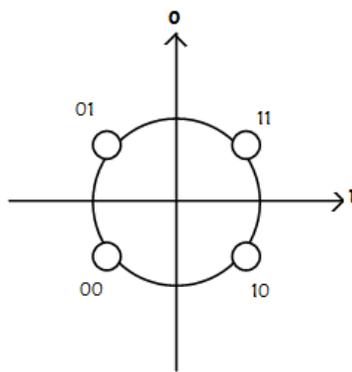
PSK representa una forma de modulación angular en que la fase de la señal portadora, una señal digital, varía entre un número definido de valores discretos. Entre sus propiedades características puede mencionarse:

- La moduladora es una señal digital con un número de estados limitados.
- La denominación completa del sistema depende del número de fases que se consideren. Se codifica un número entero de bits por cada símbolo, tomando el número de fases una potencia de dos.
- BPSK -> 2 fases
- QPSK -> 4 fases
- 8-PSK -> 8 fases, así sucesivamente.

- A mayor número de fases se logra transmitir mayor cantidad de información en un ancho de banda específico. Sin embargo, también serán mayores su sensibilidad a ruidos e interferencia.
- Con este sistema se logra que la potencia de todos los bits sea la misma, simplificando así el diseño de los amplificadores y las respectivas etapas de recepción.
- Como se especificó previamente, QPSK es un sistema PSK con un desplazamiento de fase de cuatro símbolos desplazados entre sí 90° . Entre sus características:
 - Saltos de fase ubicados en 45° , 135° , 225° y 315° .
 - Cada símbolo estará codificado en dos bits.
 - La asignación de bits de cada símbolo se logra con el código Gray, en éste entre cada dos símbolos adyacentes los símbolos se diferencian en un solo bit. Con esto se minimiza la tasa de bits erróneos.

La figura 5 muestra el diagrama de constelación característico para un sistema QPSK.

Figura 5. Diagrama de Constelación de un Sistema QPSK.



La probabilidad de bit erróneo (P_b) en este sistema es:

$$P_b = Q\left(\sqrt{\frac{2E_b}{N_o}}\right)$$

La tasa de símbolos erróneos (P_s) es:

$$P_s = 1 - (1 - P_b)^2$$

Donde,

$Q(x)$ = Función de densidad de probabilidad Gaussiana.

$$Q(x) = \frac{1}{2\pi} \int_x^{\infty} e^{-t^2/2} dt$$

E_b = energía por bit

$N_o/2$ = Densidad espectral de potencia del ruido.

El método OQPSK es una forma especial de QPSK en el que la señal transmitida no se modula en amplitud. En su lugar, la señal de entrada se divide en el modulador en dos porciones que se transmiten luego de ser desplazadas temporalmente medio período de símbolo. Con esto se logra reducir la amplitud de las fluctuaciones y se mejora la eficiencia espectral de la señal.

1.3.3 CSMA-CA

Es un método implementado para permitir que múltiples dispositivos utilicen el mismo canal de frecuencias como su medio de comunicación. Las siglas corresponden a “*Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance*” o “Acceso Múltiple por Detección de Portadora con Evasión de Colisiones”. Con este mecanismo, cada vez que un dispositivo desee transmitir realizará

primero una verificación de canal libre para asegurarse que no está en uso por parte de otro dispositivo. Un canal libre se detecta con la medición de su densidad espectral de potencia en el canal de frecuencia de interés o con la determinación del tipo de señal en el canal. Posterior a esto el dispositivo iniciará su transmisión.

Cuando un dispositivo planea transmitir se establecerá primero en modo de recepción para detectar y estimar el nivel de energía de la señal en el canal deseado. Esta tarea se conoce como ED o Detección de Energía (*Energy Detection*). Con este método el dispositivo no intentará decodificar la señal, solamente se estima el nivel de energía de esta. Si una señal está ya en el canal de interés no se intentará determinar si esta pertenece o no al estándar IEEE 802.15.4.

Una forma alternativa de determinar la ocupación de un canal es la CS o Detección de Portadora (*Carrier Sense*). Con este método se definirá el tipo de señal y si la señal corresponde al estándar IEEE 802.15.4, el dispositivo podrá considerar ocupado el canal aún cuando la densidad espectral de potencia es muy baja.

Si el canal no está libre, el dispositivo se quedará inactivo por cierto período aleatorio de tiempo para intentar de nuevo posteriormente. Esto se repetirá hasta que el canal quede libre o el dispositivo alcance su número máximo de intentos permitidos, parámetro definido por el usuario.

1.4 Ejemplos de Aplicación

A continuación se enumerarán algunos ejemplos de aplicación donde *ZigBee* proveería ventajas dadas su Topología de Red en Malla y las características de su protocolo. En algunos casos, al trabajarse aplicaciones simples, quizá lo más sencillo sea implementar únicamente las capas del protocolo correspondientes al estándar IEEE 802.15.4.

1.4.1 Automatización del Hogar

Es una de las mayores áreas de aplicación. La tasa de datos típica en una aplicación de domótica es de 10 Kbps.

- **Sistemas de seguridad:** Conformado por varios sensores: detectores de movimiento, sensores de rompimiento de vidrio, cámaras de seguridad. Los dispositivos necesitan comunicarse con un panel central de seguridad inalámbricamente. Cuando *ZigBee* se implementa en estos casos, la instalación y actualización de los sistemas se simplifica. Aún con la baja tasa de transferencia de *ZigBee*, es posible transferir imágenes inalámbricamente y con calidad aceptable.
- **Lectores de indicadores de consumo:** Algunos medidores necesitan leerse periódicamente para generar facturas por consumo de un servicio. *ZigBee* permite crear redes en malla inalámbricas a través de un complejo residencial, de forma que todos los equipos de lectura de consumo se puedan enlazar con una central de análisis. Esto brinda la oportunidad de monitorear remotamente el consumo de electricidad, gas y agua de una residencial. Con este sistema se puede reunir el total del consumo mensual

con un detalle del uso del servicio por parte de cada contribuyente. Permite detectar fugas, interferencia y otro tipo de problemas con el equipo.

- **Sistemas de irrigación:** Los sistemas de irrigación con control sensorial tienen como resultado una administración efectiva del consumo de agua. Sensores distribuidos a través de una plantación establecen comunicación con un panel central al que le informarán el nivel de humedad del suelo a distintas profundidades. El controlador determinará el momento de riego basándose en estos niveles de humedad, el tipo de plantas, la hora del día y el clima. Una red sensorial inalámbrica reduce las dificultades de cableado y costos de mantenimiento.
- **Control de iluminación:** En un sistema donde los interruptores y luminarias están implementados con *ZigBee*, no se necesita conexión cableada. De esta forma, cualquier interruptor en la residencia puede asignarse para controlar determinada luz.

La adquisición de equipo con tecnología *ZigBee* puede ser más costosa que la convencional, sin embargo, el costo de aplicación sigue siendo menor dado que obvia lo referente al cableado. *ZigBee* premia este tipo de aplicaciones, para implementación a mayor escala, asegurando una vida prolongada para la fuente de alimentación y productos con consideraciones de interoperabilidad entre equipos de distintos proveedores.

Un sistema de iluminación implementado con *ZigBee* pueden tener otros beneficios, por ejemplo, los nodos de la red podrían funcionar como Enrutadores que envían mensajes a distintos puntos de la residencia, o bien las luces podrían programarse para atenuarse cuando se requiera.

- **Sistemas HVAC:** Estos sistemas permiten el monitoreo de la calefacción (*Heating*), la ventilación (*Ventilación*) y aire acondicionado (*Air-Conditioning*) en varios puntos de una residencia para lograr el control de la temperatura en varios puntos de la misma. Estos sistemas pueden colaborar en el ahorro energético controlando el flujo de aire entre cada cuarto de la casa y evitando el calentamiento o enfriamiento en puntos innecesarios de la residencia.

1.4.2 Control remoto en la industria electrónica

Las señales de radiofrecuencia (RF) penetran fácilmente la mayoría de objetos y paredes. El uso de *ZigBee* vendría a desplazar la tecnología IR, la más utilizada actualmente en aplicaciones a control remoto. ZigBee representa beneficios debido a su bajo costo, prolongado período de vida, sistema de comunicación de dos vías y transmisiones sin restricción a línea vista, propia de las transmisiones con IR.

1.4.3 Automatización industrial

La configuración en malla de la red ZigBee beneficia áreas relativas a la administración energética, control de iluminación, control de procesos y control de activos. A continuación se enumerarán algunos ejemplos relativos a este tipo de aplicaciones.

- **Administración de activos y seguimiento de individuos:** Las etiquetas de identificación por radiofrecuencia (RFID) pasivas son dispositivos de almacenamientos de datos utilizados como medios para la identificación automática de elementos. No necesitan alimentación extra pero sí del trabajo de un lector especializado y energizado para obtener información de ella. Una desventaja de estas etiquetas es la poca información que pueden manejar, insuficiente para aplicaciones complejas.

La utilización de *ZigBee* facilita la creación de RFID activas, es decir alimentadas independientemente. Éstas, aunque más costosas, pueden proveer servicios adicionales como la estimación de la ubicación del activo o del personal, sumándose esto al número de identificación propio del objeto de interés. Para el seguimiento se necesitan básicamente tres nodos *ZigBee* con ubicación específica. El nodo móvil, que puede ser transportado por un empleado, envía continuamente una señal que es recibida por los tres nodos. La señal se vuelve más débil a medida que viaja más lejos, por lo tanto, la amplitud de la señal recibida por los tres nodos es distinta. Existen numerosos algoritmos para calcular la ubicación aproximada del objeto móvil sólo con la información de las ubicaciones de cada nodo fijo y la amplitud de la señal recibida por cada uno de ellos.

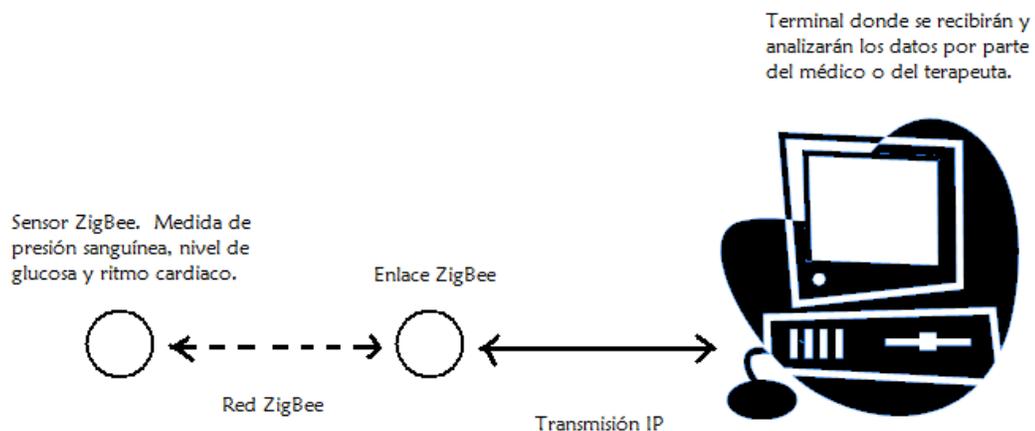
- **Seguimiento de animales domésticos:** Los animales domésticos son vulnerables a enfermedades, es importante identificar y darle seguimiento a un animal doméstico pues esto impedirá la rápida difusión de la enfermedad al permitir tomar medidas de acción pertinentes. Regularmente, las RFID pasivas se han utilizado como una solución barata y parcial a este tipo de problemas. Sin embargo esto no es suficiente en todos los casos, pues

tienen un rango de acción limitado y pueden proveer sólo información almacenada desde el inicio. Las RFID activas implementadas con *ZigBee* pueden ser más costosas pero tendrán un rango de acción más extenso y brindarán información adicional, como el ritmo cardiaco del animal y su ubicación aproximada.

1.4.4 Aplicaciones de salud

El uso directo de ZigBee en este tipo de aplicaciones radica en el monitoreo remoto de los signos vitales de un paciente. La red puede recolectar datos de varios sensores conectados al paciente, los datos pueden asegurar su transmisión íntegra y segura mediante métodos de encriptación avanzada (*AES*). La figura 6 muestra la configuración básica con que se establecería un sistema de este tipo.

Figura 6. Configuración de un sistema de monitoreo a pacientes.

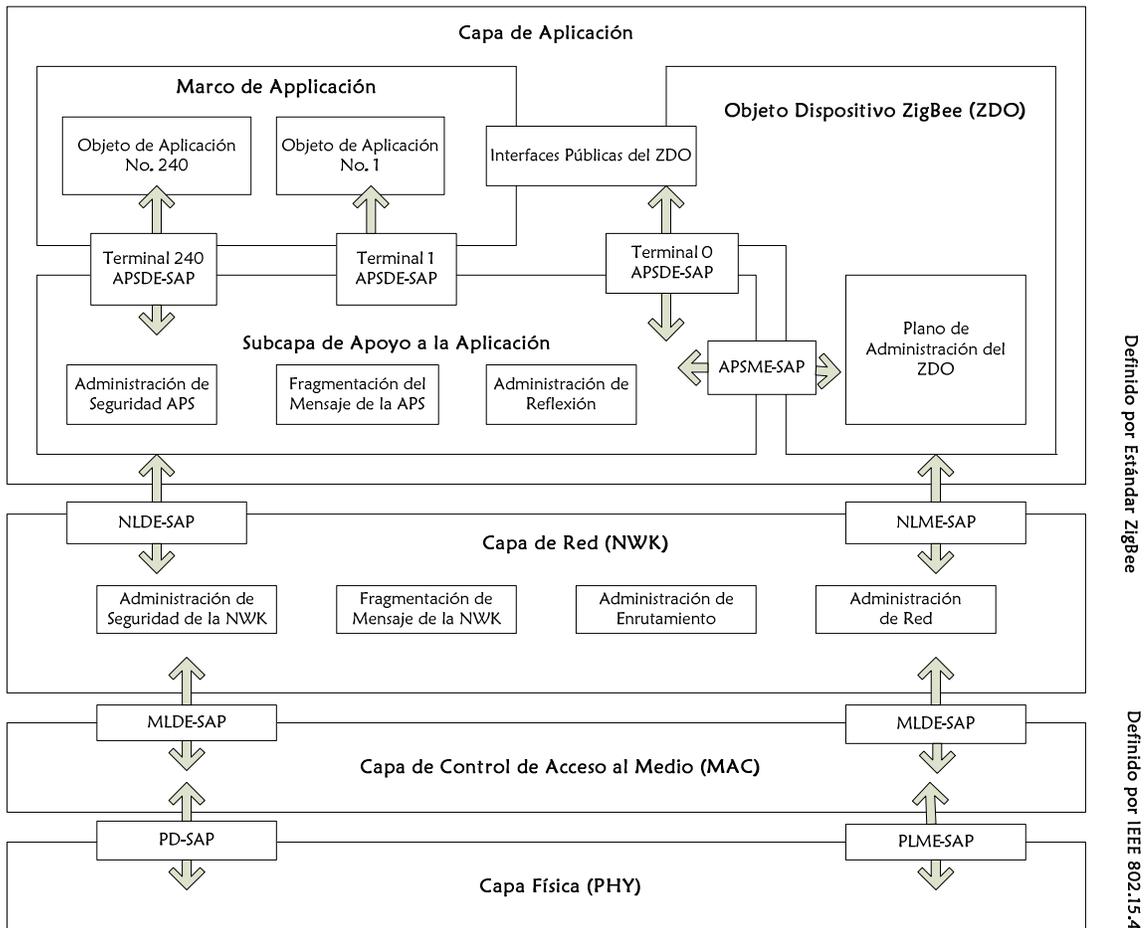


El paciente utilizaría un dispositivo *ZigBee* anexo a un sensor, de ritmo cardiaco por ejemplo, que reuniría información periódica. Esta información se transmitiría luego a un nodo *ZigBee* que funciona como portal de transmisión hacia una conexión que funciona a través de IP, o Protocolo de Internet. La información del paciente será por lo tanto transmitida a través de Internet a una computadora personal utilizada por el médico a cargo. El sistema colaboraría con centros de salud y hospitales al mejorar su sistema de cuidado al paciente y liberar la sobrepoblación que podrían tener, pues habilita la monitorización de pacientes reposando en sus casas.

2. CAPAS DEL PROTOCOLO

La figura 7 muestra la organización en capas típica de una red *ZigBee*.

Figura 7. Organización de Capas del Estándar IEEE 802.15.4 y ZigBee



Fuente: Shahin, Farahani, **ZigBee wireless networks and transceivers**, Pág. 34

Las capas del protocolo cooperan entre sí para la ejecución de distintas tareas. Fundamentadas en el modelo de referencia OSI (*Open System Interconnect*), *ZigBee* implementa sólo las capas esenciales para el trabajo con bajo consumo energético y baja tasa de datos. Las dos capas inferiores, PHY (Capa Física) y MAC (Capa de Control de Acceso al Medio), están definidas por el estándar IEEE 802.15.4. Las dos capas superiores, NWK (Capa de Red) y APL (Capa de Aplicación), son definidas por el estándar *ZigBee*.

Las capas adyacentes se comunican entre sí a través de “Puntos de Acceso de Servicio”, SAP (*Service Access Points*). Estos representan una localidad conceptual donde cada capa puede solicitar los servicios de otra capa.

2.1 Capa Física (PHY)

Según las especificaciones del estándar IEEE 802.15.4 esta capa define:

- Funciones del protocolo
- Interacciones con la capa inmediata superior, MAC.
- Mínimos requerimientos de hardware.

Básicamente esta capa busca que el paquete de información que transmitirá, a la capa física de otro dispositivo o a su capa superior, esté en el formato adecuado y en condiciones íntegras. Sus funciones principales son:

- Activación y desactivación del transreceptor de radio.
- Transmisión y recepción de datos.
- Selección del canal de frecuencia y determinación de su disponibilidad.

2.1.1 Asignación de Canales

Los canales de frecuencia se definen con un número de página y número de canal. Cada página de canales soporta un máximo de 27 canales. La tabla I resume la distribución de páginas y números de canal para cada una de las bandas de frecuencia de trabajo de *ZigBee*.

Tabla I. Distribución de Páginas y Canales de las Bandas de Frecuencia

Página	Número de Canal	Descripción
0	0	Banda 868 MHz. (BPSK)
	1 -10	Banda 915 MHz. (BPSK)
	11 – 26	Banda 2.4 GHz. (O-QPSK)
1	0	Banda 868 MHz. (ASK)
	1 -10	Banda 915 MHz. (ASK)
	11 – 26	Reservado
2	0	Banda 868 MHz. (O-QPSK)
	1 -10	Banda 915 MHz. (O-QPSK)
	11 – 26	Reservado
3 – 31	Reservado	Reservado

Fuente: Shahin, Farahani, **ZigBee wireless networks and transceivers**, Pág. 35

Cada canal será representado por una frecuencia central dependiente de la banda a la que pertenece y su número de canal. El canal 0 está destinado a la banda 868 de MHz., con una frecuencia central de 868.3 MHz. Los canales de las demás bandas obtienen su frecuencia central con la siguiente relación.

$$\text{Frecuencia Central (MHz.)} = \text{Banda} + 2 * (\text{Número de Canal} - 1)$$

2.1.2 Detección de Energía (ED)

Abreviada con las iniciales ED, dada la traducción al inglés de *Energy Detection*. Es el mecanismo empleado para determinar la condición del canal elegido para la transmisión de la información. El dispositivo encargado de la transmisión operará inicialmente en modo de recepción y “escuchará” el canal para detectar y estimar el nivel de energía presente. Puede que no se detecten señales débiles con niveles de energía próximos al nivel de sensibilidad del receptor. La sensibilidad del receptor es el nivel de energía mínimo que puede recibir y demodular exitosamente con un porcentaje menor al 1% en el paquete.

Este mecanismo es requerido por la MAC y la PHY le devolverá un byte que indica el nivel de energía en el canal de frecuencia en cuestión. La exactitud esperada en la medición es de al menos ± 6 dB.

2.1.3 Medición de Portadora (CS)

Abreviada con las iniciales CS, dada la traducción al inglés de *Carrier Sense*. Es un mecanismo de verificación de disponibilidad de uso de un canal de frecuencia. El dispositivo “escuchará” el canal con el fin de detectar el tipo de señal presente en el mismo. La señal será demodulada para verificar que la modulación y método de ensanchamiento correspondan con el designado a la

PHY del estándar en uso. Si se determina que la señal es coincidente con el estándar IEEE 802.15.4 se definirá el canal como ocupado aún si el nivel de energía no es suficientemente alto.

2.1.4 Indicador de Calidad de Enlace (LQI)

Abreviado como LQI por su traducción al inglés de *Link Quality Indicator*. Es un indicador de la calidad del paquete de datos recibido. La naturaleza del indicador puede variar, según el parámetro que sea adoptado como representativo de este indicador. Entre los posibles candidatos cabe mencionar:

- **Energía de la Señal Recibida, RSS (*Received Signal Strength*):** Medida de la energía total de la señal recibida.
- **Razón Señal a Ruido, SNR (*Signal – to – Noise Ratio*):** Razón entre la energía de la señal recibida y la energía del ruido en el canal.
- Una conjunción entre los dos parámetros previos.

Se mide el LQI de cada paquete y luego se transmite a la capa superior del protocolo, la MAC. A partir de ésta estará disponible para la NWK y la APL. En éstas puede utilizarse el dato para algún tipo de análisis, por ejemplo, la determinación de la mejor ruta de enlace con un elemento terminal específico, pues la ruta con el LQI más alto tendrá mayores posibilidades de llevar un paquete a su destino eficientemente.

2.1.5 Determinación de Canal Libre (CCA)

Abreviado CCA dada la traducción al inglés *Clear Channel Assessment*. Es la primera acción que la MAC solicita a la PHY previa a la conclusión del CSMA-CA, a fin de asegurar que el canal no está en uso por otro dispositivo. El CCA es una función de la sección de administración de servicios de la PHY. Los resultados obtenidos del ED o CS se emplean para determinar si el canal se considera ocupado o libre. El CCA puede trabajarse en tres modos:

- **CCA Modo 1:** sólo se considera el resultado del ED. El nivel umbral del ED puede ser establecido por el fabricante.
- **CCA Modo 2:** sólo se considera el resultado del CS. El canal se considerará ocupado si la señal que se detecte es compatible con la capa física del dispositivo que ejecuta el CCA.
- **CCA Modo 3:** se utiliza una combinación lógica del modo 1 y modo 2, cualquiera de las siguientes indicaciones pueden emplearse para determinar la disponibilidad del canal,
 - ED sobre el nivel umbral **Y** una portadora compatible fue detectada.
 - ED sobre el nivel umbral **O** una portadora compatible fue detectada.

El CCA se ejecuta siempre que lo requiere el mecanismo CSMA-CA, el resultado obtenido puede ser cualquiera de los siguientes:

- El transmisor/receptor está deshabilitado, no se ejecuta ningún CCA.
- El canal está desocupado, puede utilizarse para transmitir.
- El canal o el transmisor/receptor están ocupados.

2.1.6 Constantes y Atributos de la Capa Física

Las “constantes” definen características propias del paquete de datos. Cada capa del protocolo tendrá por lo tanto su propio conjunto de constantes. A ese respecto, la PHY tiene únicamente dos constantes:

- **aMaxPHYPacketSize:** Especifica el tamaño máximo de la Unidad de Servicio de la Capa Física (PSDU, *PHY Service Data Unit*).
- **aTurnaroundTime:** Es el tiempo que el transreceptor necesita para cambiar de su función transmisora (Tx) a su función receptora (Rx).

Cada capa del protocolo agregará ciertos prefijos a sus constantes. La PHY agrega el prefijo “a”, la NWK utilizará “nwkc” y “apsc” será para la APL. Las constantes no pueden ser cambiadas durante la operación. Los “atributos” son variables que pueden cambiar durante la operación de los dispositivos. Los atributos de la PHY se encuentran dentro de la PHY-PIB (Base de Datos de la PHY en la PAN) y se requieren para manipular sus servicios. La tabla II enlista los atributos de la PHY.

Tabla II. Atributos de la Capa Física

Atributo	Condición	Descripción
<i>phyCurrentChannel</i>	Lectura/Escritura	Canal en operación.
<i>phyChannelsSupported</i>	Lectura	Arreglo con los posibles canales a disposición.
<i>phyTransmitPower</i>	Algunos bits de sólo lectura.	Salida del transmisor en dBm.
<i>phyCCAMode</i>	Lectura/Escritura	Modo CCA de operación, (1 – 3)
<i>phyCurrentPage</i>	Lectura/Escritura	Página en que se encuentra el canal físico.

<i>phyMaxFrameDuration</i>	Lectura/Escritura	Máximo número de símbolos en un paquete.
<i>phySHRDuration</i>	Lectura/Escritura	Duración del encabezado de sincronización.
<i>phySymbolsPerOctet</i>	Lectura/Escritura	Número de símbolos por octeto de la capa física en cuestión.

Fuente: Shahin, Farahani, **ZigBee wireless networks and transceivers**, Pág. 39

2.1.7 Servicios de la Capa Física

2.1.7.1 Servicio de datos

Habilita la transmisión y la recepción de las Unidades de Datos del Protocolo de la Capa Física, PPDU, a través del canal de radio. Las funciones de datos pueden accionarse a través del PD–SAP.

Los datos para transmisión se entregan como Unidades de Datos del Paquete MAC, MPDU. La MAC generará peticiones de transmisión y las MPDU respectivas. La PHY intentará transmitir e informará sobre los resultados a la MAC. Una transmisión errónea puede ser causada porque:

- El transreceptor de radio está deshabilitado.
- El transreceptor está operando en recepción, ambas funciones no pueden desempeñarse simultáneamente.
- El transreceptor de radio está ocupado.

Los datos serán recibidos por *hardware* específico y la PHY notificará a la MAC de la recepción. La PHY enviará la información LQI necesaria. Los datos serán generados por un dispositivo *ZigBee* o una aplicación específica (todo perteneciente a la APL), estos irán transitando entre todas las capas del protocolo, cada una de las cuales agregará un encabezado y pie de trama característico a la Unidad de Datos recibida, DU. La unidad de datos generada en cada capa adopta el nombre de la capa en cuestión según su traducción al inglés.

- Capa de Aplicación, APL = APDU
- Capa de Red, NWK = NPDU
- Capa de Acceso, MAC = MPDU
- Capa Física, PHY = PPDU

En el receptor, los datos transitarán en sentido inverso entre las capas, cada una de las cuales irá retirando su encabezado y pie de trama hasta obtener la unidad de datos original.

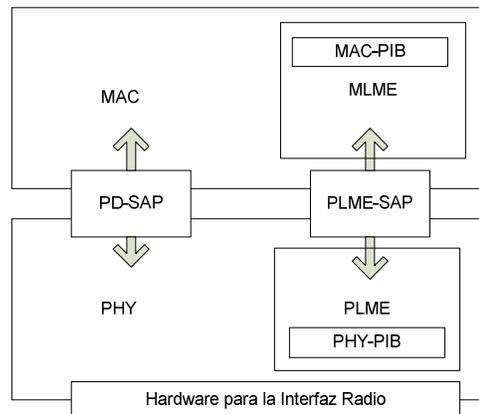
2.1.7.2 Servicio de Administración

La PHY incluye una entidad de mantenimiento denotada PLME, por las siglas en inglés de *Physical Layer Management Entity*. Ésta se encarga de mantener la PHY-BID. Las funciones de administración se activan a través del punto de acceso de la sección de administración (PLME – SAP), éste transportará los comandos entre la MLME (la Entidad de Mantenimiento de la MAC) y la PLME. Los servicios otorgados a través del punto de acceso PLME-SAP son:

- **CCA:** Solicitado por la PLME siempre que lo requiera el mecanismo CSMA-CA.
- **ED:** Servicio solicitado por la MLME y satisfecho por la PLME. Si la medida de ED es satisfactoria, el nivel de energía se reporta al MLME. Un transreceptor deshabilitado causará error en la petición.
- **Habilitación / inhabilitación del transreceptor:** El MLME puede solicitarle al PLME que inhabilite o habilite el transreceptor.
- **Obtención de información de la PHY-PIB:** El PLME puede leer los valores de cualquier atributo en la PHY e informarlo a la MLME. La petición de lectura de un atributo de la PHY es siempre hecha por la MLME.
- **Establecimiento del valor del atributo de la PHY-PIB:** Los atributos de sólo lectura pueden ser cambiados únicamente por la PHY, y la MLME podrá únicamente solicitarle a la PLME que establezca los atributos a un valor específico.

La figura 8 resume la interacción de la PHY y MAC en la pila del protocolo.

Figura 8. Interacción PHY - MAC



Fuente: Shahin, Farahani, **ZigBee wireless networks and transceivers**, Pág. 40

2.1.8 Primitivas de Servicio

La comunicación entre capas adyacentes se realiza llamando funciones o pasando mensajes denominados “primitivas”. Aún con la diferencia de funciones entre las capas del protocolo, cada una (PHY, MAC y NWK) proveen servicio de datos a la capa superior inmediata. El mecanismo de solicitud de unidades de datos es similar entre las capas. La capa superior usará el punto de acceso inmediato de la capa inferior y solicitará la transmisión de datos. Si la transmisión es exitosa, la capa inferior lo confirmará. Cada primitiva especifica la acción a ejecutar o provee el resultado de una acción solicitada previamente. Una primitiva puede incluir también los parámetros necesarios para la ejecución de una tarea. Tomando como notación a “N” como la capa presente y “N+1” la capa inmediata superior, se enumeran a continuación las primitivas adjudicadas a los posibles servicios de las capas.

- **<primitiva>.request**

Generada desde la capa N+1 hacia la capa N a fin de generar un servicio.

- **<primitiva>.indication**

Generada por la capa N hacia la capa de usuario indicando que la capa N+1 está corriendo un proceso.

- **<primitiva>.response**

Transmitida desde la capa de usuario hacia la capa N. La PHY y la NWK no tienen primitiva de respuesta, únicamente la MAC y la APL.

- **<primitiva>.confirm**

Utilizada por la capa N para indicar la finalización de un servicio solicitado por la capa N+1 al pasar una primitiva de *request*.

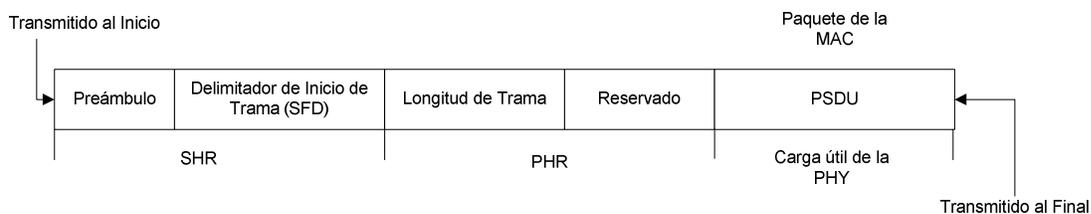
2.1.9 Formato del Paquete de la PHY

La PPDU consiste de tres secciones:

- **Encabezado de Sincronización, SHR:** Habilita el receptor para que se sincronice. Está formado por dos partes:
 - **Preámbulo:** Da al receptor el ritmo y el símbolo de sincronización.
 - **Delimitador de Inicio de Trama, SFD:** Indica la finalización del SHR y el inicio del PHR. Es un campo de 8 bits.
- **Encabezado de la PHY, PHR:** Indica la longitud de trama, el número de octetos en la carga útil entregada por la PHY (PSDU). Ésta puede ser desde 0 hasta 127 octetos según el tipo de paquete: 5 octetos para un paquete de acuse de recibo para la MAC, 9 a 127 para cualquier otro MPDU. Las longitudes de trama de 0 a 4 y de 6 a 8 se reservan para aplicaciones futuras.
- **Unidad de Datos de la PHY, PSDU:** El contenido es entregado por la MAC como un paquete propio.

La figura 9 muestra el formato de un paquete PPDU.

Figura 9. Formato PPDU



Fuente: Shahin, Farahani, **ZigBee wireless networks and transceivers**, Pág. 44

2.2 Capa de Acceso al Medio (MAC)

Provee la interfaz entre la PHY y la NWK. Al igual que la PHY, posee una entidad de administración propia, la MLME. Esta capa interactúa con su contraparte en la NWK a través de la entidad de administración de ésta, NLME. La MAC tiene también su propia base de datos, referida como MAC-PIB, ésta tiene una longitud mayor a la de la PHY. Todas las constantes propias de la MAC tendrán una “a” como prefijo general, y sus atributos tendrán “mac” como prefijo.

2.2.1 Habilitación del Uso de Trama Guía

Ventajas de este tipo de operación:

- Uso de GTS, intervalos de tiempo garantizados (*Guaranteed Time Slots*).
- Uso de una estructura de supertrama.

Una “supertrama” está limitada por dos tramas guía. Pueden existir tres períodos en una supertrama:

- **Período de Acceso de Contención, CAP:** Durante éste todos los dispositivos que necesiten transmitir deben usar el mecanismo CSMA-CA para ganar acceso al canal. El canal de frecuencia será accesible sin prioridades para todos los dispositivos de una misma red. El primer dispositivo que empiece a utilizarlo lo mantendrá hasta que la transmisión esté completa. Si un dispositivo encuentra ocupado un canal esperará por un período aleatorio de tiempo e intentará nuevamente. Las tramas de

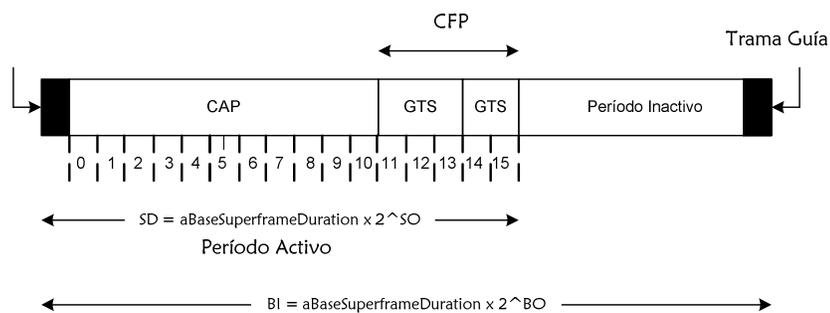
comando de la MAC deben transmitirse durante este período. No se garantiza aquí a ningún dispositivo la utilización de un canal en el momento preciso que lo necesite.

- **Período Libre de Contención, CFP:** Este período garantiza un intervalo de tiempo específico para cada dispositivo, y éste no deberá utilizar CSMA-CA para lograr acceso al canal. Un CFP puede tener hasta siete GTS, pudiendo ocupar cada uno más de un intervalo de tiempo.
- **Período Activo:** Combinación de CAP y CFP.

Éste se divide en 16 intervalos de tiempo de igual longitud, siendo el primer intervalo propio de la trama guía. Opcionalmente, una supertrama puede tener un período inactivo que permite que el dispositivo ingrese a su modo de ahorro energético.

La figura 10 muestra la estructura descrita para una supertrama, así como descripciones propias de su duración y configuración que se explican más adelante.

Figura 10. Estructura de Supertrama



Fuente: Shahin, Farahani, **ZigBee wireless networks and transceivers**, Pág. 48

La estructura de la supertrama es definida por un Coordinador y configurada por la NWK utilizando la primitiva “MLME-START.request”. El intervalo guía (BI por *Beacon Interval*), tiempo de duración entre dos intervalos guía consecutivos, se determina por las constantes *macBeaconOrder* (BO) y *aBaseSuperframeDuration* a través de la siguiente expresión:

$$BI = aBaseSuperframeDuration \times 2^{BO} \text{ (Símbolos)}$$

El valor de *macBeaconOrder* puede estar entre 0 y 14, si su valor se establece en 15 la red se considerará como inhabilitada para tener tramas guía. En este caso, el Coordinador no deberá transmitir tramas guía hasta que reciba un comando de petición de éstas por parte de un dispositivo de la red que la utilizará para localizar al Coordinador. Por lo contrario, en una red de trama guía habilitada, cada Coordinador tiene la opción de transmitir tramas guía y crear su supertrama.

La longitud del período activo de la supertrama, duración de supertrama SD, se calcula con la siguiente expresión:

$$SD = aBaseSuperframeDuration \times 2^{SO} \text{ (Símbolos)}$$

SO es el valor del atributo *macSuperframeOrder*. Este valor no puede exceder la duración del intervalo guía, así que SO será siempre menor o igual a BO.

Es de importancia saber que si un dispositivo no utiliza su GTS durante un período de tiempo extendido, éste expirará y el Coordinador podrá asignarlo a

un dispositivo distinto. El período de inactividad que resultará en la expiración del GTS es un entero múltiplo del doble de la longitud de la trama. El valor de este entero (n) depende de atributo *macBeaconOrder*:

$$\begin{array}{ll} n = 2^{(8-\text{macBeaconOrder})} & \text{si } 0 \leq \text{macBeaconOrder} \leq 8 \\ n = 1 & \text{si } 8 \leq \text{macBeaconOrder} \leq 14 \end{array}$$

2.2.2 Espaciado entre Tramas

Durante la transmisión de datos, un dispositivo debe esperar entre las tramas transmitidas para que el dispositivo receptor procese la información. Este intervalo temporal de espera entre tramas se designa como **IFS** por su traducción al inglés de *Interframe Spacing*. La longitud del IFS depende del tamaño de la trama transmitida. Las MPDU con longitudes menores o iguales a *aMaxSIFSFramesSize* (una constante de la MAC con un valor predeterminado de 18 octetos) se consideran como tramas cortas, si su tamaño excede el de esta constante se consideran tramas largas. Según el tamaño designado a una trama con esta comparación se asignan períodos de espera cortos, SIFS, o largos, LIFS, respectivamente. *MacMinSIFSPeriod* es el período mínimo para el SIFS y *macMinLIFSPeriod* lo es para el LIFS. El período de tiempo desde la transmisión de una trama y la recepción del acuse de recibo se conoce como t_{ack} .

2.2.3 Servicios de la MAC

2.2.3.1 Servicio de Datos

Se ingresa a éste por la NLDE, Entidad de Datos de la NWK (*NWK Layer Data Entity*), a través del punto de acceso común con la MAC. Fundamentalmente la MAC da servicio de datos a la NWK. Los datos que necesitan transmitirse son dados como NPDU o Unidades de Datos de la NWK. Esta información se coloca en la carga útil de la trama de la MAC, la MSDU. Cada MSDU se asocia con un manipulador (*handle*) específico denominado *msduhandle*. Éste es un número entero que identificará el MSDU y permitirá rastrearlo. El número de la secuencia de datos (DSN) puede utilizarse como *msduhandle*. Éste es un atributo de la MAC almacenado en la MAC-PIB (*macDSN*). El valor inicial del *macDSN* puede ser cualquier número aleatorio. Cada vez que se genere una trama de datos o de comandos de la MAC, ésta copia el valor del *macDSN* en la trama de salida e incrementa este *macDSN* en una unidad. Existen tres opciones para la transmisión de datos:

- **Transmisión con o sin Acuse de Recibo.**
- **Transmisión durante un GTS o un CAP:** Si la red no tiene intervalo guía activado, siempre se utilizará CAP porque una red de este tipo no maneja GTS.
- **Transmisión Directa o Indirecta:** En la indirecta los datos no se transmiten directamente al dispositivo receptor. En su lugar, en una red de trama guía activada, los datos pueden almacenarse en el Coordinador y el dispositivo receptor es notificado de la existencia de datos pendientes para él en el Coordinador. Posterior a la recepción de la notificación del Coordinador, el dispositivo envía una petición de datos al Coordinador solicitándole la

transmisión de sus datos. Sólo un Coordinador puede manejar este tipo de comunicación indirecta.

El servicio de datos está disponible para un dispositivo que desea transmitir. Si el dispositivo está en modo de recepción, la MAC entrega los datos a la NWK. El LQI medido durante la recepción de los MPDU y el tiempo en que los datos fueron recibidos se informan a la NWK.

2.2.3.2 Servicio de Administración

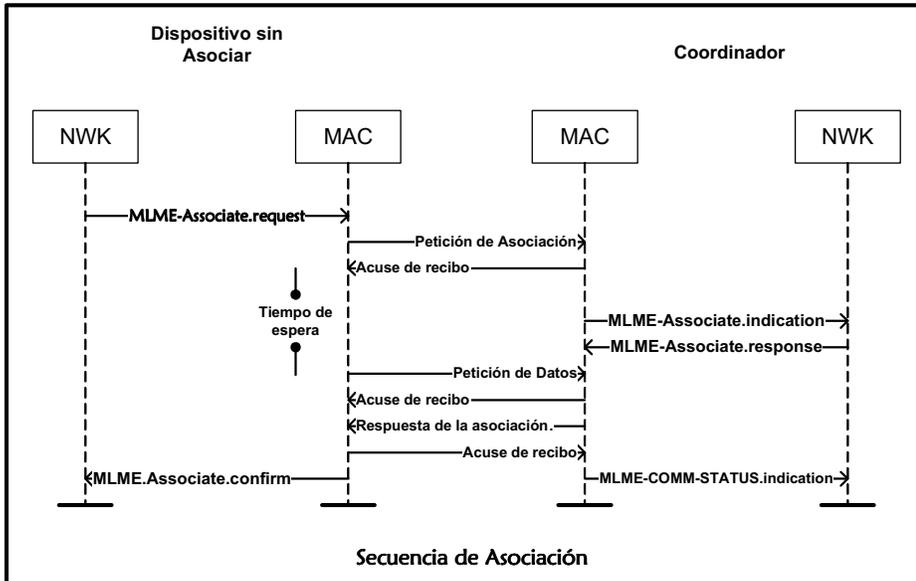
Se ingresa a éste a través del punto de acceso del servicio de administración de la MAC, MLME-SAP. Los comandos de la MAC incluyen parámetros relativos a direccionamiento y seguridad, sus respuestas son dadas como indicadores de estado a la NWK. Entre las actividades de este servicio se tienen:

- **Administración de la Base de Información de la MAC, MAC PIB:** Aquí se almacenan los atributos de la MAC para ser accedidos por la NWK. La NWK podrá solicitar acceso a atributos de la MAC PIB y de la PHY PIB haciendo pasar las solicitudes respectivas entre los puntos de acceso. La NWK no podrá cambiar los atributos por sí misma, sólo podrá solicitárselo a las demás capas.
- **Restablecimiento (*Reset*) de la MAC:** La NWK podrá pedirle a la MLME el restablecimiento de la MAC a su condición inicial y la limpieza de variables internas a sus valores predeterminados. También podrá solicitar el restablecimiento de los atributos en la MAC-PIB. La MAC utiliza el servicio de administración de la PHY para inhabilitar el transreceptor antes del restablecimiento.

