

Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo

FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA

IMPLEMENTACIÓN DE UNA RED ZIGBEE

TESIS

**Que para obtener el Título de
INGENIERO EN ELECTRONICA**

**Presenta
Emmanuel Sedano Escobar**

**Asesor de Tesis
Ing. Félix Jiménez Pérez**

Septiembre del 2009

Agradecimientos

El presente Proyecto de titulación no hubiese sido posible sin la colaboración y el apoyo de aquellas personas que se interesaron en el mismo y a quienes van dedicadas estas líneas.

Agradezco a Dios por otorgarme el preciado don de la vida y permitirme día a día luchar por conseguir mis objetivos.

Agradezco principalmente a mi familia por luchar junto a mí en todo momento con el objetivo de ver concluido este proyecto.

Mi agradecimiento en especial al Ing. Félix Jiménez Pérez, pues su apoyo resulto fundamental en el desarrollo del proyecto.

Importantes agradecimientos a mis amigos y compañeros de toda la vida, aquellos que en las horas de estudio en la carrera fueron un apoyo fundamental y junto a ellos conseguimos sacar adelante nuestros sueños para verlos culminados poco a poco.

Dedicatoria

Este proyecto va dedicado a todas las personas que lucharon y luchan todos los días junto a mí, gracias por su apoyo, siempre los llevo en mi corazón.

A mis padres, que siempre me alentaron y me empujaron adelante para no dejarme caer en los momentos difíciles, gracias por darme la vida y por perdonar todos mis errores, para ustedes este trabajo, por ser el camino por el cual transito todos los días.

A mi hermano, pues siempre ha estado a mi lado en los momentos de mayor felicidad y los más tristes también.

Finalmente dedico este proyecto a todos mis amigos que nunca desmayan en busca de sus sueños y que de alguna u otra forma me ayudaron a salir adelante a través de mis años de estudio, así como en la elaboración de este trabajo; gracias mis hermanos, para ustedes mi dedicación.

Resumen

En el presente trabajo se desarrolló una red de monitoreo y control utilizando el protocolo ZigBee. Además se da una introducción al protocolo de comunicación, así como las características más relevantes de este tipo de redes.

El desarrollo de la red ZigBee se realizó utilizando módulos XBee y XBee PRO, para lo cual se realizaron pruebas con los módulos para detectar sus diferentes parámetros, conocer sus características, ventajas y desventajas de esta tecnología, para corroborar de manera práctica las características proporcionadas por el fabricante.

Se realizaron pruebas de todos los modos de operación de los módulos XBee, además se presentó de manera detallada en qué consiste cada uno de ellos, así como las principales características de los mismos. De manera similar se realizaron las pruebas con las diferentes topologías de red.

Las pruebas que se realizaron fueron realizadas utilizando protoboard, para lo cual se construyó una base para los módulos XBee para poder ser conectados al protoboard, debido a que las terminales de los módulos XBee no son compatibles con las terminales de un protoboard común. Y tener así la posibilidad de ser conectados a un microcontrolador, mediante comunicación serial.

Los resultados obtenidos se plasmaron en un manual, en donde adicionalmente se describen los pasos que se desarrollaron para la conexión y configuración de las diferentes topologías de redes ZigBee, y se describió todo lo referente a las características de los módulos empleados, así como sus parámetros de configuración.

Finalmente se obtuvo una red de monitoreo y control, utilizando el protocolo de comunicaciones ZigBee con ayuda de los módulos XBee. Dicha red se probó de manera práctica transmitiendo datos y controlando dispositivos remotos que adquirirían información como temperatura o potencia y configuración de un control de acceso de manera remota.

Contenido

Agradecimientos.....	ii
Dedicatoria.....	iii
Resumen.....	iv
Contenido.....	v
Lista de Figuras.....	ix
Lista de Tablas.....	xi
Lista de Símbolos y Abreviaciones.....	xii
Glosario de Términos.....	xiii
Capítulo 1. Introducción.....	1
1.1. Antecedentes, Descripción General del Problema.....	2
1.2. Objetivos de la Tesis.....	3
1.3. Justificación.....	3
1.4. Contenido de la tesis.....	4
Capítulo 2. ZigBee y XBee.....	5
2.1 Aplicaciones.....	5
2.2 Tipos de dispositivos.....	6
2.3 Topologías de red.....	8
2.4 Comparación con otras tecnologías.....	10
2.5 XBee y XBee-PRO.....	11
Capítulo 3. Modos de Operación XBee.....	13
3.1 Modo IDLE.....	13
3.2 Modo transmitir.....	13
3.2.1 Transmisión Directa.....	14
3.2.2 Transmisión Indirecta.....	14
3.2.3 CCA(Clear Channel Assessment).....	15

3.2.4 Reconocimiento (Acknowledgement).....	15
3.3 Modo recibir.....	15
3.4 Modo de Bajo Consumo (Sleep Mode).....	16
3.5 Modo de Comando.....	17
3.6 Modo Transparente.....	20
3.7 Modo de operación API.....	20
 Capítulo 4. Configuración del modulo XBee.....	 22
4.1 Direccionamiento de los módulos XBee.....	22
4.1.1 Direccionamiento de 16 bits.....	22
4.1.2 Direccionamiento de 64 bits.....	23
4.2 Conexión Transparente.....	24
4.2.1 Conexión Punto a Punto.....	24
4.2.2 Conexión Punto a Multipunto.....	26
4.2.3 Broadcast.....	28
4.3 Conexión NonBeacon. Peer-to-Peer.....	29
4.4 Conexión NonBeacon con Coordinador.....	30
4.5 Conexión API.....	33
4.6 Software X-CTU.....	36
 Capítulo 5. Diseño del Hardware y Software para el monitoreo y control de una red ZigBee del tipo punto-multipunto.....	 40
5.1 Descripción del prototipo a implementarse.....	40
5.2 Diseño del Hardware.....	41
5.2.1 Funciones del Hardware.....	42
5.2.2 Herramientas de desarrollo y evaluación.....	42
5.2.3 Modulo Coordinador.....	43
5.2.4 Módulos “End Device”.....	47
5.3 Diseño del Software.....	49
5.3.1 Descripción del protocolo de comunicaciones utilizando API.....	51

5.3.2 Herramientas de desarrollo.....	52
5.3.3 Coordinador.....	53
5.3.4 Dispositivos finales.....	55
5.3.5 Interrupción.....	55
5.4 Análisis de costos.....	56
Capítulo 6. Pruebas de operación y resultados.....	57
6.1 Pruebas de funcionamiento del sistema.....	57
6.1.1 Suministro de voltaje y consumo de energía.....	60
6.2 Pruebas de conectividad del prototipo.....	60
6.2.1 Prueba en interior y exterior.....	61
6.2.2 Prueba con interferencias de dispositivos a la misma frecuencia de operación..	61
6.2.3 Prueba con interferencia electromagnética.....	62
Capítulo 7. Conclusiones y Trabajos Futuros.....	63
7.1 Conclusiones.....	64
7.2. Trabajos Futuros.....	65