- **Asociación y Disociación de Dispositivos:** La “asociación” es el procedimiento que utiliza un dispositivo para unirse a una red. La MAC permite estos procedimientos como un servicio a la NWK. En este procedimiento se emplearán cuatro primitivas de servicio de la MAC.
 - ***MLME-Associate.request***, utilizada por la NWK para solicitar unirse a un Coordinador. La petición muestra una lista de capacidades del dispositivo. La petición se transmitirá a la PHY y pasará a formar parte de su carga útil que será enviada al Coordinador.
 - ***MLME-Associate.indication***, emitida por la MAC del Coordinador para informarle a su NWK la petición.
 - ***MLME-Associate.response***, generada por la NWK del Coordinador para informar a su MAC que conoce la petición.
 - ***MLME-Associate.confirm***, enviada por el Coordinador como respuesta de asociación para un dispositivo. Esta respuesta no es transmitida directamente al dispositivo, es más bien almacenada en el Coordinador y otorgada al dispositivo cuando éste envía una petición de datos al Coordinador después de esperar cierto tiempo. La longitud del intervalo de tiempo de esta espera es un atributo almacenado en la MAC-PIB, *macResponseWaitTime*.

La figura 11 ilustra la secuencia de procedimientos entre dispositivo y Coordinador para lograr la asociación.

Figura 11. Secuencia de Asociación



Fuente: Shahin, Farahani, **ZigBee wireless networks and transceivers**, Pág. 60

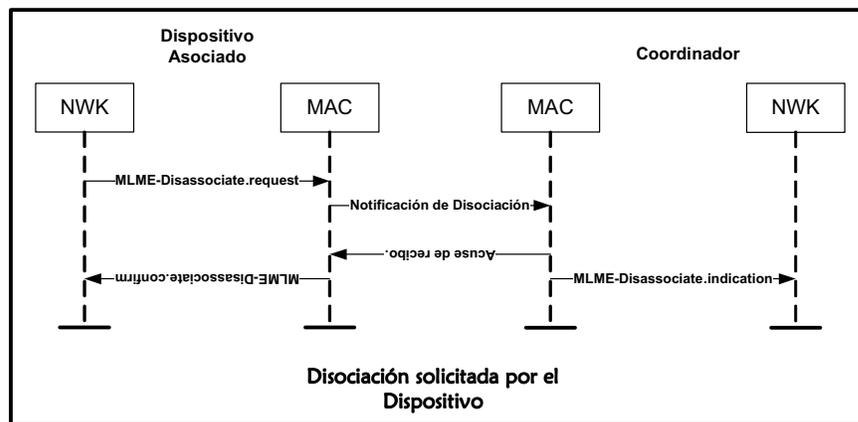
La “disociación” es el procedimiento usado por un dispositivo asociado para informar al Coordinador su intención de abandonar la red, puede ser iniciado por parte del dispositivo o por el Coordinador. Si el que inicia es el dispositivo, la NWK del dispositivo genera la petición de disociación, *MLME-Dissociate.request*, a su MLME. La petición se envía al Coordinador usando el servicio de datos de la PHY. El dispositivo informa la razón de su petición, ésta puede ser:

- El Coordinador quiere que el dispositivo abandone la PAN.
- El dispositivo desea abandonar la PAN.

El MLME del Coordinador analiza la petición y la validez de los campos de direccionamiento y seguridad en la petición, si todo está en orden enviará una respuesta afirmativa para la petición de abandono de la red por parte del

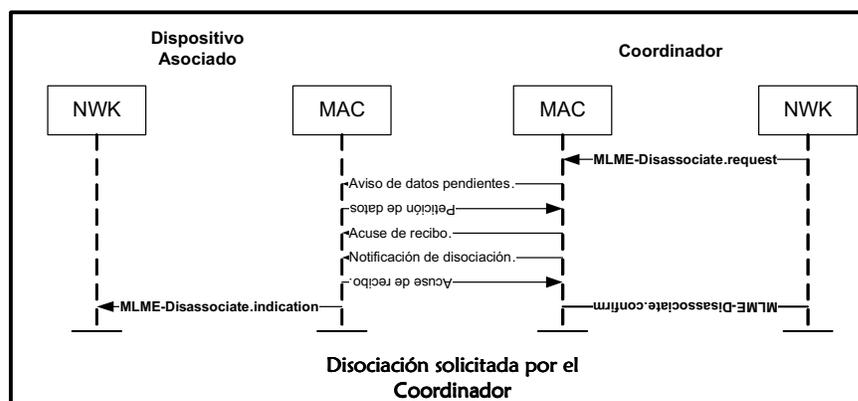
dispositivo. El Coordinador usa el *MLME-Disassociate.indication* para notificar a su NWK el resultado de la disociación y el *MLME-Disassociate.confirm* para informarle a la NWK del dispositivo el resultado de la disociación. Las figuras 12 y 13 ilustran la secuencia de procedimientos entre dispositivo y coordinador para lograr la disociación. Se tratan tanto la originada por el dispositivo como la originada por el Coordinador.

Figura 12. Secuencia de Disociación solicitada por el Dispositivo



Fuente: Shahin, Farahani, **ZigBee wireless networks and transceivers**, Pág. 61

Figura 13. Secuencia de Disociación solicitada por el Coordinador

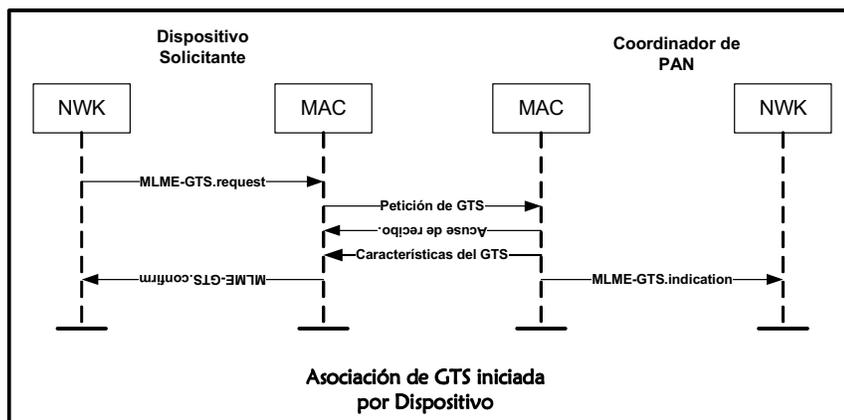


Fuente: Shahin, Farahani, **ZigBee wireless networks and transceivers**, Pág. 61

- **Estado de la Comunicación:** El MLME usa la primitiva *MLME-Comm-Status.indication* para darle información a la NWK sobre el estado de eventos como la transmisión de datos, reportes de errores de seguridad, fracaso de un proceso de comunicación y la razón, etc.
- **Habilitación e Inhabilitación del Receptor:** La NWK solicita a la MLME la habilitación o inhabilitación del receptor por cierto período de tiempo.
- **Administración de GTS:** La NWK solicita la ubicación de nuevos GTS al servicio de administración de la NWK. Si un dispositivo tiene un GTS asignado y no lo necesita más, la MLME puede solicitarle al coordinador la liberación del GTS. El coordinador podrá aceptar o negar una petición de GTS. La solicitud se hace mediante *MLME-GTS.request*, generada por la NWK hacia la MLME. La *MLME-GTS.indication* informa a la NWK del Coordinador si se asignó o desasignó un GTS y la *MLME-GTS.confirm* lo informará al dispositivo.

La figura 14 ilustra el proceso de asignación recién expuesto.

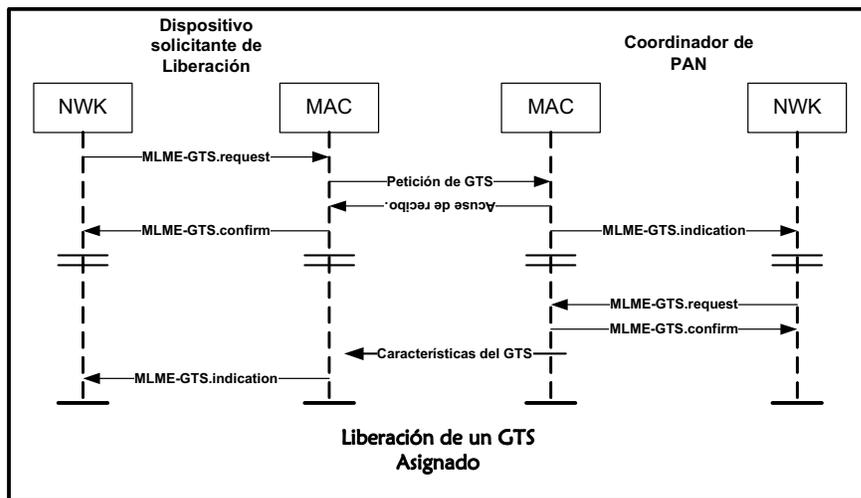
Figura 14. Asociación de GTS iniciada por el Dispositivo



Fuente: Shahin, Farahani, **ZigBee wireless networks and transceivers**, Pág. 63

La liberación de un GTS puede dejar un intervalo de tiempo sin uso en el CAP, esto se conoce como un “súper trama fragmentada”. A fin de reparar el problema que esto causa se efectúa una reubicación de GTS.

Figura 15. Liberación de GTS



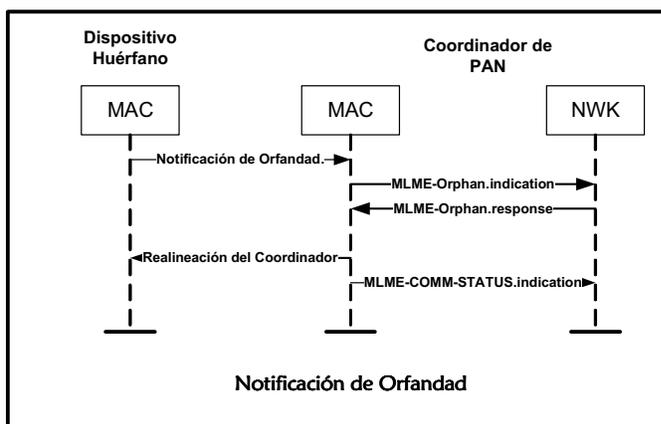
Fuente: Shahin, Farahani, **ZigBee wireless networks and transceivers**, Pág. 63

- **Actualización de la Configuración de Súper Trama:** En una red de trama guía activada, la NWK puede solicitarle al MLME la iniciación de una estructura de súper trama brindándole los parámetros de la misma. Uno de los parámetros de gran importancia es la opción “BLE” que permite al Coordinador de la trama guía apagar su receptor durante cierto tiempo, equivalente al *macBattLifeExtPeriods*, luego de transmitir la trama guía para conservar energía.
- **Notificación de Orfandad:** Se considera huérfano a un dispositivo que inicialmente estaba asociado a una red pero luego perdió dicha asociación. Si la NWK se enfrenta a frecuentes fallas de comunicación, puede concluir

en que es un huérfano. La NWK podrá solicitar a la MLME que inicialice la MAC para realizar un procedimiento de asociación o realice el procedimiento de realineación para un dispositivo huérfano.

El proceso de realineación inicia con el dispositivo enviado una notificación de orfandad al Coordinador quien se lo informa a su NWK mediante una *MLME-Orphan.indication*. La NWK verificará la dirección del huérfano y confirmará la asociación previa en su respuesta, *MLME-Orphan.response*. Si estaba previamente asociado, la MLME del Coordinador enviará un comando de realineación que informará sobre la configuración de la red. Cuando el comando sea exitosamente transmitido al huérfano, la MLME usará la *MLME-Comm-Status.indication* para informarle el éxito a la NWK. El huérfano esperará durante un tiempo *macResponseWaitTime* la recepción del comando de éxito, si no lo recibe asumirá que no estuvo asociado a ninguna red en el perímetro de acción. La figura 16 ilustra el procedimiento de notificación de orfandad.

Figura 16. Notificación de Orfandad

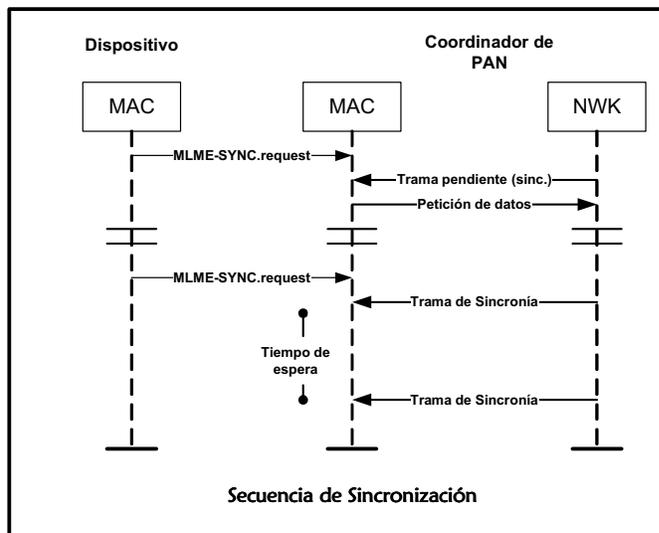


Fuente: Shahin, Farahani, **ZigBee wireless networks and transceivers**, Pág. 66

- **Verificación del Canal:** Servicio dado por la MAC a la NWK, provee información sobre las actividades hechas en el espacio de operación del dispositivo. Existen cuatro tipos de verificación:
 - **Verificación ED:** La PHY determina el nivel de energía en el canal.
 - **Verificación de orfandad:** El MLME envía una notificación de orfandad al Coordinador de cada canal secuencialmente, luego de cada envío esperará el respectivo comando de realineación que al no recibirse provocará la verificación del siguiente canal.
 - **Verificación activa:** El MLME envía una solicitud de trama guía, luego el dispositivo habilitará su receptor para la grabación de información. Este tipo de verificación puede utilizarla un Coordinador que planea establecer su propia red para descubrir los identificadores que utilizan las otras redes establecidas en su mismo campo de acción, así obtendrá un identificador único. También puede utilizarla un Dispositivo Terminal a fin de localizar un Coordinador.
 - **Verificación pasiva:** El MLME habilita el receptor luego que recibe la petición de verificación pasiva y empieza a grabar la información recibida. Este tipo de verificación puede utilizarla un dispositivo no asociado para localizar un Coordinador.
- **Notificación de Trama Guía:** Cuando un dispositivo recibe una trama guía, el MLME envía los parámetros contenidos en ésta a su NWK mediante la primitiva *MLME-Beacon-Notify.indication*.
- **Sincronización con el Coordinador:** La NWK de un dispositivo en una red con trama guía habilitada solicita a su MLME la sincronización con el Coordinador a través de la *MLME-Sync.request*. El dispositivo puede elegir entre localizar la trama guía solamente una vez o hacerlo continuamente. En el seguimiento continuo de esta trama el dispositivo habilita su receptor periódicamente, previo a la llegada de la trama. Si un dispositivo pierde la sincronización con el Coordinador, la NWK solicita al MLME que informe al

Coordinador sobre la pérdida con la *MLME-Sync-Loss.indication*. Un dispositivo concluye en que ha perdido la sincronización si no detecta la trama guía por un tiempo definido en la constante *aMaxLostBeacons* (con valor predeterminado de 4).

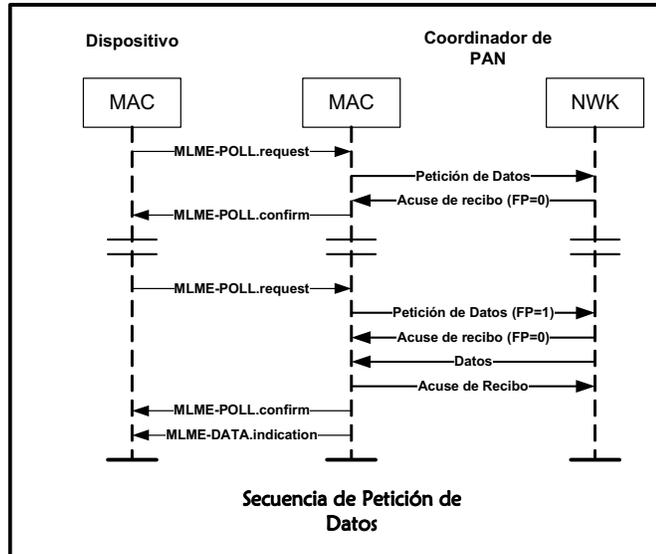
Figura 17. Secuencia de Sincronización



Fuente: Shahin, Farahani, **ZigBee wireless networks and transceivers**, Pág. 68

- Solicitud de datos al coordinador:** El Coordinador puede utilizar la transmisión con tramas guías para notificar a un dispositivo en su red la existencia de datos pendientes para él en el Coordinador. Cuando se notifica a un dispositivo, la NWK del dispositivo solicita a su MLME el envío de una solicitud de datos pendientes al Coordinador, esto a través de una *MLME-Poll.request*. El dispositivo espera un intervalo de tiempo definido por la constante *macMaxFramTotalWaitTime*. Si no recibe datos lo notificará a su NWK a través de la *MLME-Poll.confirm*.

Figura 18. Secuencia de Petición de Datos



Fuente: Shahin, Farahani, **ZigBee wireless networks and transceivers**, Pág. 69

2.2.4 Formato de Trama de la MAC

En el presente apartado se describirán las características principales de los tipos de trama que pueden generarse en la MAC, describiendo previo a esto el formato de estructura general de las tramas de esta capa. Deben considerarse cuatro estructuras de trama básicas:

1. Trama guía
2. Trama de datos
3. Trama de reconocimiento
4. Trama de comando de la MAC

Figura 19. Formato General de Trama de la MAC

Trama de Control	Número de Secuencia	Identificador de la PAN destino	Dirección del destino	Dirección del destino	Dirección Fuente	HDR Auxiliar de Seguridad	Carga Útil	FCS
MHR							Carga útil de la MAC	MFS

Fuente: Shahin, Farahani, **ZigBee wireless networks and transceivers**, Pág. 70

Se hace notar que básicamente presenta tres secciones básicas: Encabezado de la MAC (MHR), Carga Útil de la MAC y Pie de Trama de la MAC (MFS). A continuación se describirán los contenidos de cada uno de los campos presentados.

- **Trama de Control:** La figura 20 presenta los campos incluidos en ella.

Figura 20. Configuración de la Trama de Control

Tipo de Trama	Habilitación de Seguridad	Trama Pendiente	Petición de reconocimiento	Identificador de PAN comprimido	Reservado	Direccionamiento del Destinatario	Versión de Trama	Direccionamiento del Remitente
---------------	---------------------------	-----------------	----------------------------	---------------------------------	-----------	-----------------------------------	------------------	--------------------------------

Fuente: Shahin, Farahani, **ZigBee wireless networks and transceivers**, Pág. 70

El primer campo, tipo de trama, define si se trata de una trama guía, de datos, de reconocimiento o de comando. Si el segundo campo, habilitación de seguridad, está habilitado, la trama general sí incluirá el segmento HDR, Encabezado Auxiliar de Seguridad de la MAC. El campo de trama pendiente define si existen datos sin entregar por parte del Coordinador al dispositivo. Al habilitar el campo de petición de reconocimiento se obliga al receptor a enviar acuses de recibo con las transmisiones. Cuando se trate de transmisiones entre dispositivos de una misma red, los campos de dirección de destinatario y remitente serán los mismos. Un campo “Identificador de PAN Comprimido” habilitado asegura que sólo se transmita el ID de la PAN destino, asumiéndose igual que el remitente. Los campos de Direccionamiento de Destinatario y del Remitente definen el tamaño de las direcciones a utilizar, ya sea 16 ó 64 bits.

El campo de “Versión de Trama” determina la versión del estándar IEEE 802.15.4 que se está utilizando.

- **Número de Secuencia:** Puede tratarse del número de secuencia de trama guía (BSN) o número de secuencia de datos (DSN). Esto es útil para distinguir entre varias secuencias. Los valores de BSN y DSN se almacenan en la tabla MAC PIB como los atributos *macBSN* y *macDSN* correspondientemente. El dispositivo inicializa el DSN a un número arbitrario y lo va incrementando luego de cada transmisión.
- **Encabezado Auxiliar de Seguridad:** Segmento opcional en la trama general de la MAC, contiene información como el nivel de seguridad y el tipo de llaves de seguridad utilizadas para proteger las tramas de la MAC.
- **FCS (*Frame Check Sequence*):** Segmento utilizado por el receptor para buscar errores en la trama recibida.

2.2.4.1 Formato de Trama Guía

Versión especial del formato general de trama de la MAC. En ésta el campo de número de secuencia contiene el valor en turno de la constante *macBSN*. El campo de especificación de súper trama es parte de la carga útil de la MAC. La figura 21 muestra los campos que forman parte de la trama guía.

Figura 21. Campos de la Trama Guía

Trama de Control	Número de Secuencia	Direccionamientos	HDR Auxiliar de Seguridad	Especificación de Supertrama	Campos de GTS	Direcciones Pendientes	Carga Útil	FCS
MHR				Carga útil de la MAC			MFR	

Fuente: Shahin, Farahani, **ZigBee wireless networks and transceivers**, Pág. 72

El campo de Especificación de Súper Trama forma parte de la Carga Útil de la MAC y en ella se definen los intervalos de transmisión entre tramas guía, la duración del período activo, los intervalos de tiempo que serán utilizados como GTS, el modo de conservación de energía, quién originó la transmisión (Coordinador o Dispositivo Terminal) y permisos de asociación. Los campos de GTS especifican si el Coordinador de la red acepta solicitudes de GTS y la configuración y distribución de estos. El campo de Direcciones Pendientes determina si existen datos pendientes de recepción para algún dispositivo, cada dispositivo deberá chequear la existencia de su dirección en este campo y si encuentra concordancia iniciará un procedimiento de petición de datos. La carga útil de la trama guía es otorgada por la NWK del dispositivo.

2.2.4.2 Formato de Trama de Datos

Entregada por la NWK como una MSDU se hace referencia a ella como una MPDU. El número de secuencia es igual a la *macDSN* en turno cuando se crea la trama.

Figura 22. Configuración de la Trama de Datos



Fuente: Shahin, Farahani, **ZigBee wireless networks and transceivers**, Pág. 74

2.2.4.3 Formato de la Trama de Reconocimiento

Trama enviada opcionalmente desde un dispositivo receptor hacia el transmisor a fin de informarle sobre una recepción exitosa. Puede utilizarse también para informarle a un dispositivo la existencia de datos pendientes para él. El campo de número de secuencia corresponde al valor en turno del *macDSN*.

Figura 23. Formato de la Trama de Reconocimiento



Fuente: Shahin, Farahani, **ZigBee wireless networks and transceivers**, Pág. 74

2.2.4.4 Formato de la Trama de Comandos

Trama utilizada para el transporte de comandos de la MAC hacia el dispositivo receptor. El número de secuencia corresponde al valor del *macDSN* de la trama que se está reconociendo. En su campo de Identificador de Comando se especifica el comando que se utilizará y en la carga útil de comando se denotan los parámetros útiles para la ejecución. Un dispositivo FFD debe ser capaz de transmitir y recibir todos los comandos, mientras un RFD sólo podrá ejecutar algunos selectos. La figura 24 muestra el esquema de una trama de comandos, la tabla III que especifica los comandos propios de la MAC y cuáles son utilizables por los dispositivos RFD.

Figura 24. Formato de la Trama de Comandos

Trama de Control	Número de Secuencia	Direccionamientos	HDR Auxiliar de Seguridad	Identificador de Comando	Carga útil de comandos	FCS
MHR				Carga útil de la MAC		MFR

Fuente: Shahin, Farahani, **ZigBee wireless networks and transceivers**, Pág. 74

Tabla III. Comandos de la MAC

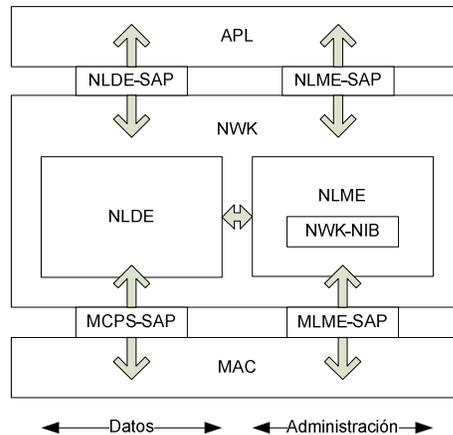
Identificador de Comando	Comando	RFD	
		TX	RX
00000001	Petición de asociación.	Sí	
00000002	Respuesta de asociación.		Sí
00000003	Notificación de disociación.	Sí	Sí
00000004	Petición de datos.	Sí	
00000005	Notificación de conflicto de identificador de red.	Sí	
00000006	Notificación de orfandad.	Sí	
00000007	Petición de trama guía.		
00000008	Realineación con el coordinador.		Sí
00000009	Petición de GTS.		

Fuente: Shahin, Farahani, **ZigBee wireless networks and transceivers**, Pág. 75

2.3 Capa de Red (NWK)

La figura 25 describe la estructura básica de la NWK y los puntos en que se da la interfaz entre la MAC, la APL y la NWK.

Figura 25. Interfaz MAC – NWK - APL



Fuente: Shahin, Farahani, **ZigBee wireless networks and transceivers**, Pág. 80

La NWK provee dos servicios básicos, Datos y Administración. La NLDE (Entidad de Datos de la Capa NWK) es responsable de la transmisión de datos, siendo el acceso a este servicio a través del NLDE-SAP (Punto de Acceso de la NLDE). Las tareas de administración en la NWK son manejadas por la NLME (Entidad de Administración de la Capa NWK). La APL puede utilizar el servicio de administración de la NWK a través del NLME-SAP. Las constantes de la NWK utilizan el prefijo *nwkc* y sus atributos el *nwk*. Los atributos se almacenan en la Base de Información de la Red (NIB). La APL puede leer y modificar los atributos de la NWK utilizando las primitivas *NLME-Get* y *NLME-Set*.

La NWK de un Coordinador asigna las direcciones de red de 16 bits a los dispositivos en su red y la dirección MAC del estándar IEEE 802.15.4 si un dispositivo que se une a la red necesita uno. Es en esta capa que se limita la distancia que se permite viajar a una trama, definiendo esta distancia en el número de saltos permitidos. Para ello, a cada trama de la NWK se le asignará un parámetro llamado *radio* que determinará el máximo número de saltos.

Los mecanismos de comunicación pueden dividirse en tres categorías generales: Difusión, Multidifusión y Monodifusión.

2.3.1 Difusión

Intencionado para la recepción por parte de cualquier dispositivo escuchando en el canal de frecuencia de su emisión sin importar el identificador de red del emisor o el receptor. Siempre que recibe, un dispositivo verificará el destinatario, sin embargo, cuando se trata de mensajes de difusión estos llevan su dirección definida como 0xffff. Esta dirección es aceptada por todos los dispositivos, siendo reconocida como la “Dirección de Difusión”. La APS de cualquier dispositivo puede iniciar la transmisión por difusión utilizando el servicio de datos de la NWK.

Al recibir un mensaje de difusión, un Dispositivo Terminal no podrá informar la recepción exitosa, serán los Enrutadores y el Coordinador de la red los que verifiquen que los dispositivos vecinos hayan transmitido el mensaje. Luego de que un dispositivo envía un mensaje por difusión se establecerá en modo de recepción y esperará hasta que la misma trama sea retransmitida por alguno de los dispositivos vecinos, ésta es la forma en que se verificará que los dispositivos pasen a relevos los mensajes entre sí.

El Coordinador y los Enrutadores mantendrán un registro de todos los mensajes que envían por difusión en una tabla denominada “Tabla de Difusión

de Transacciones”, BTT, en ésta se especificarán el número de secuencia y remitente de una trama de difusión.

Si un dispositivo *ZigBee* no mantiene activo su receptor mientras se encuentra en estado adormecido, no participará en la retransmisión de tramas de difusión ni en la administración de la BTT.

2.3.2 Multidifusión

Intencionado para la recepción de un mensaje por parte de un grupo selecto de dispositivos. Es la forma más eficiente de transmitir un mensaje a un grupo de dispositivos. Cada grupo está identificado por un identificador de multidifusión de 16 bits. Los dispositivos en un mismo grupo poseerán este identificador, pudiendo, sin embargo, pertenecer a más de un grupo de este tipo. Cada dispositivo mantendrá por ello un listado de membrecías de grupos de multidifusión en una tabla definida por el atributo *nwkGroupIDTable*.

Existen dos formas de operación en una comunicación de multidifusión:

- **Modo Miembro:** Multidifusión iniciada por un miembro de un grupo teniendo como destinatario los a los miembros de su mismo grupo.
- **Modo NO Miembro:** Multidifusión iniciada por un dispositivo que no pertenece a cierto grupo e intencionada para éste.

La trama de datos de la NWK posee un campo que define el modo de multidifusión a emplear, éste es establecido por el dispositivo que iniciará la multidifusión. Previo a la realización de cualquier transmisión se realizará un

procedimiento de “descubrimiento de ruta” que garantizará que los dispositivos conozcan la dirección del destino al que enviarán un mensaje mientras transita por los nodos de la red, es por ello que serán los nodos de la red del grupo los que indicarán la dirección de destinatario a la que se llegará con el siguiente salto de la información.

En esta forma de comunicación es posible limitar el número de veces que se retransmitirá la trama por parte de dispositivos que no pertenecen al grupo. La limitación se hace llevando el registro en un contador, en el radio del dispositivo que no pertenece al grupo, que sufre un decremento cada vez que se retransmite un mensaje por parte de un dispositivo no perteneciente al grupo. Cuando este contador se vuelve cero, no se seguirá retransmitiendo la trama por parte de dispositivos no miembros. La única excepción se da cuando el radio del dispositivo que no es miembro se establece en 007, esto indica que no existe límite al número de veces que se puede retransmitir un mensaje.

La multidifusión es empleada únicamente para la transmisión de tramas de datos, negándose la transmisión de tramas de comandos durante la multidifusión.

2.3.3 Monodifusión

Definida como una comunicación de muchos a uno, un único dispositivo recibe mensajes desde múltiples dispositivos pertenecientes a la red, el dispositivo funcionará como un sumidero. El dispositivo destino deberá

establecer rutas hacia él desde todos los Enrutadores y el Coordinador dentro de un perímetro establecido.

2.3.4 Servicios de la NWK

Al igual que las capas precedentes, la NWK cuenta con dos servicios principales, el Servicio de Datos y el Servicio de Administración.

2.3.4.1 Servicios de Datos

La NWK recibe datos que necesitan transmitirse desde la APS en forma de unidades de datos de la APS, conocidas estas unidades como APDU. La combinación de esta unidad con un encabezado de la NWK formará la Unidad de Datos de la NWK, NPDU.

La APS utiliza la primitiva *NLDE-DATA.request* para solicitar la transmisión de datos hacia la APS de cualquier otro dispositivo en la red. Esta petición de transmisión limita la distancia que se permite viajar a los datos en la red utilizando el parámetro de radio. Los datos se acompañan con un número de secuencia iniciado en un valor aleatorio que se incrementa en una unidad cada vez que se transmite una trama. En el lado del receptor, la NWK entrega su trama de datos, el indicador de calidad de enlace (LQI) y la secuencia de datos a la APS utilizando la primitiva *NLDE-DATA.indication*.

2.3.4.2 Servicios de Administración

A continuación se describen los servicios administrativos ejecutados por la NWK.

- **Descubrimiento de la red:**

Procedimiento que tiene por objetivo encontrar todas las redes operando en el espacio personal del dispositivo. La petición de este procedimiento es hecha hacia la NWK por parte de la APL. La NWK utilizará el método de verificación de canal de la MAC para detectar la presencia de otras redes.

Como resultado se obtendrá un listado de redes presentes, incluyendo sus identificadores de red, canales de frecuencia en uso y la versión del protocolo *ZigBee* que manejen. Esta información será entregada a la APL, junto con el valor de orden de trama guía, orden de súper trama y los identificadores de la pila de protocolo *ZigBee* en uso. Con este procedimiento se verificará si existe algún Enrutador en las redes descubiertas que permita la asociación del dispositivo.

- **Formación de la red**

Como petición de la APL, la NWK puede definir un dispositivo como el Coordinador. El dispositivo debe ser totalmente funcional (FFD) para trabajar como Coordinador. Los pasos para la formación de la red son:

- Verificación ED seguido por una verificación activa en un número selecto de canales utilizando los servicios administrativos de la MAC.
- Basándose en la evaluación anterior, la NWK elige el canal de frecuencia y el identificador de red único. Se considera el canal que tenga asociado el menor número de redes sensoriales.
- La NWK del coordinador *ZigBee* selecciona la dirección 0x0000 como su dirección MAC corta, equivalente ésta a su dirección de red.

- El coordinador configurará la súper trama utilizando el servicio de administración de la MAC.

- **Establecimiento de un Dispositivo como Enrutador**

El Enrutador *ZigBee* será el responsable de direccionar tramas de datos, descubrimiento y reparación de rutas. Éste puede establecer su propia súper trama y aceptar solicitudes de otros dispositivos para unirse a su red. Las solicitudes de este tipo son hechas desde la APL hacia la NWK utilizando primitivas del tipo *NLME-START-ROUTER.request*.

- **Asociación y Disociación de una Red**

Si el atributo *macAssociationPermit* de un Enrutador está establecido como verdadero, el dispositivo aceptará peticiones de asociación. La NWK de un Coordinador o Enrutador de *ZigBee* pueden permitir que dispositivos se asocien solicitando a la MLME que establezca en verdadero el valor del *macAssociationPermit* durante un período fijo de tiempo. La APL puede usar la primitiva *NLME-JOIN.request* para solicitarle a la NWK que asocie el dispositivo a una red existente.

El dispositivo que se asociará recibirá una lista de redes existentes y escogerá una red “padre” que lo tome como “hijo”. Si existe más de un padre viable, el más cercano será elegido. Para la asociación, la NWK del dispositivo hijo iniciará el procedimiento con la primitiva *MLME-Associate.request*.

Cuando el padre recibe la petición de asociación, verificará que el dispositivo no esté asociado a su red. Si el dispositivo no se encuentra en el listado recibirá un identificador de red único. Cada padre tiene un número limitado de direcciones disponibles para poderles asignar a sus hijos. Si se acepta la petición de asociación, el padre actualizará su tabla de hijos para incluir al dispositivo. Si por lo contrario el dispositivo estaba asociado a este padre, se utilizará un comando de la NWK de re-asociación. Un hijo podrá asociarse a su padre aún cuando este no esté aceptando dispositivos.

Otro método de asociación es la “asociación directa”, utilizado cuando el padre está predeterminadamente configurado con las direcciones de 64 bits de sus dispositivos hijos. En este caso el hijo no intentará encontrar un padre viable dado que éste ya fue previamente establecido. El padre iniciará la asociación con sus hijos buscando en su tabla de vecinos aquellos cuya dirección coincida con la de sus hijos.

La remoción de un dispositivo de una red puede ser iniciada por el hijo o el padre. La disociación de la MAC se usa para remover dispositivos. Cuando un dispositivo abandona una red, todos sus hijos se remueven también. Estos hijos removidos pueden unirse a otros padres en la misma red o unirse a una distinta.

Si el dispositivo que planea abandonar la red es el Enrutador o el Coordinador, la NWK de este dispositivo enviará una trama de comando de abandono difundida por toda la red. Esto permitirá a todos los dispositivos, que dependen del desertor actualizar sus rutas o encontrar un nuevo padre. Si se tratara de un Dispositivo Terminal, éste lo informaría únicamente a su padre. Cuando un padre decide remover a un hijo se enviará únicamente a él un comando de *leave-request*.

La dirección de un hijo que abandonó la red puede utilizarse nuevamente sólo si la APL permite la reutilización en las primitivas *MLME-LEAVE.request*. Si el dispositivo que se remueve es un Enrutador, éste difundirá por la red un comando *leave* (abandonar).

- **Reinicio de la NWK**

Procedimiento hecho como petición de la APL con una primitiva *NLME-Reset.request*. La NWK envía una primitiva de confirmación *NLME-Reset.confirm* y luego reinicia la MAC, haciendo una limpieza propia luego de la recepción de confirmación de reinicio por parte de la MAC. Entre los procedimientos de reinicio de la NWK se tienen: limpieza de los atributos de la NIB, establecimiento de tablas de enrutamiento y descubrimiento de rutas a sus

valores predeterminados. El procedimiento se da como consecuencia de la alimentación inicial, antes de un intento de asociación y luego de abandonar una red.

- **Sincronización**

Método utilizado para sincronizarse o recuperar datos pendientes de un Coordinador o Enrutador. Existen dos escenarios de sincronización, aquel que tiene trama guía y el que no la presenta. Si el valor de *macAutoRequest* está activado, la MAC generará y enviará el comando de petición de datos automáticamente. La APL utiliza la primitiva *NLME-Sync.request* para solicitar a la NWK que inicie el proceso de sincronización. El resultado es informado a la APL con la primitiva *MLME-Sync.confirm*.

2.3.5 Formato de Trama de la NWK

Figura 26. Formato General de Trama de la NWK

Trama de Control	Dirección Destino	Dirección Remitente	Radio	Número de Secuencia	Dirección IEEE de Destino	Dirección IEEE del Remitente	Control de Multidifusión	Subtrama de Ruta de Fuente	Carga útil
ENCABEZADO DE LA NWK (NHR)									Carga útil de la NWK

Fuente: Shahin, Farahani, **ZigBee wireless networks and transceivers**, Pág. 105

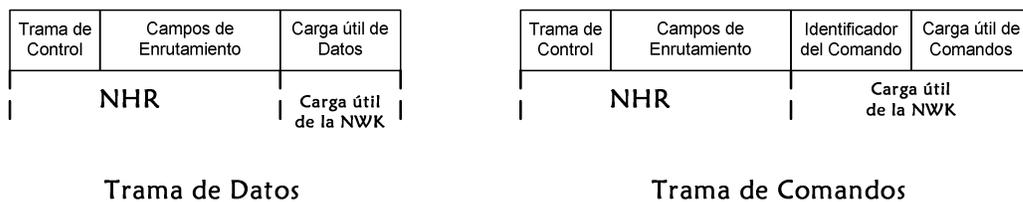
Se describe a continuación la función de algunos de los campos establecidos dentro de esta trama general representada por la figura 26.

- **Trama de Control:** En este campo se definen aspectos como:
 - Especificación de si es una trama de datos o de comandos.
 - Versión del protocolo *ZigBee* que se está implementando.

- Opciones del enrutamiento (supresión, habilitación o forzamiento del descubrimiento de rutas). Aquí se define si un dispositivo seguirá una ruta preestablecida.
- Definición de una bandera de multidifusión y de los dispositivos que pueden ser receptores de la trama enviada.
- Especificación del mecanismo de seguridad.
- **Radio:** Definición del número máximo de saltos que una trama puede tener a través del parámetro de radio.
- **Número de secuencia:** Con él se lleva un registro del número de tramas que han sido enviadas. Este valor se incrementará cada vez que una nueva trama sea enviada.
- **Control de Multidifusión:** Definición del modo de multidifusión a emplear, es decir, si la trama se enviará a un dispositivo miembro del grupo (modo 01) o a un dispositivo perteneciente a otro grupo (modo 00).

Los esquemas de la figura 27 muestran la división de campos que caracterizan a la trama de datos y la trama de comandos respectivamente.

Figura 27. Trama de Datos y Trama de Comandos



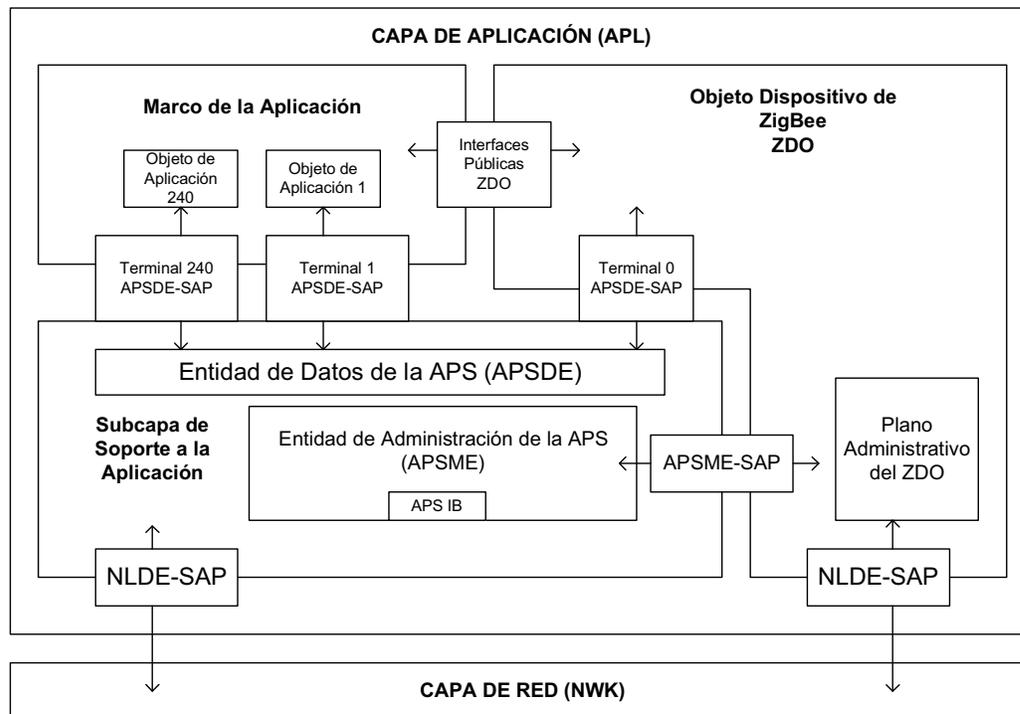
Fuente: Shahin, Farahani, **ZigBee wireless networks and transceivers**, Pág. 105

Los Campos de Enrutamiento corresponden a los campos entre la trama de control y la carga útil de la NWK descritos en el formato general de trama de la NWK previamente especificados. Entre los comandos que puede trabajar la NWK se encuentran:

- **Comando de petición de ruta:** Utilizado en el descubrimiento y reparación de rutas. El descubrimiento de rutas será siempre solicitado por un dispositivo en servicio, mientras el comando de reparación es iniciado por el Enrutador que ha intentado comunicarse con el dispositivo pero ha recibido una falla de enlace como respuesta. El objetivo principal del comando es la obtención de la ruta más óptima desde el remitente hasta el destinatario.
- **Comando de notificación de ruta:** Enviado desde el destinatario hacia el remitente como respuesta a un comando de petición de ruta. En este comando se recibirán, como verificación, la dirección de red del dispositivo que originó la petición de ruta y la dirección del destinatario.
- **Comando de error en la ruta:** Utilizado para informar al remitente sobre un error en la trama transmitida. Se incluye un código de error útil para determinar la causa del error en el enrutamiento.
- **Comando de abandono:** Enviado por un dispositivo que pretende abandonar la red o por un dispositivo que solicita a otro que la abandone. Si el dispositivo que genera el comando es un dispositivo padre, se removerán también todos sus hijos.
- **Comando de grabación de ruta:** Transmitido para grabar la dirección de todos los dispositivos que transmitieron el mensaje hacia el destinatario a través de una ruta establecida. Se originará y posteriormente proveerá una tabla de enrutamiento con todas las direcciones interventoras.
- **Comando de petición de reasociación:** Generado por un dispositivo cuando pierde la conexión a la red a fin de recuperarla a través de un dispositivo distinto a su padre original.
- **Comando de notificación de reasociación:** Respuesta del dispositivo que recibe el comando de petición de reasociación. Si el dispositivo posee capacidad para aceptar al solicitante, le otorgará en este comando su nueva dirección.