Apéndices.....	67
A. Principales Comandos AT.....	67
A1. Comandos AT especiales.....	67
A2. Comandos AT de networking y seguridad.....	68
A3. Comandos AT para la interfaz RF.....	69
A4. Comandos AT para bajo consumo (Sleep).....	69
A5. Comandos AT para la interfaz serial.....	70
A6. Comandos AT para configuración de pines.....	71
A7. Comandos AT para diagnostico.....	74
A8. Comandos AT opcionales.....	74
B. Hoja de datos XBee.....	75
 Referencias.....	 78

Lista de Figuras

2.1 Aplicaciones ZigBee.....	6
2.2 Ejemplo de Red ZigBee.....	6
2.3 Máximos hijos por dispositivos.....	8
2.4 Máxima profundidad de la red.....	8
2.5 Topologías de red.....	9
2.6 Tecnologías en 2.4 GHz.....	11
3.1 Ejemplo sintaxis comando AT.....	18
3.2 Ejemplo escritura de parámetros.....	18
3.3 Ejemplo lectura de parámetros.....	19
3.4 Forma normal y abreviada para varios comandos.....	19
4.1 Ejemplo de configuración punto a punto.....	25
4.2 Ejemplo de direccionamiento 16 y 64 bits.....	25
4.3 Canales disponibles para el protocolo IEE 802.15.4.....	26
4.4 Ejemplo configuración punto multipunto.....	27
4.5 Ejemplo red Broadcast.....	28
4.6 Ejemplo varias redes PAN NonBeacon con Coordinador.....	31
4.7 Estructura del Frame del modo API.....	34
4.8 Opción “PC Settings”.....	36
4.9 Opción “Range Test”.....	37
4.10 Opción “Terminal”.....	38
4.11 Opción “Modem Configuration”.....	39
5.1 Diagrama a bloques del prototipo.....	41
5.2 Kit de desarrollo ZigBee de MaxStream.....	42
5.3 Programador/depurador MPLAB ICD2.....	43
5.4 Diagrama a bloques del coordinador.....	44

5.5 Configuración del regulador LD33V.....	44
5.6 Diagrama de pines del PIC18F4550.....	45
5.7 Diagrama de pines del display LCD.....	46
5.8 Diagrama esquemático del coordinador.....	46
5.9 Diagrama a bloques del End Device.....	47
5.10 Distribución de pines y configuración típica del LM35.....	48
5.11 Diagrama esquemático del End Device.....	49
5.12 Asignación de direcciones de 16 bits.....	50
5.13 Paquete de transmisión Tx a dirección de 16 bits.....	51
5.14 Paquete de estado Tx.....	51
5.15 Paquete de recepción Rx de dirección de 16 bits.....	52
6.1 Modulo Coordinador.....	57
6.2 Módulos “End Devices”.....	58
6.3 Asignación de direcciones.....	58
6.4 Comparación de temperatura.....	59
6.5 Comparación de la información transmitida.....	60
B1. Diagrama de pines de los módulos XBee y XBee-PRO.....	75
B2. Características Eléctricas.....	76
B3. Detalles Físicos.....	76

Lista de Tablas

2.1 Comparación con otras tecnologías.....	10
2.2 Especificaciones XBee y XBee-PRO.....	12
3.1 Modo Sleep y consumos de corriente.....	17
4.1 Configuración Dispositivo Terminal. Comando A1	32
4.2 Configuración Coordinador. Comando A2.....	33
5.1 Funciones del modulo coordinador.....	54
5.2 Funciones del modulo “End Device”.....	55
5.3 Costos de la red punto-multipunto.....	56
A1. Comandos AT especiales.....	67
A2. Comandos AT de networking y seguridad.....	68
A3. Comandos AT para la interfaz RF.....	69
A4. Comandos AT para bajo consumo (Sleep).....	69
A5. Comandos AT para la interfaz serial.....	70
A6. Comandos AT para configuración de pines.....	71
A7. Comandos AT para diagnostico.....	74
A8. Comandos AT opcionales.....	74

Lista de Símbolos y Abreviaturas

m	Mili
μ	Micro
K	kilo
M	mega
G	giga
Hz	Hertz
bps	bytes por segundo
W	Watts
dBm	Decibeles

Glosario de Términos

Domótica.

Conjunto de sistemas capaces de automatizar una vivienda, aportando servicios de gestión energética, seguridad, bienestar y comunicación, y que pueden estar integrados por medio de redes interiores y exteriores de comunicación, cableadas o inalámbricas, y cuyo control goza de cierta ubicuidad, desde dentro y fuera del hogar.

Inmótica.

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

Firmware.

Programa que es grabado en una memoria no volátil y establece la lógica de más bajo nivel que controla los circuitos electrónicos de un dispositivo.

ISM.

(Industrial, Scientific and Medical) son bandas reservadas internacionalmente para uso no comercial de radiofrecuencia electromagnética en áreas industrial, científica y médica.

PAN.

Personal Area Network. Se entiende por PAN una red de comunicaciones que incluye un Coordinador de red y uno o más routers o dispositivos finales (end points).

WPAN.

Wireless Personal Area Networks, Red Inalámbrica de Área Personal es una red de computadoras y equipos para la comunicación entre distintos dispositivos cercanos al punto de acceso. Estas redes normalmente son de unos pocos metros y para uso personal.

WLAN.

Wireless Local Area Network, es un sistema de comunicación de datos inalámbrico flexible, muy utilizado como alternativa a las redes LAN cableadas o como extensión de éstas.

WMAN.

Redes inalámbricas de área metropolitana.

WWAN.

Redes inalámbricas de área extensa.

Capítulo 1

Introducción

Las tecnologías inalámbricas han adoptado con el paso del tiempo una manera más sencilla y cómoda de utilizar toda clase de dispositivos con el fin de mejorar el confort y las comunicaciones en general. Ésta investigación aborda la tecnología inalámbrica ZigBee, basada en el estándar 802.15.4 que por su poca introducción al mercado no es muy conocida.

ZigBee comunica una serie de dispositivos haciendo que trabajen más eficientemente entre sí. Esta tecnología utiliza un transmisor y un receptor de baja potencia para operar y tiene como objetivo las aplicaciones que requieren comunicaciones seguras con baja tasa de envío de datos y maximización de la vida útil de sus baterías.

ZigBee, también conocido como "HomeRF Lite", es una tecnología inalámbrica con velocidades comprendidas entre 20 kbps y 256 kbps. Puede usar las bandas libres ISM de 2,4 GHz, 868 MHz (Europa) y 915 MHz (EEUU), empleando hasta 16 canales.

Por lo que se pretende en el siguiente trabajo definir que es ZigBee, como funciona y como trabajar con los módulos XBee en sus diferentes topologías de red y modos de operación.