2.4 Capa de Aplicación (APL)

Figura 28. Capa de Aplicación (APL)



Fuente: Shahin, Farahani, **ZigBee wireless networks and transceivers**, Pág. 110

La figura 28 muestra que la estructura de la APL está formada por tres secciones básicas: Subcapa de Soporte a la Aplicación (APS), Marco de Aplicación y Objetos – Dispositivos *ZigBee*.

2.4.1 Subcapa de Soporte a la Aplicación (APS)

Provee una interfaz entre la NWK y la APL. Mantiene dos tipos de servicios: Datos y Administración. El Servicio de Datos de la APS es entregado

por la Entidad de Datos de la APS (APSDE), ingresándose a él a través de un punto de acceso, APSDE-SAP. Las funciones de administración son ofrecidas por la Entidad de Administración de la APS (APSME). Se ingresa a ellas por el respectivo punto de acceso, APSME-SAP. Las constantes y atributos de esta subcapa inician con apsc y aps. Los atributos de la APS están contenidos en la Base de Información de la APS (APS IB o AIB).

2.4.2 Marco de Aplicación

Esta sección hace referencia al ambiente en que se almacenan los objetos de la aplicación para administrar y controlar las capas del protocolo en un dispositivo *ZigBee*. Los objetos de la aplicación son desarrollados por compañías dedicadas. Pueden existir hasta 240 objetos de aplicación en un solo dispositivo. Los objetos de la aplicación utilizan el APSDE-SAP para enviar y recibir datos entre otros objetos de aplicación. Cada uno de estos objetos tendrá una única dirección de terminal (numeradas éstas desde 1 hasta 240). El terminal no. 0 es utilizado por el ZDO. Para enviar un mensaje a todos los objetos de la aplicación, la dirección del terminal se establece en 255. La identificación de dirección por número de terminal permite optimizar el enlace de radio pues puede ser compartido por varios dispositivos.

ZigBee ofrece la opción de utilizar “Perfiles de Aplicación” durante el desarrollo de una aplicación. El uso de estos permite la interoperabilidad entre dispositivos desarrollados por diferentes fabricantes para una aplicación específica. Estos perfiles son referidos como “Perfiles *ZigBee*”.

Cada perfil es identificado por una palabra de 16 bits, estos identificadores pueden ser otorgados únicamente por la “Alianza *ZigBee*”. La organización evalúa el perfil de aplicación propuesto y verifica que cumpla con los lineamientos establecidos por ella. Los perfiles de aplicación son nombrados en función de su aplicación objetivo. Por ejemplo, los perfiles de aplicación para la automatización del hogar otorgan una plataforma común para que los fabricantes desarrollen productos basados en el estándar *ZigBee* que estén intencionados para la automatización del hogar.

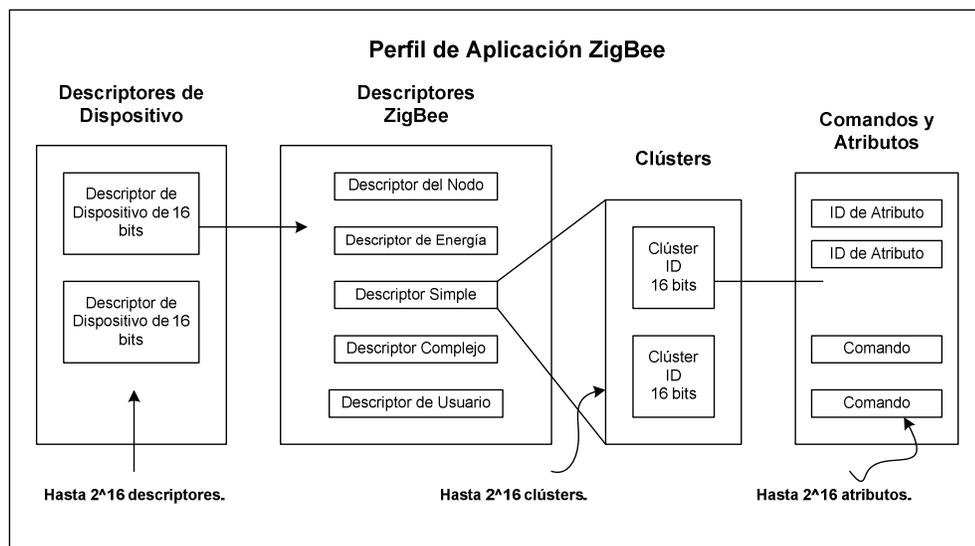
Un perfil de aplicación está compuesto de dos partes principales: Clúster y Descriptores de los dispositivos. Un Clúster es una serie de atributos agrupados. Cada clúster se identifica con un único número de 16 bits denominado identificador de atributo. Los atributos son utilizados para guardar datos o valores de estado. Los perfiles de aplicación no contienen realmente al clúster, lo que contiene es una lista de identificadores de clúster. Un Descriptor de Dispositivo brinda información sobre el mismo dispositivo, por ejemplo, las bandas de frecuencia que soporta, el tipo lógico del dispositivo (Coordinador, Enrutador o Dispositivo Terminal) y el nivel de energía de la batería. Cada descriptor de un dispositivo es identificado también con un valor de 16 bits.

El perfil de aplicación de *ZigBee* utiliza una estructura de datos de descriptor, en lugar de incluir los datos del dispositivo en el perfil de la aplicación, mantienen un valor de 16 bits que será utilizado como puntero hacia el sitio donde se encuentran los datos. Este puntero es conocido como el descriptor de datos. Cuando un dispositivo descubre la presencia de otro dispositivo en la red, la descripción de este dispositivo es transferida para otorgar información sobre él mismo.

La descripción del dispositivo incluye cinco secciones: descripción del nodo, descripción de la energía en el nodo, descriptor simple, descriptor complejo y descriptor de usuario.

- **Descriptor del nodo:** Información relativa a la naturaleza lógica del dispositivo y el código del fabricante
- **Descriptor de la energía en el nodo:** Define si es un nodo energizado con baterías y cuál es el nivel de corriente en éstas. Se especifica aquí si el dispositivo mantiene activado el receptor periódica o constantemente, o bien si lo activa únicamente ante algún evento detonante. El dispositivo puede tener varias fuentes de energía disponibles, aquí se especifica este caso.
- **Descriptor simple:** Identificador de perfil y clúster.
- **Descriptor complejo:** Sección opcional, contiene información como el número de serie y el modelo del dispositivo.
- **Descriptor de usuario:** Mantiene cualquier información adicional que se desee incluir, con una longitud máxima de 16 caracteres ASCII.

Figura 29. Configuración del Perfil de Aplicación ZigBee



Fuente: Shahin, Farahani, **ZigBee wireless networks and transceivers**, Pág. 112

El descriptor de nodo es una sección obligatoria entre las descripciones del dispositivo. La tabla IV expone el nombre de los campos que componen este descriptor, posteriormente se explica el significado de algunos de estos campos.

Tabla IV. Campos del Descriptor de Nodo

Nombre del Campo
Tipo lógico
Descriptor complejo.
Descriptor de usuario.
Reservado.
Bandera APS
Bandas de frecuencia.
Capacidad de la MAC.
Código del fabricante.
Tamaño máximo del búffer.
Transferencia máxima.
Máscara del servidor.

Centro de Seguridad Primario
 Centro de Seguridad de Respaldo
 Tabla relacional primaria.
 Tabla relacional de respaldo.
 Descubrimiento primario.
 Descubrimiento de respaldo.

Fuente: Shahin, Farahani, **ZigBee wireless networks and transceivers**, Pág. 114

- **Tipo lógico:** Define si se trata de un Coordinador, Enrutador o Dispositivo Terminal.
- **Descriptor complejo y de usuario:** Aquí se define si se trabajará con estos descriptores o no.
- **Bandera APS:** Determina las capacidades de la subcapa APS.
- **Bandas de frecuencia:** Especifica si se trabaja en la banda de 868 MHz., 915 MHz. ó 2.54 GHz.).
- **Código del fabricante:** Éste puede ser solicitado a la Alianza *ZigBee* y se incluye en este campo.
- **Tamaño máximo de búfer:** Especifica la longitud máxima de una unidad de datos de la APS (ASDU).

- **Transferencia máxima:** Especifica la longitud máxima que puede tener un mensaje transferido desde otro nodo.
- **Máscara del servidor:** Especifica las capacidades de servicio del dispositivo hacia otros dispositivos. Entre las posibilidades se tiene:
 - **Centro de seguridad:** El dispositivo es asignado como el encargado de la distribución de llaves de seguridad para aplicaciones de red y de configuración de administración.
 - **Tabla relacional:** Un dispositivo permite que otros dispositivos almacenen sus tablas de enlaces junto con la propia si tiene espacio disponible. Esto puede utilizarse como un sistema de respaldo ante la posible pérdida de datos. Los dispositivos podrán decidir entre conservar su propia tabla de enlaces o mantenerla en otro dispositivo.
 - **Descubrimiento:** Los dispositivos encargados del descubrimiento, Coordinadores o Enrutadores, almacenan los descriptores de otros dispositivos. Esto es útil al trabajar con dispositivos que permanecen adormecidos durante largo tiempo pues estos pueden almacenar sus descriptores en el dispositivo encargado del descubrimiento. Por lo tanto, si un dispositivo intentara obtener la información, a pesar de su condición inactiva, puede intentar recuperarla del dispositivo de descubrimiento.

El descriptor de la energía en el nodo es también una sección obligatoria entre las descripciones del dispositivo. La tabla V expone el nombre de los campos que componen este descriptor, posteriormente se explica el significado de algunos de estos campos.

Tabla V. Campos del Descriptor de Energía

Nombre del Campo	
Modo de energía.	<ul style="list-style-type: none"> 0000 El receptor encendido en inactividad. 0001 El receptor se enciende periódicamente. 0010 El receptor se enciende frente a un estímulo.
Fuentes de energía disponibles.	<ul style="list-style-type: none"> (bit 0) Energía principal. (bit 1) Batería recargable. (bit 2) Batería desechable.
Fuente de energía.	
Nivel de la fuente de energía	<ul style="list-style-type: none"> 0000 Crítico 0100 33% 1000 66% 1100 100%

Fuente: Shahin, Farahani, **ZigBee wireless networks and transceivers**, Pág. 115

- **Modo de energía:** Especifica si el receptor permanecerá encendido mientras el dispositivo está inactivo. También puede elegirse encenderlo de forma periódica o únicamente frente a algún estímulo especial.
- **Fuentes de energía disponible:** El dispositivo puede tener disponibilidad de acceso a varias fuentes distintas de energía, se especifica el tipo activando el bit respectivo.

La tabla VI muestra los campos correspondientes al descriptor simple, una sección también obligatoria entre las descripciones del dispositivo. De igual forma se describen luego algunos de los campos.

Tabla VI. Campos del Descriptor Simple

Nombre del Campo
Terminal
ID del perfil de la aplicación
ID del dispositivo
Versión del dispositivo
Reservado
Conteo de entrada al clúster
Lista de entrada al clúster
Conteo de salida al clúster
Lista de salida al clúster

Fuente: Shahin, Farahani, **ZigBee wireless networks and transceivers**, Pág. 114

- **Terminal:** Contiene la dirección de terminal del dispositivo en el nodo.
- **Versión del dispositivo:** La descripción del dispositivo puede variar con el tiempo, este campo especifica qué versión de la descripción del dispositivo es soportada.
- Todos los identificadores de clúster se incluyen en este descriptor. El proceso de **vinculación** hace referencia a la creación de enlaces lógicos entre aplicaciones relacionadas.

2.4.3 Objetos - Dispositivos de *ZigBee* (ZDO)

El ZDO es una interfaz entre la APS y el marco de aplicación. Es responsable de la iniciación de la APS, la NWK, y el Proveedor del Servicio de Seguridad (SSP). Existe un perfil definido para el ZDO, conocido como el Perfil del Dispositivo *ZigBee* (ZDP) o simplemente perfil de dispositivo. Este perfil contiene descripciones del dispositivo y el clúster. Los clúster se organizan en dos grupos: clúster obligatorios y clúster opcionales. Como su nombre lo indica, los clúster obligatorios deben incluirse en cualquier dispositivo *ZigBee*.

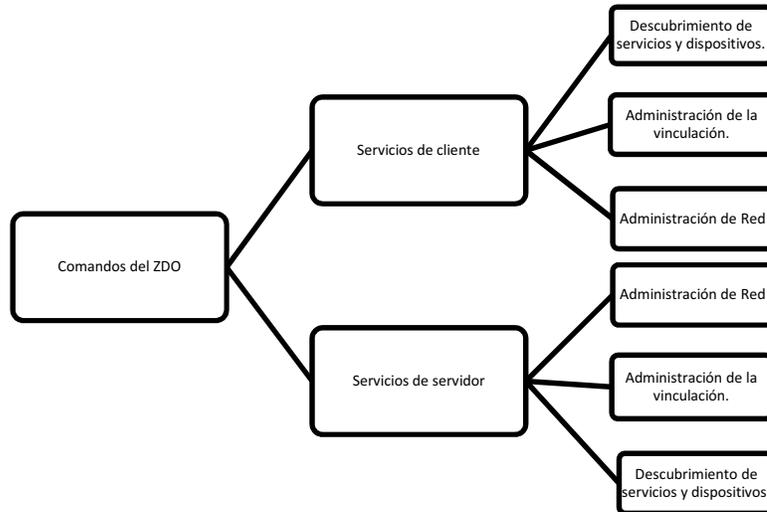
El perfil del dispositivo brinda soporte para el descubrimiento de dispositivos y servicios, administra también el proceso de vinculación. El descubrimiento de dispositivos hace referencia a la habilidad de determinar la identidad de los otros dispositivos en la red. El descubrimiento de servicios permite que un dispositivo le solicite a otro información detallada como su identificador de perfil o descriptores *ZigBee*. El dispositivo puede también solicitar un listado de los clúster de entrada y salida de otro dispositivo. Este

listado de clúster puede ser utilizado para asociar dispositivos durante el proceso de vinculación.

El perfil del dispositivo puede configurarse como un cliente y/o servidor. Un “cliente” (dispositivo local) es un dispositivo que solicita un servicio, el dispositivo que responde a la petición actúa como un “servidor” (dispositivo remoto). Los servicios que pueden ofrecerse se dividen en dos categorías: Servicios de Cliente y Servicios de Servidor. Ambos son presentados como comandos y presentan identificadores de clúster únicos.

Los comandos del ZDP son enviados utilizando el servicio de datos de la APS. La trama del comando presenta un esquema sencillo donde se especifican únicamente dos campos: el número de secuencia de la transacción y los datos de la transacción. Cualquier objeto de aplicación mantiene un contador que se incrementa cada vez que se transmite una nueva transacción. El contenido de este contador se copia en el campo de número de secuencia del comando ZDP. El campo de datos de la transacción contiene cualquier tipo de datos que se manejen, ya sean propios o de algún comando asociado. La figura 30 expone la división que se hace de los comandos manejados por el ZDO.

Figura 30. Organización Jerárquica de los Comandos del ZDO



Los comandos en estas tres últimas categorías conforman tres objetos del ZDO: el Objeto de Descubrimiento de Dispositivo y Servicio, el Objeto de Administración de la Vinculación y el Objeto de Administración de Red.

Los Comandos de Descubrimiento de Dispositivos y Servicios permiten que un dispositivo solicite información como dirección NWK y el listado de descriptores a otro dispositivo. También permiten que un dispositivo almacene sus propios descriptores en otro dispositivo con servicio de descubrimiento o bien configure el descriptor de usuario de otro dispositivo en la red. El Comando de Vinculación permite que un dispositivo cree o elimine relaciones de vinculación, almacene tablas de vinculación y cree archivos de respaldo para éstas. Los Comandos de Administración de Red se utilizan para identificar a las redes cercanas, solicitar el contenido de tablas de enrutamiento de dispositivos vecinos y administrar la asociación y abandono de dispositivos en la red.

2.4.4 Subcapa APS

Provee servicio de datos a los objetos de aplicación y ZDO a través de la Entidad de Datos de la APS (APSDE). La APSDE recibe datos que necesitan transmitirse en forma de Unidades de Datos del Protocolo (PDU). El APSDE agrega los encabezados apropiados al PDU a fin de crear una trama de datos de la APS, ésta será dirigida hacia la NWK.

La Entidad de Administración de la APS (APSME) contiene primitivas que ejecutan tres funciones: administración de vinculación, administración de la Base de Información de la APS (AIB) y administración de grupo. Las primitivas de vinculación permiten que la capa superior vincule o desvincule dos dispositivos creando o borrando una entrada en la tabla local de vinculación. Las primitivas de administración de grupo se utilizan para agregar (o remover) ciertos terminales de nodo en una tabla de grupo.

Como se había descrito, la transmisión de un mensaje puede hacerse por difusión, multidifusión o monodifusión. Sin embargo, la APS da soporte a otra forma de transmisión conocida como "Direccionamiento Indirecto". En éste un dispositivo con recursos limitados se relaciona con otro dispositivo en una red sin conocer la dirección del destinatario deseado. Las transmisiones por direccionamiento indirecto son iniciadas desde el Coordinador. Éste revisa la dirección remitente, dirección de terminal e identificador de clúster en su tabla de vinculación y retransmite el mensaje a cada dirección de terminal que encuentre.

Existen tres tipos de tramas en la APS: Datos, Comandos y Reconocimiento. La figura 31 muestra los campos incluidos dentro de una trama general de la APS, posteriormente se describen algunas de estas secciones.

Figura 31. Formato General de Trama de la APS

Trama de Control	Terminal Destino	Dirección de Grupo	ID de Clúster	Identificador de Perfil	Terminal Remitente	Dirección IEEE del Remitente	Contador APS	Carga útil
ENCABEZADO DE LA APS (NHR)								Carga útil de la APS

Fuente: Shahin, Farahani, **ZigBee wireless networks and transceivers**, Pág. 120

- **Trama de control:** Incluye el tipo de trama con que se trabaja. Aquí se indican las opciones de transmisión con que se cuenta, es decir, si se trata de difusión normal, monodifusión, multidifusión o direccionamiento de grupo. Si se va a trabajar con el direccionamiento indirecto, aquí es donde se especifica que la trama tiene como destinatario al Coordinador de la red.
- **Terminal destino:** Indica un único destinatario objetivo. Si este campo se incluye no se incluirá la dirección de grupo pues éste indica que el mensaje está intencionado a todo el grupo presente en la red.
- **ID de clúster:** El identificador de clúster está presente únicamente en una operación de vinculación y contiene el identificador de clúster que se utilizará en el procedimiento.
- **Contador APS:** Contador de 8 bits agregado a cada trama de la APS e incrementado cada vez que se transmite una nueva trama. Este contador ayuda al receptor de la trama en la identificación y eliminación de tramas duplicadas.

3. LA RED ZIGBEE

En este capítulo se hace una revisión a la configuración de una red *ZigBee*, centrando la atención en la constitución de los nodos, actores principales de la red. Se abarca desde la topología básica a los tipos de dispositivos que la componen, continuando con la configuración de los transreceptores hasta los mecanismos que se implementan en la red para la conservación de la energía y la ubicación de dispositivos.

3.1. Tipos de dispositivos

Como fue especificado en el primer capítulo, *ZigBee* trabaja con tres tipos de dispositivos o nodos en la red. El trabajo específico de cada uno de estos se ejemplifica haciendo referencia a la topología implementada en la red, descrita también a grandes rasgos en el primer capítulo.

El estándar *ZigBee* tiene capacidad para direccionar hasta 65535 nodos en una sola red, haciendo referencia únicamente a tres tipos de dispositivos:

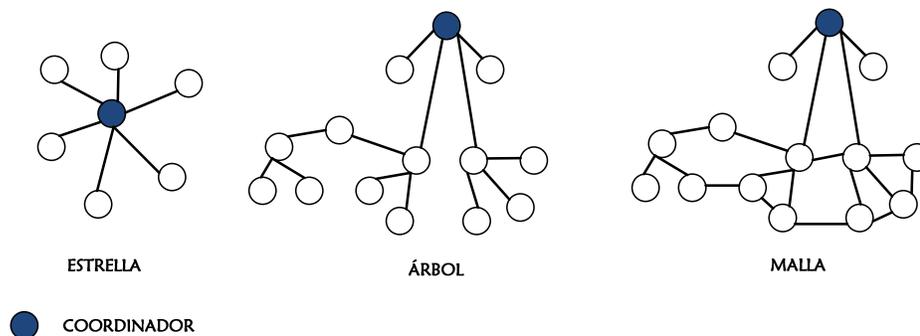
- Coordinador
- Enrutador
- Dispositivo Terminal

Estos roles existen a nivel de red, sin embargo, pueden desarrollar funciones distintas a nivel de aplicación sin que éstas tengan relación con sus funciones de red.

3.1.1. Coordinador

Todas las redes *ZigBee* deben tener solamente un Coordinador, independientemente de la topología de red implementada. En una red en estrella, el Coordinador es el nodo central de la red. En una red en árbol o malla, el Coordinador está en el nodo cúspide (o raíz) de la red.

Figura 32. Posición del nodo Coordinador en las Topologías de Red.



Fuente: Jennic, **ZigBee foundations**, Pág. 7

A nivel de red, el Coordinador es fundamental en la inicialización. Desempeña tres tareas.

- Selección el canal de frecuencia a utilizar en la red.
- Inicialización de la red.
- Evaluación de dispositivos que se unen y abandonan la red.

El Coordinador puede desempeñar funciones extras como enrutamiento de mensajes, administración de seguridad y otros servicios. Cuando el coordinador no se desempeñe como nodo de paso obligatorio en la entrega de mensajes o no tome decisiones de enrutamiento, la red podrá operar con normalidad si él falla o es apagado.

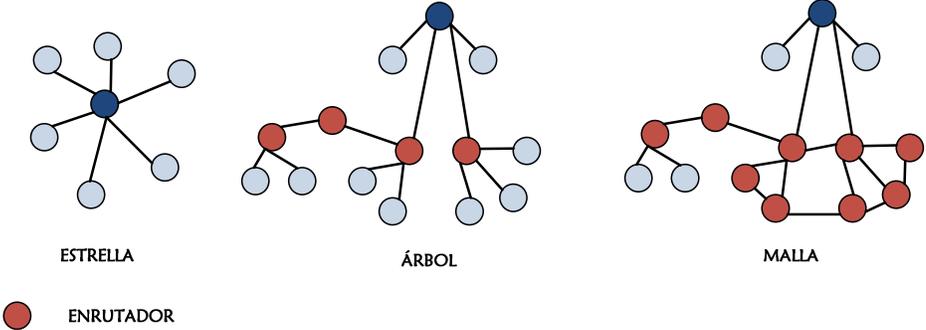
3.1.2. Enrutador

Las redes con topología de árbol o malla necesitan como mínimo uno de estos dispositivos. Presenta dos funciones principales.

- Traspasar mensajes de un nodo a otro.
- Permitir que nodos “hijos” se conecten a él.

En una topología en estrella estas funciones son manejadas por el Coordinador, por lo tanto no se necesita la inclusión de un Enrutador. En una topología de Árbol los enrutadores se ubican en sitios donde permitan que los mensajes pasen en doble vía (hacia arriba y debajo de la jerarquía del árbol) a través de la red. En la red en malla pueden ubicarse en cualquier punto donde sea necesario un nodo de paso. Sin embargo, cuando el Enrutador corra aplicaciones necesarias para un punto específico pueden ubicarse en cualquier lugar sin que cumpla su función de traspaso de mensajes. Los Enrutadores deben permanecer siempre activos en la red, en ellos no puede programarse un modo de operación adormecido.

Figura 33. Posición del nodo Enrutador en las distintas topologías de red.

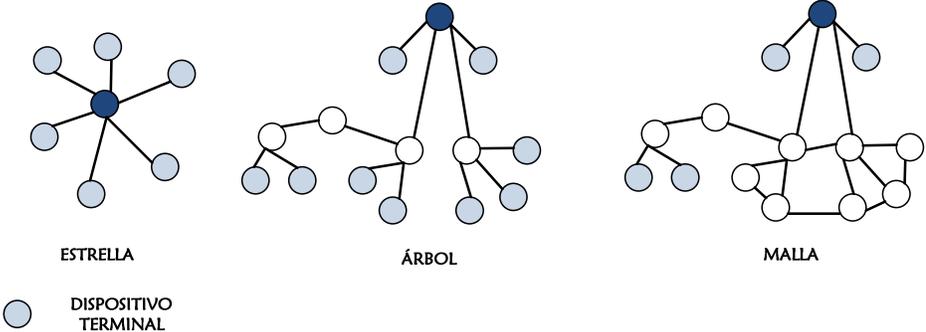


Fuente: Jennic, **ZigBee foundations**, Pág. 7

3.1.3. Dispositivo Terminal

Este tipo de dispositivo se coloca siempre a los extremos de las ramas de la red. En una red en estrella son los nodos perimetrales, en una red en árbol o malla son el equivalente a las hojas.

Figura 34 Posición de los Nodos Terminales en las Topologías de Red.



Fuente: Jennic, **ZigBee foundations**, Pág. 7

Sus tareas principales, a nivel de red, son el envío y recepción de mensajes. No pueden funcionar como nodos de paso a mensajes ni permitir que otros nodos se conecten a la red a través de ellos. Pueden ser alimentados por baterías y permanecer adormecidos en los intervalos temporales en que no procesen datos.

3.2. Topologías de Red

3.2.1 Topología en Estrella

Esta configuración es la topología más simple y limitada de las posibilidades para una red *ZigBee*. Está conformada por un Coordinador y un grupo de Dispositivos Terminales que pueden comunicarse únicamente con el Coordinador. Por lo tanto, para transmitir un mensaje de un terminal a otro el mensaje debe enviarse primero al Coordinador quien lo remitirá al destino pertinente. Un Enrutador puede utilizarse en lugar de un Dispositivo Terminal pero su funcionalidad característica en la entrega de paquetes no será implementada, sólo serán de importancia sus aplicaciones.

Entre las desventajas de esta topología está la inexistencia de una ruta alternativa para el canal RF si el enlace principal entre Coordinador y terminal falla. Otra desventaja la constituye el cuello de botella que puede desarrollarse si el Coordinador debe enviar muchos mensajes a distintos terminales.

Para implementar esta topología no es necesario utilizar la Capa de Red de *ZigBee* dado que la topología de red es dada por las capas del estándar IEEE 802.15.4. En este caso el programa de aplicación en el Coordinador será responsable del traspaso de mensajes. Sin embargo, si se implementa, la transmisión de mensajes será transparente a la aplicación principal.

3.2.2 Topología en Árbol

Configuración constituida por un Coordinador, en la cúspide jerárquica de la estructura, al que se conectan los demás nodos. Los nodos pueden ser un grupo de Enrutadores y sus hijos, los Dispositivos Terminales. Los Enrutadores pueden conectarse a otros grupos de Enrutadores y Terminales sucesivamente. A continuación se definen las reglas estructurales y terminología utilizada.

- El Coordinador y los Enrutadores pueden tener “hijos”, y se reconocidos como “padres”.
- Los Dispositivos Terminales no pueden tener hijos y no pueden ser padres.

Un hijo se puede comunicar directamente con su padre y únicamente con él, no puede tener comunicación con ningún otro nodo de la red. Un padre se puede comunicar directa y únicamente con su hijo y con su propio padre. En el envío de mensajes de un nodo a otro el mensaje debe partir desde el nodo fuente hacia arriba en el árbol, yendo hacia el ancestro común más cercano y luego hacia abajo del árbol al nodo destino. La propagación de un mensaje es manejada por la pila del protocolo y es transparente a la aplicación principal. Una desventaja de esta topología es que no existe ruta alternativa ante el fallo de un enlace necesario.

3.2.3 Topología en Malla

La estructura de la Red en Malla, o Red Punto-a-Punto, es similar a la topología en Árbol con el Coordinador en la cúspide de una estructura similar a un árbol. El coordinador está enlazado a un conjunto de Enrutadores y Dispositivos Terminales, sus hijos. Un Enrutador puede estar enlazado a más Enrutadores y Dispositivos Terminales, incrementando así sucesivamente el número de niveles. Las reglas de comunicación son más flexibles para los Enrutadores que tienen un amplio rango de acceso a otros Enrutadores y Terminales.

Con esta topología se logra una propagación más eficiente de mensajes bajo la implementación de rutas alternativas de transmisión que pueden encontrarse ante un posible fallo de los nodos de la red. Para posibilitar esta opción se incluyen mecanismos de “Descubrimiento de Rutas” que permiten elegir la ruta más eficiente de un grupo de posibilidades. La comunicación implementa mecanismos de “múltiple salto” donde los datos son traspasados a los nodos saltando de dispositivo en dispositivo a través de la ruta calificada como la más eficiente en calidad y costo. Al igual que en la topología de árbol, la propagación de un mensaje es manejada por la pila del protocolo, constituyendo un proceso transparente para la aplicación principal.

Esta topología se presenta como la más eficiente de las posibilidades, entre sus ventajas puede considerarse:

- Es una topología confiable y robusta. Si algún Enrutador se vuelve inaccesible se pueden descubrir y utilizar rutas alternas.

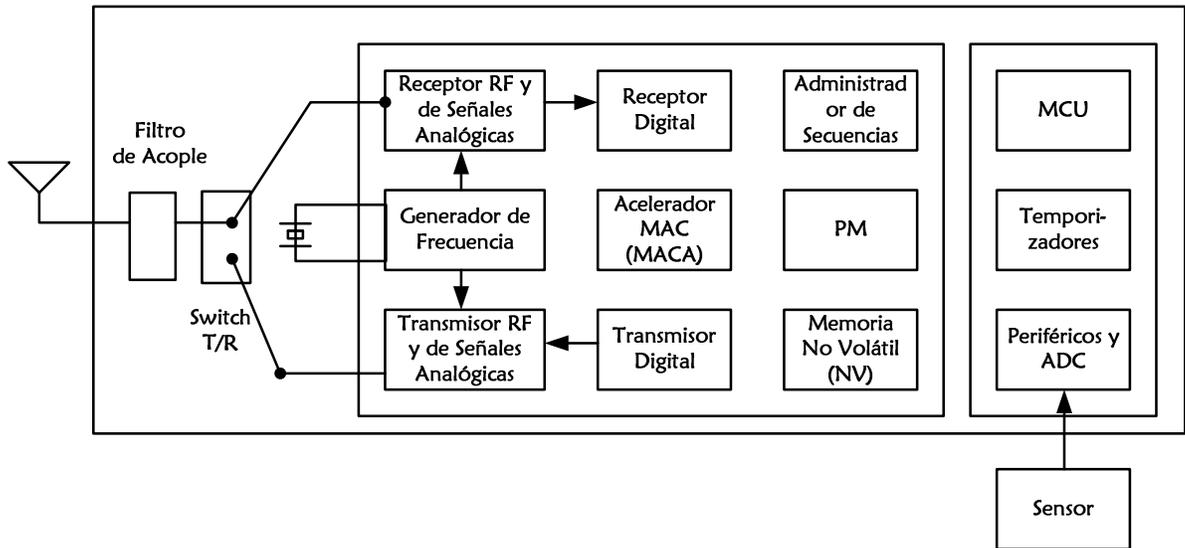
- El uso de dispositivos intermedios se traduce en un incremento posible para las dimensiones de la red.
- Se pueden eliminar las “zonas muertas” y con señal débil mediante la adición sencilla de más enrutadores a la red.

3.3 Transreceptor

La parte básica de una red sensorial es el nodo como tal, siendo éste el responsable de ejecutar tareas como la adquisición, procesamiento y almacenamiento de datos, comunicación con otros nodos, medición y actuación en función de las medidas, etc. Los nodos deben cumplir ciertos requisitos según la aplicación a la que estén destinados: deben ser pequeños, baratos, energéticamente eficientes, equipados con los sensores idóneos, recursos computacionales y de memoria necesarios, facilidades de comunicación, etc. Dado que en una red sensorial la comunicación se desarrolla en doble vía y se hace necesario que los elementos integrantes sean capaces tanto de recibir como de transmitir información, los nodos están constituidos por transreceptores, equipos que integran la doble funcionalidad para hacer posible la comunicación en la red.

Un transreceptor hace referencia al módulo de comunicación que hará posible la adquisición de datos, procesamiento de información y comunicación RF entre nodos de una red *ZigBee*. La figura 35 muestra la configuración básica, en diagrama de bloques, de un transreceptor característico del estándar IEEE 802.15.4.

Figura 35. Transreceptor del estándar IEEE 802.15.4



Fuente: Shahin, Farahani, **ZigBee wireless networks and transceivers**, Pág. 138

En el transreceptor, la “antena” funciona como transductor convirtiendo las ondas electromagnéticas a corrientes eléctricas y viceversa. El tipo de antena depende de la aplicación. La mayoría de las antenas utilizadas tendrán una impedancia característica de 50 Ohm. El uso de filtros de acople perfecciona el desempeño durante la recepción mejorando la sensibilidad del receptor, y durante la transmisión al restringir las emisiones al rango de frecuencias especificado. La transmisión y recepción no se hacen simultáneamente, así que la misma antena puede ser utilizada para ambos eventos, especificándose el modo de operación mediante un “interruptor T/R”. El “cristal” es utilizado como parte del circuito de temporización precisa y es externo al circuito integrado principal.

En el caso del receptor, los bloques de RF y bloques analógicos se encargan de amplificar la señal recibida, transportar la señal a una frecuencia

de portadora más pequeña y filtrar los componentes indeseables. El bloque digital del receptor demodulará la señal y recuperará la información binaria que es entregada a la Capa Física del protocolo. El “generador de frecuencia” será el responsable de proveer un reloj de referencia muy preciso cuando sea necesario y uno no tan rígido cuando se trabaje en modo de ahorro energético.

En el caso de operación en modo de transmisión, la sección digital convertirá los paquetes a señales moduladas. La porción de RF convierte, amplifica y filtra esta señal modulada hacia la salida con el nivel de potencia programado, asegurando que la potencia de la señal cumpla con las regulaciones de ley establecidas en la región de operación. El administrador de secuencias es el responsable de clasificar los eventos según prioridad coordinando la temporización y manteniendo un registro del estado del integrado. El UART (transmisor/receptor universal asíncrono), SPI (interfaz serial de periféricos) y GPIO (entradas y salidas de propósito general) son ejemplos de periféricos disponibles en un CI transreceptor característico.

Dado que estos transreceptores son construidos buscando un bajo consumo de corriente y un ciclo de trabajo reducido, la administración de energía tiene una estructura simple formada principalmente por reguladores de voltaje y convertidores de nivel. Los bloques de RF y las unidades digitales emplean reguladores independientes para eliminar el ruido que pueda generarse en los bloques digitales y altere la sección RF.

El “Acelerador MAC” (MACA) es una pieza física que provee controladores de bajo nivel para el enlace entre la Capa MAC y la Capa Física, puede incluir

búferes para la transmisión y recepción de paquetes. No es necesario implementar esta sección pero su presencia puede reducir la carga del procesador y permitir que algunas funciones se ejecuten independientes a éste. Los “temporizadores” son necesarios para implementar interrupciones en tiempo real. Usualmente se implementan varios temporizadores en un mismo transreceptor.

La “Memoria No Volátil” (NVM) retiene la información aún cuando el dispositivo se desconecte de la alimentación principal. Su contenido puede ser reescrito. A partir de estas características es posible apreciar que incluye características tanto de una RAM (Memoria de Acceso Directo) al permitir reescribir información, y de una ROM (Memoria de Sólo Lectura) por la permanencia de los datos.

La configuración y arquitectura específica de un transreceptor depende finalmente de la aplicación objetivo. Los transreceptores destinados a aplicaciones del estándar IEEE 802.15.4 deben ser de baratos y de bajo consumo energético como requisitos primordiales. En los siguientes incisos se incluirán las características básicas de operación de algunos bloques funcionales importantes en un transreceptor *ZigBee*.

3.3.1 Antena

Utilizada como elemento principal de la recepción y terminal en la transmisión de toda red inalámbrica, funciona como un transductor que

convierte corrientes eléctricas en ondas electromagnéticas y viceversa. Su estructura física puede ser variada en forma, tamaño, ganancia e impedancia. La selección depende de las características que se requieran para la aplicación objetivo. Algunas de las características principales hacen referencia a la ganancia, la eficiencia de la radiación y la transferencia de potencia, su impedancia, etc.

Una antena omnidireccional o isotrópica es aquella que emite una señal uniforme, con la misma potencia, en todas las direcciones. Una antena de este tipo es ideal y se utiliza como punto de referencia en el análisis de antenas prácticas. Una antena direccional es una antena real pues produce una señal de intensidad mayor en ciertas direcciones, aunque su potencia total radiada no puede ser nunca mayor a la potencia radiada por su antena isotrópica equivalente. La ganancia de una antena es descrita como la razón entre la potencia de radiación máxima que puede producir una antena direccional y la potencia que radia uniformemente una isotrópica, medida en dBi presenta el mismo valor tanto en recepción como en transmisión. La ganancia de la antena variará con la frecuencia de la señal a la que opere, por ello se diseñan o sintonizan a fin de que entreguen su máxima ganancia para una frecuencia específica o un grupo de frecuencias. Usualmente, la ganancia cae a frecuencias altas, esto es beneficioso pues las transmisiones suelen agregar interferencia a frecuencias altas, las cuales serán atenuadas.

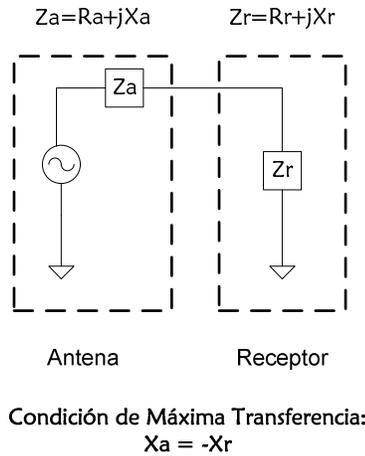
La eficiencia de radiación de la antena hace referencia a la razón entre la potencia de la señal que la antena transmite al espacio y la que recibe de su circuitería de transmisión. Este valor es equivalente al que se obtendría en modo de recepción, donde la relación correspondería a la razón entre la

potencia de la señal transmitida y la que la antena transmitiría a su circuitería de recepción.

La impedancia de la antena, o resistencia de radiación, se presenta como un parámetro de modelado que permitirá establecer un equivalente de dispositivos pasivos a este transductor. En muchos análisis la antena podrá ser reemplazada con una impedancia equivalente (usualmente un resistor de 50 ohm) conectada a tierra, obviándose así el análisis con los parámetros electromagnéticos de la transmisión o la recepción. La impedancia de la antena es otro parámetro que presentará el mismo valor tanto en transmisión como en recepción, además de ser también dependiente de la frecuencia de operación del sistema. Los fabricantes de transreceptores siempre especifican la impedancia de la antena que será óptima para operar con sus circuitos. Para los módulos del estándar IEEE 802.15.4 lo óptimo será trabajar con antenas que se encuentren en el rango de los 50 a los 200 Ohm.

Ligada a la impedancia de la antena se encuentra la eficiencia de transmisión de la antena, ésta establece la relación de transferencia entre la antena y el receptor. Esta potencia recibida será dependiente tanto de la antena como del circuito receptor, obedeciendo esta dependencia al “Teorema de Máxima Transferencia de Potencia” en que se establece que la transferencia de potencia será máxima si la impedancia de la antena, resistencia óhmica más reactancia, es igual al conjugado de la impedancia del circuito receptor. Esta potencia máxima que es posible recibir equivale al 50% de la potencia transmitida. La figura 36 hace referencia a la condición entre impedancias de antena y receptor para cumplir con la máxima transferencia de potencia.

Figura 36. Acople de Impedancias entre Antena y el Bloque Receptor



Fuente: www.upv.es/antenas/Tema_5/Tema_5.htm

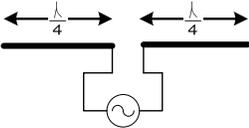
La impedancia de la antena depende de la forma y tamaño de ésta. La sintonización de una antena se refiere al proceso de cambiar la forma y tamaño de una antena a fin de ajustar su impedancia. El acoplamiento de una antena, es un proceso similar, pero en él se agregan elementos pasivos (resistencias, capacitores, inductores) en serie o paralelo a la estructura de la antena para que coincidan con lo óptimo descrito para los circuitos de recepción.

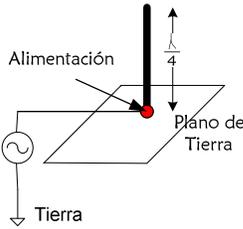
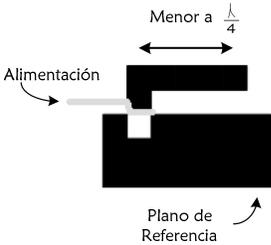
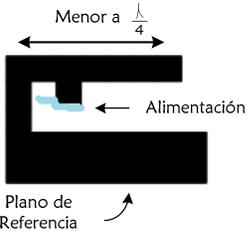
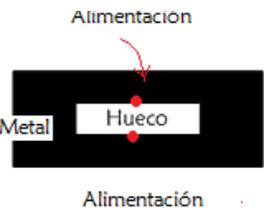
La polarización de una antena también debe ser tomada en consideración. Una onda electromagnética está conformada por un componente de campo eléctrico y un componente de campo magnético viajando por el espacio a la misma velocidad y en configuración ortogonal a la dirección en la que se propagan. La dirección que toma la componente del campo eléctrico es la que define la polaridad de la onda electromagnética. Existen tres tipos de polarización: circular, elíptica y lineal. En la polarización circular, la fase de la componente de campo eléctrico cambia con velocidad constante provocando que el campo eléctrico se desplace en una circunferencia. En la polarización

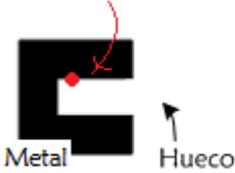
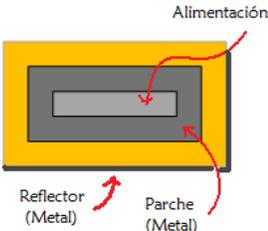
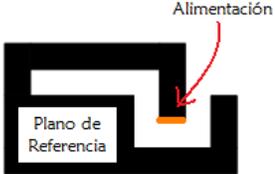
elíptica tanto la amplitud como la fase de la componente del campo eléctrico sufren variación y provocan que el campo rote de forma elíptica. En la polarización lineal el campo eléctrico se mueve a lo largo de una línea recta. La polarización inicial de una onda electromagnética depende de la forma en que es radiada por la antena emisora. El ambiente y los obstáculos que la onda pueda encontrar a su paso pueden provocar un cambio en su polarización. Lo ideal es implementar nodos transmisores y receptores con antenas de idéntica polarización, así si se está trabajando en un sitio con nodos transmitiendo y recibiendo a línea vista, se tendrá el máximo aprovechamiento de la potencia de la señal.

Son muchas las opciones de diseño de una antena, las aplicaciones deben estudiarse cuidadosamente a fin de elegir la idónea para el sistema. La tabla VII resume las posibles antenas a implementar en una red *ZigBee*, su diseño básico, ventajas y desventajas de operación.

Tabla VII. Tipos de Antenas

Tipo de Antena	Descripción
<p style="text-align: center;">Dipolo</p> 	<p>La más simple y de uso más difundido. Formada por dos alambres o dos líneas de cobre en una placa de circuito impreso. Cada sección tiene una longitud equivalente a un cuarto de la longitud de onda de la señal para la que está diseñada. En <i>ZigBee</i>, con señales en la banda ISM de 2.4 GHz., cada sección tendrá alrededor de 3 cm. En el plano XY tendrá un patrón de radiación cercano al de una antena isotrópica ideal. En el espacio tridimensional tendrá un patrón con forma de dona. Puede ser modelada con una resistencia de 73 Ohm. Si se implementa en un circuito impreso, su impedancia puede cambiar con el tipo de dieléctrico y la proximidad a la que esté del plano de tierra. Su impedancia puede ajustarse cambiando la forma o longitud de sus secciones.</p>

<p>Monopolo o Antena de Cuarto de Onda</p> 	<p>Equivalente a una antena de dipolo si se remueve una de sus secciones y en su lugar se coloca un plano conductor. El plano actúa como un “espejo” reflejando la sección posicionada sobre él en la parte inferior y creando características de propagación similares a las de la antena de dipolo en la parte superior del plano. No existirá propagación bajo el plano. La impedancia característica es de 36 Ohm, la mitad de la de la antena de dipolo.</p>
<p>Lineal Inclinada</p> 	<p>Es una línea de cobre en una placa de circuito impreso con una longitud menor a un cuarto de longitud de onda. Su longitud puede necesitar ajustes en función de su grosor y el dieléctrico que la rodee. A menor distancia entre ella y el plano de tierra disminuye la impedancia y la eficiencia de la antena. La distancia debe ser de por lo menos un décimo de la longitud de onda. Tiene polarización lineal y un patrón de radiación similar al de una antena omnidireccional, con una ganancia típica de -10 dBi.</p>
<p>“F” Invertida</p> 	<p>Comúnmente utilizada en aplicaciones del estándar IEEE 802.15.4 debido a su simplicidad, tamaño, eficiencia y patrón de radiación aproximadamente omnidireccional. Su impedancia se ajusta cambiando el punto de alimentación.</p>
<p>De Hendidura</p> 	<p>Se crea al realizar un orificio, con una longitud de aproximadamente media longitud de onda, en una hoja de metal. Sus características de propagación son similares a una antena dipolar. La impedancia es muy alta y puede ajustarse cambiando el punto de alimentación.</p>

	<p>Si se corta a la mitad se genera una antena de hendidura abierta, ésta tiene propiedades de propagación similares a la antena monopolo.</p>
<p style="text-align: center;">Parche</p> 	<p>De varias formas y tamaños, constituidas por un parche de metal colocado directamente sobre el plano de tierra. Su desventaja es el tamaño relativamente grande al compararse con los demás tipos de antenas. Su polarización puede ser circular o lineal. Se propaga sobre el plano de referencia y tiene una ganancia direccional muy alta.</p>
<p style="text-align: center;">Chip</p>	<p>Son antenas de superficie con ganancia aceptable y tamaño reducido. Su rango de operación es angosto y puede perder la sintonización a efecto de objetos cercanos.</p>
<p style="text-align: center;">De Lazo</p> 	<p>Existen dos versiones de ésta, la eléctricamente pequeña y la eléctricamente grande. Si la circunferencia total del lazo es menor a un décimo de la longitud de onda, se considera pequeña. Si el perímetro es cercano a la medida de la longitud de onda, se considera grande. La pequeña tiene un ancho de banda angosto y requiere sintonización para asegurar que la ganancia se maximice en la frecuencia de interés. Su ganancia es pequeña pero su patrón de radiación es casi omnidireccional, es difícil que pierda la sintonización.</p>

3.3.2 Unidad de Microcontrolador (MCU)

El microcontrolador es el núcleo de una red sensorial inalámbrica. Éste recolecta los datos de los sensores, los procesa, deciden cuándo y hacia dónde enviarlos, recibe datos de otros nodos sensoriales y decide el comportamiento de sus actuadores. Debe ejecutar varios programas, los cuales van desde aplicaciones críticas y dependientes del tiempo, hasta protocolos de comunicación y programas de aplicación; es la Unidad de Procesamiento Central del nodo. Varios dispositivos pueden funcionar como procesadores centrales en una red sensorial, sin embargo el mercado está liderado por los microcontroladores. Los microcontroladores son unidades de procesamiento más simples que los procesadores de propósito general usuales (no consumen toda la energía que estos toman del sistema) y pueden ser embebidos al mecanismo que controlan. Son más flexibles y su conexión con otros dispositivos es más sencilla, su conjunto de instrucciones está adaptado al procesamiento de señales en tiempo crítico, consumen menos energía, pueden entrar en períodos de adormecimiento (actividad limitada) y usualmente incluyen más registros de memoria.

Otra opción para implementar la unidad de procesamiento de la red es hacer uso de un DSP. El DSP, Procesador Digital de Señales, es un tipo de procesador programable especialmente diseñado, en arquitectura y conjunto de instrucciones, para procesar grandes cantidades de datos vectoriales, el formato común para las aplicaciones de procesamiento de señales. En un nodo de una red sensorial inalámbrica, el DSP puede utilizarse para procesar datos provenientes de un dispositivo analógico inalámbrico. Sin embargo, esta información ingresará siempre como una trama simple y la cantidad de

información será relativamente modesta, una red sensorial inalámbrica *ZigBee* no aprovechará todo el potencial que ofrece este procesador.

Otra opción son los FPGA (Compuerta de Arreglos Programables en el Campo) o los ASIC (Circuitos Integrados de Aplicación Específica). Los FPGA pueden ser reprogramados en el “campo”, como lo indica su nombre, pues se pueden adaptar a un conjunto dinámico (cambiante) de requisitos. Sin embargo, este mecanismo de reprogramación puede tomar mucho tiempo y drenará considerable cantidad de energía del sistema. El ASIC es un procesador especializado, diseñado según los requisitos establecidos por el solicitante para una aplicación específica. El resultado será un sistema energéticamente más eficiente y con un desempeño superior. El sistema resultante habrá perdido su flexibilidad en la reprogramación de los nodos y será más costoso en cuanto a equipo físico.

De las opciones presentadas, los microcontroladores continúan siendo la elección preferida. Los microcontroladores dan mayor flexibilidad a las aplicaciones y su uso es más sencillo.

3.3.3 Memoria

Es necesario implementar una Memoria de Acceso Aleatorio, RAM, para almacenar las lecturas inmediatas de los sensores, los paquetes provenientes de otros nodos, etc. La RAM es rápida, pero tiene la desventaja de perder su contenido si se interrumpe la alimentación. El código del programa se

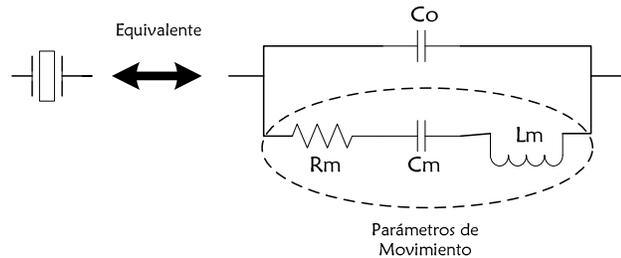
almacena en una ROM o la alternativa, una Memoria de Sólo Lectura Eléctricamente Borrable, EEPROM. También puede utilizarse, para esta última finalidad, una Memoria Flash. La memoria Flash puede servir también como una región intermedia de almacenamiento en caso de que la RAM no sea suficiente o su alimentación deba ser suspendida por algún tiempo. En los temas de consumo energético, rapidez de procesamiento y eficiencia de la red, deben tomarse en consideración las lecturas prolongadas o accesos de escritura retardados que se dan al utilizar una memoria Flash.

El dimensionamiento adecuado de los espacios de memoria, especialmente en la RAM, puede ser crucial con respecto a los costos de fabricación y consumo energético.

3.3.4 Cristal

Este elemento es la parte principal del circuito generador de pulsos de reloj, pudiendo ser interno o externo al procesador central del sistema. Es un dispositivo piezoeléctrico que produce vibraciones mecánicas siempre que se le aplica un voltaje a sus terminales de alimentación. La figura 37 muestra el equivalente con elementos pasivos de un cristal.

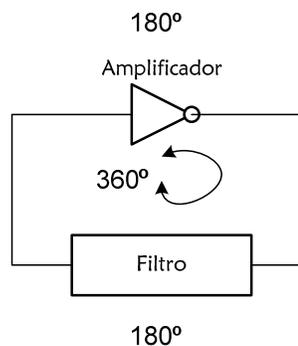
Figura 37. Equivalente eléctrico de un cristal piezoeléctrico



Fuente: Robert, Boylestad, **Teoría de circuitos y dispositivos electrónicos**, Pág. 847

En el diagrama, los elementos identificados como R_m , C_m y L_m constituyen los parámetros de movimiento del cristal. C_o es el Capacitor de Desviación y es útil para modelar la capacitancia parásita debida al empaquetado del cristal. La figura 38 representa el diagrama de bloques básico para un oscilador de cristal.

Figura 38. Diagrama de bloques de un oscilador de cristal



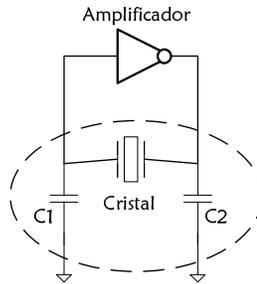
Fuente: Shahin, Farahani, **ZigBee wireless networks and transceivers**, Pág. 160

Los bloques funcionales principales son el amplificador y el filtro del sistema. Al inicio no existirá oscilación y la única entrada percibida por el amplificador será el ruido del circuito. El amplificador incrementa la potencia del

ruido y la entrega al filtro. El filtro tiene un ancho de banda muy angosto, altamente sintonizable, alrededor de la frecuencia nominal de oscilación para el cristal. La salida del filtro será entonces amplificada de nuevo hasta llegar a un punto en que la entrada del filtro será suficientemente alta como para sacar el amplificador de la región de operación lineal y reducir de nuevo su ganancia. Cuando el oscilador alcanza su estado estable, la ganancia de lazo será igual a la unidad. Para asegurar un sistema oscilatorio estable, el desfase total de la señal debe ser un múltiplo de 360° . Es por esto que el amplificador y el filtro se implementan ambos con una configuración inversora, dando cada uno un desfase de 180° a la señal.

La etapa de filtrado se genera utilizando un cristal que incluye dos capacitancias de carga, C_1 y C_2 , las cuales pueden incluir también la capacitancia del circuito impreso y las capacitancias parásitas de los contactos. Un cristal tiene dos frecuencias de resonancia: la frecuencia resonante en serie (f_s) y la frecuencia antiresonante (f_a). En f_s , la impedancia entre las dos terminales del cristal es mínima. Las reactancias C_m y L_m se cancelan mutuamente y el sistema tendrá sólo una impedancia resistiva. En f_a , L_m reacciona con todas las capacitancias cercanas al cristal incrementando la impedancia total entre las terminales de éste a un máximo. La frecuencia antiresonante, f_a , es un poco mayor a la frecuencia de resonancia serie, f_s . En la figura 39 se muestra la configuración del cristal y los capacitores agregados para implementar el filtro del sistema.

Figura 39. Oscilador de cristal con capacitores de carga.

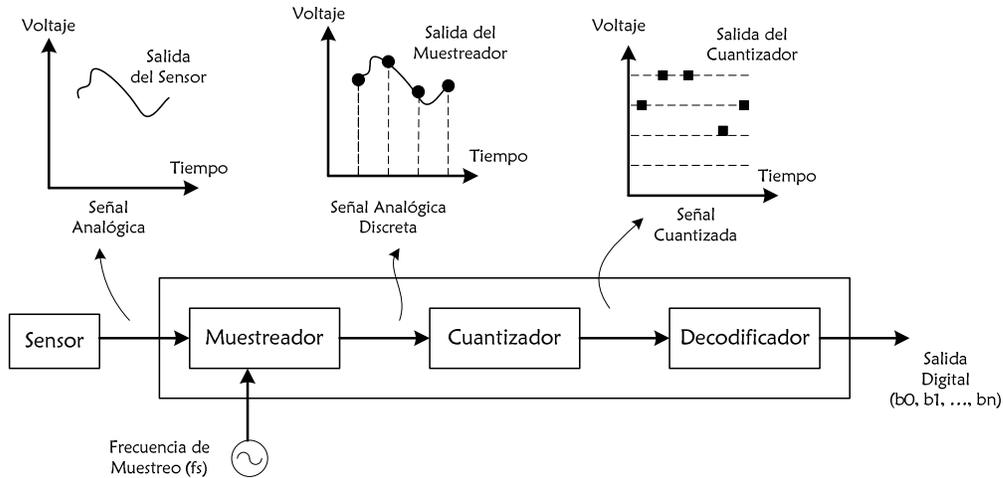


Fuente: Shahin, Farahani, **ZigBee wireless networks and transceivers**, Pág. 160

3.3.5 Convertidor Analógico Digital (ADC)

Este bloque funcional es el encargado de hacer la conversión de los valores de voltaje analógicos que se reciben a valores digitales, previo esto a la transmisión inalámbrica de la información. Los transreceptores desarrollados para el estándar IEEE 802.15.4 usualmente tienen integrado el ADC del sistema. El ADC puede leer la información proveniente de los sensores y colocarla en los registros de memoria, todo ello sin que sea necesaria la intervención del procesador central. La lectura y procesamiento de la información del sensor puede exigir un consumo energético grande, es por ello que se recomienda recabar la información necesaria mientras el resto del módulo está adormecido. La figura 40 muestra los bloques funcionales que incluye un ADC.

Figura 40. Diagrama de bloques de un ADC



El sensor genera una señal analógica, usualmente de frecuencia baja, que es entregada a un circuito muestreador. Éste tomará el valor de la señal analógica en momentos específicos, definidos por la frecuencia de muestreo del oscilador del sistema, y construirá una señal analógica discreta en el tiempo. El cuantizador se encargará de redondear cada valor al nivel cuantizado más cercano. El decodificador generará el equivalente digital para cada nivel de cuantización. El sistema puede requerir ajustes o acondicionamientos de la señal para trabajar apropiadamente. Por ejemplo, el voltaje entregado por el sensor puede requerir cierto tratamiento (de amplificación o reducción de nivel) para entrar en el rango de 0 V al voltaje definido como referencia. También puede requerirse filtrado para eliminar los componentes de la señal que estén fuera del rango de interés.

3.3.6 Sensores

Los sensores pueden categorizarse en tres grupos básicos. Los “Sensores Pasivos” u “Omnidireccionales” son aquellos que miden una cantidad física en el sitio en que se encuentra el nodo sensorial, sin realizar alguna manipulación del ambiente o realizar pruebas del mismo. Algunos de estos presentan alimentación alternativa, obtienen recargas energéticas del ambiente, necesitan la energía para amplificar la señal analógica que resulta de su medición. No tienen noción de la dirección. Ejemplos típicos de este tipo de sensores son los termómetros, sensores de luz, sensores de vibración, micrófonos, medidores de humedad y tensión mecánica, sensores químicos, detectores de humo, etc. Los “Sensores Pasivos de Cobertura Angosta” son aquellos que no interactúan con el ambiente al realizar las mediciones, pero tienen una noción bien definida de la dirección en la que tienen que trabajar. Ejemplo de este tipo de sensores son las cámaras. Los “Sensores Activos” son aquellos que realizan pruebas con el ambiente, por ejemplo, un sonar o algunos tipos de sensores sísmicos.

Hay disponibilidad de todos los sensores mencionados anteriormente. Deben tomarse en consideración su precisión, independencia, costo, tamaño, consumo energético, etc., antes de decidir implementarlos en una red sensorial. En la mayoría de redes del tipo aquí analizado se consideran sensores pasivos y omnidireccionales.

El área de cobertura de un sensor estima la distancia, entre sensor y evento a medir, a la que se tendrá una medición fiable y precisa. Para

determinar esta área de cobertura se genera un modelo de detección del sensor que relaciona la distancia entre el sensor y el evento u objeto a detectar con una probabilidad de detección. La razón de cambio de la medida con la distancia puede utilizarse para generar el modelo mencionado.

3.4 Control Energético

Los Dispositivos Terminales son los elementos *ZigBee* que pueden implementarse teniendo como alimentación principal una batería. La capacidad de las baterías puede ser medida en miliamperio x hora (mAH). En muchas redes sensoriales inalámbricas de corto alcance se maneja un consumo de corriente promedio bastante bajo, pero en determinados momentos la corriente instantánea consumida puede ser muy alta. Este pico momentáneo se da en los cortos instantes en que el dispositivo está activo y puede tener un efecto indeseable en el tiempo de vida de la batería si no existe suficiente tiempo entre los períodos de actividad que permitan que la batería se restablezca.

El fenómeno de relajación, o recuperación, describe cómo una batería puede terminar su vida útil aún cuando todavía tenga elementos activos en ella si es sometida a períodos sucesivos de descargas intensas (picos de corriente). Sin embargo, si estos ciclos de descargas son lo suficientemente espaciados y se intercalan con descargas de corriente menos críticas, se da oportunidad a que los materiales activos se restablezcan de la pérdida que tienen en los momentos de gran demanda de corriente.

Los picos de corriente pueden suavizarse utilizando un capacitor suficientemente grande que proveerá la corriente al transreceptor cuando esté en modo activo. Mientras el dispositivo está adormecido la batería cargará al capacitor, cuando entre en actividad y requiera un gran suministro de corriente le será entregada por el capacitor. De esta forma la batería no experimentará períodos críticos de descarga y su eficiencia tendrá mejoras.

Las baterías son descritas por una serie de parámetros que sirven de guía para la selección de la más eficiente en determinada actividad. Uno de estos parámetros es la “Capacidad Nominal”, descrita por los proveedores. Este parámetro hace referencia al uso en un escenario específico. A partir de la capacidad nominal y la capacidad real detectada en la aplicación se obtiene el “Factor de Eficiencia de la Batería”, descrito como una razón entre el valor real y el esperado de la capacidad de la misma. Otra característica de importancia es la razón de autodescarga. Una batería, aunque no esté en uso, pierde su capacidad inicial con el paso del tiempo dado a fugas internas. Los fabricantes describen este parámetro de fuga como la “Autodescarga Mensual”. El tiempo de almacenamiento de una batería es descrito como el intervalo temporal que puede permanecer almacenada hasta que su capacidad cae por debajo del 80% original.

El estado de las baterías puede ser monitoreado en función del incremento en su resistencia interna, inversamente proporcional a la reducción de su capacidad. A mayor resistencia interna, menor será el voltaje de la batería. Durante el modo activo, cuando se da la mayor demanda de corriente, esta caída de voltaje estará en su máximo. Por lo tanto, el voltaje remanente ante una gran exigencia de corriente es el indicador más sencillo de la

capacidad aún disponible de la batería. La lectura de este indicador puede hacerse con instrumentos usuales de laboratorio, o bien, implementando un ADC programado para realizar las lecturas en el momento preciso en que el dispositivo esté activo y la razón de descarga sea alta.

3.4.1 Cálculo del Tiempo de Vida de una Batería

El primer paso en el cálculo del tiempo de vida es el establecimiento del presupuesto de energía total en un escenario característico de una aplicación *ZigBee*. La tabla VIII describe una serie de actividades ejecutadas por un Dispositivo Terminal típico de una red *ZigBee*, asumiendo tiempos de ejecución hipotéticos para cada una a fin de determinar la capacidad total del sistema. En el Apéndice A del trabajo de investigación se incluye un programa de aplicación con el objetivo de calcular el tiempo de vida de las baterías en función de sus parámetros de construcción y las actividades que lleve a cabo el nodo que alimente.

TABLA VIII. Actividades de un Nodo Alimentado por Baterías.

Paso	Acción	Duración	Corriente Promedio	Energía (mAH)
1	Adormecido.	1 hora	1 uA	1.00×10^{-3}
2	Activación.	10 ms.	50 uA	1.39×10^{-7}
3	Captura, procesamiento y almacenamiento de datos.	1 ms.	5 mA	1.39×10^{-6}
4	Dispositivo en modo de recepción para ejecutar CCA.	700 us.	20 mA	3.89×10^{-6}
5	Transmisión.	550 us.	20 mA	3.06×10^{-6}
6	Espera acuse de recibo.	400 us.	20 mA	2.22×10^{-6}
7	Vuelve a dormir.			
Energía total del ciclo:				1.01×10^{-3}

La capacidad de la batería se calcula multiplicando el tiempo de duración de cada evento con su corriente promedio asociada. Según esta tabla el consumo de energía total es mayor en estado adormecido que en la serie de actividades restantes, significando esto que en aplicaciones con un ciclo de trabajo bastante bajo la corriente en estado adormecido tiene un impacto mayor en la capacidad total que las tareas ejecutadas en estado activo.

El segundo paso es la determinación de la eficiencia de la batería para una aplicación específica. Esto puede hacerse experimentalmente o indagando con el proveedor o fabricante de la batería. Usualmente se establecerá una capacidad nominal y un porcentaje de eficiencia para determinadas actividades, con estos datos se establecerá una capacidad real que será la utilizada en los cálculos referentes al tiempo de vida de la batería.

El efecto de fuga interna de la batería puede ser un factor determinante en aplicaciones con ciclos de trabajo reducidos, dado que el monto total de capacidad según el porcentaje de fuga establecido puede ser mayor al consumo real durante el desarrollo de las aplicaciones. Por lo tanto, este elemento puede considerarse como el tercer elemento de importancia para el tiempo de vida de la batería. Finalmente, en la determinación del tiempo de vida de una batería, lo más apegado a la realidad será dividir la capacidad actual entre el consumo total del dispositivo por uso y por fugas internas.

3.4.2 Técnicas de Reducción de Consumo

Básicamente se pueden considerar tres métodos para reducir el consumo energético en una red inalámbrica.

1. Selección de equipo de mejor calidad.
2. Mejorar la eficiencia de operación de la red.
3. Implementar un enrutamiento eficiente.

3.4.2.1 Consideraciones para la Selección de Equipo

El transreceptor consumirá cierta corriente tanto en modo activo como en modo adormecido, ambos son factores que impactan directamente la vida de la batería. Los elementos nodales de una red *ZigBee*, operando principalmente como Dispositivos Terminales, funcionan con una “Administración Dinámica de Energía” (ADE) al poder trabajar en distintos modos de operación. Esto permite activar únicamente los circuitos requeridos en determinada tarea, separando los períodos de operación de las secciones dedicadas a la adquisición, procesamiento y transmisión de datos independientemente.

Cuando se trabaja con aplicaciones sencillas el microcontrolador del transreceptor tiene un consumo energético de poca influencia para el consumo total. Sin embargo, cuando se hace necesario que éste desarrolle procesos algorítmicos más complejos, se puede convertir en un consumidor importante de energía del sistema. La energía que este consume es proporcional al

producto entre el voltaje administrado al integrado (V), y la frecuencia de reloj del sistema (f):

$$\text{Consumo energético del MCU} = k * f * V^2$$

“k” es la constante de proporcionalidad de la relación.

El efecto podría limitarse reduciendo la frecuencia del reloj o el voltaje aplicado al integrado. Sin embargo, la reducción de cualquiera de estos dos trae implícita la reducción del otro por efectos naturales. Reducir el voltaje de alimentación reduce el rango de frecuencia que maneja el dispositivo CMOS que conforma el microcontrolador. En este tipo de integrados, la frecuencia máxima de operación es dependiente del voltaje. Disminuir la frecuencia de operación provocará un retraso en el desempeño de tareas que necesitarán más tiempo para desarrollarse. Este retraso puede considerarse poco relevante en redes sensoriales inalámbricas de este tipo, es decir, que trabajan con ciclos activos reducidos y una tasa de transferencia baja. El control de esta pareja de parámetros (voltaje y frecuencia) constituye el “Escalado Dinámico de Voltaje y Frecuencia”, un mecanismo de autoajuste en que la frecuencia y el voltaje de alimentación se establecen en función de la demanda del sistema.

El anterior mecanismo no puede ser implementado en redes que trabajan con tramas guía que necesitan temporización precisa para que el terminal se active justo antes de que llegue la trama. Si no se utiliza un reloj de precisión (oscilador de cristal) se provocará cierta incerteza en el momento esperado para la recepción. Los errores de temporización pueden acumularse alterando la sincronización general de la red, además de provocar consumos energéticos innecesarios al desperdiciar la capacidad generada para el período de ajuste en que el transreceptor se encuentra en espera de la trama. Un nodo debe

mantenerse adormecido la mayor parte del tiempo, la frecuencia a la que entre en actividad dependerá de la aplicación a la que esté destinado. La corriente consumida en el período de ajuste puede ser baja, pero si el período de inicialización es muy largo, la energía consumida puede ser determinante para el tiempo de vida de la batería.

El consumo energético de un nodo puede mejorarse considerando el tipo de comunicación que mantendrá con sus vecinos. Si el nodo está ubicado en un sitio en que todas sus comunicaciones se dan en una sola dirección, lo mejor es dotarlo de una antena direccional de gran ganancia que permitirá, al transmisor, reducir su consumo de corriente mientras mantiene constante la potencia de salida en la dirección deseada. Esto se debe a que la energía consumida por el amplificador de potencia, ubicado en la última etapa del transmisor, se incrementa con la cantidad de potencia que entrega a la antena. Si ésta tiene ganancia positiva, se reduce la cantidad exigida al amplificador de potencia quien también minimiza su consumo. Una antena direccional también mejora el nivel de sensibilidad incrementando las probabilidades de una transmisión/recepción exitosa.

Una alternativa para los Dispositivos Terminales de este tipo de redes sensoriales es la recolección de energía proveniente de fuentes externas a la red (calor, luz, movimiento, etc.). La capacidad de obtener energía de una segunda fuente puede ser de ayuda en la lucha por prolongar el tiempo de vida de la batería. Sin embargo, implementar un sistema de este tipo incrementa los costos del equipo y no siempre se tendrá certeza de que la fuente elegida como proveedora alternativa estará presente, el ambiente es impredecible. Esto no

será relevante si se tiene como una alimentación de respaldo para el sistema, donde su función principal será la compensación de lo consumido por la batería.

3.4.2.2 Eficiencia de Operación de la Red

La simplificación del protocolo de red puede reducir el número de operaciones que un dispositivo necesita realizar para establecer enlaces con otros nodos. Tanto el mecanismo de enrutamiento y el costo de enlace pueden influir en la eficiencia de operación de la red. La selección de ambos parámetros responde a la aplicación objetivo.

Cuando un dispositivo se encuentra transmitiendo datos, el consumo energético total a considerar es el necesario para lograr una transmisión exitosa (se dejan de considerar sólo las demandas instantáneas de energía). Cada transmisión exitosa se define como el número de bits útiles (carga útil del paquete) que son transmitidos por segundo, sin considerar el encabezado, las retransmisiones y el preámbulo. Puede ocurrir que la carga útil sea muy pequeña en comparación del resto de la trama, siendo mayor el tiempo y consumo de energía que se invierte en la transmisión de las secciones restantes durante el modo activo. La energía de cada transmisión exitosa, medida en Joules por bit (J_{pb}) puede ser utilizada como parámetro de comparación entre distintas configuraciones de red, siempre y cuando se aplique al mismo tipo de aplicaciones.

$$J_{pb} = \frac{\text{Energía Promedio Consumida (W)}}{\text{Transmisión exitosa (bps)}}$$

Según las condiciones ambientales puede que se necesiten muchos intentos de retransmisión para un paquete, en este caso el contenido de las transmisiones exitosas permanecerá igual, pero la energía requerida para cada transmisión crecerá casi proporcionalmente al número de intentos que se hagan.

Si se trata de un medio transitado por múltiples señales, un aumento en la potencia de las transmisiones RF equivale a generar una relación señal a ruido mayor en el receptor, mejorando la razón de error del paquete, PER (*Packet Error Rate*). Un método útil para ahorrar energía en estas condiciones es el ajuste la potencia de transmisión según la longitud del paquete a transmitir. Para una razón de error de bit, BER (*Bit Error Rate*), dada, un paquete más grande tiene mayores probabilidades de error si se compara con un paquete de menor longitud. Este control proporcional de potencia y longitud de paquete mejorará el PER y reducirá el número de intentos requeridos para entregar exitosamente un paquete. Cuando se trabaja en un ambiente propenso al desvanecimiento el aumento de la potencia de transmisión no genera ningún efecto significativo. En este caso deberán considerarse distintos tipos de antenas con patrones de radiación específicos.

Si se tiene conocimiento de la ubicación física de los dispositivos, la potencia de las transmisiones puede ajustarse para optimizar el tiempo de vida de la batería según la distancia física entre transmisor y receptor. Es importante considerar, en este caso, que las condiciones del enlace pueden variar haciendo necesario el ajuste periódico de las características de transmisión. Se trata de una relación de concesión entre la potencia RF de transmisión y el consumo de potencia total. Al reducir la potencia se reduce el

consumo instantáneo de energía, pero si la potencia se vuelve muy pequeña los paquetes pueden requerir múltiples retransmisiones antes de recibir un acuse de recibo.

La existencia de nodos escondidos y nodos expuestos es otro factor que afecta el tiempo de vida de las baterías en la red. Para un nodo escondido los paquetes que transmita serán objeto de colisiones constantes con paquetes de otros nodos, esto provocará una retransmisión continua de las tramas. Cuando se trata de nodos expuestos se hace innecesario desarrollar el CCA que sólo provocará consumo energético de la batería. Estos casos pueden ser compensados cambiando la ubicación de los nodos, ajustando su potencia de salida, utilizando antenas direccionales o implementando métodos de enrutamiento energéticamente más eficientes.

3.4.2.3 Enrutamiento Eficiente

Es importante considerar que el “Tiempo de Vida” de una red se define en función de la aplicación para la que ésta esté destinada, dependiendo de esta definición el método que se implemente para buscar su eficiencia. En algunas ocasiones se define como el intervalo de tiempo comprendido desde el establecimiento de la red hasta el momento en que falla el primer nodo debido a la descarga de la batería. Puede definirse también como el total de veces que se puede desarrollar cierta tarea sin que ningún nodo se quede sin energía. Es usual considerarlo también como el momento en que la energía remanente promedio en toda la red es más crítica que aquella en cualquier nodo.

Cuando solamente importa el consumo energético total, un método de enrutamiento que minimice la energía total consumida para direccionar cada paquete será la elección correcta. En redes constituidas por Enrutadores alimentados principalmente por baterías el enrutamiento efectivo puede prolongar el período de vida de éstas. Sin embargo, al trabajar con una red en la que todos los Enrutadores están conectados a la alimentación principal, no será necesario buscar rutas eficientes energéticamente, pudiéndose concentrar la atención en otros parámetros que intervengan en el consumo total.

La capa de Red del estándar *ZigBee* implementa un procedimiento de descubrimiento de ruta que puede ser configurado por el usuario en la capa de aplicación, esto puede hacerse estableciendo un presupuesto de enlace que sea función de información referente a la calidad de enlace, distancia entre nodos y estado de la batería en cada nodo. Los mecanismos no son perfectos y su desempeño es función del escenario, por lo tanto, si se tiene una red en un ambiente dinámico quizá sea necesario modificar el método de selección de ruta con el paso del tiempo, siempre teniendo en mente que el objetivo del enrutamiento eficiente es prolongar el tiempo de vida mientras se mantiene una calidad de enlace relativamente alta con períodos de latencia reducidos. A continuación se describen algunos de estos métodos.

a. Enrutamiento Basado en el Estado de la Batería

Según la estructura de la red puede que algunos nodos participen constantemente en la comunicación de paquetes, mientras otros lo hacen remotamente. Los nodos de participación rutinaria drenarán su capacidad energética con mayor rapidez que aquellos de un protagonismo menor.

Los nodos contienen un descriptor de energía que contiene información sobre el estado de la batería, es este dato el que puede tomarse en consideración para determinar el presupuesto energético en el establecimiento de rutas. El objetivo será entonces establecer un costo de enlace alto para aquellos que tienen una capacidad energética disponible menor, direccionando de esta forma los paquetes hacia nodos alimentados por baterías con mayor disponibilidad energética. El resultado de esta forma de direccionamiento será una red con un desgaste uniforme en su distribución.

El descriptor de energía mencionado contiene información referente al tipo de alimentación que maneja el nodo. Si un dispositivo presenta respaldo energético recargable se tendrá en cuenta como parte del presupuesto energético del mismo. El nodo de preferencia para el enrutamiento es aquel conectado a la alimentación principal de energía pues no sufrirá de un desgaste que imposibilite su funcionamiento (idealmente). Aún así, esto creará conflicto pues los nodos intermedios al punto de generación del mensaje con el nodo conectado a la alimentación general sufrirán un drenaje de energía superior, pudiendo quedar deshabilitados y dividiendo la red en dos secciones.

b. Enrutamiento Basado en la Ubicación del Nodo

La información referente a la ubicación física de un nodo puede utilizarse como parte del proceso de descubrimiento de ruta para mejorar la eficiencia del desempeño total de la red y el control del tráfico. Conocer la ubicación del próximo nodo ayuda al remitente en el ajuste de su potencia RF de transmisión y el establecimiento del progreso hecho hacia el destino final. La consideración de estos factores, junto con el LQI y la capacidad remanente en la batería, podría mejorar considerablemente el consumo energético del sistema.

c. Utilización de una Antena Direccional

Las antenas direccionales pueden mejorar la administración energética de los nodos. Una antena direccional es una antena que tiene una alta ganancia en una dirección específica, su dirección puede ser ajustada electrónicamente. El efecto total puede mejorarse implementando varias antenas direccionales de patrones de radiación característicos y dirigiéndolas hacia múltiples direcciones, se utilizará una antena a la vez, según el nodo que se designe como destino.

La ganancia de las antenas ayuda a reducir el consumo energético y la interferencia, características que a su vez disminuirán el número de intentos requeridos para transmitir exitosamente un paquete y prolongar el tiempo de vida de la red. Sin embargo, la desventaja, radica en la complejidad agregada a la red.

3.5 Ubicación de Nodos

La “Estimación de la Ubicación” hace referencia a los procesos para obtener la posición de un nodo con respecto a otros nodos de referencia. Contar con una red sensorial que incluya esta actividad permitirá integrar servicios dependientes de la localización de los nodos y habilitará una red más segura que autenticará paquetes no sólo basándose en la información que transporten, sino también en el reconocimiento del nodo que lo genera. En conclusión, mejorará la eficiencia de la administración del sistema. Estos sistemas de estimación de ubicación se conocen como LPS, Sistema de Posicionamiento Local.

El estándar IEEE 802.15.4 puede hacer uso de tres métodos distintos para estimar la ubicación de los nodos presentes en su red.

1. Estimación con el RSS, potencia de la señal recibida (*Received Signal Strength*).
2. Estimación a través del ángulo de recepción.
3. Estimación según el tiempo de llegada de la señal.

Para el caso de redes *ZigBee*, el método referente a la estimación del RSS es el que presenta más factibilidad dado que no se necesita implementar equipo nuevo y es más sencillo en su configuración. Son varios los criterios a tomar en consideración para el desarrollo del algoritmo de determinación de la ubicación, entre estos se consideran:

- La precisión de la posición, referente a la diferencia entre la distancia real y la distancia medida. En las redes *ZigBee*, dada la naturaleza de las aplicaciones, no se requiere una precisión muy alta de las mediciones.
- El tiempo que se invertirá en la determinación de la ubicación, éste puede variar del estimado debido a que se pueden requerir varios intentos para tener acceso al canal. Esto no constituirá un problema grave cuando se trabaja con elementos de movimiento lento y actividad reducida.
- El desempeño de cobertura, el cual especifica la extensión física máxima que una LPS puede considerar para ubicar exitosamente sus nodos.
- La escalabilidad, determina qué tan efectiva es la respuesta de un algoritmo al incremento en el número de nodos de la red.

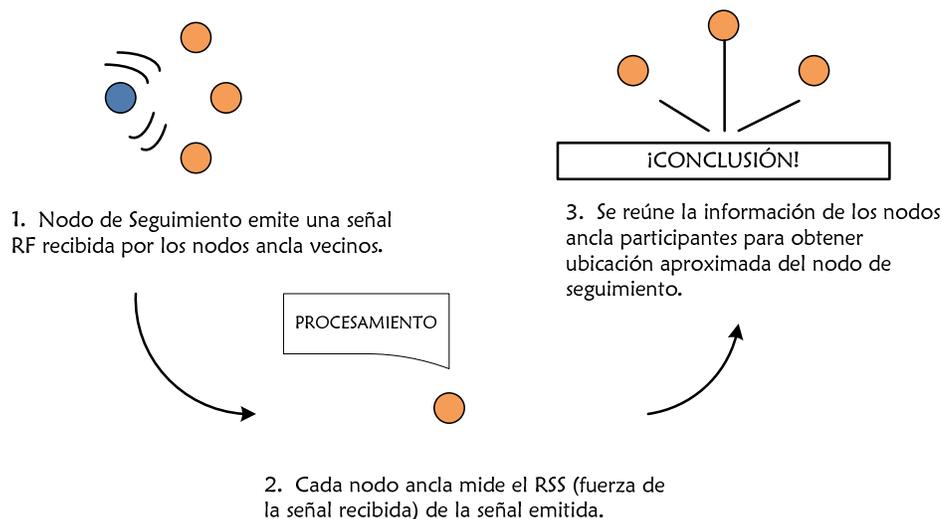
La rigurosidad que se tendrá en la consideración de estas métricas es función de la aplicación objetivo. En las redes *ZigBee*, las aplicaciones son baratas, los nodos tienen una habilidad computacional restringida y el espacio

de memoria de los nodos es reducido, en conclusión, no están destinadas a algoritmos computacionales complejos.

En los mecanismos de determinación de la posición se trabajará con dos grupos de nodos: los “Nodos Ancla”, funcionan como referencia pues su posición es conocida, a partir de ellos se determinará la posición de los demás; y los “Nodos Móviles” o “Nodos de Seguimiento” que tienen ubicación desconocida y por determinar. Con esta definición, puede decirse que el objetivo de los algoritmos para la determinación de la ubicación es calcular la posición de los nodos de seguimiento según la referencia dada por los nodos ancla. El sistema debe ser capaz de continuar funcionando aún cuando sean inhabilitados algunos nodos de referencia, debe ser tolerante a fallos.

La figura 41 hace referencia al procedimiento básico que debe ejecutarse para iniciar y finalizar exitosamente el método de RSS para la determinación de la posición.

Figura 41. Algoritmo de Posición basado en el RSS.



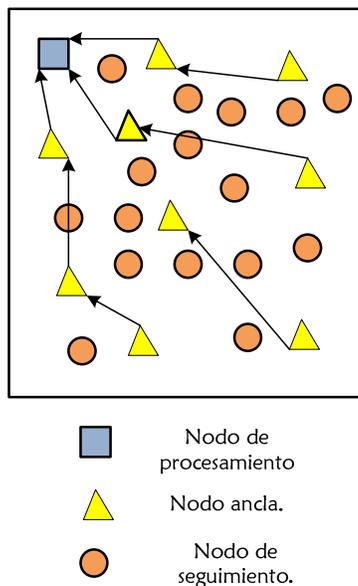
3.5.1 Escenarios de Ubicación

La configuración de una red *ZigBee* puede clasificarse en tres escenarios distintos en función de la cantidad de nodos ancla que implemente y la forma en que se recabará y considerará la información concerniente al nivel de RSS.

3.5.1.1 Escenario Centralizado

Este escenario está destinado a implementarse en redes pequeñas que manejen una tasa de actualización baja. La figura 42 explica la configuración básica de un ambiente de este tipo.

Figura 42. Escenario centralizado.



Fuente: Shahin, Farahani, **ZigBee wireless networks and transceivers**, Pág. 228

En este escenario se tendrá un nodo central de procesamiento encargado de ejecutar el algoritmo de estimación de la ubicación. El nodo central calculará la posición aproximada de los nodos de seguimiento y la informará a cada uno de estos cuando le soliciten el dato. Los nodos ancla no participan en el desarrollo del algoritmo, se encargan únicamente de reunir la información útil al trabajo del nodo central.

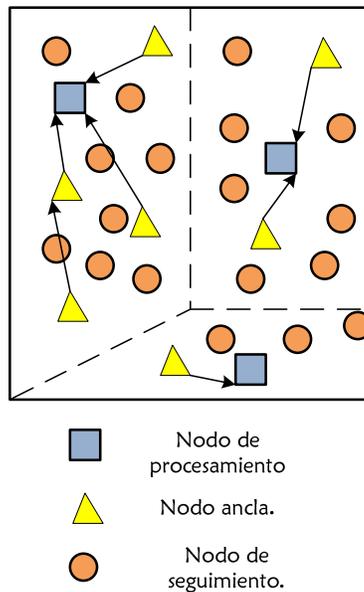
La ventaja obvia de esta configuración es la reducción de las capacidades requeridas a cada uno de los nodos, las exigencias de procesamiento serán hechas al nodo central, pudiéndose mantener simple la estructura de los nodos restantes. Las desventajas radican en el gran nivel de tráfico que se manejará y los periodos prolongados de inactividad que puedan provocarse, esto se debe a que todos los nodos deberán comunicarse con un solo nodo en la red. El tráfico experimentará la formación de un cuello de botella y el sistema completo tendrá problemas para actualizarse, con esto la métrica más afectada será la referente a la escalabilidad de la red. Otro problema puede darse a nivel de consumo energético, pues los nodos trabajando como enrutadores intermedios estarán constantemente pasando mensajes, y sus baterías se drenarán con mayor rapidez.

3.5.1.2 Escenario Seccionado

El objetivo de esta configuración es superar el cuello de botella generado con un escenario centralizado. Básicamente, la red se divide en secciones. En cada una de éstas se ubica un nodo capaz de ejecutar el algoritmo de ubicación

y determinar la posición dentro de la sección de trabajo. La figura 43 representanta la configuración del ambiente descrito.

Figura 43. Escenario seccionado.