1.1 Antecedentes

El nombre "ZigBee" se deriva de los patrones erráticos comunicativos que hacen muchas abejas entre las flores durante la recogida de polen. Esto es alusivo de las redes invisibles de las conexiones existentes en un entorno totalmente inalámbrico.

ZigBee se ha desarrollado para satisfacer la creciente demanda de capacidad de red inalámbrica entre varios dispositivos de baja potencia. En la industria ZigBee se está utilizando para la próxima generación de fabricación automatizada, con pequeños transmisores en cada dispositivo, lo que permite la comunicación entre dispositivos a un ordenador central.

Para llevar a cabo este sistema, un grupo de trabajo llamado Alianza ZigBee (ZigBee Alliance) formado por varias industrias, la mayoría de ellas fabricantes de semiconductores, desarrollo el estándar, trabajando codo con codo con IEEE para asegurar una integración, completa y operativa.

Esta alianza trabajó para crear un sistema estándar de comunicaciones, vía radio y bidireccional, para usarlo dentro de dispositivos de automatización hogareña (domótica), de edificios (inmótica), control industrial, periféricos de PC y sensores médicos. Los miembros de esta alianza justifican el desarrollo de este estándar para cubrir el vacío que se produce por debajo del Bluetooth.

La ZigBee Alliance cuenta con más de 200 miembros corporativos, aprobando el 14 de diciembre de 2004 la especificaciones ZigBee y el 13 de junio de 2005 se hacen públicas y disponibles para universidades, centros de desarrollo e individuales, en San Ramón, California, por parte de la alianza Zigbee. Y el 5 de Noviembre de 2007, se anunció la finalización de la aplicación pública ZigBee Home Automation y su disponibilidad inmediata al público de forma gratuita. Con la ZigBee Home Automation se ofrece a los fabricantes, integradores, desarrolladores, etc., la opción de trabajar bajo un enfoque basado en estándares a la hora de introducir los nuevos productos dedicados a la domótica, eliminando así la necesidad de hacerlo sobre tecnología patentada.

1.2 Objetivo

- Dar a conocer en qué consiste y como operan las redes ZigBee.
- Conocer sus características, ventajas y desventajas de esta tecnología.
- Realizar pruebas con los módulos XBee y XBee PRO en sus diferentes modos de operación.
 - Modo RECIBIR/TRANSMITIR.
 - Modo de bajo consumo.
 - Modo de comando.
 - Modo Transparente.
 - Modo de operación API.
 - IDLE.
- Implementar las siguientes topologías de red.
 - Punto a punto.
 - Estrella.
 - Diagrama de árbol
- Diseño y construcción de una red inalámbrica, con un coordinador y varios dispositivos finales para monitoreo y control, empleando un microcontrolador.
- Crear el punto de partida para desarrollar un manual de usuario para la conexión y configuración para las diferentes topologías de las redes ZigBee.

1.3 Justificación

La tecnología ZigBee es relativamente nueva, razón por la cual aún no ha tenido una penetración muy fuerte en el mercado latinoamericano en donde es muy difícil encontrar tecnología desarrollada de manera comercial, para alguna de sus diversas aplicaciones. A pesar de que se espera que los módulos ZigBee sean los transmisores inalámbricos más baratos de la historia, y además producidos en forma masiva.

Debido al reciente desarrollo de ZigBee no existe mucha información en nuestro idioma sobre dicha tecnología, disponible para estudiantes y desarrolladores en general. Por lo que una de las razones que me impulsaron a desarrollar este trabajo es la de proporcionar a la comunidad estudiantil un manual de referencia en su idioma para realizar aplicaciones

y desarrollar dispositivos empleando esta tecnología.

Por último el área profesional que más me interesa es la Domótica, siendo esta tecnología el futuro de dicha área, razón por la cual me motivo a desarrollar este trabajo de investigación.

1.4 Contenido de la tesis

En el capítulo 1 se da una breve introducción a este trabajo, se habla sobre algunos hechos históricos sobre la tecnología ZigBee y por último se describe el objetivo de este trabajo.

En el capítulo 2 se muestran las principales aplicaciones de la tecnología ZigBee, se realiza una comparativa con otras tecnologías inalámbricas y se da una introducción a los módulos XBee.

En el capítulo 3 se narran los diferentes modos de operación de los módulos XBee.

En el capítulo 4 se presenta toda la información necesaria para poder configurar los diferentes aspectos de los módulos XBee y se dan algunos ejemplos prácticos para la misma configuración de los módulos empleando tanto la Hyper Terminal como el software X-CTU.

En el capítulo 5 se explica el desarrollo tanto del software como del hardware, de la red inalámbrica desarrollada para el monitoreo y control con un coordinador y varios dispositivos finales.

En el capítulo 6 se presentan las pruebas realizadas a la red creada, así como los resultados obtenidos en dichas pruebas.

En el capítulo 7 se presentan conclusiones generales, aportaciones y trabajos futuros.

Capítulo 2

ZigBee y XBee

En este capítulo se presentan las principales aplicaciones que tiene la tecnología ZigBee, se compara con otras tecnologías inalámbricas y se describen sus principales características como las bandas de operación, nodos, diferentes topologías de red y los diferentes dispositivos que pueden existir en una red ZigBee. Además se da una breve introducción a los dispositivos XBee y la diferencia entre estos dispositivos y lo que es ZigBee.

2.1 Aplicaciones

Los protocolos ZigBee están definidos para su uso en aplicaciones de sistemas mínimos o autónomos con requerimientos muy bajos de transmisión de datos y consumo energético. Se pretende su uso en aplicaciones de propósito general con características “auto organizativas” y bajo costo (redes en malla, en específico). Puede utilizarse para realizar control industrial, albergar sensores empotrados, recolectar datos médicos, ejercer labores de detección de humo, intrusos o domótica. La red en su conjunto utilizará una cantidad muy pequeña de energía de forma que cada dispositivo individual pueda tener una autonomía de hasta 5 años antes de necesitar un recambio en su sistema de alimentación.

Si echamos un vistazo en la clase de comunicaciones que se producen en una red de sensores o actuadores, podemos encontrar que muchas de estas comunicaciones se realizan con pequeños paquetes de datos: para enviar información de un sensor (por Ej., activado = detecta humo), o simplemente para controlar el estado de los sensores. Además de ser paquetes pequeños de información, la gran mayoría de los dispositivos pueden estar ‘dormidos’ hasta que envíen la información (porque no ocurre nada) y activarse al detectar algo.

Como se puede observar las principales áreas de aplicación de esta tecnología, se

encuentran en el área de la domótica, la inmótica, la salud, control industrial, entre otras, estas pueden ser mejor apreciadas en la Figura 2.1 que se muestra a continuación.