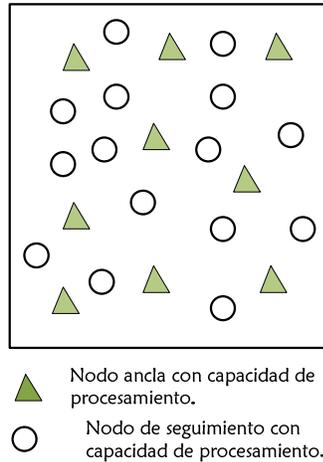


Fuente: Shahin, Farahani, **ZigBee wireless networks and transceivers**, Pág. 228

3.5.1.3 Escenario Distribuido

En este caso, las tareas de ubicación se dividirán entre todos los nodos integrantes de la red. No se cuenta con un nodo central que determine la ubicación, cada uno determina su propia posición interactuando con los nodos (ancla y de seguimiento) de los alrededores. En este caso todos los nodos deberán cumplir con ciertos requisitos físicos que habiliten su capacidad para procesar algoritmos computacionales más complejos. La figura 44 ejemplifica la configuración descrita.

Figura 44. Escenario distribuido



Fuente: Shahin, Farahani, **ZigBee wireless networks and transceivers**, Pág. 228

La implementación de un escenario como éste es ventajosa dado que el tráfico de paquetes se vuelve uniforme y la escalabilidad de la red se ve muy favorecida. Sin embargo, el problema radica en la complejidad algorítmica que deberá ejecutar cada nodo, algo no contemplado en una red de equipo relativamente sencillo como *ZigBee*.

3.5.2 Algoritmos Basados en el RSS

El RSS puede ser medido para cada paquete que se transmita en la red, siendo cuantizado a partir del RSSI (Indicador de Potencia de la Señal Recibida). Tanto el RSSI como el tiempo que tarda en llegar un paquete, son datos que quedan a disponibilidad de la MAC, la NWK y la APL. *ZigBee* elige implementar sus algoritmos de determinación de la ubicación según el RSSI pues se puede proveer un servicio sin agregar equipo extra.

Los parámetros que intervienen en la determinación del RSSI son:

- **Rango Dinámico (dB):** Mayor y menor medida que el receptor es capaz de medir.
- **Precisión:** Error promedio asociado con cada medida, lo típico es ± 4 dB.
- **Linealidad:** Desviación máxima de la potencia recibida respecto a una recta que es proporcional a la entrada.
- **Intervalo de promediado:** Número de bits que se manejan por medición, generalmente 8 símbolos.

Para el desarrollo del método, lo más sencillo es solicitarle a un nodo de seguimiento que emita una señal RF. La posición del nodo de referencia (nodo ancla) que reporte el nivel más alto del RSSI proporcionará la ubicación, coincidente con la propia del nodo de seguimiento en cuestión. La ubicación es aproximada. Este método es el de usual implementación en redes de bajo costo, alimentadas por baterías, de baja capacidad de memoria y procesamiento. En este caso, la precisión del sistema logra incrementarse integrando más nodos de referencia a la red.

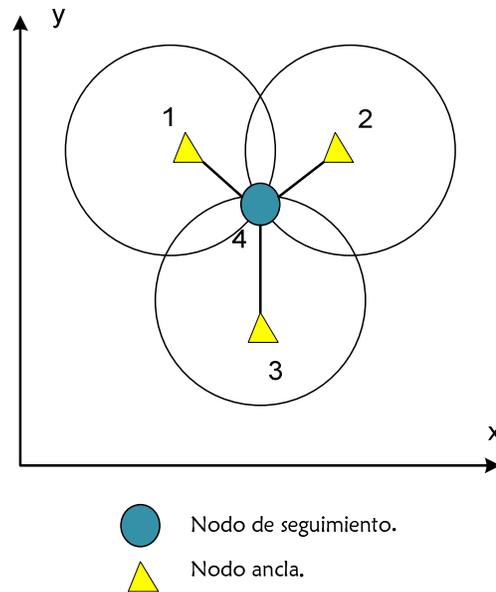
A continuación se describen los algoritmos que se pueden implementar en una red que se basa en los niveles de RSS para la determinación de la posición de sus nodos móviles.

3.5.2.1 Triangularización RSS

Se trata de un algoritmo a implementar en espacios abiertos, donde las probabilidades de enlace a línea vista son bastante altas y existen bajos efectos

de reflexión de la señal debido a múltiples trayectorias de la misma. La figura 45 describe el mecanismo.

Figura 45. Triangularización RSS



Fuente: Shahin, Farahani, **ZigBee wireless networks and transceivers**, Pág. 231

Como logra apreciarse en la gráfica, los elementos disponibles en este caso son tres nodos ancla o de referencia (nodo 1, nodo 2, nodo 3) y un nodo móvil o de seguimiento (nodo 4). El objetivo claro es determinar la ubicación estimada en el plano bidimensional del nodo móvil, es decir, generar un par de coordenadas (x, y) que describan la posición del nodo de interés. Los pasos del algoritmo son:

- **Paso no. 1:** Nodo 4 emite una señal RF de potencia definida.
- **Paso no. 2:** Asumiendo que todos los nodos presentan antenas omnidireccionales, cada nodo ancla calcula la distancia “r” entre él y el nodo móvil valiéndose de la siguiente expresión,

$$P_R = P_T - 10 \log_{10} f - 10n \log_{10} r + 30n - 32.44 \quad (dBm)$$

P_T : Potencia transmitida por el nodo no. 4, en dBm.

P_R : RSS recibido en el nodo de referencia, en dBm.

f : Frecuencia del transmisor en MHz.

n : Exponente de pérdidas en la trayectoria.

r : Distancia en metros.

- **Paso no. 3:** Cada uno de los nodos generará una ecuación que describe la distancia Euclidiana entre el nodo ancla y el nodo de seguimiento objetivo.

$$(X_n - X_4)^2 - (Y_n - Y_4)^2 = r_n^2$$

(X_n, Y_n) : Coordenadas del nodo ancla "n".

(X_4, Y_4) : Coordenadas del nodo de seguimiento.

r_n : Distancia entre el nodo ancla "n" y el nodo de seguimiento objetivo.

- **Paso no. 4:** Con la ecuación generada por cada uno de los nodos se crea una matriz cuya solución respecto a la pareja de coordenadas (X_4, Y_4) dará la ubicación exacta del nodo de seguimiento en interés.

$$\begin{bmatrix} (X_1 - X_4)^2 - (Y_1 - Y_4)^2 \\ (X_2 - X_4)^2 - (Y_2 - Y_4)^2 \\ (X_3 - X_4)^2 - (Y_3 - Y_4)^2 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} r_1^2 \\ r_2^2 \\ r_3^2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

Idealmente existe la solución para este sistema de ecuaciones, sin embargo, los errores de medición inherentes en la práctica pueden generar que el sistema no tenga una solución posible.

- **Paso no. 5:** A fin de generar un sistema de ecuaciones que acepte ciertas incertezas en la medición, se incluye en el sistema un vector de error. La suma del cuadrado de cada uno de los elementos del vector de error constituyen en error cuadrático del sistema.

$$\begin{bmatrix} (X_1 - X_4)^2 - (Y_1 - Y_4)^2 \\ (X_2 - X_4)^2 - (Y_2 - Y_4)^2 \\ (X_3 - X_4)^2 - (Y_3 - Y_4)^2 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} r_1^2 \\ r_2^2 \\ r_3^2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} e_1^2 \\ e_2^2 \\ e_3^2 \end{bmatrix}$$

$$\text{Error cuadrático} = e_1^2 + e_2^2 + e_3^2$$

- **Paso no. 6:** A partir de este punto se trabaja con un nuevo objetivo, obtener la pareja de coordenadas (X_4, Y_4) que minimice el error en el sistema matricial previamente expuesto.

El algoritmo presentado puede utilizarse también si se implementan más de tres nodos fijos en la red, lo cual puede mejorar la precisión en las mediciones. El paquete con la medida de RSSI proveniente del nodo de seguimiento, que recibe cada nodo ancla, indicará la distancia entre los nodos. Si un nodo de referencia recibe el paquete de un nodo de seguimiento, sólo podrá participar en la determinación de la distancia si el valor del RSSI está por encima de cierto límite. Modificando este límite se puede reducir o incrementar el número de nodos de referencia participando en la localización.

Las fuentes de error afectando un sistema de este tipo suelen estar incluidas en una de tres categorías descritas a continuación.

- **Errores de Equipo:** Este tipo se relaciona con la potencia de la señal que se transmite, pues se espera que el transmisor del nodo de seguimiento genere cierto nivel de potencia. Sin embargo, los transreceptores de bajo costo y destinados a aplicaciones con un rango físico de alcance limitado, suelen implementar mecanismos simples para el control de la potencia. Los fabricantes sólo garantizarán cierto rango de salida al seleccionar un nivel específico para la transmisión. En referencia al equipo, las propiedades de la antena pueden degradar también la exactitud en la potencia de la señal transmitida; realmente el patrón de radiación de la antena no es omnidireccional y afectará el ángulo en que se reciba la señal. Cuando el error en el RSSI es un valor constante conocido y se puede determinar que

no es función del ambiente o la posición de los nodos, la salida puede ser ajustada incluyendo un nivel de balance al RSSI.

- **Limitaciones Algorítmicas:** La señal que se recibe en cada nodo es cuantizada para calcular el RSSI, esta cuantización incluye un error inevitable para cualquier método. El algoritmo puede contribuir al error eligiendo un mínimo local, al momento de la optimización, para la pareja de coordenadas (X_4, Y_4) en cuestión. Es importante considerar la complejidad del algoritmo que se elija, pues aunque éste restrinja más que otros la propagación del error, puede sobrecargar un sistema con limitaciones físicas como lo es *ZigBee*.
- **Ambiente:** El ambiente en que se ubica la red constituye el problema más demandante en cuanto a la limitación del error. Las regiones con múltiples trayectorias alterarán la potencia que finalmente se reciba, pueden considerarse arreglos de múltiples antenas o métodos de estimación del canal para mitigar los errores referidos a esta causa. Los algoritmos de dispersión de la señal inherentes a la naturaleza de ésta, como el DSSS, suele reducir los errores de las múltiples trayectorias o los inducidos por éstas. La movilidad del nodo de seguimiento introduce cambios dinámicos en el canal de desvanecimiento y hace más difícil compensar su efecto.

Los errores aquí comentados pueden buscar solución en técnicas diversas. Una de éstas constituye el incremento en el período de medición o bien las mediciones repetidas del RSSI, con estas técnicas quizá se tenga una mejora en cuanto a la incerteza de los cálculos, pero se habrá sacrificado tiempo de vida en la red y la razón de actualización de la misma. Otra de las técnicas hace referencia a la estimación de las características del canal, pudiendo hacerse esto a través de un método empírico y un método teórico.

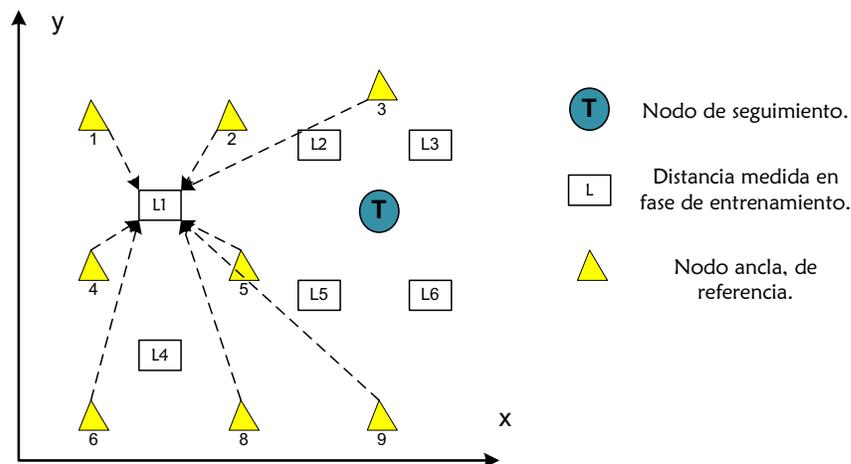
- **Método Empírico:**
 - La señal se mide en repetidas ocasiones en distintos momentos y posiciones.
 - A partir de estos datos se genera un histograma con el cual puede crearse un modelo matemático que describa de forma aproximada las características del canal con desvanecimiento.
 - Este método es mejor que el método teórico, pero es mucho más trabajoso.
- **Método Teórico:**
 - Hace uso de la información disponible a partir del estudio en ambientes cerrados para generar el modelo matemático que describa las características del canal, tomará en cuenta los planos del piso, los coeficientes de reflexión de los materiales cercanos y la información disponible de mano del proveedor.

3.5.2.2 Mapeo del RSSI

Este algoritmo hace uso de dos fases de implementación. En la primera se trabaja con una investigación de campo, donde se genera una base de datos con los valores del RSSI de los nodos ancla medidos en posiciones variadas. En la segunda fase, cada nodo de seguimiento será capaz de determinar su propia ubicación comparando la medida en tiempo real del RSSI recibido de cada nodo ancla, con la información almacenada en su base de datos. A continuación se describen los pasos fundamentales del algoritmo, teniendo en cuenta siempre que el sistema de ubicación implementado puede ser mejorado agregándole más nodos de medición y anexándolos a la base de datos. La

figura 46 describe el comportamiento básico del algoritmo, posteriormente, la descripción de los pasos que implementa.

Figura 46. Mapeo del RSSI



Fuente: Shahin, Farahani, **ZigBee wireless networks and transceivers**, Pág. 236

- **Paso no. 1:** Aquí se inician los pasos correspondientes a la primera fase del método, la fase de entrenamiento. Se enumeran los nodos fijos a considerar. Estos presentarán ciertos traslapes en sus áreas de cobertura y generarán un plano bidimensional. La distancia física entre los nodos no tiene por qué ser igual, es esta “distancia más pequeña entre los nodos” la que se considera como el espaciado de trama.
- **Paso no. 2:** El receptor se ubica a una distancia predeterminada de cada nodo ancla, se generan así las distancias características L_n , donde el “n” denota el número de nodo ancla considerado.
- **Paso no. 3:** El nodo receptor, nodo de seguimiento, recibe, mide y almacena los niveles de RSSI de cada nodo de referencia.

- **Paso no. 4:** El receptor genera un vector de RSS representado por la notación ss_L que contiene la información de la potencia recibida de cada uno de los nodos ancla participantes:

$$ss_L = [ss_{L1} \quad ss_{L2} \quad \dots \quad ss_{Ln}]$$

Es importante tomar en cuenta que este arreglo contiene la información referente a la intensidad de la potencia, siendo ésta una medida realizada en repetidas ocasiones y que genera un vector correspondiente con el promedio estadístico de la potencia recibida de cada nodo. Igualmente, la potencia de la señal en un punto puede variar mucho según la orientación que tenga el nodo colector de datos. Es por ello que la recopilación de los datos se hace considerando orientaciones diversas en las medidas a promediar.

- **Paso no. 5:** Es aquí donde termina la fase de entrenamiento y se considera que el nodo de seguimiento está listo para determinar su propia ubicación. Para ello, operará en modo de recepción para obtener paquetes provenientes de nodos ancla.
- **Paso no. 6:** El nodo de seguimiento calcula la fuerza de cada señal y almacena la información en un vector, similar al creado en la fase de entrenamiento, que se asocia a la ubicación actual del nodo.

$$ss_{actual} = [ss_{actual1} \quad ss_{actual2} \quad \dots \quad ss_{actual_n}]$$

- **Paso no. 7:** La distancia Euclidiana esperada puede hacerse equivalente con la estimación de la diferencia entre el vector generado en tiempo real y el obtenido y almacenado en la base de datos del nodo durante la fase de entrenamiento. Se trata de generar un valor equivalente a la distancia Euclidiana pues el número que se obtendrá de la siguiente operación no es una distancia física real, sino más bien una indicación de la similitud entre los arreglos obtenidos.

$$d(ss_{actual}, ss_{Ln}) = \sqrt{\sum_{i=1}^n (ss_{actual} - ss_{Ln})^2}$$

Lo ideal en este caso sería obtener un $d = 0$, sin embargo, en realidad se obtendrán resultados distintos a cero.

Este algoritmo permite implementar variaciones, cada una con características que lo hacen más idóneo para cierta aplicación. Se consideran a continuación tres variaciones del algoritmo y sus características principales.

1. Técnica del Vecino más Cercano:

- El nodo de seguimiento calculará su distancia Euclidiana como la diferencia entre el vector medido en tiempo real y el que tiene almacenado en su base de datos.
- El nodo de seguimiento ajustará su ubicación a la del nodo ancla que le genere el valor mínimo respecto a la diferencia entre el valor actual y el almacenado.
- Esta es la forma más simple del algoritmo. No presentará mejoras si se integran más nodos de referencia.

2. Técnica del K-ésimo Vecino más Cercano:

- Con esta técnica se mejora la precisión del algoritmo.
- El nodo de seguimiento identificará “k” ubicaciones conocidas para las cuales el arreglo de niveles de potencia tenga la menor distancia.
- La ubicación estimada generará la pareja de coordenadas:

$$X_E = \frac{1}{K} \sum_{i=1}^K X_i, \quad Y_E = \frac{1}{K} \sum_{i=1}^K Y_i$$

(X_E, Y_E) : Coordenadas estimadas.

(X_i, Y_i) : Coordenadas de los vecinos cercanos.

- Incrementar el valor de “k” no mejorará forzosamente la ejecución del método. Aumentándola se considerarán más nodos y podría introducirse más error.

3. Valoración del K-ésimo Vecino:

- Mejora la precisión del k-ésimo vecino más cercano al considerar las diferencias entre los vecinos en lo referente a la distancias respecto al nodo de seguimiento.
- En algunas ocasiones, puede que la distancia considerada entre los nodos sea nula, por lo tanto, para evitar la división entre cero, se agrega un valor de respaldo a la distancia estimada entre los nodos.
- La ubicación estimada generará la pareja de coordenadas:

$$X_E = \frac{1}{D} \sum_{i=1}^K \frac{1}{d(ss_{Li}, ss_{actual}) + d_o} X_i, \quad Y_E = \frac{1}{K} \sum_{i=1}^K \frac{1}{d(ss_{Li}, ss_{actual}) + d_o} Y_i$$

(X_E, Y_E) : Coordenadas estimadas.

(X_i, Y_i) : Coordenadas de los vecinos cercanos.

D : Sumatoria de distancia entre cada nodo ancla y el nodo de seguimiento.

$$D = \sum_{i=1}^K \frac{1}{d(ss_{Li}, ss_{actual}) + d_o}$$

d_o : Valor agregado a la distancia para evitar la división entre cero.

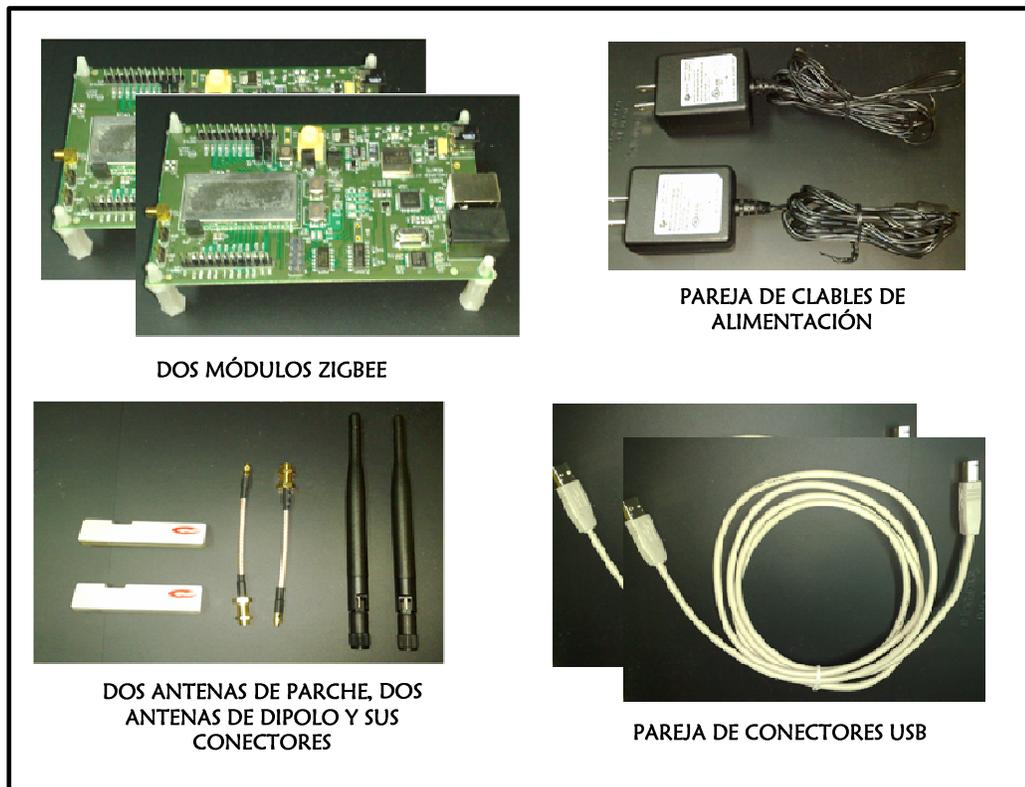
En los algoritmos descritos, cada vez que el nodo de seguimiento actualiza su posición entra en modo de recepción, adquiere el nivel de potencia actual de cada nodo ancla considerado y lo compara con el valor almacenado en su base de datos. Alternativamente, podría trabajarse invirtiendo los papeles. En este caso, el nodo de seguimiento trabajará como transmisor emitiendo una señal RF recibida por cada nodo ancla, el cual comparará el nivel de potencia con el almacenado en una base de datos. Se generará así el arreglo de la ubicación, con la contribución de la medida hecha por cada nodo

ancla. Para aplicar esta variación al algoritmo, se considera que la propagación de una señal RF es simétrica en cualquier ambiente, y por lo tanto, se tendrá una precisión similar a la del sistema descrito inicialmente. Además, pueden incluirse métodos estadísticos para mejorar las técnicas.

4. MONTAJE Y UTILIZACIÓN DE UNA RED ZIGBEE

En el presente capítulo se analizará el funcionamiento de una pequeña red sensorial trabajando únicamente con dos nodos. Para ello se hará uso del *ZMN2405/HP ZigBee Module Developer's Kit*, un kit de desarrollo perteneciente a la compañía estadounidense *Cirronet*. La descripción de los procedimientos se hará en base al equipo mencionado, sin que esto signifique pérdida de generalidad para el manejo de otros sistemas similares. En la figura 47 se muestran los dispositivos que integran el equipo.

Figura 47. Kit de Desarrollo ZMN2405/HP

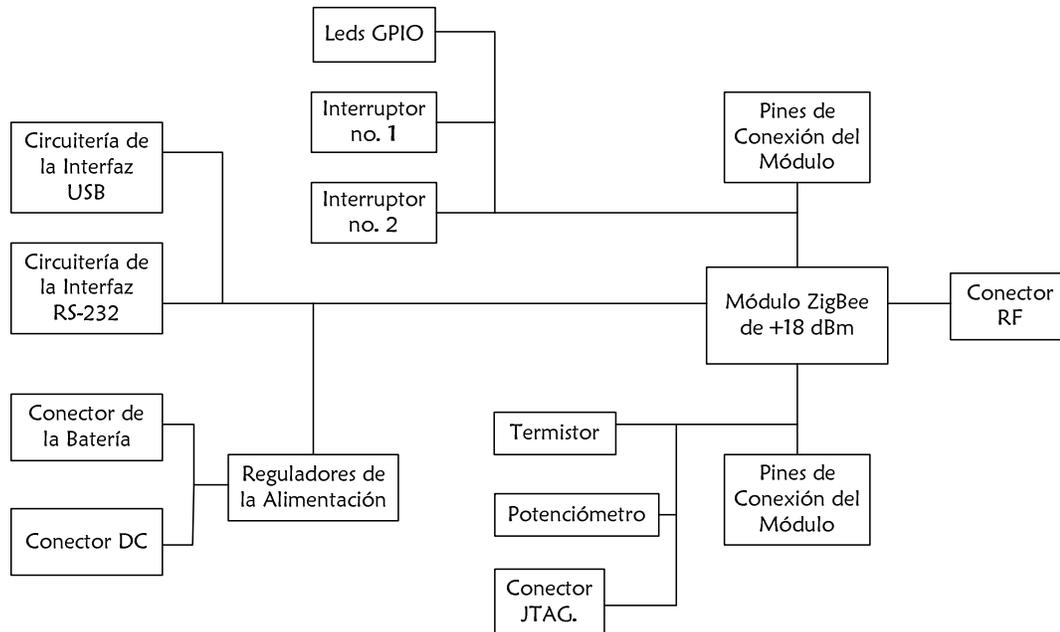


Los módulos desarrollados por *Cirronet* proveen una potencia de transmisión de 100 mW., cuando trabajan con la antena dipolar de 2 dBi de ganancia, y hasta 250 mW. al trabajar con la antena de parche, la cual provee 6 dBi de ganancia. Los módulos soportan ser configurados como cualquiera de los tres elementos principales en una red *ZigBee*: Coordinador, Enrutador o Dispositivo Terminal. La configuración se hace programándolos con el código que el fabricante entrega como parte del equipo. El kit de desarrollo contiene un disco donde se incluye un programa de prueba, *ZBDemo*, el cual funciona como punto de partida para la demostración de las potencialidades del sistema.

4.1 Módulos de Desarrollo

El kit de desarrollo de *Cirronet* cuenta con dos módulos que se implementan como nodos de la red sensorial. Las tarjetas vienen configuradas como Coordinador y Enrutador de la red, siendo éste un aspecto que el usuario puede variar según la necesidad de su aplicación. La figura 48 especifica los bloques funcionales que constituyen cada uno de los módulos *ZigBee* de *Cirronet*. Posteriormente se enumeran algunos aspectos característicos respecto a los bloques mostrados.

Figura 48. Diagrama de Bloques de un Módulo ZigBee

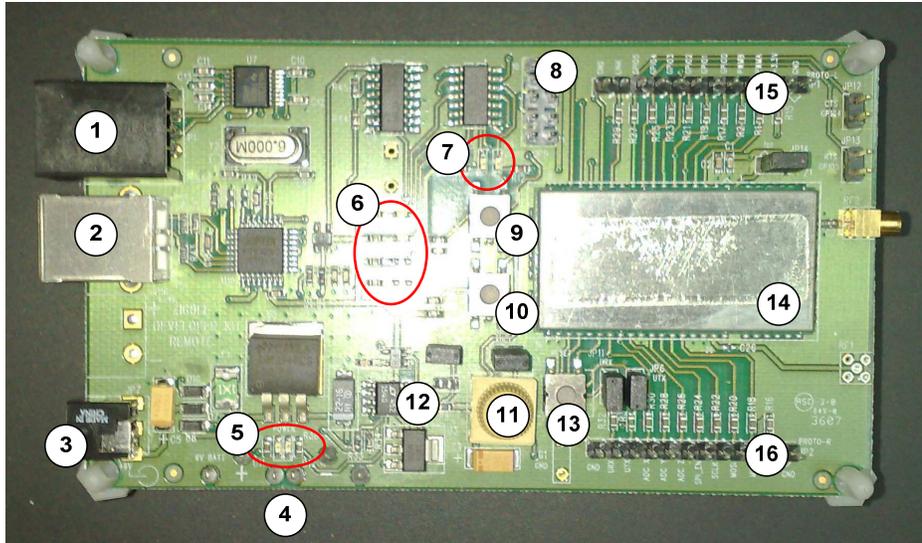


Fuente: Cirronet, **ZMN2405 / HP ZigBee module developer's kit user's manual**, Pág. 24

- Los circuitos de interfaz RS-232 o USB convierten los niveles estándar de las señales a un nivel, en recepción y transmisión, de 3.3 V. Sólo una entrada puede utilizarse en cada momento. Si existe una conexión USB, se deshabilitará la conexión RS-232.
- La entrada RS-232 incorpora un conector RJ-11.
- La entrada JTAG se incluye para situaciones en las que se están desarrollando aplicaciones (perfiles) por parte del usuario o se está creando código y se programará el módulo sin utilizar el código otorgado por el fabricante.

La figura 49 muestra la ubicación real, de los bloques especificados en el diagrama anterior, en los módulos de desarrollo *ZigBee*.

Figura 49. Ubicación Real de los Bloques Funcionales



1. Conector serial del módulo.
2. Conector USB del módulo.
3. Alimentación DC externa, a través de la toma de alimentación general.
4. Ubicación de las baterías. El conector se encuentra en la parte inferior de la placa.
5. Led de alimentación.
6. Led de enlace, de datos y dos led de estado.
7. GPIO 3 y GPIO 4.
8. Conector JTAG (JP5).
9. Interruptor no. 0 (SW0).
10. Interruptor no. 1 (SW1).
11. Potenciómetro.
12. Termistor.
13. Reset.
14. Módulo *ZigBee*.
15. JP1
16. JP2

Como puede apreciarse con el diagrama del módulo, todos los pines, exceptuando el *Reset*, salen posibilitando la conexión con otros dispositivos externos sin tener que integrar el módulo en otro circuito. Los pines de salida a cada lado del integrado se enumeran en la tabla IX, siendo posible su identificación en la gráfica del módulo como la serie de conectores JP1 y JP2.

Tabla IX. Pines de Conexión del Módulo del ZMN2405/HP

JP1			JP2		
Pin de Conexión	Señal	Pin del Módulo	Pin de Conexión	Señal	Pin del Módulo
1	Tierra	2	1	Tierra	2
2	3.3 V	1	2	5 V	1
3	PWMA	3	3	SPI_MISO	3
4	PWMB	4	4	SPI_MOSI	4
5	GPIO0	5	5	SPI_SCLK	5
6	GPIO1	6	6	SPI_EN	6
7	GPIO2	7	7	ADCZ	7
8	GPIO3	8	8	ADCY	8
9	GPIO4	9	9	ADCX	9
10	GPIO5	10	10	UTX	10
11	Enlace/ TDO	12	11	URX	12
12	Tierra	2	12	Tierra	2

Fuente: Cirronet, **ZMN2405 / HP ZigBee module developer's kit user's manual**, Pág. 24

La tabla X incluye una descripción más detallada de los pines enumerados anteriormente.

Tabla X. Descripción de los Pines del Módulo ZMN2405/HP

Nombre	Descripción
Vcc	+3.3 Vdc a +5.5 Vdc
Tierra	Tierra de las fuentes de alimentación. Todos los pines de tierra deben conectarse a la tierra del circuito.
PWM A - B	Dos salidas moduladas por ancho de pulso (PWM) que pueden usarse para crear una salida análoga al agregar un filtro RC.
GPIO0 - 5	Seis E/S de propósito general. Configurables por software como entradas o salidas. Cuando se configuran como salidas, el voltaje de salida es también configurable por software.
ENLACE/TDO	Indica el estado del enlace del módulo. Si está habilitado el puerto JTAG, funciona como una salida de evaluación del JTAG.
UART_RX	Recibe datos del módulo UART. Los datos que se transmitirán al módulo se transmiten en este pin.
UART_TX	Transmite datos de salida al módulo UART.
ADCX - Z	Tres entradas análogas a digital. La entrada está limitada de 0 Vdc. A +2.5 Vdc.
SPI_EN	Habilitación de la salida para dispositivos con bus SPI.
SPI_SCLK	Señal de reloj del puerto SPI.
SPI_MOSI	Salida de datos del puerto SPI.
SPI_MISO	Entrada de datos del puerto SPI.

Fuente: Cirronet, **ZMN2405 / HP ZigBee module developer's kit user's manual**, Pág. 24

Los LED GPIO, interruptores, potenciómetro y termistor son implementados con propósito de demostración. Estos componentes pueden ser leídos y escritos con la aplicación *ZBDemo* del fabricante. El termistor se utiliza para variar el voltaje de entrada al pin ADC X con un máximo voltaje de entrada de 3.0 volts. El potenciómetro se conecta a una red divisora de voltaje para variar el voltaje de entrada al pin ADC Y. Para conectar el ADC X o ADC Y a señales ajenas a la tarjeta, se debe desconectar el termistor y el potenciómetro de las entradas del módulo removiendo los conectores respectivos.

Los led de estado permiten monitorear la actividad de las tarjetas. Se cuentan con dos led indicadores:

- **Led de Enlace:** En el Coordinador se ilumina cuando se ha detectado un canal libre y está disponible para que otros dispositivos se asocien con él. En los Enrutadores y Dispositivos Terminales se ilumina cuando se ha asociado a una red.
- **Led de Actividad:** Indica actividad RF.

4.2 Aplicación del Proveedor

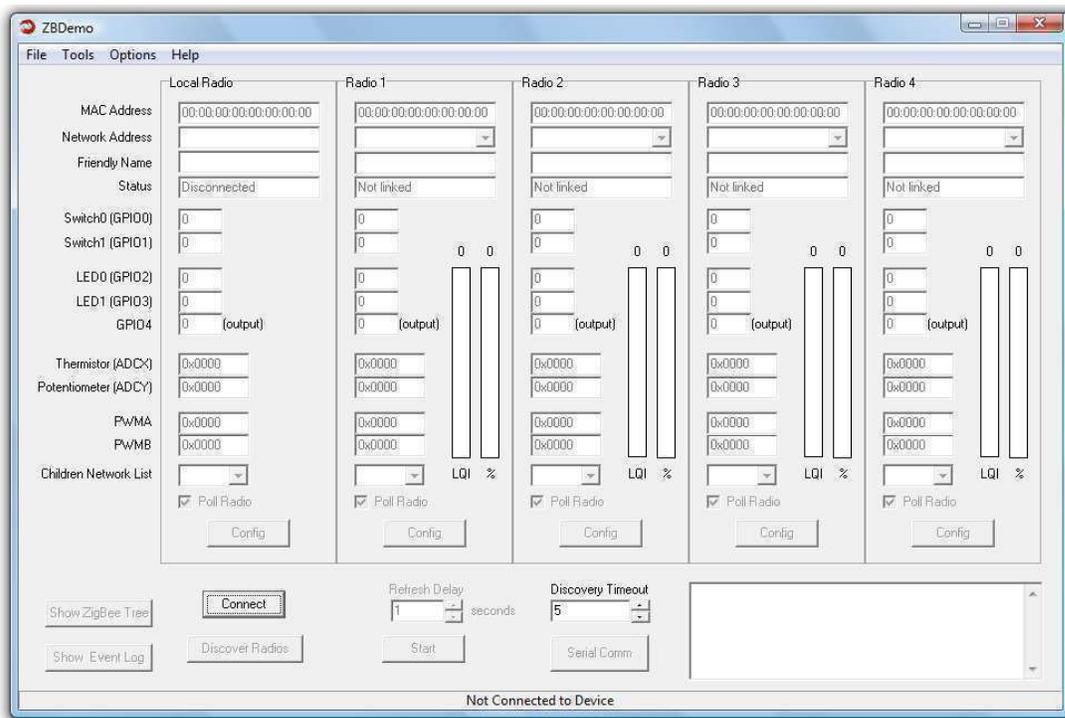
El fabricante incluye en su equipo una aplicación de entrenamiento, útil en el proceso de familiarización con la forma de trabajo del sistema. La aplicación se llama *ZBDemo*, y necesita ser copiada en las computadoras donde se conectarán los módulos *ZigBee* para la evaluación de su funcionamiento. Se hará uso del puerto USB para conectar los módulos, siendo posible también conectarlos a través de un puerto serial RS-232. La alimentación de los nodos puede ser a través de baterías o a través de la toma de corriente general, no es necesario que ambos módulos tengan la misma alimentación.

Uno de los módulos de desarrollo se encuentra configurado, de fábrica, como el Coordinador de la red, mientras el otro funciona como el Enrutador. Como ha sido mencionado, estas configuraciones pueden ser cambiadas por el usuario. A continuación se enumerarán algunas de las funcionalidades básicas que incorpora el programa de prueba del equipo. El objetivo será dar una visión de las posibilidades fundamentales de los nodos de una red *ZigBee*, sin que

esto signifique una pérdida de generalidad al querer tratar con equipo de otro proveedor.

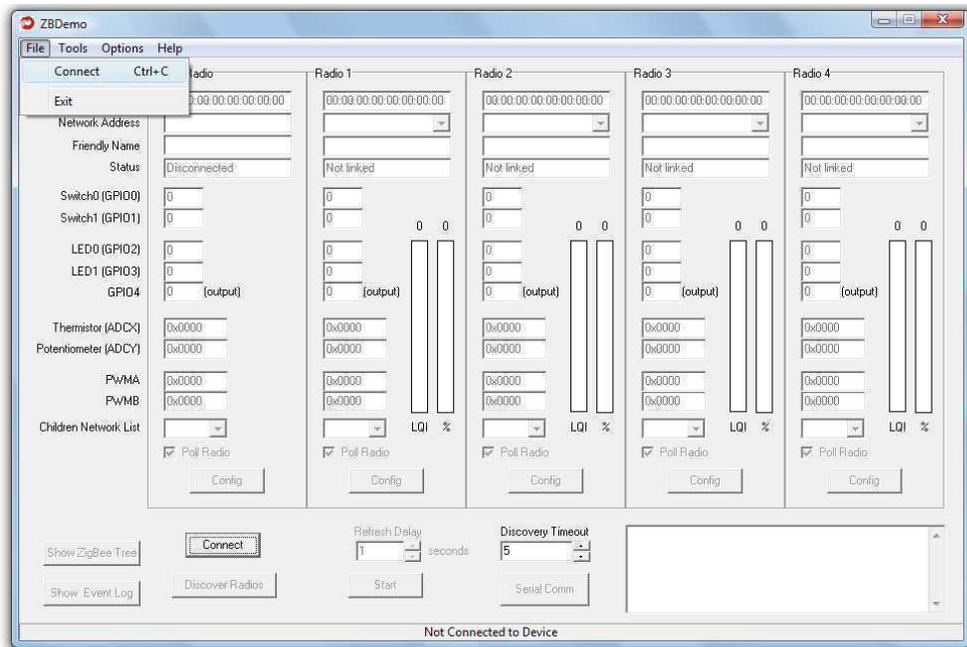
El primer paso será conectar el Coordinador y verificar que su led de alimentación esté encendido. El Coordinador empezará a buscar un canal libre, al encontrarlo el led de enlace del módulo permanecerá de color verde. Una vez el Coordinador haya encontrado un canal libre, el Enrutador podrá intentar unirse a éste. Cuando el Enrutador se haya unido al Coordinador, será el led de enlace del enrutador el que brillará de color verde. Antes de inicializar la aplicación del fabricante es importante esperar a que los módulos hayan establecido el contacto descrito. El siguiente paso será inicializar la aplicación ZBDemo. Se desplegará la pantalla mostrada en la figura 50.

Figura 50. Pantalla Inicial de la Aplicación ZBDemo.



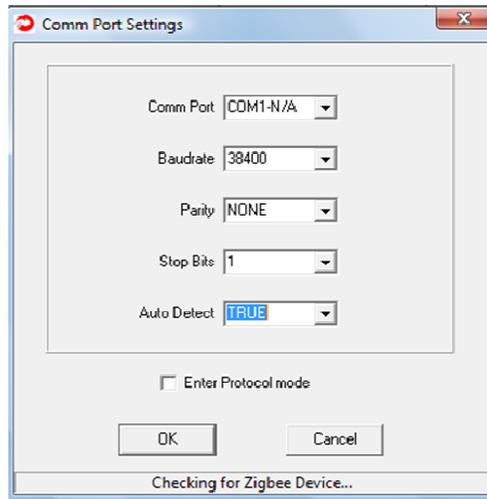
Es necesario que la aplicación reconozca los módulos *ZigBee* que se encuentran conectados a la computadora. Para ello se puede presionar el botón de “*Connect*” que aparece resaltado en la imagen, o bien desplegar las siguientes opciones de la barra de herramientas: *File -> Connect*.

Figura 51. Conexión de la Aplicación ZBDemo con el Módulo ZigBee



Se despliega ahora una nueva ventana, presentada en la figura 52, con los parámetros de comunicación necesarios para reconocer el módulo conectado a la computadora. Los parámetros aparecen como opciones concernientes al puerto a través del cual el módulo está conectado a la computadora.

Figura 52. Pantalla de Configuración del Puerto Serial en el ZBDemo



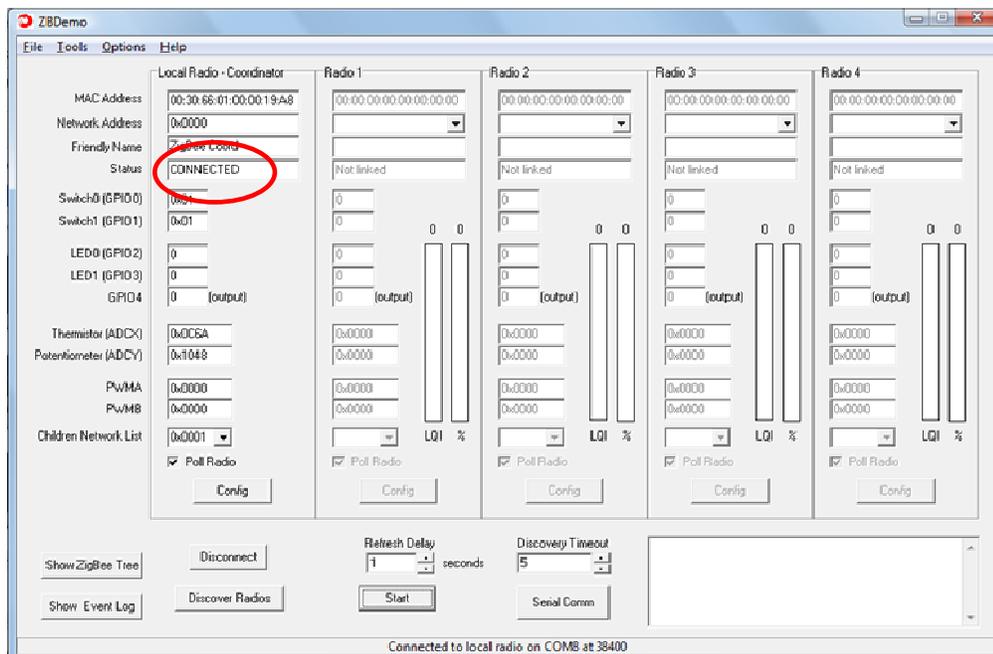
La ventana de configuración está cargada con valores predeterminados. Si los datos no son correctos no se encontrará el módulo y la conexión no podrá establecerse. Sin embargo, los parámetros de configuración del puerto pueden cambiarse, sin que esto afecte la configuración de la tarjeta. Para evitar la configuración errónea de los parámetros del puerto existen dos métodos de conexión con el módulo.

- **Método no. 1:** Utilizar los menús desplegables para cambiar los parámetros iniciales. Aquí se asume que el usuario conoce la configuración del puerto en que se ubica del radio que se utiliza. Se eligen parámetros como número de puerto, rata de baudios, bits de parada y paridad. Se incluyen hasta 16 puertos, los que están habilitados son los que presentan la marca *OK*. Si se selecciona un número de puerto pero el radio no está conectado a éste, se desplegará un mensaje de error en la rata de baudios. Para resolver el problema deberá elegirse otro número de puerto.
- **Método no. 2:** Función “*Auto Detect*” (autodetección). Si se habilita (establece en *TRUE*) el programa verificará todas las combinaciones posibles con los parámetros del puerto hasta que encuentre el radio

pertinente. El programa desarrolla una búsqueda sistemática para comunicarse con el módulo. Inicia con el primer puerto válido, creará una combinación con cada rata de baudios, luego cada configuración de paridad y de parada, cambiando luego al siguiente puerto disponible.