Figura 2.1 Aplicaciones ZigBee

2.2 Tipos de Dispositivos

Una red ZigBee está conformada por 3 tipos de dispositivos, según su papel en la red. Estos son un único coordinador, dispositivos routers y dispositivos finales (end points o end device). Un ejemplo de red ZigBee es el mostrado en la Figura 2.2.

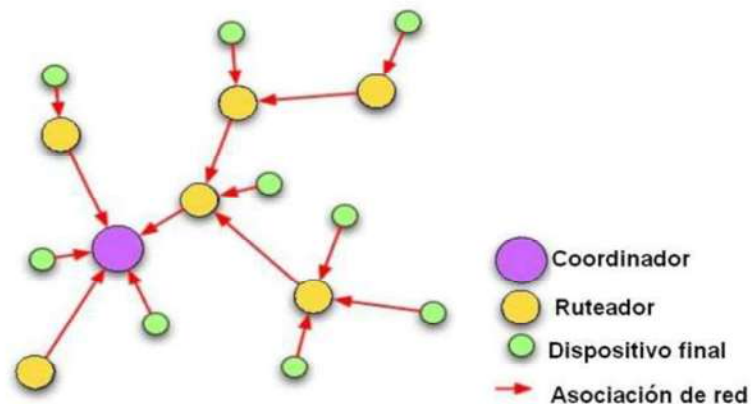


Figura 2.2 Ejemplo de Red ZigBee

El Coordinador. Es el nodo de red que tiene la única función de formar una red, siendo este el dispositivo más completo y sólo debe existir uno por red. Es el responsable de establecer el canal de comunicaciones y del PAN ID (identificador de red) para toda la red. Una vez establecidos estos parámetros, el Coordinador puede formar una red, permitiendo unirse a él a dispositivos Routers y End Points. Una vez formada la red, el Coordinador hace las funciones de Router, esto es, participar en el enrutado de paquetes y ser origen y/o destinatario de información. En otras palabras es el que controla la red y los caminos que deben seguir los dispositivos para conectarse entre ellos, razón por la cual requiere memoria y capacidad de computación.

Los Routers. Es un nodo que crea y mantiene información sobre la red para determinar la mejor ruta para transmitir un paquete de información. Lógicamente un router debe unirse a una red Zigbee antes de poder actuar como router retransmitiendo paquetes de otros routers o de dispositivos finales (End device).

Dispositivos Finales o End Device. No tienen capacidad de enrutar paquetes. Deben interactuar siempre a través de su nodo padre, ya sea este un Coordinador o un Router, es decir, no puede enviar información directamente a otro end device. Normalmente estos equipos van alimentados a baterías. El consumo es menor al no tener que realizar funciones de enrutamiento.

Los dispositivos ZigBee tienen una dirección única de 64Bits que viene grabada de fábrica. Por otro lado, la red ZigBee, utiliza para sus algoritmos de ruteo direcciones de 16 bits. Cada vez que un dispositivo se asocia a una red Zigbee, el Coordinador al cual se asocia le asigna una dirección única en toda la red de 16bits. Por eso el número máximo teórico de elementos que puede haber en una red Zigbee es de $2^{16} = 65535$, que es el n° máximo de direcciones de red que se pueden asignar.

Por otro lado estas limitaciones de red pueden ser explicadas de la siguiente manera. El coordinador y cada router de la red pueden tener hasta 20 hijos de los cuales sólo 6 pueden ser routers y los otros pueden ser dispositivos finales, esto se muestra en la Figura 2.3.

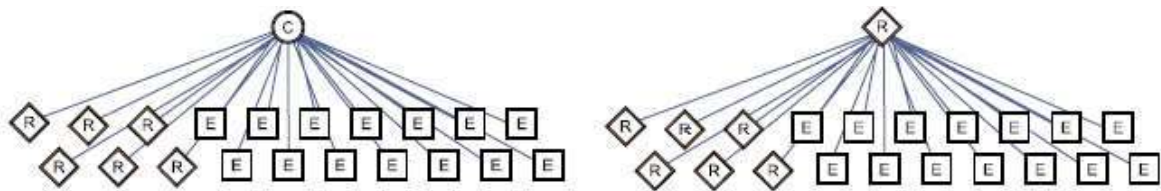


Figura 2.3 Máximos hijos por dispositivo

Siendo 5 descendientes del coordinador, la máxima profundidad de la red, como se muestra en la Figura 2.4.

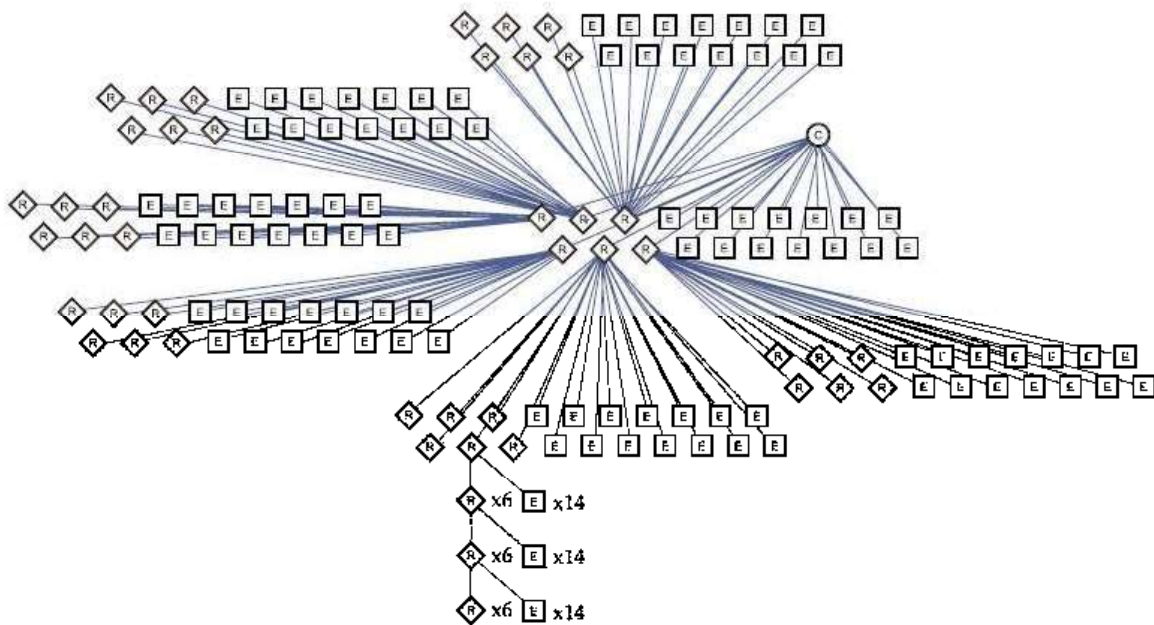


Figura 2.4 Máxima profundidad de la red

2.3 Topologías de red

En una red ZigBee pueden haber hasta 254 nodos, no obstante, según la agrupación que se haga, se pueden crear hasta 255 conjuntos/clusters de nodos, para lo que existe la posibilidad de utilizar varias topologías de red: punto a punto, en estrella, en malla y en grupos de árboles, como puede verse en la Figura 2.5.

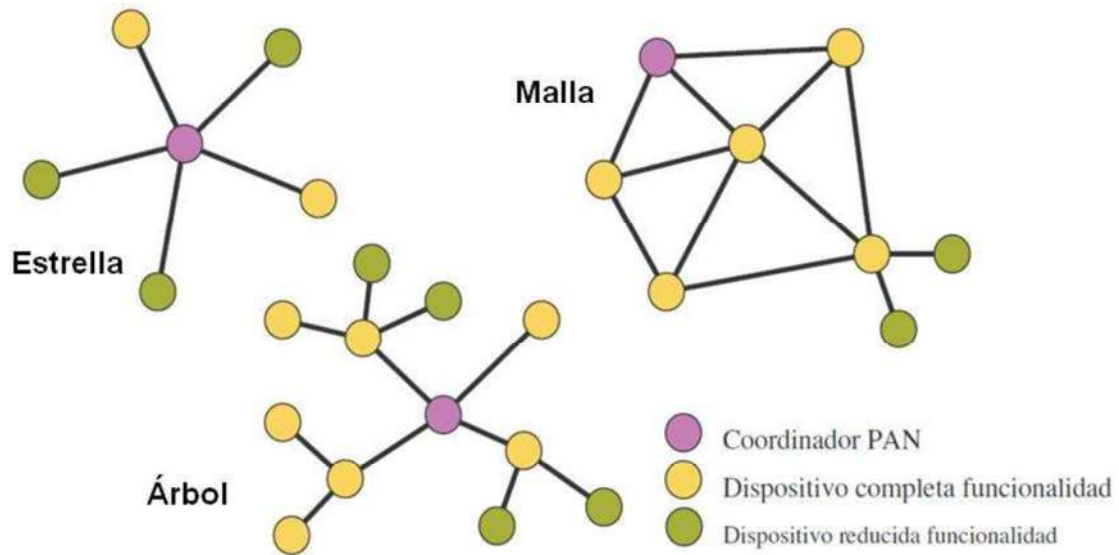


Figura 2.5 Topologías de red

Como se mencionó la tecnología ZigBee soporta múltiples configuraciones de red. En la configuración en estrella, uno de los dispositivos asume el rol de coordinador de red y es responsable de inicializar y mantener los dispositivos en la red. Todos los demás dispositivos zigbee, conocidos con el nombre de dispositivos finales, “hablan” directamente con el coordinador.

En la configuración de malla, el coordinador ZigBee es responsable de inicializar la red y de elegir los parámetros de la red, pero la red puede ser ampliada a través del uso de routers ZigBee. El algoritmo de enrutamiento utiliza un protocolo de pregunta-respuesta (request-response) para eliminar las rutas que no sean óptimas. La red final puede tener hasta 254 nodos.

Para la topología punto a punto, a diferencia con la topología estrella, cualquier dispositivo puede comunicarse con otro siempre y cuando estén en el mismo rango de alcance circundante. Las aplicaciones orientadas para el monitoreo y control de procesos industriales, redes de sensores inalámbricos, entre otros, son ampliamente usados por estas redes. Proveen confiabilidad en el enrutamiento de datos.

La topología de árbol es un caso especial de topología de conexión punto a punto, en la cual muchos dispositivos son routers y los end points pueden conectarse como un nodo único al final de la red. Cualquiera de los routers restantes pueden actuar como coordinadores y proveer servicios de sincronización hacia otros dispositivos o coordinadores.

2.4 Comparación con otras tecnologías

En la Tabla 2.1 se muestra un pequeño resumen de las principales características de las tecnologías Wi-Fi, Bluetooth y ZigBee.

Tabla 2.1 Comparación con otras tecnologías

	Wi-fi	Bluetooth	ZigBee
Bandas de frecuencia	2.4 GHz	2.4 GHz	2.4 GHz, 868 / 915 MHz
Tasa de transferencia	11 Mbps	1 Mbps	250 kbps(2.4GHz) 40 kbps (915 MHz) 20 kbps (868 MHz)
Número de canales	11 - 14	79	16 (2.4GHz) 10 (915 MHz) 1 (868 MHz)
Número de dispositivos	32	8	255 / 65535
Requisitos de alimentación	Media – Horas de batería.	Media – Días de batería.	Muy baja – Años de alimentación.
Arquitecturas	Estrella.	Estrella.	Estrella, árbol, punto a punto y malla.
Mejores aplicaciones	Edificio con internet.	Computadoras y teléfonos	Control y monitoreo de bajo costo.

Como se puede observar en la Tabla 2.1 ZigBee opera en las bandas libres de 2.4Ghz por lo que en la Figura 2.6 se puede ver el espectro de ocupación en las bandas del protocolo 802.

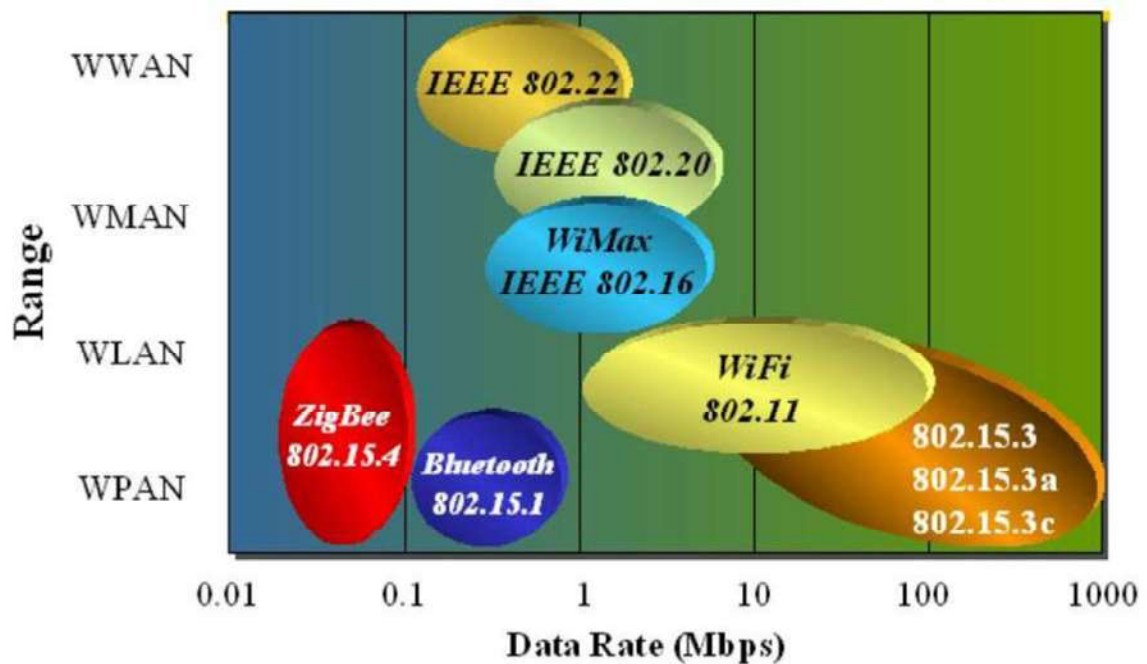


Figura 2.6 Tecnologías en 2.4 GHz

2.5 XBee y XBee-PRO

Existe una gran variedad de dispositivos electrónicos que utilizan el protocolo de comunicaciones ZigBee. Pero los que se emplearon para la realización del presente trabajo de investigación son los módulos XBee y XBee-PRO, los cuales tienen múltiples aplicaciones entre las que destacan, sistemas de seguridad, controles de iluminación, domótica, aparatos domésticos, monitoreo de sistemas remotos y colección de datos de varios sensores en sistemas incorporados.