Una vez el programa haya encontrado el radio, se presiona “OK” y la información sobre el módulo *ZigBee* será desplegada con la columna de radio local junto con su dirección MAC de 8 bytes. La condición “*Connected*” en el estado indica que la computadora ha logrado detectar el radio. La figura 53 muestra la forma en que la aplicación se desplegará al usuario después de haber logrado la conexión pertinente con el módulo.

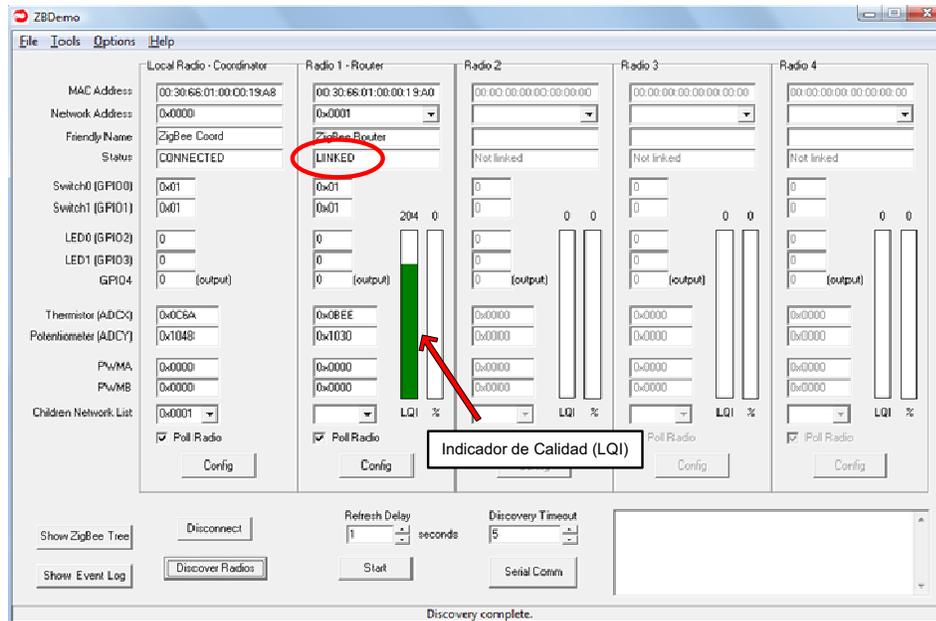
Figura 53. Módulo Local Reconocido por la Aplicación ZBDemo



Se procede ahora a la lectura de la información de los otros radios anexados a la red. Tanto en el Coordinador como en el Enrutador se presiona

el botón “*Discover Radios*” (Descubrir Radios). Esto provoca que el Coordinador solicite información sobre la tarjeta de desarrollo del Enrutador, y el Enrutador sobre el Coordinador. La información se desplegará en la siguiente columna, Radio 1, de la aplicación ejecutada en cada computadora. El estado del radio 1 será *LINKED* (conectado) y su LQI mostrará el índice de eficiencia de la conexión respecto a la potencia de la señal de enlace. El *ZBDemo* puede descubrir y anexar en la ventana de visualización hasta cuatro radios que sean parte de la misma red *ZigBee*. Los radios que sean visualizados pueden ser leídos y analizados a intervalos especificados por el usuario. En los menús desplegables de “*Network Address*” (Dirección de Red) se puede elegir visualizar nodos de red distintos a los desplegados inicialmente en las columnas de la aplicación. El estado de cada radio será de conectado. La ventana de “*MAC Address*” (Dirección MAC) desplegará la dirección MAC real de cada radio y las ventanas de *switch* (interruptor), LED, termistor y potenciómetro desplegarán el estado de cada componente en la tarjeta de desarrollo. Inicialmente se desplegarán los valores leídos al momento en que la aplicación reconoció el dispositivo, la lectura no será actualizada hasta que se presione el botón “*Start*” (Inicio) de la aplicación. El botón de descubrimiento de radios puede ser presionado desde la aplicación que tenga a cualquier dispositivo de la red como radio local (Coordinador, Enrutador o Dispositivo Terminal). La figura 54 muestra la aplicación al momento de tener un radio más, además del local, conectado a su red.

Figura 54. Reconocimiento de otros Módulos



Las casillas de “Poll Radio” (Sondear el Radio) se utilizan para actualizar periódicamente los parámetros que se leen de cada una de las tarjetas de desarrollo integradas a la red con que se trabaja. Se habilita esta opción presionando el botón de inicio que se encuentra bajo el campo de “Refresh Delay” (Retraso de la Actualización). Si éste último se establece en 0 segundos, la actualización será continua. La funcionalidad de retraso de la actualización establece la frecuencia con la cual se actualiza la información de los radios, locales y remoto. La frecuencia puede ajustarse en incrementos de un segundo. Dado que la actualización de cada radio requiere un número individual de lecturas y escrituras, puede tomar un segundo actualizar cada radio aún cuando esté programada una actualización continua. Mientras se realiza la actualización el botón “start” cambia a “stop” (parar) para detener las lecturas. Si la casilla de sondeo del radio no está habilitada para un radio, la información de éste no se actualizará.

Las ventanas Switch0 y Switch1 muestran el estado de dos interruptores ubicados en la tarjeta de desarrollo. Cuando los interruptores están “abiertos” el valor desplegado será 0x01, cuando estén presionados el valor será 0x00. El dato no será actualizado si no está habilitada la función de actualización. Las ventanas LED0 y LED1 permiten que las líneas GPIO2 y GPIO3 sean establecidas en alto o bajo para encender y apagar los leds del módulo de desarrollo. El encendido equivale a ingresar un “1” y el apagado a un “0”. La ventana del termistor despliega la salida de 10 bits de la lectura del ADC del canal ADC_X. Los cambios en la temperatura serán registrados en la ventana si ha sido habilitada la opción de actualización en la aplicación. Igualmente, la ventana del potenciómetro muestra la salida de 10 bits del ADC según su lectura del divisor de voltaje implementado con el potenciómetro. El potenciómetro y el termistor pueden removerse del circuito retirando los conectores respectivos de la placa de desarrollo. Se puede sustituir por el sensor deseado por el usuario. Las ventanas PWMA y PWMB permiten ajustar el ciclo de trabajo de las salidas PWM. Éstas salidas son alimentadas a una red RC para que el filtro pasabajos genere una salida analógica. Los valores permitidos están entre el intervalo 0x0000 a 0xFFFF.

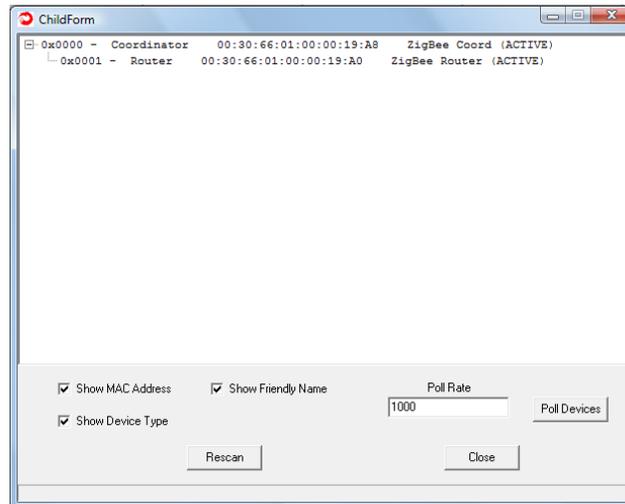
En el menú desplegable identificado como “*Children’s Network List*” (Lista de Hijos de la Red), se enlistan los dispositivos anexados al módulo cuya información está siendo desplegada en la columna. Los Coordinadores y Enrutadores pueden ser los “padres” de otros dispositivos en la red. El Coordinador siempre tendrá hijos mientras haya, por lo menos, un dispositivo más asociado a la red. Los Enrutadores pueden o no tener hijos, los Dispositivos Terminales no tienen hijos. El menú desplegable muestra las direcciones de los hijos asociados al radio registrado en esa columna.

El botón “*Event Log*” (Registro de Eventos) despliega una ventana con el listado cronológico de los eventos que se han dado en la red *ZigBee*. La tabla muestra la fecha y hora del evento, junto con la dirección de red del dispositivo generador del evento recibido, el grupo del que forma parte, el desplazamiento y longitud (en bytes) del evento, y los datos recibidos. El botón “*Clear*” limpia el listado de eventos.

La funcionalidad del botón “*ZigBee Tree*” (Árbol *ZigBee*) muestra la distribución jerárquica de la red. El Coordinador se muestra al inicio de la red. Al presionar el botón se abre la ventana “*Childform*” que es una representación esquemática de la forma en que la red está conformada. Tiene casillas de verificación en la parte inferior de la ventana (*Show MAC Address, Show Friendly Name, Show Device Type*), que permiten elegir la información que se enlistará para cada elemento de la red. La información disponible hace referencia a la dirección MAC, el nombre asignado por el usuario y el tipo de dispositivo del que se trata. Se pueden habilitar o inhabilitar todas las opciones.

La figura 55 muestra la ventana *Childform*. Posteriormente se hace una descripción de las características que en ella pueden definirse.

Figura 55. Ventana ChildForm de la Aplicación

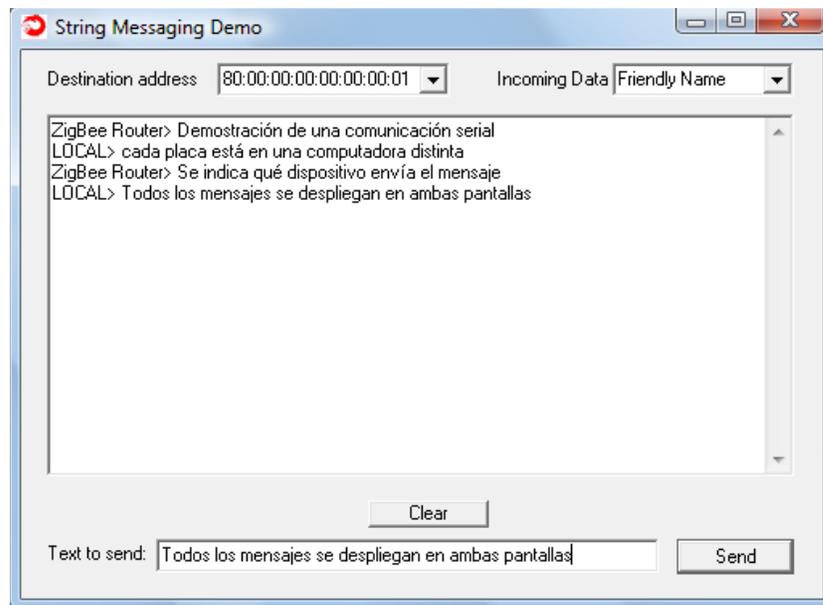


El campo de *Poll Rate* permite al usuario definir el período en el que se consultarán simultáneamente los dispositivos de la red, este número está en milisegundos. Con un doble *click* sobre cualquier dispositivo se despliega la pantalla de configuración del mismo. Presionando el botón “*Rescan*” (Reescanear) se registrará la red en busca de cualquier cambio que luego se especificará en la *ChildForm*.

La aplicación incorpora una sección de envío de mensajes de texto entre los radios de los dispositivos participantes de la red. Es necesario contar con dos equipos de cómputo pues dos elementos *ZigBee* no pueden conectarse a la misma computadora (esto se debe a los *drivers* del USB). Para iniciar este tipo de comunicación se debe presionar el botón “*Serial Comm*” (Comunicación Serial) que genera el formulario “*String Messaging Demo*” (Prueba de Mensajería de Texto). Esta ventana posee cuatro campos distintos: Dirección de destino, dirección de remitente, ventana del mensaje y campo de mensaje a

enviar. La figura 56 muestra la ventana principal de la aplicación de mensajería.

Figura 56. Función de Mensajería de la Aplicación ZBDemo



Para enviar texto, éste se ingresa y luego se presiona “Send” (Enviar). Así se enviará, automáticamente, la información al otro radio. La información enviada por el radio local aparecerá en la ventana de mensajes del radio destinatario. El botón “Clear” permite limpiar el contenido de la ventana de mensajes. La información que se envía o se recibe aparece en la ventana de mensajes etiquetada con el nombre del dispositivo a encargado, aparece con su nombre habitual, dirección MAC o dirección de red. Esta funcionalidad de comunicación serial opera igualmente bien para un Coordinador, Enrutador o Dispositivo Terminal.

4.2.1 Configuración del dispositivo

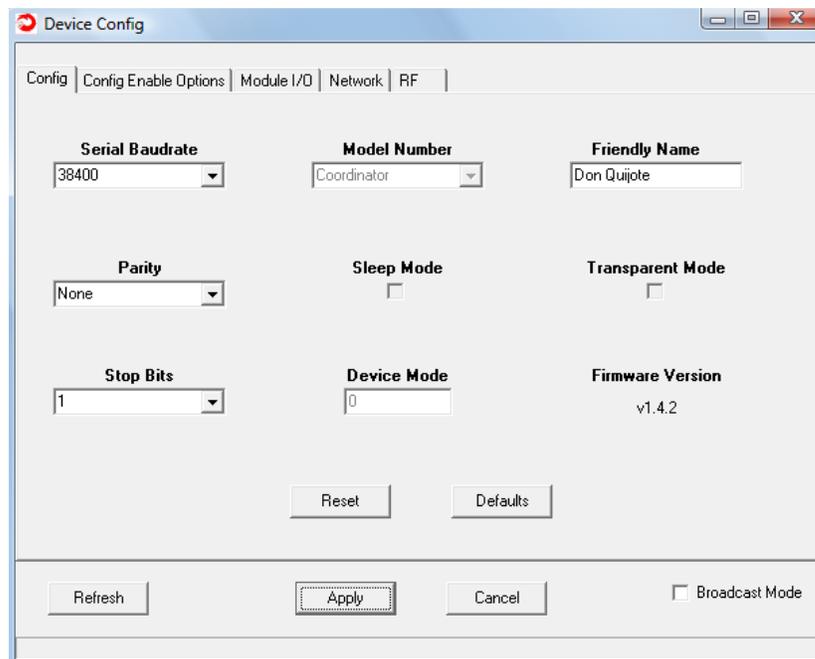
El formulario donde se realiza la configuración de los dispositivos se muestra al presionar el botón “*Config*” (Configurar) de la aplicación principal. Aquí será posible cambiar la forma de operación definida para cada uno de los radios. La ventana muestra siete pestañas, cada una correspondiente a una funcionalidad distinta de los radios. Las pestañas son:

1. *Config*
2. *Config Enable Options*
3. *Module I/O*
4. *Network*
5. *Diag*
6. *RF*

Como se verá en las siguientes imágenes, aparece en la parte inferior de esta ventana de configuración la casilla “*Broadcast Mode*”. Al habilitar esta opción se estará permitiendo enviar la información de aplicación disponible a todos los radios de la red. El botón “*Apply*” (Aplicar) escribe los nuevos valores al módulo. Si se necesita reinicializar los radios para que las modificaciones tengan efecto, aparecerá una ventana que requiera la confirmación de esta acción para el módulo especificado. Si no se resetea el dispositivo, los cambios se darán en el siguiente ciclo de trabajo. A continuación se describen las opciones de configuración que se habilitan al acceder a esta ventana de la aplicación. Se mostrará inicialmente una imagen de la pantalla para cada opción y posteriormente se describirán los campos que la integran.

1. Opción CONFIG

Figura 57. Opción CONFIG



Las opciones presentadas en esta pestaña son:

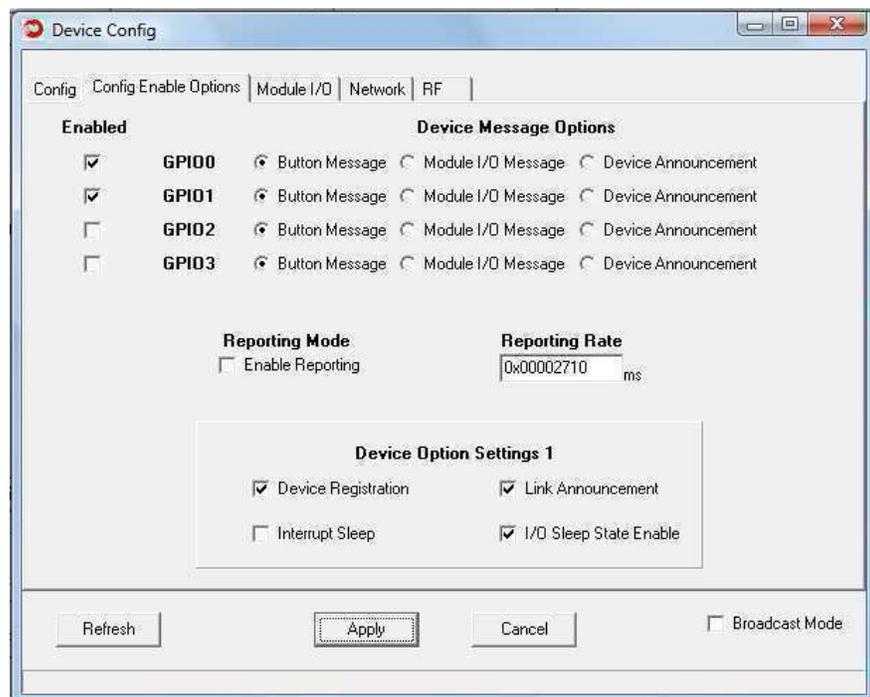
- **Serial Baudrate (Rata de Baudios)**
 - Especifica la rata de comunicación para el puerto UART del módulo.
- **Model Number (Número de Modelo)**
 - Muestra si el dispositivo es un Coordinador, Enrutador o Dispositivo Terminal.
- **Friendly Name (Nombre Amistoso)**
 - Campo de 16 bytes que permite asignar nombres definidos por el usuario a los módulos, esto con objeto de una identificación más sencilla.
- **Sleep Mode (Modo Adormecido)**

- Modo de operación utilizado únicamente en Dispositivos Terminales. Al habilitar esta casilla se está estableciendo el dispositivo como un nodo operado por baterías que permanece dormido la mayor parte del tiempo. Como forma predeterminada se utiliza un temporizador de sueño. Si en su lugar se prefiere trabajar con interrupciones, se puede seleccionar en la pestaña de “*Config Enable Options*”. Estos parámetros deben configurarse antes que el dispositivo se una a la red. Si se hace luego deben reinicializarse todos los dispositivos de la red, iniciando con el Coordinador para asegurar que la red funcione correctamente.
- **Device Mode (Modo o Modelo del Dispositivo)**
 - Región de sólo lectura. Registra un 0x00 si el dispositivo es un Coordinador, 0x01 para un Enrutador y 0x02 para un Dispositivo Terminal.
- **Transparent Mode (Modo Transparente)**
 - Al habilitar esta casilla se permite la transmisión de los datos que no estén empaquetados según el estándar *Cirronet* para el módulo. Cualquier dato que aparezca en la entrada serial será transmitido al Coordinador. Los datos recibidos por el dispositivo también serán transmitidos sin utilizar el estándar para los paquetes. Una vez se entre en este modo de operación el *ZBDemo* no funcionará más pues estará esperando recibir los datos en los paquetes CSM. Este modo de operación está destinado únicamente a un Enrutador o Dispositivo Terminal.
- **Reporting Mode (Modo de Reporte)**
 - Permite que el dispositivo envíe el estado de sus pines de propósito general (GP I/O) en un paquete de EVENTO al Coordinador, esto según el intervalo determinado por el campo “*Reporting Rate*” (Razón de Reportes). Este tipo de operación funciona para todos los dispositivos.

- **Reporting Rate (Razón de Reportes)**
 - Éste es un valor de 32 bits que establece el intervalo al cual se harán los reportes en el modo respectivo. El valor puede variar desde 1000 ms. (0x000003E8) hasta 49.7 días (0Xffffff).
- **Firmware Version (Versión del Firmware)**
 - Corresponde a un registro de solo lectura donde se establece la versión de sistema instalado.

2. Opción CONFIG ENABLE OPTIONS

Figura 58. Opción CONFIG ENABLE OPTIONS



En esta pestaña se habilitan las opciones de mensaje de los dispositivos (*Device Message Options*) para todos sus pines GPIO's (Entradas/Salidas de Propósito General).

Al colocar cheques en los cuadros de habilitación se permite que el dispositivo entregue varios mensajes cuando los pines GPIO0 a GPIO3 se establezcan como entradas vulnerables a la interrupción. Cuando las entradas cambien de alto a bajo, un mensaje definido en la región de Opciones de Mensaje del Dispositivo (*Device Message Options*) será transmitido a la puerta de enlace, que de forma predeterminada es el Coordinador de la red.

La sección de *Device Message Options* es la región donde se establecen los tipos de mensaje que son iniciados ante la interrupción de los GPIO0 a GPIO3. Las opciones son:

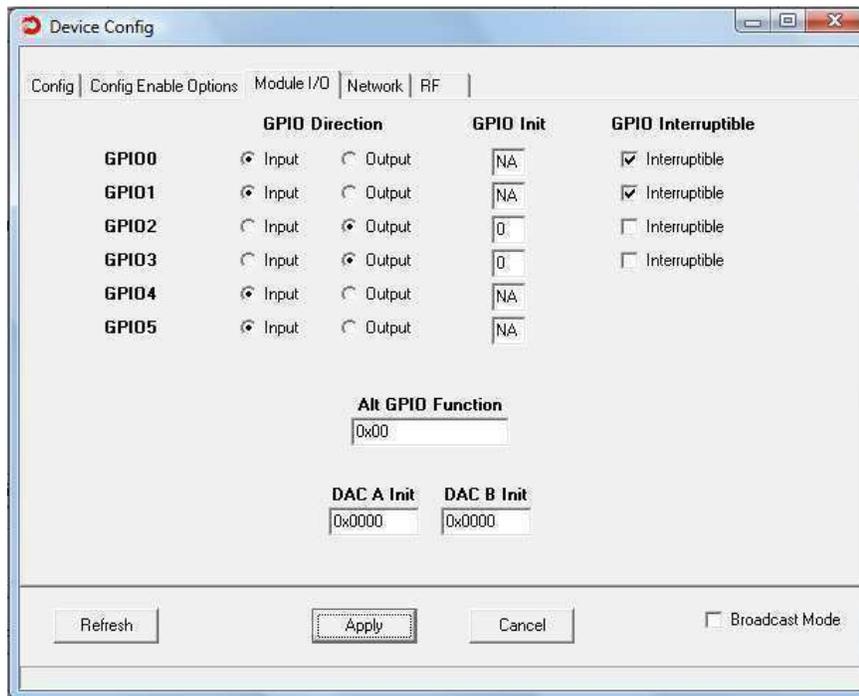
- **Button Message (Botón de Mensaje):** El mensaje es sólo un Mensaje de Evento que describe el estado particular del pin. Las interrupciones son disparadas en una transición de alto a bajo.
- **Module I/O Message (Mensaje de Entrada/Salida del Módulo):** Es un evento que contiene información sobre el estado de cada uno de los pines que integran el módulo de entrada/salida. Éste es el mismo tipo de datos que se envían cuando se habilita el Modo de Reporte en la pestaña anterior.
- **Device Announcement (Anuncio del Dispositivo):** Esto forzará al dispositivo a registrarse nuevamente con el Coordinador enviando un paquete de anuncio específico.

En la sección *Device Option Settings* se especifica que mensajes son válidos para el módulo en configuración, las opciones que presenta son:

- ***Device Registration (Registro del Dispositivo)***: Al habilitar, el dispositivo enviará un paquete con su registro para cada nuevo dispositivo que se una a la red. Esta opción está habilitada predeterminadamente.
- ***Interrupt Sleep (Interrupción del Adormecimiento)***: Si el dispositivo es un terminal, al habilitar esta opción cuando la alimentación principal está inhabilitada (opción "*Power Source*" en la pestaña *Config*) se pone al módulo en un sueño interrumpido del cual sólo despertará cuando se dé una interrupción en una de los pines GP I/O.
- ***Link Announcement (Anuncio de Enlace)***: El dispositivo generará un paquete de anuncio de enlace (disponible sólo para Enrutadores y Dispositivos Terminales) o formación de red (sólo para Coordinadores). El paquete es una salida en el puerto UART. Este bit está habilitado de forma predeterminada.
- ***I/O Sleep State Enable***: Al habilitar esta opción el módulo establece los pines GP I/O al estado seleccionado para cada uno en la pestaña "*Module I/O*". Se pretende utilizar esta opción para un Dispositivo Terminal que permanecerá adormecido pero tendrá circuitería anexada a él.

3. Opción MODULE I/O

Figura 59. Opción MODULE I/O

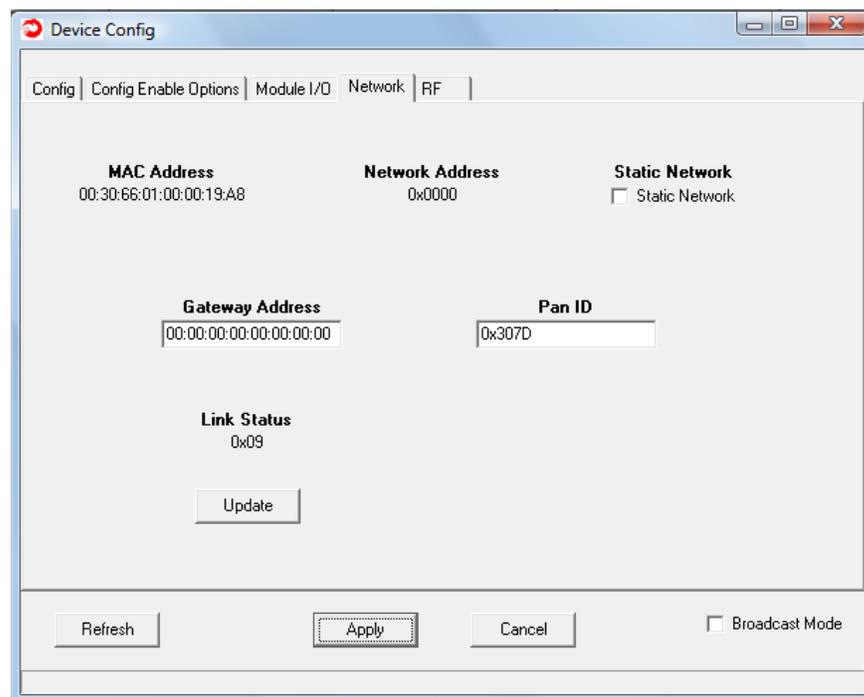


La región *GPIO Direction* permite establecer individualmente los pines GP I/O 0-5 como entradas o salidas. El *GPIO Init* es un valor predeterminado que se le dará a cada pin establecido como salida. Si el pin fue definido como entrada, lo que se coloque en este campo carece de valor. Cada vez que se de un reestablecimiento del sistema éste será el valor de salida del pin. El registro *GPIO Interruptible* permite establecer los pines GPIO0 a GPIO3 como receptores de interrupciones que despertarán un módulo que esté configurado para trabajar con baterías. Es un requisito establecer algún pin como sensible a interrupciones siempre que se vaya a trabajar con un módulo en estado adormecido.

Los registros *DAC A Init* y *DAC B Init* son los valores predeterminados que se le dan a la salida analógica después de que se ha dado una reinicialización del sistema.

4. Opción NETWORK

Figura 60. Opción NETWORK



El *MAC Address* de la pestaña muestra la dirección MAC del módulo. Esta es una dirección única, asignada desde la fábrica.

El *Network Address* hace referencia a la dirección de la red. Se trata de un registro de sólo lectura que contiene la dirección asignada al dispositivo por su dispositivo padre. Esta dirección no puede ser cambiada o predeterminada de ninguna forma. Cuando el dispositivo no está anexo a ninguna red, su dirección de red será 0xFFFF.

Al habilitar la opción de *Static Network* el usuario forzará su módulo para que permanezca con la misma configuración de red la próxima vez que reinicie el establecimiento de enlaces. Si esta opción se encuentra inhabilitada al apagarse el dispositivo, la próxima vez que reinicie podrá unirse a la red de forma distinta, siendo posible que cambien su dirección de red.

En el campo *Gateway Address* se especifica la dirección de red del dispositivo destino al que el módulo enviará la información que aparezca en su puerto UART, puerto serial, al estar funcionando en modo transparente. Esto es válido para Enrutadores y Dispositivos Terminales. De forma predeterminada, y fija, se encuentra establecida la dirección del Coordinador de la red.

El *PAN ID*, o Identificador de Red de Área Personal, es un dato, de 14 bits, requerido por el Coordinador. La *PAN ID* especificada en el Enrutador, o Dispositivo Terminal, debe ser coincidente con la establecida en el Coordinador para que puedan establecerse los enlaces. Establecer la PAN ID de un Enrutador con el valor 0xFFFF permitirá que éste se conecte a cualquier Coordinador que esté haciendo uso del canal de radio. Si al Coordinador se le

asigna un valor 0xFFFF, éste escogerá cualquier valor aleatorio como identificador de red.

El valor del *Link Status*, o Estado del Enlace, hace referencia a un registro de solo lectura que proporciona información de las condiciones actuales de la conexión entre el dispositivo y su Coordinador. Para actualizar este dato se debe presionar el botón de “*Refresh*” (Actualizar) que aparece en la ventana de la aplicación. La tabla X muestra los valores de *Link Status* que pueden presentarse.

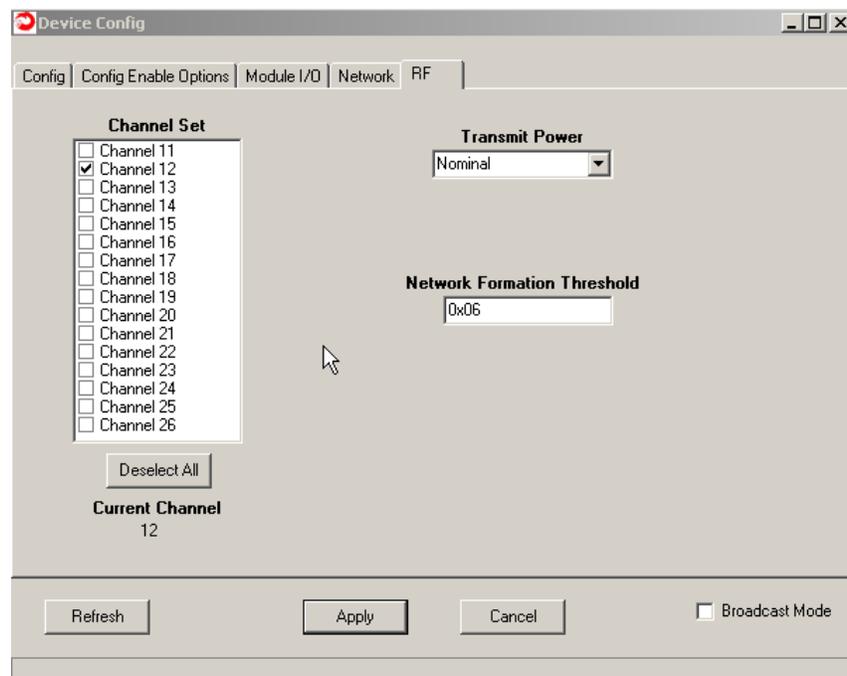
Tabla XI. Valores del Estado de Enlace

Valor	Significado
0x01	El dispositivo está inicializado pero no conectado.
0x02	El dispositivo está descubriendo las redes personales (PAN) a las que puede unirse.
0x03	El dispositivo está conectado a una PAN.
0x04	El dispositivo está conectado pero aún no ha sido autenticado por el centro de seguridad.
0x05	El dispositivo ha sido autenticado y se ha unido a una red como un Dispositivo Terminal.
0x06	El dispositivo ha sido autenticado y se ha unido a una red como un Enrutador.
0x07	El dispositivo está inicializando una red como Coordinador.
0x08	El dispositivo es huérfano, ha abandonado su red.

Fuente: Cirronet, **ZMN2405 / HP ZigBee module developer’s kit user’s manual**, Pág. 24

5. Opción RF

Figura 61. Opción CONFIG ENABLE OPTIONS



En el listado mostrado en el apartado *Channel Set*, o establecimiento del canal, se seleccionan los canales que el módulo puede utilizar. Puede seleccionarse cualquier número de canales, pero como mínimo uno debe aparecer seleccionado. El Coordinador escuchará el primer canal del listado, que fue permitido por el usuario, para determinar si es posible su utilización. Si después de realizar la evaluación pertinente de estado y actividad en el canal el Coordinador determina que no es idóneo para establecer su red, se movilizará al siguiente canal especificado por el usuario en el listado. Una vez que el Coordinador encuentre un canal libre, iniciará la búsqueda de dispositivos que deseen asociarse a su red.

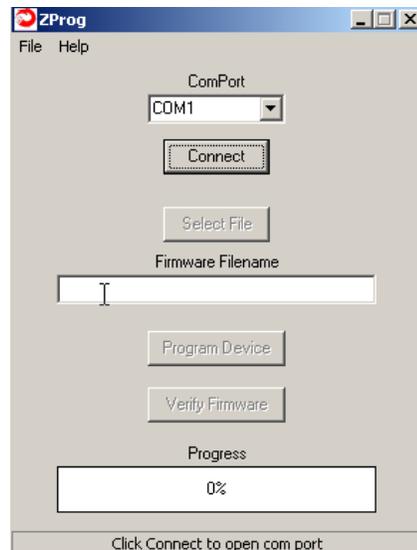
En la opción de *Transmit Power*, o potencia de transmisión, se especifica en cuánto se disminuirá la potencia de transmisión del valor nominal establecido para los módulos *ZigBee* del equipo. Nominalmente, la potencia de transmisión es de +18 dBm. Esto quiere decir que si el usuario elige en el menú desplegable de la opción un valor de -15 dBm, su nueva potencia de transmisión será de 3 dBm. Esta opción es útil cuando se necesita ajustar la potencia a las regulaciones legales en la región, o bien si se van a utilizar antenas de gran ganancia.

En la opción de *Network Formation Threshold*, o valor umbral de la red, se especifica el nivel de potencia límite para considerar ocupado un canal de radio. Si el Coordinador mide, en determinado canal, un nivel de potencia superior al aquí especificado buscará otro canal para formar su red.

4.3 Programación del Módulo

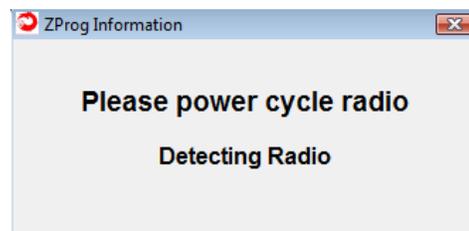
El equipo distribuido por *Cirronet* incluye tres códigos distintos para programar los módulos *ZigBee*, ya sea como Coordinadores, Enrutadores o Dispositivos Terminales. De fábrica los módulos se encuentran programados como un Coordinador y un Enrutador. Los módulos se programan a través de uno de los puertos seriales, cargando los códigos en la aplicación *ZProg*. La figura 62 muestra la ventana de la aplicación *ZProg*.

Figura 62. Ventana de Programación del ZProg



Se debe seleccionar el puerto serial al que tenemos conectado el módulo en la computadora en el menú desplegable, luego se deberá presionar el botón de “*Connect*”. Mientras el programa hace el reconocimiento del radio aparecerá la pantalla de mensaje mostrada en la figura 63.

Figura 63. Ventana de Mensaje del ZProg



Esta pantalla solicita al usuario que ejecute un simulacro de un ciclo de alimentación del módulo, se refiere a que se deberá desconectar y conectar inmediatamente la alimentación del módulo. Una vez la aplicación ha encontrado el radio se cerrará el anterior mensaje y reaparecerá la ventana del

ZProg. A continuación se deberá seleccionar el archivo a cargar desde el *software* distribuido con el equipo, pues será éste el compatible con el Estándar *Cirronet* que fundamenta los módulos utilizados.

El siguiente paso será seleccionar la opción *Program Device*, o Programar Dispositivo, para arrancar el proceso de programación del módulo. En este caso se seleccionó cambiar el módulo programado de fábrica como un Enrutador por un Dispositivo Terminal. Al finalizar la reprogramación del módulo la aplicación verificará que la información nueva en el módulo corresponda a la del archivo cargado. Si corresponde, se mostrará una ventana que informe el éxito de la actividad.

La aplicación del fabricante también incluye la opción de *Verify Firmware* donde se permite comparar la programación actual del módulo con el archivo elegido por el usuario en la sección de *Select File*, o Selección de Archivo. El objetivo de esta función es determinar si el dispositivo fue programado como un Coordinador, un Enrutador o un Dispositivo Terminal.

4.4 Comunicación Directa con el Módulo

Todos los módulos necesitan tener una aplicación, cargada desde fábrica, para controlarlos. Ésta se conoce como un “*profile*”, o un perfil. El perfil creado por *Cirronet* responde al nombre de CSM (*Cirronet Standard Module*), y es a través de él se puede tener acceso a todos los recursos del módulo para

desarrollar aplicaciones que integren equipo exterior a él. En este apartado se detalla la forma en que se logra esta comunicación.

Al entablar una conexión con el módulo *ZigBee*, la comunicación se hace a través de la interfaz UART con un protocolo de mensajes y comandos. Los comandos se utilizan para establecer los parámetros de configuración, enviar y recibir datos, reportar errores, etc. Todas las operaciones hacen uso de mensajes con una estructura definida. Los parámetros que se utilicen en la conformación de los comandos están agrupados en clústeres, o registros definidos. Los parámetros o posiciones de datos se definen como desplazamientos dentro de un clúster. La primera localidad de memoria dentro de un clúster corresponde a un desplazamiento nulo.

Los datos se escriben en un clúster haciendo uso del comando *Set Field* (establecer campo) y son leídos con un comando *Get Field* (obtener campo). Los clústeres utilizados por el perfil *ZigBee* son:

1. Módulo I/O
2. Configuración
3. Reinicio
4. Red
5. RF
6. Seguridad

Todos los clústeres, con sus parámetros y desplazamientos respectivos dentro del registro, son descritos en detalle en el anexo de este informe.

La interfaz serial para establecer la comunicación con el módulo se hace, únicamente, con tres cables: RX, TX y GND (tierra). Los pines tienen salida externa para conectarse a circuitería ajena al módulo del radio. De forma predeterminada, el puerto serial del módulo trabaja con una tasa de baudios de 38.462 Kbps, con tramas de 8 bits, un bit de parada y sin paridad asignada. La tasa de baudios puede ajustarse hasta un máximo 115 Kbps. La figura 64 muestra la posición de los pines en la tarjeta de desarrollo.

Figura 64. Pines de Transmisión Serial en el Módulo ZigBee



El módulo hace uso de un protocolo serial para entablar comunicación con dispositivos externos. El protocolo permite la configuración, el envío de comandos, información de estado o transferencia de datos hacia el módulo local o hacia uno remoto. La tabla XI muestra la estructura utilizada para una trama de comando.

Tabla XII. Estructura de la Trama de Comando

1 byte	1 byte	1 byte	1 byte	Varía
SOP (0xFD)	Longitud (en bytes)	TransID	Tipo de MSJ	Argumentos

Fuente: Cirronet, ZMN2405 / HP ZigBee module developer's kit user's manual, Pág. 62

El "SOP" hace referencia al inicio de la trama (*Start Of Packet*), su valor definido para los módulos de *Cirronet* es 0xFD. En el campo de "Longitud" se define el número de bytes que resta enviar (después de este campo). *ZigBee* es un estándar cuyos módulos son propensos a recibir múltiples retransmisiones de un paquete, especialmente cuando el remitente no ha recibido la notificación de acuse de recibo del destinatario. El remitente podrá enviar una trama hasta siete veces, así que para identificar a los datos redundantes, en el campo de "TransID" se especifica el número de retransmisión con que se trabaja. En el campo de "Tipo de MSJ" se define el tipo de actividad que se está realizando. En el listado a continuación se enumeran los tipos de mensaje que pueden utilizarse, y en el anexo de la investigación se incluye una descripción detallada de cada tipo de mensaje.

- **0x01:** *Set Field*
- **0x05:** *Get Field*
- **0x0A:** *Send String*
- **0x0C:** *Send SPI*
- **0x10:** *Get IEEE Address*
- **0x11:** *Get NWK Address*
- **0x64:** *Discovery Request*
- **0x65:** *Discovery End*
- **0x81:** *Set Reply*
- **0x85:** *Get Reply*

- **0x8A:** *Send String Reply*
- **0x8C:** *Send SPI Reply*
- **0x8E:** *Receive String*
- **0x90:** *Get IEEE Address Reply*
- **0x91:** *Get NWK Address Reply*
- **0x95:** *Receive Field Event*
- **0XD0:** *Link Announce*
- **0XE4:** *Discovery Reply*
- **0XF0:** *Device Registration*
- **0XFF:** *Error*

En la última sección de la trama, “Argumentos”, se ubican los datos utilizados para ejecutar la actividad especificada. La tabla XII muestra la estructura de la sección de argumentos en la trama.

Tabla XIII. Estructura de la Sección de Argumentos

8 bytes	2 bytes	1 byte	1 byte	2 bytes	1 byte	Varía
Dirección MAC / NWK	Identificación de Perfil	Indicador Final	Clúster	Desplazamiento	Longitud	Datos

Fuente: Cirronet, **ZMN2405 / HP ZigBee module developer’s kit user’s manual**, Pág. 62

La sección de “Dirección MAC/NWK” es utilizada para la dirección MAC de 8 bytes o la dirección de red, NWK, de 2 bytes. Para mantener el formato de las tramas utilizadas, esta sección tendrá siempre una longitud de 8 bytes. La IEEE asigna un prefijo, por compañía, a la dirección MAC del dispositivo. Para *Cirronet*, fabricante de los módulos utilizados, esta dirección es 00:30:66. Para indicar que se está utilizando la dirección de red, el byte más significativo del campo debe establecerse en 80 con la dirección de red ubicada en los dos

bytes menos significativos. Los otros cinco bytes restantes deben configurarse como 00.

La “Identificación de Perfil” permite la comunicación de dispositivos controlados por perfiles distintos. Para el caso aquí evaluado, siempre se utiliza un perfil de *Cirronet* y el identificador será 0xC000. El “Identificador Final” es un indicador lógico utilizado para que un solo módulo sea tratado como múltiples dispositivos lógicos. Los perfiles de *Cirronet* soportan sólo un indicador final, 0x01.

La definición de grupos de estructuras y funciones comunes a todos los dispositivos que implementen *ZigBee* responde a la necesidad de desarrollar distintos productos que integren un módulo *ZigBee* a su sistema. Dentro de estas estructuras, denominadas clústeres, se especifica la funcionalidad y características del dispositivo a través de variables a disposición del usuario para su configuración. Los clústeres pueden ser reconocidos como localidades de memoria donde se encuentran almacenadas las variables por categorías. Dentro de cada categoría o clúster, las distintas variables, almacenadas en la NVRAM, que la integran pueden encontrarse a través de “Desplazamientos” en el registro. El desplazamiento es el índice dentro de un arreglo en un campo de datos, está formado por dos bytes de los cuales se especifica primero el menos significativo. La región de “Longitud” se refiere al número de datos contenidos en la sección de datos. Los “datos” dependen del estado que el usuario desee para cada uno de los bits que integran el registro del clúster en que se trabaja.

4.5 Ejemplo de Aplicación

4.5.1 Descripción del Problema

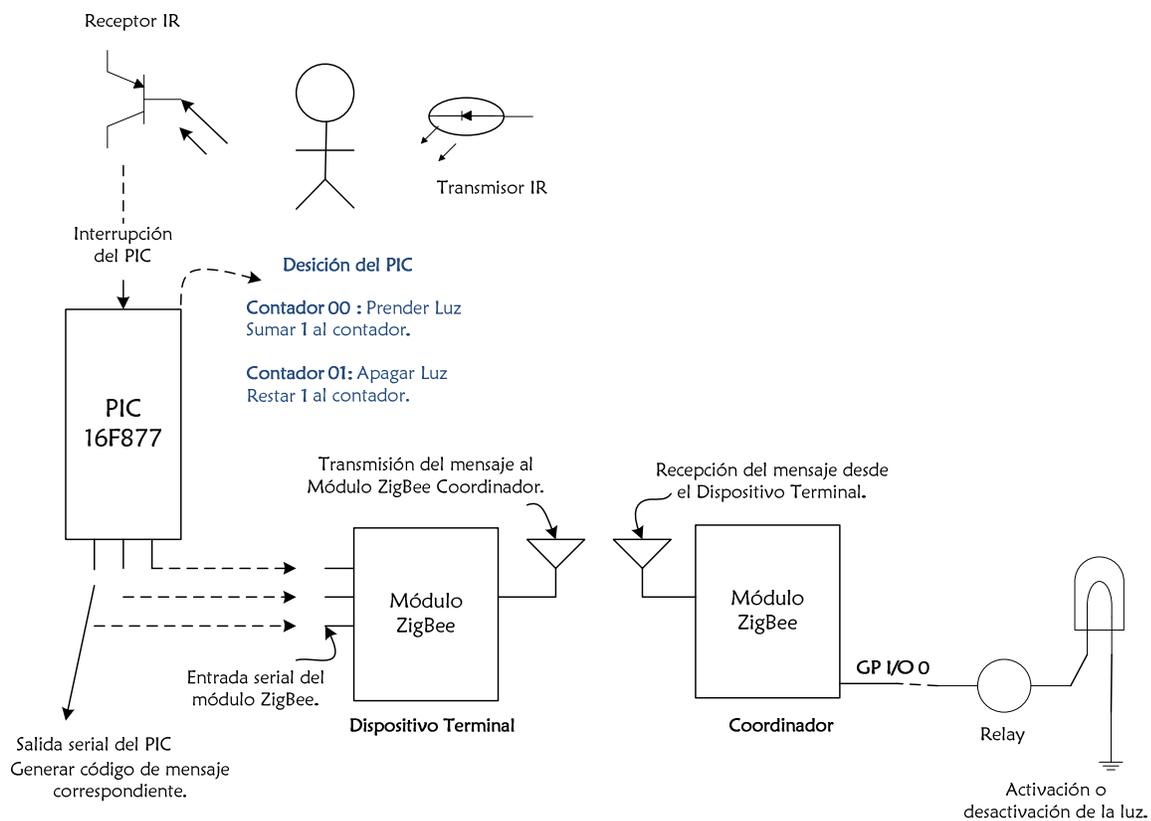
La aplicación a describir es una muestra sencilla del montaje de una red sensorial de dos nodos, un Coordinador y un Dispositivo Terminal, que tenga por objetivo encender una luz cada vez que una persona ingrese al sitio donde el foco está ubicado, y apagarlo al momento de que la persona salga de la habitación. Con este sistema se busca reducir el consumo energético de la instalación pues prevendrá que la luz permanezca encendida más tiempo del necesario. Existen otras consideraciones importantes, especialmente respecto al número de sensores y condiciones ambientales, que deben tomarse en cuenta para desarrollar una aplicación real de este tipo, pero que tratándose este trabajo de la implementación del estándar *ZigBee* se pasarán por alto y se dejarán para experimentos posteriores en la región de sugerencias del informe.

4.5.2 Solución Sugerida

Se instalará un sensor infrarrojo en la entrada de la bodega. El emisor estará ubicado en el lado derecho del marco de la puerta, mientras el receptor estará en el lado izquierdo conectado a un PIC operando en modo de adormecimiento. La salida serial del PIC estará conectada al serial del módulo *ZigBee* configurado como Dispositivo Terminal. Cuando alguien ingrese a la bodega interrumpirá el paso del haz infrarrojo, generando un pulso e interrumpiendo el adormecimiento del PIC. El PIC verificará su contador interno

para determinar si se trata del ingreso o retirada de una persona de la habitación y generará un código hexadecimal que transmitirá al módulo *ZigBee*. El código producido corresponde a un mensaje que el módulo enviará al Coordinador de la red informándole del nuevo estado en que éste debe establecer sus pines de propósito general, registro GP I/O, para encender o apagar la luz que tiene conectada. La figura 65 muestra el funcionamiento de la solución sugerida.

Figura 65. Diagrama de Bloques de la Solución Sugerida



4.5.3 Implementación de la Solución

La solución propuesta muestra aspectos particulares en lo referente al microcontrolador utilizado, su programación y los sensores elegidos. Todos estos elementos pueden variar en función del equipo con que cuente cada experimentador. Las secciones correspondientes a la elaboración de los mensajes a transmitir y la configuración de los módulos previa a la implementación son de carácter general, y por lo tanto constituyen los puntos clave en la descripción.

a. Elaboración de los Mensajes Transmitidos hacia los Módulos *ZigBee*

El módulo Coordinador será el encargado de encender y apagar el foco de la habitación. Para lograr esta acción se busca poner en “alto” y en “bajo” el pin GP I/O 0 del clúster del Módulo I/O, pues será este pin el que active y desactive un relé para encender y apagar el foco. La tabla XIII muestra el formato del paquete que se generará en el Dispositivo Terminal para que transmita la información al Coordinador.

Tabla XIV. Formato del Paquete de Instrucción

1 byte	1 byte	1 byte	1 byte	Varia
SOP	Longitud	TransID	Tipo de Mensaje	Argumentos

El SOP será 0xFD. La longitud debe establecerse hasta que se tenga la estructura completa del paquete a transmitir. El TransID será 0x00. Nuestra intención exige que trabajemos con un mensaje para “Establecer un Campo”

(*Set Field*) con el código hexadecimal 0x01. Hasta el momento la estructura del paquete es la mostrada por la tabla XIV.

Tabla XV. Formato del Paquete de Instrucción

FD	Por determinar.	00	01
SOP	Longitud	TransID	Tipo de Mensaje

A continuación corresponde establecer los valores con los que se trabajará en el campo de argumentos. La tabla XV muestra el formato de esta trama.

Tabla XVI. Argumentos

8 bytes	2 bytes	1 byte	1 byte	2 bytes	1 byte	Varía
Dirección MAC / NWK	Identificación de Perfil	Indicador Final	Clúster	Desplazamiento	Longitud	Datos

Dado que el campo de la dirección MAC/NWK es un campo de múltiples bytes, se inicia ingresando primero el bit menos significativo. En esta aplicación en particular trabajaremos con la dirección MAC de los dispositivos, y dado que nuestro paquete pretende cambiar el estado de los pines en el Coordinador, la dirección que aquí especifiquemos hará referencia a éste. El valor que ingresaremos será A8 19 00 00 01 66 30 00. La dirección MAC es única para cada módulo, la aquí incluida hace referencia al equipo particular adquirido. El identificador de perfil será 0xC000 y el indicador final para los productos de *Cirronet* utilizados será 0x01. Al verificar en el anexo el clúster y el desplazamiento del que haremos uso, confirmamos que trabajaremos con el

campo de Inicialización del GP I/O en el clúster del Módulo de I/O. Por lo tanto, nuestro clúster es el 0x01 con un desplazamiento de 0x0013. En el campo de longitud se anotará 0x01 dado que sólo se necesita un byte para establecer el valor del registro de inicialización del GP I/O. En la tabla XVI se muestra el mapa de bits establecido en el registro según se tenga el foco encendido o apagado. El encendido equivale a la activación del GP I/O 0 (establecerlo en 1) y el apagado a la desactivación del GP I/O 0 (establecerlo en 0).

Tabla XVII. Mapa de Bits del Registro

Reservado	Reservado	GP I/O 5	GP I/O 4	GP I/O 3	GP I/O 2	GP I/O 1	GP I/O 0	
7	6	5	4	3	2	1	0	
0	0	0	0	0	0	0	1	Encendido = 0x01
0	0	0	0	0	0	0	0	Apagado = 0x00

Hasta el momento la estructura del paquete es la mostrada por la tabla XVII.

Tabla XVIII. Formato del Paquete de Instrucción

A8 19 00 00 01 66 30 00	00 C0	01	01	13 00	01	01 6 00
Dirección MAC / NWK	Identificación de Perfil	Indicador Final	Clúster	Desplazamiento	Longitud	Datos

Ya teniendo completa la trama que se entregará al módulo para que la envíe a su Coordinador, se puede introducir el valor de la longitud del paquete

para el esquema general. En este caso se incluirán 18 bytes a continuación del byte de longitud, por lo que el valor transmitido en este campo será de 0x12. A continuación se muestra la apariencia completa del paquete a transmitir.

Tabla XIV. Paquete Final

FD	12	00	01
SOP	Longitud	TransID	Tipo de Mensaje

A8 19 00 00 01 66 30 00	00 C0	01	01	13 00	01	01 ó 00
Dirección MAC / NWK	Identificación de Perfil	Indicador Final	Clúster	Desplazamiento	Longitud	Datos

La configuración del Coordinador y del Dispositivo Terminal se hará a través la aplicación del fabricante, *ZBDemo*. Se debe tener especial cuidado en la configuración del Coordinador y las opciones de la pestaña de “*Module I/O*”. Como se especificó anteriormente, es aquí donde se establece si los pines de propósito general se utilizarán como entradas o como salidas. El pin de interés aquí es el GPIO_0 que se establecerá como salida con un valor inicial de cero.

b. Implementación de Sensores

Se puede utilizar cualquier tipo de sensor que genere un cambio de estado en el microcontrolador a implementar y provoque una interrupción del sistema. En este caso se sugiere un sensor infrarrojo (IR) conformado por un transmisor y un receptor. El receptor conectará su salida al pin RBO del PIC, tal como se indica posteriormente en el diagrama del microcontrolador. Los esquemas presentados a continuación son sugerencias para la construcción de la pareja de transmisor y receptor para un sensor infrarrojo. El transmisor está basado en un integrado NE555 funcionando en modo “*astable*” y cuya salida alimenta

los Led IR. El receptor generará un pulso en la salida ante la ausencia de luz, pues será en esta condición que el fotodetector incrementará su resistencia y activará la serie de transistores a continuación.

Figura 66. Transmisor IR

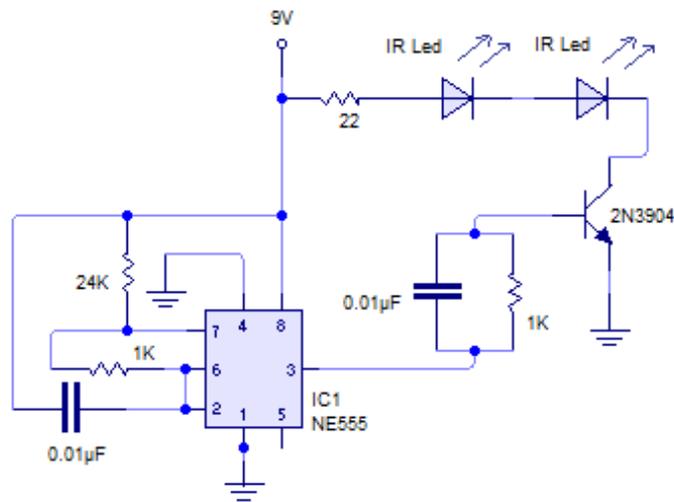
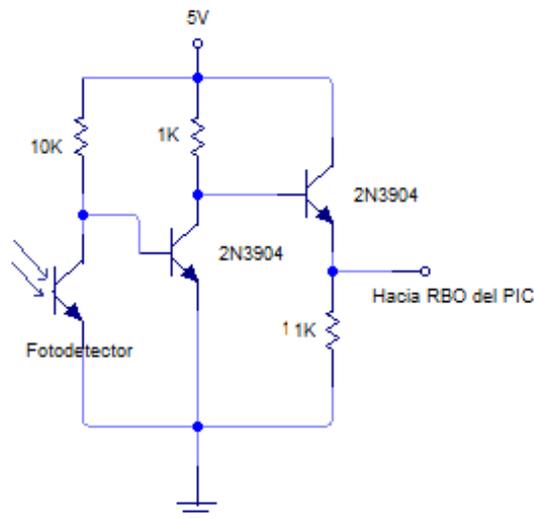


Figura 67. Receptor IR

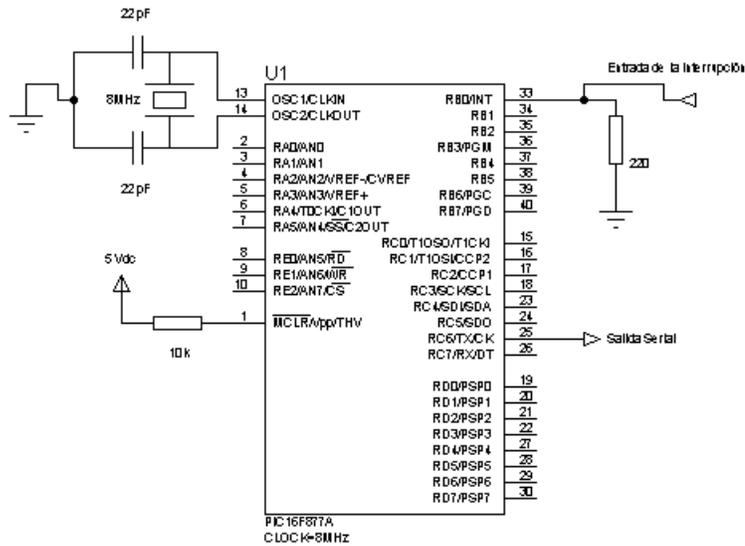


c. Programación del PIC

Para la aplicación puede utilizarse cualquier microcontrolador que cuente con un puerto serial y habilitación de interrupciones. En este caso particular se hace uso de un PIC 16F877A. Básicamente se habilitó el registro de interrupciones del microcontrolador, se eligió trabajar con la interrupción del pin RBO del mismo. Cuando el microcontrolador sea interrumpido despertará de su adormecimiento y verificará el estado de un contador interno que le indica si se trata de un “ingreso” (primera interrupción o interrupción impar, 0x01) o un “egreso” (segunda interrupción o interrupción par, 0x00). Según sea el caso, el PIC emitirá un mensaje a través de su puerto serial correspondiente al código generado en el inciso anterior. El mensaje será entregado al Dispositivo Terminal que trabaja en modo transparente y que lo transmitirá a su Coordinador. El Coordinador cambiará el estado de sus registros según lo especificado por el Dispositivo Terminal.

El figura 68 muestra la conexión básica del microcontrolador para la aplicación descrita. La ubicación de los pines responde al PIC 16F877A y puede variar según el elegido por cada usuario en particular.

Figura 68. Conexión del Microcontrolador



A continuación se muestra el código cargado en el PIC para desarrollar la aplicación anteriormente descrita. Para mayor información sobre el código el lector deberá remitirse a un manual técnico u hoja de datos del microcontrolador utilizado.

Tabla XX. Código del Microcontrolador 16F877A

```

TRISB = 0xff
PORTB = 0
INTCON = %10010000 'Registro de las interrupciones

TRISC.6 = 0 'Pin TX de salida serial
TRISC.7 = 1 'Pin RX de entrada serial
PORTC = 0

Hseropen 38400 ' Rata de baudios del serial

Dim i As Bit
    
```

inicio:

 i = 0 'Inicialización del contador

End

On Interrupt

 If i = 0 Then

 ' Mensaje para prender el foco

 ' FD 12 00 01 A8 19 00 00 01 66 30 00 00 C0 01 01 13 00 01 01

 Hserout 0xfd

 Hserout 0x12

 Hserout 0x00

 Hserout 0x01

 Hserout 0xa8

 Hserout 0x19

 Hserout 0x00

 Hserout 0x00

 Hserout 0x01

 Hserout 0x66

 Hserout 0x30

 Hserout 0x00

 Hserout 0x00

 Hserout 0xc0

 Hserout 0x01

 Hserout 0x01

 Hserout 0x13

 Hserout 0x00

 Hserout 0x01

 Hserout 0x01

 Endif

 If i = 1 Then

 ' Mensaje para apagar el foco

 ' FD 12 00 01 A8 19 00 00 01 66 30 00 00 C0 01 01 13 00 01 00

 Hserout 0xfd

```
Hserout 0x12
Hserout 0x00
Hserout 0x01
Hserout 0xa8
Hserout 0x19
Hserout 0x00
Hserout 0x00
Hserout 0x01
Hserout 0x66
Hserout 0x30
Hserout 0x00
Hserout 0xc0
Hserout 0x01
Hserout 0x01
Hserout 0x13
Hserout 0x00
Hserout 0x01
Hserout 0x00
Endif

If i = 0 Then
    i = 1
Else
    i = 0
Endif
Resume
```

La salida serial del PIC se conectará a la entrada serial del módulo *ZigBee* configurado como Dispositivo Terminal, en el pin de conexión 11 del JP2. El PIC descargará en el Dispositivo Terminal el mensaje hexadecimal respectivo. El Dispositivo Terminal transmitirá este mensaje hacia su Coordinador quien

cambiará el estado de los pines de su módulo GP I/O según lo especificado previamente.

CONCLUSIONES

1. El estándar *ZigBee* es una nueva tecnología desarrollada por la Alianza *ZigBee* y una serie de empresas, dedicadas todas ellas a la investigación e implementación de redes de sensores en aplicaciones industriales o personales que incluyan transreceptores pequeños operando en la banda ISM.
2. El objetivo del estándar *ZigBee* es participar en el desarrollo de redes sensoriales dedicadas al monitoreo y aplicaciones de control. Es por ello que su implementación ha tenido más éxito en el área de automatización del hogar y edificios, cuidado de pacientes y control industrial.
3. *ZigBee* ha sido desarrollada como una tecnología de bajo costo y bajo consumo energético que maneja una razón de información baja, en una red con topología de malla. Es una red de instalación sencilla, buena escalabilidad y configuración dinámica.
4. *ZigBee* opera en la banda ISM de 2.4 GHz o en una de las bandas regionales de 900 MHz. La elección de la banda de operación depende de las leyes al respecto que existan en cada país o región donde se implemente.

5. La utilización de técnicas como CSMA permite la coexistencia de *ZigBee* con equipos de otras tecnologías. Esto se debe a que siempre se realiza una evaluación de los canales permitidos para el establecimiento de la red y únicamente se utilizará aquel canal que cumpla con los requisitos de potencia y ocupación.

6. Una red implementada con el estándar *ZigBee* estará integrada por tres elementos principales, cada uno con funciones de red bien definidas. El Coordinador, quien organiza la red y mantiene las tablas de enrutamiento; el Enrutador, quien puede relacionarse con todos los dispositivos de la red y optimiza el enrutamiento; y los Dispositivos Terminales quienes jugarán el papel principal en la recolección de datos en la red.

7. La capa física (PHY) y la capa de acceso al medio (MAC) del estándar *ZigBee* están fundamentadas en lo especificado en el estándar IEEE 802.15.4. La especificación IEEE 802.15.4 describe características como las técnicas de modulación implementadas por los nodos, la razón de datos que se maneja, el establecimiento de los canales de radio, etc.

8. La estructura de la capa de red (NWK) y la capa de aplicación (APL) del estándar *ZigBee*, son propias de esta especificación y fueron desarrolladas en detalle por la Alianza *ZigBee*. Aquí se definen aspectos como la configuración lógica de la red, los algoritmos de seguridad y el *software* de aplicación.

9. La capa de red establece los parámetros que permiten la implementación de una topología de red en malla.
10. La pila del protocolo de *ZigBee* se muestra más sencilla que la de muchos otros protocolos al implementar sólo cuatro capas y requerir menos código. El código necesario para manejar las capas de red y de aplicación es entregado por el fabricante del equipo que se utilice.
11. Los perfiles son los encargados de definir la implementación objetivo en la capa de aplicación del estándar *ZigBee*. Estos perfiles deben ser certificados por la Alianza *ZigBee* para permitir la interoperabilidad entre dispositivos de distintos proveedores.
12. Para minimizar el consumo de energía y prolongar el tiempo de vida de los nodos alimentados con baterías, los Dispositivos Terminales permanecen adormecidos la mayor parte del tiempo, despertando únicamente cuando es necesario que obtengan cierta información y la comuniquen al Coordinador de la red.
13. Los Enrutadores en una red *ZigBee* funcionan como dispositivos de doble entrada, pues recolectan datos y los repiten, constituyen así el elemento clave en una red con topología de malla. Si dos nodos en la red no pueden comunicarse como se debe, la transmisión es redireccionada desde el nodo bloqueado hacia un Enrutador que permita otro camino de

enlace hacia el nodo destino. Esto se da automáticamente, por lo que la comunicación continúa aún cuando falle un enlace.

14. Los dispositivos implementados en una red *ZigBee* se encuentre pre-programados con su función de red específica. Los Dispositivos Terminales siempre intentarán unirse a una red existente. Los Coordinadores siempre intentarán buscar un canal libre para establecer su red.

15. Trabajar con módulos *ZigBee* es similar al trabajo que se hace con otros módulos de comunicación, por ejemplo, los RF. Sin embargo, la comunicación no se limita únicamente a transmitir una trama de información cualquiera. Se requiere en cambio, estructurar efectivamente un paquete de datos con una instrucción precisa que se ingresará a uno de los módulos para que se lo informe al otro y se genere la actividad esperada.

RECOMENDACIONES

1. Continuamente se generan diversas aplicaciones referentes a redes de sensores, siendo inminente el hecho de que en el futuro formarán parte común del diario vivir. Es por ello que se hace necesario motivar la creación de un laboratorio, para la carrera de Ingeniería Electrónica, dedicado exclusivamente a la investigación y desarrollo de proyectos con sensores.
2. Incluir en el curso de Redes y Telecomunicaciones Locales temas referentes a sistemas de comunicación inalámbrica y redes de sensores. Las redes de sensores implementadas con estándares como *ZigBee* deben ser tratadas como redes inteligentes que posibilitan la interconexión de diversos los dispositivos
3. Es importante investigar e involucrarse más a profundidad con las nuevas tecnologías emergentes. Temas como el estándar *ZigBee*, una prometedora nueva tecnología, debieran ser objeto de estudio en más de un curso del pensum de estudios de la carrera de Ingeniería Electrónica. Mientras mejor informados estén los estudiantes más posibilitados estarán para investigar e involucrarse con el desarrollo tecnológico.

4. La Universidad de San Carlos de Guatemala, como la principal promotora del desarrollo intelectual en Guatemala, debe procurar trabajar conjuntamente a organismos como Conred o el INSIVUMEH planteando proyectos en beneficio de ambos. El trabajo con redes de sensores bajo el estándar *ZigBee* se presenta como un proyecto prometedor del que todos los participantes pueden beneficiarse. Las redes de sensores son útiles en la medición e identificación de parámetros físicos que, en algunos casos, pueden ser determinantes al momento de desencadenarse una catástrofe natural. La estructuración de redes de sensores para el análisis de factores físicos como humedad del suelo, vibración mecánica de algunas estructuras, etc., ayudaría en el estudio y prevención de desastres.

5. El estándar *ZigBee* es un aliado en lo referente a temas de optimización energética y económica. Esta tecnología ya está siendo implementada en los medidores de electricidad, gas y agua de muchos hogares alrededor del mundo. Guatemala no puede quedar excluida de estos avances, por ello se hace necesario establecer relaciones con proveedores de productos *ZigBee* y llegar a convenios que permitan explorar más sobre esta tecnología y por lo tanto, beneficiarse de ella.

6. La industria manufacturera se vería grandemente beneficiada con la inclusión del estándar *ZigBee* en sus sistemas. *ZigBee* permite elevar los estándares de calidad y confiabilidad en la industria al llevar un registro detallado y continuo de parámetros físicos importantes como temperatura, presión o presencia de algún químico dentro de un establecimiento, entre otros.

BIBLIOGRAFÍA

1. Ahmed, Sayed. **TRLabs report on current researches on sensor networks**. s.l.: s.e., s.a. 77pp.
2. Boylestad, Robert y Louis Nashelsky. **Electrónica: teoría de circuitos y dispositivos electrónicos**. 8ª. Ed. México: Pearson Educación de México, S. A., 2003. 1020pp.
3. Cardama, Ángel. **Antenas**. México: Alfaomega Grupo Editor, S. A., 2000. 454
4. Eady, Fred. **Hands-On ZigBee: implementing 802.15.4 with microcontrollers**. Estados Unidos: Elsevier, Ltd., 2007. 336pp.
5. en.wikipedia.org/wiki/DSSS
6. en.wikipedia.org/wiki/QPSK
7. Farahani, Shahin. **ZigBee wireless networks and transceivers**. Estados Unidos: Elsevier, Ltd., 2008. 339pp.
8. **Getting started with ZigBee and IEEE 802.15.4**. Estados Unidos: Daintree Networks, Inc., 2008. 26pp.
9. Karl, Holger y Andreas Willig. **Protocols and architectures for wireless sensor networks**. Inglaterra: John Wiley & Sons, Ltd., 2007. 497pp.
10. Perry, Greg. **Aprendiendo Visual Basic 6 en 21 días**. México: Prentice-Hall Hispanoamericana, S. A., 1999. 880pp.

11. Singhvi, Vipul. **Intelligent light control using sensor networks.** Estados Unidos: s. e., 2005. 12pp.
12. www.upv.es/antenas/Tema_5/Tema_5.htm
13. **ZigBee Overview.** Estados Unidos: *ZigBee Alliance*. 35pp.
14. “*ZigBee: the choice for energy management and efficiency*”, **Revista ZigBee Resource Guide**: 28-31. 2008.
15. **ZMN2405/HP ZigBee module developer’s kit user’s manual.** Estados Unidos: s.e., s.a. 100pp.

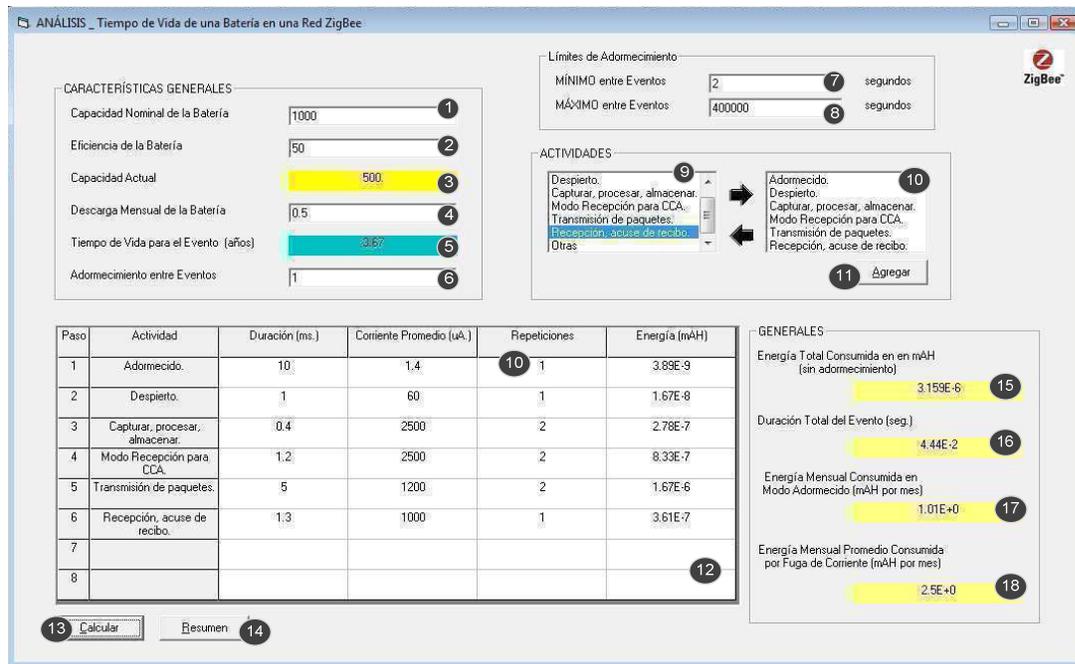
ANEXO

ANÁLISIS DE TIEMPO DE VIDA DE UNA BATERÍA APLICACIÓN DESARROLLADA EN MICROSOFT VISUAL BASIC 6.0

La siguiente aplicación tiene como objetivo ser una herramienta a los diseñadores de redes ZigBee para establecer la efectividad, de baterías específicas, al implementarlas como fuentes de alimentación de los nodos en su sistema. Permite determinar rápidamente el tiempo de vida estimado para las baterías de la red valiéndose de datos concernientes a las actividades del nodo (tiempo en que las desarrollan, consumo energético de las mismas, etc.). La aplicación está constituida por dos formularios. En el primer formulario se encuentran las áreas de ingreso de información por parte del usuario y se despliegan resultados generales del análisis. En el segundo formulario se mostrará el resumen de los consumos energéticos que pueden producirse en función del tiempo de adormecimiento que se considere entre eventos.

La figura 69 corresponde al primer formulario que se desplegará al ingresar a la aplicación. Se enumeran los controles principales, su identificación y funciones. La identificación del control será de utilidad para ubicarlo en el código del programa incluido al final del apéndice.

Figura 69. Pantalla principal de la aplicación



Control núm. 1

Nombre: txtCNB

Tipo: Caja de texto.

Aquí el usuario ingresará el dato referente a la **capacidad nominal de la batería**. Este dato es usualmente incluido por el fabricante en el manual del dispositivo. El valor es ingresado en mAH.

Control núm. 2

Nombre: txtEB

Tipo: Caja de texto.

En este espacio el usuario deberá ingresar el **porcentaje de rendimiento** de la batería, dato también incluido por el fabricante en el manual de la batería. El valor aquí ingresado será tratado como un valor porcentual.

Control núm. 3**Nombre:** txtCA**Tipo:** Etiqueta.

El dato que se desplegará en este espacio será calculado por la aplicación en función de los datos anteriores, es la **capacidad actual** de la batería.

Control núm. 4**Nombre:** txtDMB**Tipo:** Caja de texto.

En este espacio el usuario ingresará un valor porcentual que represente el índice mensual de descarga sufrido por la batería.

Control núm. 5**Nombre:** txtTVE**Tipo:** Etiqueta.

El programa calculará y desplegará aquí el tiempo de vida (en años) que se estima cumplirá la batería ejecutando la serie de actividades definidas por el usuario.

Control núm. 6**Nombre:** txtAE**Tipo:** Caja de texto.

Aquí el usuario deberá ingresar el tiempo que ha programado para que transcurra entre cada evento. Un evento es una serie de actividades que se repiten de forma periódica. Los cálculos generales serán desarrollados en función de este valor, sin embargo, se creará (en el segundo formulario) una

tabla donde se especifiquen los consumos energéticos devengados entre variaciones del tiempo estimado entre eventos.

Control núm. 7

Nombre: txtTMin

Tipo: Caja de texto.

En esta región el usuario especificará un tiempo mínimo que funcione como límite inferior para generar la tabla de datos a la que se hizo referencia en el control anterior.

Control núm. 8

Nombre: txtTMax

Tipo: Caja de texto.

Similar al uso del control anterior, aquí el usuario deberá definir el límite superior para el intervalo temporal que será considerado en la generación de la tabla de consumo energético del segundo formulario. La tabla establecerá los datos en función del tiempo entre eventos que se esté considerando.

Control núm. 9

Nombre: lstActividades_1

Tipo: Lista.

Este control funciona como un listado de referencia para el usuario. Aquí se enumeran las actividades que puede realizar el nodo y que el usuario podrá elegir posicionándose sobre el nombre de la actividad y presionando la flecha que apunta hacia el siguiente formulario.

Control núm. 10**Nombre:** IstActividades_2**Tipo:** Lista.

A este control se trasladan las actividades elegidas por el usuario a partir de las establecidas en el listado anterior. Si se desea eliminar alguna de las actividades el usuario deberá posicionarse sobre la elegida y presionar la flecha dirigida hacia el listado anterior.

Control núm. 11**Nombre:** cmdAgregar**Tipo:** Botón de comandos.

Al presionarlo el usuario trasladará las actividades elegidas a la hoja de cálculo del formulario.

Control núm. 12**Nombre:** gridTest**Tipo:** Conjunto de celdas.

Este control se asemeja a una hoja de cálculo. Aquí el usuario deberá definir distintas características de las actividades que realizará el nodo alimentado por las baterías en análisis. Entre éstas:

- **Columna núm. 1, “Paso”:** Datos incluidos por la aplicación. Se refiere al número de actividad que ejecuta el programa.
- **Columna núm. 2, “Actividad”:** Aquí se enumeran las actividades elegidas por el usuario en listado IstActividades_2 de la aplicación.
- **Columna núm. 3, “Duración (ms.)”:** Aquí se define el tiempo, medido en milisegundos, que el usuario considera que el nodo invertirá en cada actividad.

- **Columna núm. 4, “Corriente promedio (uA.)”:** En esta columna el usuario deberá definir el valor aproximado de corriente que consume el nodo en cada actividad.
- **Columna núm. 5, “Repeticiones”:** En este apartado el usuario deberá especificar el número de veces que se hará cada una de las actividades definidas. Algunas actividades con tendencia a necesidad de repetición son el CCA, la espera de acuses de recibo, etc. Si para una actividad se especifican cero repeticiones, el programa considerará que la actividad se realizó únicamente una vez.
- **Columna núm. 6, “Energía (mAH)”:** Esta columna es llenada por la aplicación. Corresponde al consumo energético reportado por cada actividad según el tiempo que se realice, su exigencia de corriente y el número de veces que será realizada en cada evento.

Control núm. 13

Nombre: cmdCalcular

Tipo: Botón de comandos.

Al presionar este botón el usuario inicializará la serie de procedimientos que se encargan de realizar los cálculos referentes al desempeño de la batería de los nodos.

Control núm. 14

Nombre: cmdResumen

Tipo: Botón de comandos.

Presionando este botón se muestra el segundo formulario de la aplicación

Control núm. 15**Nombre:** txtETC**Tipo:** Etiqueta.

Posteriormente al desarrollo de los cálculos de la aplicación, aquí se presentará el dato referente a la **energía total consumida** durante el evento, especificando el dato en mAH. y sin considerar los períodos de adormecimiento del dispositivo.

Control núm. 16**Nombre:** txtDTE**Tipo:** Etiqueta.

Aquí desplegará el programa el dato calculado para la duración total del evento, generado a partir de la tabla de datos. El tiempo estará expresado en segundos.

Control núm. 17**Nombre:** txtEMCMA**Tipo:** Etiqueta.

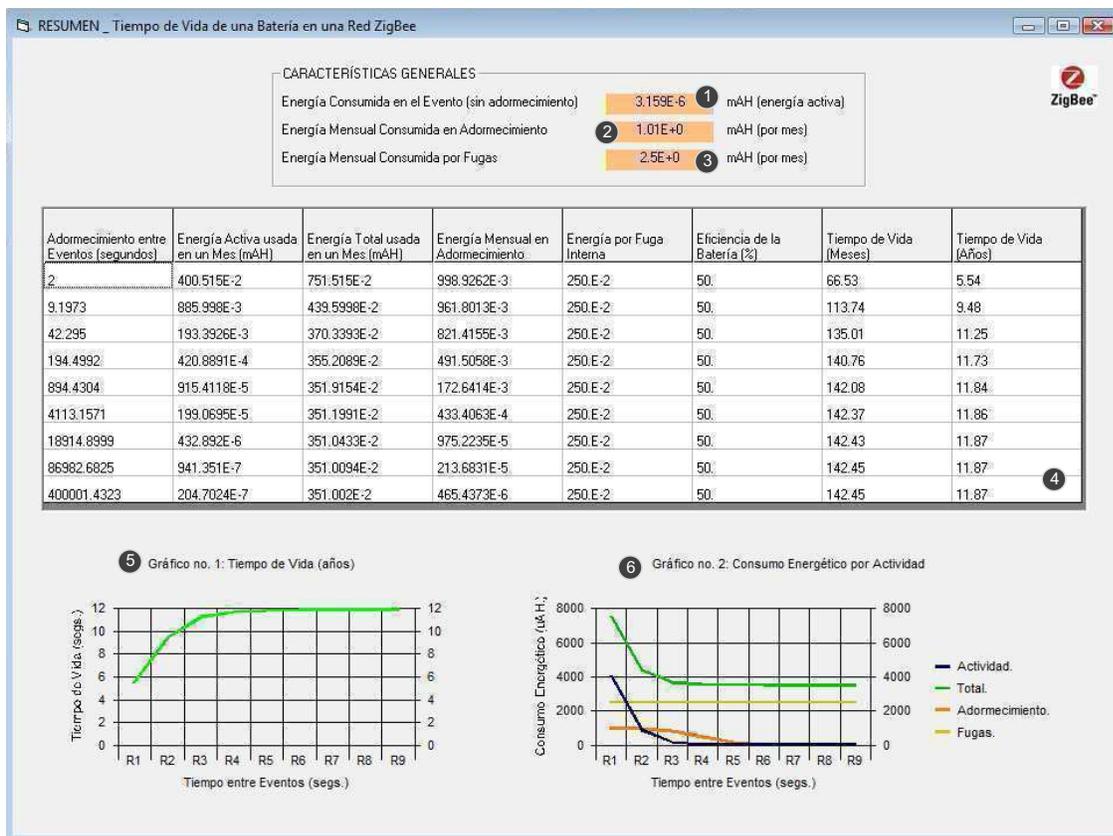
En este espacio se mostrará el valor del consumo energético mensual de la batería cuando se encuentra operando en modo de adormecimiento.

Control núm. 18**Nombre:** txtEMFC**Tipo:** Etiqueta.

Aquí se mostrará el valor calculado para el consumo energético mensual de la batería producido por las fugas de corriente en ésta.

La figura 70 corresponde al segundo formulario de la aplicación. A este formulario se accede al presionar el botón de comandos “cmdResumen”, tal como se especificó en el primer formulario de la aplicación. Al igual que con el primer formulario, se identifican y describen los controles y sus funciones.

Figura 70. Formulario de resumen



Control núm. 1

Nombre: lblCGDato_1

Tipo: Etiqueta.

Aquí se presentará el dato referente a la **energía total consumida** durante el evento, especificándolo en mAh. y sin considerar los períodos de adormecimiento del dispositivo.

Control núm. 2**Nombre:** lblCGDato_2**Tipo:** Etiqueta.

En este espacio se mostrará el valor del consumo energético mensual de la batería cuando se encuentra operando en modo de adormecimiento.

Control núm. 3**Nombre:** lblCGDato_3**Tipo:** Etiqueta.

Aquí se mostrará el valor calculado para el consumo energético mensual de la batería producido por las fugas de corriente en ésta.

Control núm. 4**Nombre:** gridResumen**Tipo:** Conjunto de celdas.

En esta tabla se despliega un resumen del consumo energético de la batería en distintos modos de operación en función del tiempo transcurrido entre cada evento. A continuación se especifica la información contenida en cada una de las columnas de la tabla.

- **Columna núm. 1, “Adormecimiento entre eventos (segs.)”:** El programa generará una serie de valores correspondientes al tiempo que transcurre entre eventos. Los tiempos son generados tomando como referencia el límite temporal superior e inferior especificados por el usuario en el primer formulario de la aplicación.
- **Columna núm. 2, “Energía activa usada en un mes (mAH)”:** Valores obtenidos al considerar todas las actividades que realice el nodo, excluyendo solamente los tiempos de adormecimiento del dispositivo.

- **Columna núm. 3, “Energía total usada en un mes (mAH)”**: El dato que aquí se despliegue corresponde al consumo de cualquier actividad del nodo, ya sean programadas o sean consecuencia de la estructura física del nodo o la batería.
- **Columna núm. 4, “Energía mensual en adormecimiento (mAH)”**: Calculada con el valor del consumo de corriente especificado para el adormecimiento en la tabla de datos del primer formulario de la aplicación.
- **Columna núm. 5, “Energía por fuga interna”**: Dato calculado a partir de lo especificado por el usuario en el primer formulario en lo referente a porcentaje de descarga por fugas de corriente y capacidad nominal de la batería.
- **Columna núm. 6, “Eficiencia de la batería”**: Valor porcentual especificado por el usuario en el primer formulario de la aplicación.
- **Columna núm. 7, “Tiempo de vida (meses)”**: Tiempo de vida, en meses, estimado por la aplicación para la batería.
- **Columna núm. 8, “Tiempo de vida (años)”**: Tiempo de vida, en años, estimado por la aplicación para la batería.

Control núm. 5

Nombre: chartVB

Tipo: Gráfico estadístico.

En este gráfico se despliegan los valores de la octava columna de la tabla de datos, tiempo de vida en años, en función de los tiempos de adormecimiento considerados en la primera columna de la misma tabla.

Control núm. 6

Nombre: chartMisc

Tipo: Gráfico estadístico.

Este gráfico presenta una gráfica de línea para cada consumo energético (activo, en adormecimiento, fuga de corriente y total) que se haya estimado para el nodo en función de los tiempos de adormecimiento considerados en la primera columna de la tabla de datos. El dato en este caso está expresado en uAH. para una mejor visualización de los datos.

Código de la aplicación

' Variables globales de la aplicación

Option Explicit

Dim bDoNotEdit As Boolean

Dim bOnFixedPart As Boolean

' Conjunto de Funciones dedicadas al análisis

Private Function Calculos()

Dim i As Integer

On Error Resume Next

'Llenar tabla de la aplicación anexa

With Form2.gridResumen

 ' 1. Columna del tiempo en adormecimiento

 .TextMatrix(1, 0) = txtTMin.Text

 For i = 2 To 9

 .TextMatrix(i, 0) = Format(Str(CDec(.TextMatrix(i - 1, 0) * _

 Math.Sqrt(Math.Sqrt(Math.Sqrt((txtTMax.Text / txtTMin.Text))))), "#.####")

Next

For i = 1 To 9

' 2. Columna de Energía activa usada en un mes (mAH.)