Las principales características de dichos módulos son que tienen una muy buena relación de precio rendimiento, baja potencia de consumo y alta sensibilidad del receptor.

A continuación se muestra en la Tabla 2.2 las principales especificaciones tanto de los módulos XBee, como las de su versión PRO.

Tabla 2.2 Especificaciones XBee y XBee-PRO.

ESPECIFICACIONES		XBee	XBee-PRO
Rendimiento	Alcance en ambientes interiores/zonas urbanas.	Hasta 30 m	Hasta 100 m
	Alcance de RF en línea de visión para ambientes exteriores.	Hasta 100 m	Hasta 1200 m
	Potencia de salida de transmisión.	1 mW (0 dBm)	60 mW (18 dBm), 100 mW EIRP
	Velocidad de transmisión de datos.	250 000 bps	250 000 bps
	Sensibilidad del receptor	-92 dBm (1%PER)	-100 dBm (1% PER)
Requerimiento de potencia	Suministro de voltaje	2.8 – 3.4 V	2.8 – 3.4 V
	Corriente de transmisión (típico)	45 mA @ 3.3V	270 mA @ 3.3V
	Corriente de recepción (típico)	50 mA @ 3.3V	55 mA @ 3.3V
	Corriente Power-Down	< 10 μ A	< 10 μ A
Información general	Frecuencia	ISM 2.4GHz	ISM 2.4GHz
	Dimensiones	2.438cm x 2.761cm	2.438cm x 3.294cm
	Opciones de Antena	Conector U.FL, Antena Chip, o antena de alambre.	Conector U.FL, Antena Chip, o antena de alambre.
Trabajo en Red y Seguridad	Topologías permitidas en la Red	Punto a punto, punto a multipunto, igual a igual y mesh (sólo versión 2).	Punto a punto, punto a multipunto, igual a igual y mesh (sólo versión 2).
	Número de Canales	16 canales de Secuencia Directa	12 canales de Secuencia Directa
	Capas de Filtración de la Red	PAN ID & Direcciones 64-bits	PAN ID & Direcciones 64-bits

Para obtener mayor información véase el Apéndice B.

Capítulo 3

Modos de Operación XBee

En el presente capítulo se describen los 5 diferentes modos de operación en que pueden trabajar los módulos XBee, modo de recepción, de transmisión, modo de bajo consumo, modo de comandos e idle. Adicionalmente se describen otros 2 modos referentes a la forma de transmitir la información, que son el modo transparente y el modo API. Además en el presente capítulo se empieza a dar una pequeña introducción a la configuración de los diferentes parámetros de los módulos XBee, explicando la forma de configurar los modos de operación mencionados.

3.1 Modo IDLE

Se encuentra en este modo cuando no se encuentra en ninguno de los demás modos, es decir no está recibiendo ni transmitiendo, ni ahorrando energía y tampoco se encuentra en el modo de comandos, se dice que el módulo de RF está en modo ocioso, a este estado se le conoce como IDLE.

3.2 Modo transmitir

Entra a este modo cuando los datos seriales son recibidos en el buffer del pin 3. El módulo RF sale del modo IDLE e intentará transmitir los datos. La dirección de destino determina cuál nodo recibirá los datos.

Antes de la transmisión de los datos, el módulo asegura que una dirección de red de 16 bits y la ruta al nodo destino han sido establecidas.

Los datos serán transmitidos una vez que una ruta es establecida. Si el descubrimiento de ruta falla en establecer una ruta, el paquete será desechado. Cuando los datos son transmitidos de un nodo al otro, un reconocimiento de nivel de red es transmitido atrás a través de la ruta establecida al nodo de la fuente. Este paquete de reconocimiento indica al

nodo de la fuente que el paquete de datos fue recibido por el nodo destino. Si un reconocimiento de red no es recibido, el nodo de la fuente transmitirá de nuevo los datos.

Existen dos métodos de transmitir datos, la transmisión directa y la indirecta. En la primera los datos son transmitidos inmediatamente a la dirección destino, mientras que en la indirecta un paquete es conservado por un periodo de tiempo y sólo es transmitido hasta que el módulo destino solicita los datos. Estas últimas sólo pueden ocurrir sobre un coordinador, siendo útiles para asegurar la entrega de paquete a un nodo durmiente. El coordinador es capaz de conservar hasta 2 mensajes indirectos.

3.2.1 Transmisión Directa

Un Coordinador puede ser configurado para usar la Transmisión Directa sólo poniendo el parámetro SP (Cyclic Sleep Period) a "0". También, un Coordinador que usa transmisiones indirectas volverá para dirigir la transmisión si este sabe que el módulo destino está despierto.

Para permitir este comportamiento, el valor de ST (Time before Sleep) del Coordinador debe ser puesto para emparejar el valor de ST del Dispositivo Final. Una vez que el Dispositivo "End Device" transmite datos al Coordinador o sondea el Coordinador para datos, el Coordinador usará la transmisión directa para todas las transmisiones de información subsecuentes a aquella dirección de módulo hasta que el tiempo de ST ocurra sin ninguna actividad (a partir de este momento, este volverá a la utilización de transmisiones indirectas para la dirección del módulo). "Ninguna actividad" no quiere decir ninguna transmisión o recepción de mensajes con una dirección específica. Mensajes globales no reinicializarán el temporizador de ST.

3.2.2 Transmisión Indirecta

Para configurar Transmisiones Indirectas en una PAN (Personal Area Network -Red de Área Personal-), el valor del parámetro SP del Coordinador debe ser puesta para emparejar el valor de Modo Sleep más largo de cualquier Dispositivo Final. El valor de período de Modo Sleep sobre el Coordinador determina cuanto tiempo el Coordinador conservará un

mensaje indirecto antes de desecharlo.