.TextMatrix(i, 1) = Format(Str(CDec(Val(txtETC.Caption) * 30 * 24 * 3600 / _
(Val(.TextMatrix(i, 0)) + Val(txtDTE.Caption))), "###.####E+"))

' 3. Columna de Energía Total usada en un mes (mAH.)

.TextMatrix(i, 2) = Format(Str(CDec(Val(.TextMatrix(i, 1)) + _
Val(txtEMFC.Caption) + Val(txtEMCMA.Caption))), "###.####E+"))

' 4. Columna de Energía mensual en adormecimiento.

.TextMatrix(i, 3) = Format(Str(CDec(Val(txtEMCMA.Caption) * Val(.TextMatrix(i, 1)) _
/ (Val(.TextMatrix(i, 1)) + Val(txtDTE.Caption))), "###.####E+"))

' 5. Columna de Fuga Interna

.TextMatrix(i, 4) = Format(txtEMFC.Caption, "###.####E+"))

' 6. Columna de Eficiencia de la Batería (%)

.TextMatrix(i, 5) = Format(txtEB.Text, "###.####")

' 7. Columna de Vida de la Batería (Meses)

.TextMatrix(i, 6) = Format(Str(CDec((Val(txtCNB.Text) * Val(txtEB.Text) / _
(Val(.TextMatrix(i, 2)) * 100))), "###.##"))

' 8. Columna de Vida de la Batería (Años)

.TextMatrix(i, 7) = Format(Str(CDec(Val(.TextMatrix(i, 6)) / 12)), "##.##")

Next

End With

' Llamada a la función encargada del dibujo de la gráfica.

Call DibujarGrafico

End Function

Private Sub DibujarGrafico()

Dim i As Integer

Dim arID(1 To 4)

Dim arDatos_1(1 To 9, 1 To 2)

Dim arDatos_2(1 To 9, 1 To 4)

On Error Resume Next

With Form2.gridResumen

For i = 1 To 9

arDatos_1(i, 2) = .TextMatrix(i, 7)

arDatos_2(i, 1) = .TextMatrix(i, 1) * 1000

arDatos_2(i, 2) = .TextMatrix(i, 2) * 1000

arDatos_2(i, 3) = .TextMatrix(i, 3) * 1000

arDatos_2(i, 4) = .TextMatrix(i, 4) * 1000

Next

' Propiedades del gráfico general de tiempo de vida vrs. segundos entre eventos

With Form2.chartVB

.Title = "Gráfico no. 1: Tiempo de Vida (años)"

.chartType = VtChChartType2dLine

.ChartData = arDatos_1

.ShowLegend = False

.Plot.Axis(VtChAxisIdX).AxisTitle = "Tiempo entre Eventos (segs.)"

.Plot.Axis(VtChAxisIdY).AxisTitle = "Tiempo de Vida (segs.)"

End With

' Propiedades del gráfico de los consumos de energía vrs. segundos entre eventos

arID(1) = "Actividad."

arID(2) = "Total."

arID(3) = "Adormecimiento."

arID(4) = "Fugas."

With Form2.chartMisc

.Title = "Gráfico no. 2: Consumo Energético por Actividad"

.chartType = VtChChartType2dLine

.ChartData = arDatos_2

.ShowLegend = True

.Legend.Location.LocationType = VtChLocationTypeRight

For i = 1 To 4

.Column = i

```

        .ColumnLabel = arID(i)
    Next
    .Plot.Axis(VtChAxisIdX).AxisTitle = "Tiempo entre Eventos (segs.)"
    .Plot.Axis(VtChAxisIdY).AxisTitle = "Consumo Energético (uAH.)"
End With

```

```
End With
```

```
End Sub
```

' Función encargada de cargar el formulario inicial al sistema.

```
Private Sub Form_Load()
```

```
Dim i As Long
```

```
'
```

```
' Agregar algunas filas y columnas a la
' tabla para tener algo con qué empezar.
```

```
'
```

```
Unload Form2
```

```
With gridTest
```

```
    .RowHeightMin = txtEdit.Height
```

```
    ' Tamaño de la primer columna fija
```

```
    .ColWidth(0) = .ColWidth(0) / 2
```

```
    .ColAlignment(0) = 1
```

```
    For i = 1 To 5
```

```
        .ColWidth(i) = .ColWidth(0) * 4
```

```
    Next
```

```
    ' Nombrar las filas
```

```
    For i = .FixedRows To .Rows - 1
```

```
        .TextArray(fLabelRow(i, 0)) = i
```

```
    Next
```

```
    'Nombrar las columnas
```

```
    Call fLabelCol
```

End With

' Formato de las celdas y el texto

' al mismo tipo de letra.

,

With txtEdit.Font

.Name = gridTest.Font.Name

.Size = gridTest.Font.Size

.Weight = gridTest.Font.Weight

End With

txtEdit.BackColor = vb3DLight

txtEdit = ""

bDoNotEdit = False

,

' Establecer actividades disponibles

With lstActividades_1

.AddItem "Adormecido."

.AddItem "Despierto."

.AddItem "Capturar, procesar, almacenar."

.AddItem "Modo Recepción para CCA."

.AddItem "Transmisión de paquetes."

.AddItem "Recepción, acuse de recibo."

.AddItem "Otras"

End With

End Sub

' Funciones de formato de las tablas de datos y edición por parte del usuario.

Private Sub Form_Click()

Call pSetCellValue

End Sub

Private Sub gridTest_Click()

```
'  
' Mostrar la caja de texto si el usuario  
' hace clic en una fila o columna no fija.  
'
```

```
If bOnFixedPart Then Exit Sub
```

```
Call pEditGrid(32)
```

```
End Sub
```

Private Sub gridTest_GotFocus()

```
If bDoNotEdit Then Exit Sub
```

```
'  
' Copiar el valor de la caja de texto a la tabla  
' y ocultar la caja de texto.  
'
```

```
Call pSetCellValue
```

```
End Sub
```

Private Sub gridTest_LeaveCell()

```
If bDoNotEdit Then Exit Sub
```

```
Call gridTest_GotFocus
```

```
End Sub
```

Private Sub gridTest_MouseDown(Button As Integer, Shift As Integer, X As Single, Y As Single)

```
Dim I As Long
```

```
Dim IWidth As Long
```

```
With gridTest
```

```
For I = 0 To .Cols - 1
```

```
    If .CollsVisible(I) Then
```

```
        IWidth = IWidth + .ColWidth(I)
```

```
    End If
```

```

Next
'
' Verificar que estamos en la parte fija de la tabla
'
bOnFixedPart = (X < .ColWidth(0)) Or _
                (X > IWidth) Or _
                (Y < .RowHeight(0)) Or _
                (Y > .Rows * .RowHeightMin)
End With
End Sub

```

Private Sub gridTest_Scroll()

```

Call gridTest_GotFocus
End Sub

```

Private Function fLabelRow(IRow As Long, ICol As Long) As Long

```

fLabelRow = ICol + gridTest.Cols * IRow
End Function

```

Private Function fLabelCol()

```

Dim i As Integer

```

' Nombrar las columnas

```

With gridTest
    .TextArray(0) = "Paso"
    .TextArray(1) = "Actividad"
    .TextArray(2) = "Duración (ms.)"
    .TextArray(3) = "Corriente Promedio (uA.)"
    .TextArray(4) = "Repeticiones"
    .TextArray(5) = "Energía (mAH)"

For i = 0 To 5
    .ColAlignment(i) = 3 'Centrado

```

```
Next
End With

End Function
```

Private Sub pSetCellValue()

```
If txtEdit.Visible Then
    gridTest.Text = txtEdit.Text
    txtEdit.Visible = False
End If
End Sub
```

Private Sub pEditGrid(KeyAscii As Integer)

```
'
' Posicionamiento y edición de la caja de texto.
'
```

```
With txtEdit
```

```
    Select Case KeyAscii
```

```
        Case 0 To 32
```

```
            '
```

```
            ' Editar el texto actual.
```

```
            '
```

```
            .Text = gridTest
```

```
            .SelStart = 0
```

```
            .SelLength = 1000
```

```
        Case 8, 46, 48 To 57
```

```
            '
```

```
            ' Reemplazar el texto actual pero sólo
```

```
            ' si el usuario a ingresado un número.
```

```
            '
```

```
            .Text = Chr(KeyAscii)
```

```
            .SelStart = 1
```

```

Case Else
    ' Si se ha ingresado un caracter inválido
    ' se coloca un cero en su lugar.
    .Text = "0"
End Select
End With
' Posicionamiento adecuado del cuadro de texto.
With gridTest
    If .CellWidth < 0 Then Exit Sub
    txtEdit.Move .Left + .CellLeft, .Top + .CellTop, .CellWidth, .CellHeight
End With
txtEdit.Visible = True
txtEdit.SetFocus
End Sub

```

Private Sub txtEdit_KeyDown(KeyCode As Integer, Shift As Integer)

```

' Ver qué tecla se presionó en la caja de texto.

```

```

With gridTest
    Select Case KeyCode
        Case 13 'ENTER
            .SetFocus
        Case 27 'ESC
            txtEdit.Visible = False
            .SetFocus
        Case 38 ' Flecha hacia arriba
            .SetFocus
            DoEvents
            If .Row > .FixedRows Then
                bDoNotEdit = True
                .Row = .Row - 1
                bDoNotEdit = False
            End If
        Case 40 ' Flecha hacia abajo

```

```

        .SetFocus
    DoEvents
    If .Row < .Rows - 1 Then
        bDoNotEdit = True
        .Row = .Row + 1
        bDoNotEdit = False
    End If
End Select
End With
End Sub

```

Private Sub txtEdit_KeyPress(KeyAscii As Integer)

```

Select Case KeyAscii
    Case Asc(vbCr)
        KeyAscii = 0
    Case 8, 46
    Case 48 To 57
    Case Else
        KeyAscii = 0
End Select
End Sub

```

‘Rutinas de los controles de “botón” que activan funciones dedicadas al análisis de los datos:

Private Sub cmdAgregar_Click()

```

Dim i As Variant
Dim k As Variant

For i = 0 To lstActividades_2.ListCount
    gridTest.TextMatrix(i + 1, 1) = lstActividades_2.List(i)
Next

End Sub

```

Private Sub cmdCalcular_Click()

Dim i As Integer

Dim aux As Variant

With gridTest

' Capacidad actual de la batería

txtCA.Caption = Format(Str(CDec(Val(txtCNB.Text) * Val(txtEB.Text) / 100)), "###.##")

' Energía consumida por cada actividad

For i = 1 To lstActividades_2.ListCount

.TextMatrix(i, 5) = Format(Str(CDec((Val(.TextMatrix(i, 2)) * _
Val(.TextMatrix(i, 3)) / (3600 * 1000000#))))), "###E-")

Next

' Energía consumida sin considerar el adormecimiento

aux = 0

For i = 1 To lstActividades_2.ListCount

If .TextMatrix(i, 1) <> "Adormecido." Then

aux = aux + CDec(.TextMatrix(i, 5))

End If

Next i

txtETC.Caption = Format(Str(aux), "###E+")

Form2.lblCGDato_1.Caption = txtETC.Caption

' Duración total del evento

aux = 0

For i = 1 To lstActividades_2.ListCount

aux = aux + (Val(.TextMatrix(i, 2)) * Val(.TextMatrix(i, 4))) + Val(.TextMatrix(i, 2))

Next i

txtDTE.Caption = Format(Str(aux * 0.001), "###E-")

' Energía consumida en un mes en adormecimiento

i = 0

```

Do While i <= lstActividades_2.ListCount
    If .TextMatrix(i, 1) = "Adormecido." Then
        txtEMCMA.Caption = Format(Str((CDec(30 * 24 * Val(.TextMatrix(i, 3)) * 0.001))), "#.##E+")
        Form2.lblCGDato_2.Caption = txtEMCMA.Caption
        i = lstActividades_2.ListCount + 1
    Else
        i = i + 1
    End If
Loop

```

' Energía consumida en un mes por fugas de corriente

```

txtEMFC.Caption = Format(Str(CDec(Val(txtCA.Caption) * Val(txtDMB.Text) / 100)), "#.##E+")
Form2.lblCGDato_3.Caption = txtEMFC.Caption

```

' Tiempo de vida de la batería en el evento

```

aux = CDec(Val(txtETC.Caption) * 30 * 24 * 3600 / (Val(txtAE.Text) + Val(txtDTE.Caption)))
txtTVE.Caption = Format(Str(CDec(Val(txtCNB.Text) * Val(txtEB.Text) / _
    (aux + Val(txtEMFC.Caption) + Val(txtEMCMA.Caption)) / 100 / 12)), "#.##")

```

End With

'Llamada a la función encargada de analizar los datos que se colocan en la tabla de datos de referencia.

```

Call Calculos

```

End Sub

Private Sub cmdResumen_Click()

```

Load Form2
Form2.Visible = True

```

End Sub

Private Sub txtCNB_Change()

```

Dim varCNB As Variant
Dim douCNB As Double

```

```
varCNB = txtCNB.Text
If IsNumeric(varCNB) <> True Then
    txtCNB.Text = "Dato en mA..."
Else
    douCNB = Cdbl(varCNB)
End If
```

End Sub

Private Sub txtDMB_Change()

```
Dim varDMB As Variant
Dim douDMB As Double
```

```
varDMB = txtDMB.Text
If IsNumeric(varDMB) <> True Then
    txtDMB.Text = "Valor porcentual, %"
Else
    douDMB = Cdbl(varDMB)
End If
```

End Sub

Private Sub txtEB_Change()

```
Dim varEB As Variant
Dim douEB As Double
```

```
varEB = txtEB.Text
If IsNumeric(varEB) <> True Then
    txtEB.Text = "Valor porcentual, %"
Else
    douEB = Cdbl(varEB)
End If
```

End Sub

Private Sub imAgregar_Click()

IstActividades_2.AddItem IstActividades_1.Text

End Sub

Private Sub imQuitar_Click()

'Quitar elementos del listado de actividades a seleccionar

Dim i As Long

i = 1

Do While i <= IstActividades_2.ListCount

If IstActividades_2.List(i) = IstActividades_2.Text Then

IstActividades_2.RemoveItem (i)

i = IstActividades_2.ListCount + 1

End If

If IstActividades_2.List(0) = IstActividades_2.Text Then

IstActividades_2.RemoveItem (0)

i = IstActividades_2.ListCount + 1

End If

i = i + 1

Loop

i = 1

End Sub

' Código del formulario 2

Private Sub Form_Load()

Dim i As Integer

With gridResumen

' **Llenar los datos de la tabla**

```
.TextMatrix(0, 0) = "Adormecimiento entre Eventos (segundos)"  
.TextMatrix(0, 1) = "Energía Activa usada en un Mes (mAH)"  
.TextMatrix(0, 2) = "Energía Total usada en un Mes (mAH)"  
.TextMatrix(0, 3) = "Energía Mensual en Adormecimiento"  
.TextMatrix(0, 4) = "Energía por Fuga Interna"  
.TextMatrix(0, 5) = "Eficiencia de la Batería (%)"  
.TextMatrix(0, 6) = "Tiempo de Vida (Meses)"  
.TextMatrix(0, 7) = "Tiempo de Vida (Años)"
```

```
.RowHeightMin = Form1.txtEdit.Height * 0.8
```

' Ajustar ancho de las celdas.

```
For i = 0 To 7  
    .ColWidth(i) = .ColWidth(i) * 1.75  
    .ColAlignment(i) = 2  
Next
```

```
.RowHeight(0) = .RowHeight(0) * 2
```

```
End With
```

```
End Sub
```

CLÚSTERES ZIGBEE

Tabla XXI. Registros del clúster módulo I/O

Parámetro	Corrimiento	Bytes	R/W	Reinicio	Descripción
ADC X	0x0000	2	R	N	ADC del módulo, canal X.
ADC Y	0x0002	2	R	N	ADC del módulo, canal Y.
ADC Z	0x0004	2	R	N	ADC del módulo, canal Z.
DAC A	0x0006	2	R/W	N	DAC del módulo, canal A.
DAC B	0x0008	2	R/W	N	DAC del módulo, canal B.
GP I/O 0	0x000a	1	R/W	N	I/O de propósito general, línea 0.
GP I/O 1	0x000b	1	R/W	N	I/O de propósito general, línea 1.
GP I/O 2	0x000c	1	R/W	N	I/O de propósito general, línea 2.
GP I/O 3	0x000d	1	R/W	N	I/O de propósito general, línea 3.
GP I/O 4	0x000e	1	R/W	N	I/O de propósito general, línea 4.
GP I/O 5	0x000f	1	R/W	N	I/O de propósito general, línea 5.
SPI Port	0x0010	varía	R/W	N	Registro del puerto SPI.
UART Port	0x0011	varía	R/W	N	Registro del puerto UART, enviar dato ASCII.
GP I/O Direction	0x0012	1	R/W	N	Registro que define el comportamiento de los pines del GPIO, 0 = salida y 1 = entrada.
GP I/O Init	0x0013	1	R/W	Y	Inicialización del registro GPIOs, valor que desplegará de forma predeterminada.
DAC A Init	0x0014	1	R/W	Y	Valor de 16 bits que define el valor que desplegará el DAC del canal A.
DAC B Init	0x0016	1	R/W	Y	Valor de 16 bits que define el valor que desplegará el DAC del canal A.
Status/GP I/O Alternate Function Enable	0x0018	1	R/W	Y	Registro que define funciones alternativas para las señales de estado y los pines del GPIO.

Interrupciones del GPIO	0x0019	1	R/W	N	Registro que permite utilizar los pines del GPIO0 - GPIO3.
-------------------------	--------	---	-----	---	------------------------------------------------------------

Fuente: Cirronet, **ZMN2405 / HP ZigBee module developer's kit user's manual**. Pág. 52

Tabla XXII. Registros del clúster de configuración

Parámetro	Corrimiento	Bytes	R/W	Reinicio	Descripción
Versión de la aplicación.	0x0000	2	R	Y	Permite la lectura de la versión del perfil. La versión se despliega como tres números separados por comas.
Modo del dispositivo.	0x0002	1	R	Y	Indica el modo de operación del módulo: 0x00 = Coordinador 0x01 = Enrutador 0x02= Dispositivo Terminal
Modo serial.	0x0003	2	R/W	N	Permite que el dispositivo se conecte a distintas ratas de baudios. 1200 = 0x03 2400 = 0x04 4800 = 0x05 9600 = 0x06 19200 = 0x07 38400 = 0x08 (valor predeterminado) 57600 = 0x09 115200 = 0x0B
Número del modelo.	0x0005	2	R	N/A	Registro que identifica al módulo. Es de sólo lectura.
Nombre amistoso.	0x0007	16	R/W	N	Registro de 16 bytes definido por el usuario. Si el nombre deseado por el usuario es menor a 16 bytes, el resto debe llenarse con caracteres nulos.
Modo de adormecimiento.	0x0017	1	R/W	N	Registro utilizado únicamente por los Dispositivos Terminales, para habilitar el adormecimiento y uso de interrupciones. 0x00 = deshabilitado

					0x01 = habilitado.
Modo de datos del UART.	0x0018	1	R/W	N	Este parámetro selecciona entre el Modo Transparente de operación (0x00, el UART no tendrá formato de paquete) y el Modo de Protocolo (0x01, el UART utiliza un formato de paquete predefinido). Cuando se utiliza el Modo Transparente, todos los datos que se reciban en el UART es enviado al coordinador. Para salir del Modo Transparente, no se deberán enviar datos por 2 segundos. A continuación se deberá enviar la siguiente secuencia de escape de 8 bytes: 0xED 0xAE 0xF9 0x2B 0x07 0x62 0x3C 0xED . De forma predefinida se utiliza el Modo de Protocolo.
Opciones de Configuración no. 1	0x0019	1	R/W	N	Este registro controla varias opciones del dispositivo, según la siguiente tabla. El valor predeterminado es 0xF3. <u>Bit</u> 0 = Registro del Dispositivo. 1 = Anuncio de Enlace. 2 = Interrupción de adormecimiento. 3 = Estado de Adormecimiento de E/S. 4 = Habilidad de los Mensajes GPIO. 5 = Habilidad de los Mensajes GPIO1. 6 = Habilidad de los Mensajes GPIO2. 7 = Habilidad de los Mensajes GPIO3.
Opciones de Mensaje	0x001A	1	R/W	N	Este registro establece las opciones de mensaje para

(Controladas por las Opciones de Configuración no. 1)					<p>las entradas interrumpibles según el siguiente listado: 0 - 1 = Opciones de Mensaje para GPIO0 2 - 3 = Opciones de Mensaje para GPIO1 4 - 5 = Opciones de Mensaje para GPIO2 6 - 7 = Opciones de Mensaje para GPIO3 Solamente una de las anteriores opciones podrá ser seleccionada. 0b00 = Es un botón de mensaje, es un evento que describe el estado de los GPIO. Siempre debe ser 0b0 dado que las interrupciones se hacen en flanco de bajada. Este modo se habilita de forma predeterminada. 0b01 = Mensaje E/S del módulo, es un evento que contiene el dato actual del Módulo I/O completo. 0b10 = Mensaje de anuncio del dispositivo, este mensaje forzará al dispositivo a registrarse de nuevo con el coordinador enviando un paquete de anuncio del dispositivo. 0b11 = Mensaje reservado.</p>
-------------------------------------------------------	--	--	--	--	------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

Fuente: Cirronet, **ZMN2405 / HP ZigBee module developer's kit user's manual**. Pág. 53

Tabla XXIII. Registros del clúster de reinicio

Parámetro	Corrimiento	Bytes	R/W	Reinicio	Descripción
Reinicio del Microcontrolador	0x0000	1	W	Auto	Reinicia el microcontrolador del módulo. 0x5A es el valor a escribir para reiniciar el radio.

Recuperación de la Configuración de Fábrica	0x0001	1	W	Auto	Reinicia los parámetros de todos los clústeres y luego el microcontrolador, para luego establecer los valores de fábrica. 0x5A es el valor a escribir para el restablecimiento.
---------------------------------------------	--------	---	---	------	---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

Fuente: Cirronet, ZMN2405 / HP ZigBee module developer's kit user's manual. Pág. 57

Tabla XXIV. Registros del clúster de red

Parámetro	Corrimiento	Bytes	R/W	Reinicio	Descripción
Dirección MAC	0x0000	8	R	N/A	Devuelve la dirección MAC asignada desde fábrica.
Dirección de Red	0x0008	2	R	N/A	Contiene la dirección de red asignada al dispositivo por parte del padre.
Dirección de Enlace	0x000A	8	R/W	Y	Especifica la dirección MAC del Coordinador de red. Esto permite que los enlaces se mantengan aún después de retirar la alimentación.
Red Estática	0x0012	1	R/W	Y	Esta variable permite que el usuario fuerce a sus dispositivos a permanecer con la misma configuración de red aún cuando se les retire la alimentación. Se habilita la opción al colocar 0x01 en el registro. Con el valor 0x00 se permite que el dispositivo configure la red de distinta forma cada vez que se reinicie. Predeterminadamente, la opción está deshabilitada.
Identificación Predeterminada de PAN	0x0013	2	R/W	Y	Al colocar en el registro un valor distinto a 0xFFFF se forzará al Enrutador o Dispositivo Terminal a buscar una red con un identificador PAN específico. Todos los

					demás serán rechazados. Un Coordinador iniciará una red con esta variable como su PAN ID. Los tres bits más significativos del registro están enmascarados, por lo tanto 0x7FFF y 0x3FFF generarán el mismo identificador. Al establecer un valor 0xFFFF hará que el Coordinador forme una red con un identificador aleatorio, y que un Enrutador o Dispositivo Terminal se unan a una red con cualquier identificador.
Estado de Enlace	0x0015	1	R	N/A	Informa al usuario sobre el estado del enlace.

Fuente: Cirronet, **ZMN2405 / HP ZigBee module developer's kit user's manual**. Pág. 58

Tabla XXV. Registros del clúster de RF

Parámetro	Corrimiento	Bytes	R/W	Reinicio	Descripción
Listado de Canales	0x0000	4	R/W	Y	Permite que el usuario defina al dispositivo un grupo de canales para que un Coordinador forme una red o un Enrutador o Dispositivo Terminal busquen una red. Es un mapa de bits que representa los canales de frecuencia. Por lo menos uno debe establecerse en algo. Para los dispositivos que deseen comunicarse debe elegirse un canal común. El mapa de bits permitido es 0x07FFF800. El canal individual más bajo es 0x00000800 (2405 MHz). El canal individual más alto es 0x04000000 (2480 MHz). Puede elegirse cualquier

					combinación de canales, pero el radio utilizará sólo un canal a la vez. No se trata de establecer una secuencia de saltos definida.
Canal Utilizado	0x0004	1	R/W	N/A	Su valor representa el canal que el radio está usando actualmente.
Potencia de Transmisión	0x0005	1	R/W	N	Aquí se define la potencia que está utilizando el módulo. La potencia nominal de transmisión puede reducirse hasta 25 dB. El valor que se especifique determina la cantidad de potencia que se disminuirá en el módulo. Los valores permitidos: 0x00 = 0dB 0x21 = -1 dB 0x2A = -10 dB 0x23 = -3 dB 0x2F = -15 dB 0x25 = -5 dB 0x39 = -25 dB 0x27 = -7 dB Predeterminadamente, 0 dB.
Margen de Energía para la Formación de la Red	0x0006	1	R/W	Y	Aquí se establece el valor de potencia a partir del cual el Coordinador no considerará un canal para formar la red.

Fuente: Cirronet, ZMN2405 / HP ZigBee module developer's kit user's manual. Pág. 59

Tabla XXVI. Registros del clúster de seguridad

Parámetro	Corrimiento	Bytes	R/W	Descripción
Código de Seguridad	0x0000	10	W	Este código es utilizado para dar seguridad a nivel de enlace y red. Si se utiliza, cada dispositivo de la red deberá utilizar el mismo código y nivel de seguridad. Si se utiliza un código distinto, no se permitirá que los dispositivos se unan a la red. El código puede ser cualquier secuencia binaria de 16 bits, se

				utilizará para encriptar los datos.
PIN de Seguridad	0x0001	4	W	Secuencia útil para el nodo que la tiene habilitada. Al establecerse, todos los clúster se bloquean y no permiten realizar operaciones de escritura o escritura se realice en ellos. Para desbloquearlos, el PIN correcto debe ser escrito en este registro. Para bloquearlos, se debe escribir cualquier valor de 4 bytes. para establecer un cambio de PIN, se debe escribir un dato de 8 bytes donde los cuatro primeros correspondan al nuevo PIN y los últimos al antiguo. Se debe recordar el nuevo PIN pues un reinicio a los parámetros de fábrica no restablecerá este registro. Predeterminadamente, 0x76543210.

Fuente: Cirronet, **ZMN2405 / HP ZigBee module developer's kit user's manual**. Pág. 60

MENSAJES ZIGBEE

En la presente sección se muestra una descripción detallada de cada uno de los mensajes que pueden incluirse en las tramas de comando manejadas por el estándar ZigBee.

1. *Set Field* (Establecer Campo)

Escribe los datos al registro del clúster especificado. El destinatario envía un acuse de recibo a través de un mensaje *Set Reply*.

8 bytes	2 bytes	1 byte	1 byte	1 byte	1 byte	Varía
Dirección MAC	Identificador de Perfil	Final	Clúster	Desplazamiento	Longitud	Datos (primero el menos significativo)

- **Código del mensaje:** 0x01
- **Dirección MAC:** Destino del paquete. Si se refiere al dispositivo conectado (local) es 0x0000000000000000.
- **Identificador de perfil:** 0xC000
- **Final:** 0x01
- **Clúster:** Clúster que contiene el registro a establecer.
- **Desplazamiento:** Índice del arreglo.
- **Longitud:** Número de bytes a continuación.
- **Datos**

2. *Set Reply* (Generar Respuesta), 0x81

Enviado como acuse de recibo a un mensaje **Set Field** cuando se lleva a cabo satisfactoriamente. Se recibirá un mensaje de **Error** si el mensaje no logró entregarse.

1 byte	1 byte
Reservado	LQI

- **Código del mensaje:** 0x81

3. *Get Field* (Obtener Campo)

Solicitud del valor de algún elemento de un clúster. El valor se devuelve a través de un mensaje *Get Reply*.

8 bytes	2 bytes	1 byte	1 byte	2 bytes	1 byte
Dirección MAC	Identificador de Perfil	Final	Clúster	Desplazamiento	Longitud

- **Código del Mensaje:** 0x05

4. *Get Reply* (Obtener Respuesta)

Mensaje que retorna el valor del parámetro solicitado con *Get Field*.

8 bytes	2 bytes	1 byte	1 byte	2 byte	1 byte	Varía	1 byte
Dirección MAC	Identificador de Perfil	Final	Clúster	Desplazamiento	Longitud	Datos (primero el menos significativo)	LQI

- **Código:** 0x85

5. *Send String* (Enviar Cadena)

Envía una cadena de datos para que sea la salida del UART del dispositivo destino. Las transmisiones exitosas generan un acuse de recibo a través de un mensaje tipo *Send String Reply*. Si la transmisión no fue efectiva generará un mensaje

de Error. Si se especifica el dispositivo local, el remitente, la cadena de datos será devuelta a éste.

8 bytes	2 bytes	1 byte	1 byte	2 byte	1 byte	Varía
Dirección MAC	Identificador de Perfil	Final	Clúster	Desplazamiento	Longitud	Datos (primero el menos significativo)

- **Código del mensaje:** 0x0A
- **Dirección MAC:** Destino del paquete.
- **Identificador del perfil:** 0XC00
- **Final:** 0x01
- **Clúster:** 0x01
- **Desplazamiento:** 0x0011
- **Longitud:** Número de bytes faltante.
- **Datos:** La cadena enviada.

6. **Send String Reply (Respuesta de la Recepción de la Cadena)**

Mensaje de acuse de recibo de la cadena de datos recibida y reenviada al remitente. Si no se logró una transmisión exitosa, se envía un mensaje de Error.

1 byte	1 byte
Reservado	LQI

- **Código del Mensaje:** 0x8A

7. **Receive String (Recibir Cadena) 0x8E**

Mensaje utilizado para indicar que una cadena de datos, en el campo de datos, fue enviada por el dispositivo indicado en el campo de la dirección MAC utilizando el mensaje *Send String*.

8 bytes	2 bytes	1 byte	1 byte	2 byte	1 byte	Varía
Dirección MAC	Identificador de Perfil	Final	Clúster	Desplazamiento	Longitud	Datos (primero el menos significativo)

- **Código del mensaje:** 0x8E
- **Dirección MAC:** Fuente del paquete.
- **Identificador del perfil:** 0XC000
- **Final:** 0x01
- **Clúster:** 0x01
- **Desplazamiento:** 0x0011
- **Longitud:** Número de bytes faltante.
- **Datos:** La cadena enviada.

8. *Send SPI* (Enviar SPI)

Envía datos, los solicitados, a través del puerto SPI del dispositivo destino. Cuando se da una transmisión exitosa, se genera un mensaje *Send SPI Reply*, de lo contrario se envía un mensaje de error.

8 bytes	2 bytes	1 byte	1 byte	2 byte	1 byte	Varía
Dirección MAC	Identificador de Perfil	Final	Clúster	Desplazamiento	Longitud	Datos (primero el menos significativo)

- **Código del mensaje:** 0x0C
- **Dirección MAC:** Dirección del destino del paquete.
- **Identificador del perfil:** 0XC000
- **Final:** 0x01
- **Clúster:** 0x01
- **Desplazamiento:** 0x0010
- **Longitud:** Número de bytes faltante.
- **Datos:** Los bytes a enviar al puerto SPI.

9. *Send SPI Reply* (Enviar Respuesta del SPI)

Devuelve los datos solicitados por el dispositivo SPI conectado al dispositivo destino especificado en el comando *Send SPI*. Cuando se especifica el dispositivo local, los datos serán del bus del SPI en el módulo local.

8 bytes	2 bytes	1 byte	1 byte	2 byte	1 byte	Varía
Dirección MAC	Identificador de Perfil	Final	Clúster	Desplazamiento	Longitud	Datos (primero el menos significativo)

- **Código del mensaje:** 0x8C
- **Dirección MAC:** Dirección del dispositivo que recibió el comando Send String.
- **Identificador del perfil:** 0XC000
- **Final:** 0x01
- **Clúster:** 0x01
- **Desplazamiento:** 0x0010
- **Longitud:** Envía el mismo número de bytes que fue enviado con el comando Send SPI.
- **Datos:** Los elementos leídos desde el dispositivo SPI conectado.

10. *Get IEEE Address* (Obtener Dirección IEEE)

Solicita la dirección MAC del dispositivo o bien la dirección de red, NWK. Cuando en el tipo de solicitud se especifica un 0x00, sólo se solicita la MAC del dispositivo especificado en la dirección de red. Cuando el tipo de solicitud es 0x01, se refiere a la MAC del dispositivo definido en el campo de dirección de red, y sólo los dispositivos asociados con el especificado por la dirección de red. Este tipo de solicitud es utilizado para solicitar las direcciones de red de los dispositivos que se han anexoado a la misma a través de un Enrutador. Para obtener la dirección MAC de los dispositivos asociados, el comando *Get IEEE Address* debe ser enviado para cada dispositivo individualmente.

2 bytes	1 byte	1 byte
Dirección de Red (NWK)	Tipo de Petición	Índice de Inicio

- **Código del mensaje:** 0x10
- **Dirección de red:** Dirección de red del dispositivo para el cual se está solicitando la dirección IEEE.
- **Tipo de petición:** Especifica el tipo de dato devuelto en la respuesta,
 - **0x00:** Sólo se solicita la dirección MAC.
 - **0x01:** Se solicita la MAC y la dirección de red de los dispositivos asociados.
- **Índice de inicio:** Se utiliza al solicitar la dirección de red de los dispositivos asociados, indica el punto en el listado de dispositivos asociados en que el remitente desea que se le empiece a informar sobre los dispositivos en la red.

11. *Get IEEE Address Reply* (Respuesta de la Petición de Dirección IEEE)

Este mensaje devuelve la dirección MAC de los dispositivos especificados a través del comando *Get IEEE Address*. Cuando el comando anterior utiliza el tipo de petición 0x01, devolverá la dirección MAC y el número de dispositivos asociados en la red con el dispositivo especificado en el campo de dirección de red. Para obtener la dirección MAC de los asociados, debe enviarse un comando *Get IEEE Address* individualmente, para cada dispositivo asociado.

2 bytes	8 bytes	1 byte	1 byte	Variable
Dirección de Red (NWK)	Dirección MAC IEEE	Índice de Inicio	Número de Dispositivos Asociados	Lista de Direcciones de Red

- **Código del mensaje:** 0x90
- **Dirección de red:** Dirección de red del dispositivo cuya dirección IEEE ha sido solicitada.
- **Dirección MAC:** Dirección correspondiente a la dirección de red entregada.

- **Índice de inicio:** Si se solicitan los dispositivos asociados, este índice indica dónde inicia la lista devuelta. Este campo es utilizado en múltiples peticiones para trabajar con listas de mayor longitud que lo permisible para un paquete ZigBee.
- **Número de dispositivos asociados:** Representa el número de dispositivos que se han asociado con el dispositivo que tiene la dirección MAC solicitada.
- **Lista de direcciones de red:** Es la lista de las direcciones de red, de 16 bits, que corresponden a los dispositivos asociados al de interés. Se devuelve un campo vacío o nulo si no se solicita o entrega un informe de dispositivos asociados.

12. Get NWK Address (Obtener Dirección de Red)

Con este mensaje se solicita la dirección de red única, de dos bytes, del dispositivo identificado con la dirección de red de 8 bytes. Cuando el valor del tipo de solicitud es 0x00, se está solicitando únicamente la dirección de red del dispositivo. Cuando el valor del tipo de solicitud es 0x01, se está solicitando la dirección de red del dispositivo y de los dispositivos asociados a éste. Este modo de operación es utilizado para solicitar la dirección de red de dispositivos que se han unido a ésta a través de un Enrutador.

8 bytes	1 byte	1 byte
Dirección IEEE (MAC)	Tipo de Petición	Índice de Inicio

- **Código del mensaje:** 0x11
- **Dirección IEEE:** Dirección de red del dispositivo para el cual se está solicitando la dirección de red, NWK.
- **Tipo de petición:** Especifica el tipo de dato devuelto en la respuesta,
 - **0x00:** Sólo se solicita la dirección de red del dispositivo de interés.
 - **0x01:** Se solicita la del dispositivo de interés y la de los dispositivos asociados.

- **Índice de inicio:** Se utiliza al solicitar la dirección de red de los dispositivos asociados, indica el punto en el listado de dispositivos asociados en que el remitente desea que se le empiece a informar sobre los dispositivos en la red.

13. *Get NWK Address Reply* (Respuesta de la Solicitud de Dirección de Red)

Este mensaje devuelve la dirección de red al o los dispositivos especificados en el comando *Get NWK Address*.

2 bytes	8 bytes	2 bytes	Variable
Dirección de Red (NWK)	Dirección IEEE (MAC)	Número de Dispositivos Asociados	Lista de Direcciones de Red

- **Código del mensaje:** 0x91
- **Dirección de red:** Dirección de red de dos bytes correspondiente al dispositivo con la dirección IEEE especificada en el comando de solicitud.
- **Dirección MAC:** Dirección IEEE del dispositivo correspondiente a la dirección de red solicitada.
- **Número de dispositivos asociados:** Representa el número de dispositivos que se han asociado con el dueño de la dirección MAC especificada. Contiene también la longitud de la lista que sigue. Se devuelve un 0x00 si no existen dispositivos asociados o no se solicitó la información.
- **Lista de direcciones de red:** Lista con las direcciones de red de dos bytes correspondientes a los módulos asociados al dispositivo de interés.

14. *Discovery Request* (Petición de Descubrimiento)

Mensaje cuya función principal es encontrar otros dispositivos con los que sea posible comunicarse. Todos los dispositivos que coincidan con el perfil del Coordinador responderán con un mensaje de *Discovery Reply*. Éste continuará hasta

que se llegue al límite de reenvíos permitidos. Luego se devolverá un mensaje *Discovery End* con el número de intentos realizados. No se pueden generar más mensajes de nuevos descubrimientos hasta haber recibido el mensaje de terminación de descubrimiento.

2 bytes	1 byte	1 byte
Identificador de Perfil	Final	Tiempo Fuera

- **Código del mensaje:** 0x64
- **Identificador de perfil:** 0Xc000
- **Final:** 0x01
- **Tiempo fuera:** Tiempo, en segundos, que se esperará para reenviar peticiones de descubrimiento.

15. *Discovery Reply* (Respuesta del Descubrimiento)

Mensaje generado por cada dispositivo descubierto.

2 bytes
Dirección de Red (NWK)

- **Código del mensaje:** 0xE4
- **Dirección de red (NWK):** Dirección de 16 bits asignada al dispositivo por parte del Coordinador ZigBee. Se utiliza para el direccionamiento directo de los paquetes.

16. *Discovery End* (Finalización del Descubrimiento)

Indica la finalización del tiempo asignado para generar de peticiones de descubrimiento.

2 bytes
Número de Respuestas

- **Código del mensaje:** 0x65
- **Número de respuestas:** Devuelve el número de respuestas obtenidas por el módulo.

17. *Receive Field Event* (Recepción de Campo)

Mensaje utilizado para identificar mensajes generados por Enrutadores o Dispositivos Terminales trabajado en Modo Transparente.

8 bytes	2 bytes	1 byte	1 byte	2 byte	1 byte	Varía
Dirección MAC	Identificador de Perfil	Final	Clúster	Desplazamiento	Longitud	Datos (primero el menos significativo)

- **Código del mensaje:** 0x95
- **Dirección MAC:** Dirección del dispositivo que recibió el comando *Get/Send*.
- **Identificador del perfil:** 0XC000
- **Final:** 0x01
- **Clúster:** Éste es el clúster que contiene el campo configurado.
- **Desplazamiento:** Índice del arreglo de elementos en el campo de datos.
- **Longitud:** Número de bytes que restan en la trama del mensaje.
- **Datos:** La información, datos, enviados en la trama del mensaje.

18. *Link Announce* (Anuncio de Enlace)

Este es un evento no solicitado que se da cada vez que un dispositivo se anexa a una red. El dispositivo generará este mensaje para indicar que ha inicializado una red (si se trata de un Coordinador) o se ha asociado a un grupo de dispositivos (Enrutador o Dispositivo Terminal).

1 byte	1 byte
Estado del Enlace	LQI

- **Código del mensaje:** 0xD0
- **Estado del enlace:** A continuación se enumera lo que representa cada uno de los códigos que es posible recibir.
 - **0x01:** El dispositivo está inicializado pero no conectado.
 - **0x02:** El dispositivo se encuentra buscando redes personales (PAN) para conectarse a ellas.
 - **0x03:** El dispositivo se ha unido a una PAN.
 - **0x04:** El dispositivo se ha anexado pero aún no ha sido autenticado por el centro de seguridad de la red.
 - **0x05:** El dispositivo ha sido autenticado y se ha unido a la red como un Dispositivo Terminal.
 - **0x06:** El dispositivo se ha autenticado y se ha unido a la red como un Enrutador.
 - **0x07:** El dispositivo está inicializando una red.
 - **0x08:** El dispositivo ha inicializado una red como el Coordinador.
 - **0x09:** El dispositivo ha sido abandonado.
- **LQI:** Indicador de la calidad de la conexión del enlace de radio.

19. Device Registration (Registro del Dispositivo)

Este es un evento no solicitado que se da cada vez que un dispositivo se asocia a la red. Permite que la puerta de enlace (predeterminadamente el Coordinador) esté al tanto de los cambios en la dirección de red para algún elemento determinado. Incluye información sobre el tipo de dispositivo que se está registrando. Permite que el dispositivo trabajando como puerta de enlace comprenda a cada tipo de dispositivo que se comunique con ella.

2 bytes	1 byte	2 bytes
Dirección de Red	Dirección IEEE (MAC)	Número del Modelo
Número de Red del Nodo Padre	Dirección MAC del Padre	Razón de Verificación del Padre

- **Código del mensaje:** 0xF0

20. ERROR

Mensaje que retorna un código de error cuando es necesario.

1 byte	1 byte
Código de Error	LQI

- **Código del mensaje:** 0xFF
- **Código de error:** Código que hace referencia al tipo de error ocurrido.
 - **0x01:** Tiempo fuera en el último mensaje Get/Set
 - **0x02:** Tipo de paquete equivocado.
 - **0x03:** Error desconocido.
 - **0x04:** Comando no válido.
 - **0x05:** Campo de trama equivocado.
 - **0x06:** Valor fuera de límites para el campo de datos.
 - **0x07:** No existe suficiente memoria.
 - **0x08:** Error de autorización.
- **LQI:** Indicador de la calidad de mensaje.