3.2.3 CCA (Clear Channel Assessment)

Antes de la transmisión de un paquete, un CCA es realizado sobre el canal para determinar si el canal está disponible para la transmisión. La energía detectada sobre el canal es comparada con el valor del parámetro de CA (CCA Threshold), este parámetro es usado para poner y leer el umbral CCA. Si la energía descubierta excede el valor del parámetro de CA, el paquete no es transmitido.

También, un retraso es insertado antes de que una transmisión ocurra. Este retraso es establecido utilizando el parámetro RN (Random Delay Slots). El comando RN es usado para poner y leer el valor mínimo del “Backoff Exponent” en el algoritmo CSMA-CA, dicho algoritmo fue tramado para la anulación de colisiones, insertando retrasos arbitrarios para prevenir la pérdida de datos causada por las colisiones. Si RN es puesto a "0", entonces no hay ningún retraso antes de que el primer CCA sea realizado.

El algoritmo CSMA-CA previene colisiones de datos antes de que estas ocurran. En cuanto un módulo recibe un paquete que debe ser transmitido, esto comprueba si el canal es claro (ningún otro módulo transmite). Si el canal esta libre, el paquete es enviado al aire. Si el canal no está libre, el módulo espera durante un período al azar seleccionando el tiempo, entonces comprueba otra vez para ver si el canal esta libre. Dentro de un rato, los finales de proceso y los datos son perdidos.

3.2.4 Reconocimiento (Acknowledgement)

Si la transmisión no es un mensaje de difusión (broadcast), el módulo esperará recibir un reconocimiento del nodo destino. Si un reconocimiento no es recibido, el paquete será enviado hasta 3 veces más. Si el reconocimiento no es recibido después de todas las transmisiones, un ACK fallido es registrado.

3.3 Modo recibir

Si un paquete de RF válido es recibido y su dirección es la misma del parámetro de

MY (Dirección de 16 bites de la fuente) del módulo de RF, los datos son transferidos al buffer DO (Data Out).

3.4 Modo de Bajo Consumo (Sleep Mode)

El modo de Sleep permite al módulo RF entrar en el estado de bajo consumo de energía cuando no se está usando.

Para entrar a este modo se debe configurar el comando SM (ATSM – Sleep Mode). Si SM=4 o SM=5, el módulo entra al modo SLEEP cuando transcurre un período dado por el comando ST (ATST-Time Before Sleeping). Donde ST posee un rango entre 0 y 0xFFFF (x 1ms). Si SM=4, el módem despertará cada cierto tiempo, dado por SP (ATSP – Cyclic Sleep Period), cuyo rango es entre 0 y 0x68B0 (x10 ms). Cuando despierte buscará por datos entrantes desde un módulo configurado como Coordinador, en caso de no haber nada, el módem volverá al modo SLEEP. Si SM=5, el módulo realzará lo mismo que antes, pero despertará de acuerdo al estado del pin SLEEP_RQ (pin 9). Cuando el pin pase a estado bajo (el pin es disparado por detección de flanco, no por nivel), despertará, buscará por datos entrantes, y si no hay nada volverá a cero el timer del comando ST, por lo que sólo volverá a dormir cuando transcurra el período dado por éste. Mientras transcurra ese período, cualquier actividad en el pin SLEEP_RQ será ignorada, hasta que vuelva al modo SLEEP. Si SM=1, el módulo entrará al estado de hibernación. En este estado, si el pin SLEEP_RQ está en HIGH, el módulo cortará cualquier actividad entrante, ya sea de transmisión, recepción o de asociación y entrará al modo SLEEP, y no saldrá de ahí hasta que el pin SLEEP_RQ vuelva a estar en LOW. Mientras se encuentre en el estado de hibernación, no responderá a ninguna actividad serial ni a ningún paquete RF entrante, simplemente los desechará. En el modo hibernación el sistema ahorra una gran cantidad de potencia. Si SM=2, el sistema se comporta igual que el modo de hibernación, pero sin tanto ahorro de energía y además despierta mucho más rápido que el modo anterior.

Todo lo anterior se resume en la Tabla 3.1 y donde se muestran los respectivos consumos de corriente.

Tabla 3.1 Modo Sleep y consumos de corriente.

Modo	Consumo de alimentación			Modo Sleep	Modo Wake-up
	2.8 – 3 V	3.2 V	3.4 V		
SM = 1	< 3 μ A	32 μ A	255 μ A	Sleep_RQ	Sleep_RQ
SM = 2	< 35 μ A	48 μ A	170 μ A	Sleep_RQ	Sleep_RQ
SM = 3	(reservado)			(reservado)	(reservado)
SM = 4	< 34 μ A	49 μ A	240 μ A	Comando ST	Comando SP
SM = 5	< 34 μ A	49 μ A	240 μ A	Comando ST	Sleep_RQ

3.5 Modo de Comando

Para modificar o leer los parámetros del Módulo RF, primero se debe establecer el módulo en el modo de comandos, en el cual los caracteres entrantes son interpretados como ordenes. Es decir, que este modo permite ingresar comandos AT al módulo Xbee, para configurar, ajustar o modificar parámetros. Permite ajustar parámetros como la dirección propia o la de destino, así como su modo de operación entre otras cosas. Para poder ingresar los comandos AT es necesario utilizar la HyperTerminal de Windows, el programa X-CTU (será tratado posteriormente) o algún microcontrolador que maneje UART y tenga los comandos guardados en memoria o los adquiera de alguna otra forma.

Para ingresar a este modo se debe esperar un tiempo dado por el comando GT (Guard Time, por defecto ATGT=0x3E85 que equivalen a 1000ms) luego ingresar tres símbolos “+” y luego esperar otro tiempo GT. Como respuesta el módulo entregará un OK. El módulo Xbee viene por defecto con una velocidad de 9600bps. En caso de no poder ingresar al modo de comandos, es posible que sea debido a la diferencia de velocidades entre el módulo y la interfaz que se comunica vía serial.

En la Figura 3.1 se muestra la sintaxis de un comando AT. Luego de ingresar a este modo, se debe ingresar el comando deseado para ajustar los parámetros del modulo XBee. La lista de comandos más importantes se encuentra en el Apéndice A.

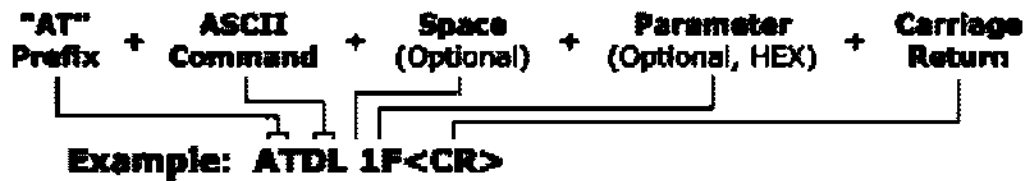


Figura 3.1 Ejemplo sintaxis comando AT.

Por ejemplo si se desea modificar la dirección de origen de 16 bit (con el comando MY), se debe ingresar los comandos mostrados en la Figura 3.2.



Figura 3.2 Ejemplo escritura de parámetros.

En el ejemplo anterior, la dirección asignada equivale a 0x5001. Se observa que primero se ingresa al modo de comandos AT, recibiendo un OK de respuesta. Luego se ingresa el comando ATMY5001 y se presiona ENTER o carácter <CR><LF> (Carrier Return y Line Feed) si se maneja desde un microcontrolador. Con ello se recibe un <CR><LF>OK<CR><LF> como respuesta.

Para salir del modo de Comandos se ingresa ATCN y se presiona ENTER. En caso de que no se ingrese ningún comando AT válido durante el tiempo determinado por CT (Command Mode Timeout), el módulo se saldrá automáticamente del modo de comandos. Para que los cambios realizados tengan efecto se debe ingresar el comando ATCN (sale del modo de comandos) o ATAC (aplica los cambios inmediatamente). Con el comando ATWR, se guardan los cambios en la memoria no volátil del módulo, pero sólo tendrán efecto una vez ingresado el comando AC o CN.

Para consultar el valor asignado a un comando, éste se debe ingresar directamente sin ningún parámetro. En el ejemplo anterior se ingresaría ATMY. La Figura 3.3 muestra lo anterior.



Figura 3.3 Ejemplo lectura de parámetros.

Se observa que se ingresa ATMY, donde el que módulo responde con un 5001, que es la dirección que tiene configurada. Otra forma de configurar el módulo por comandos AT, es ingresando varios comandos separados por coma (','). Esto se muestra en la Figura 3.4.

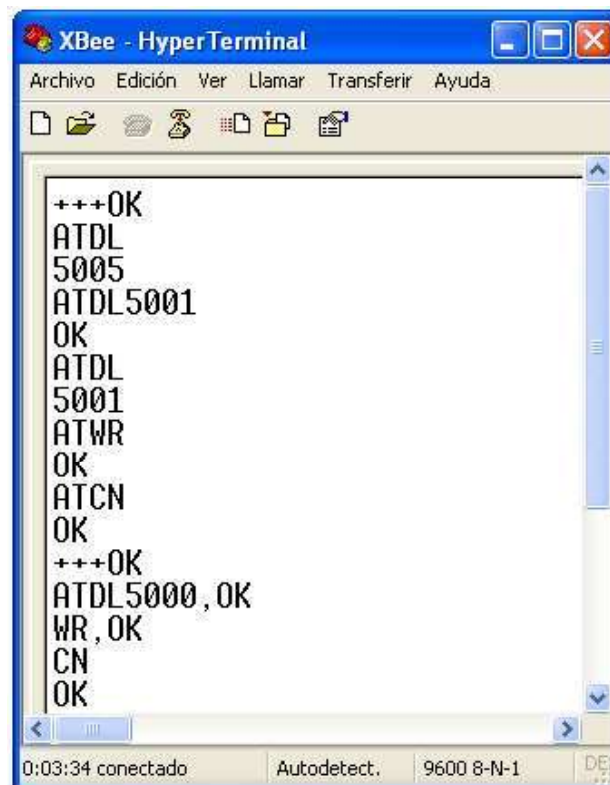


Figura 3.4 Forma normal y abreviada para varios comandos.

Como se puede observar en la figura anterior, que luego de ingresar al modo de Comandos (+++), se pregunta por la dirección de destino (ATDL), para lo cual se tiene como respuesta la dirección 0x5005. Con ello se modifica esta dirección por 0x5001 ingresando ATDL5001, obteniendo un OK como respuesta. Se confirma el correcto ajuste preguntando nuevamente y luego se guarda la configuración en la memoria no volátil del módulo usando ATWR, para lo cual se vuelve a obtener un OK. Posteriormente se saldrá del modo de comando utilizando ATCN obteniendo otro OK. Otra forma de hacer lo mismo se muestra en la misma figura. Se observa que luego de ingresar al modo de comandos nuevamente, se ingresa ATDL5000,WR,CN que indica que se ingresarán tres comandos en uno, y éstos serán ATDL5000, ATWR y ATCN.

Obteniéndose la respuesta para cada comando después de ser ingresados.

3.6 Modo Transparente

Por defecto, estos dispositivos trabajan en modo transparente. Cuando operan en este modo los módulos actúan como una línea serial normal esto es: todo dato UART recibido en el pin 3 (Data In -DI), es puesto a la cola para la transmisión RF. Así mismo, cuando un dato RF es recibido, el mismo es transmitido a través del pin 2 (Data Out -DO).

Cuando el dato recibido desde el host no puede ser transmitido inmediatamente (debido a que en ese momento el dispositivo está recibiendo datos RF), el mismo es almacenado en el búfer Data In hasta que pueda ser enviado. Los datos son empaquetados y enviados cada vez que el tiempo RO se cumpla o cuando el módulo a recibido 100 bytes (máximo tamaño de empaquetado). Si el búfer Data In empieza a llenarse, se debe implementar algún tipo de control de flujo ya sea vía hardware o vía software, esto con el fin de prevenir un sobre flujo (pérdidas de datos entre el host y el dispositivo).

3.7 Modo de operación API

El modo de operación API (Application Programming Interface) es una alternativa distinta al modo Transparente. Cuando el dispositivo trabaja en modo API, todos los datos que ingresan y abandonan el módulo están contenidos en tramas que definen las

operaciones o eventos dentro del módulo.

Las tramas RF transmitidas (recibidas a través del pin DI, pin 3), incluyen:

- Los datos de la trama de transmisión RF.
- Trama de Comandos (equivalente a los comandos AT).

Las tramas de datos RF recibidas (enviadas por el pin DO, pin 2) contienen:

- Los datos de la trama RF recibida
- Comandos de respuesta
- Notificaciones de eventos tales como: reset, asociación, desasociación, etc.

El modo API provee alternativas de configuración de los dispositivos y el ruteo de datos para la capa aplicación del Host. Una aplicación del Host puede ser enviada por tramas hacia el módulo; estas tramas contendrán el direccionamiento y la carga de información útil.

El modo de operación API facilita muchas operaciones, tales como:

- Transmisión de datos hacia múltiples destinatarios sin ingresar al modo de comandos.
- Estatus de recepción exitosa o fallida para cada uno de los paquetes RF transmitidos.
- Identificación de las direcciones fuente de cada paquete recibido.

Capítulo 4

Configuración del Modulo XBee

En este capítulo se presenta la información para configurar el direccionamiento de los módulos XBee, tanto para 16 y 64 bits, así como las diferentes conexiones en modo transparente, como la conexión punto a punto, punto multipunto y se explica la configuración de broadcast.

También se describen las conexiones NonBeacon y la conexión API, la cual es utilizada para crear una red de control y monitoreo punto multipunto. Adicionalmente se describe el uso del software X-CTU.

4.1 Direccionamiento de los módulos XBee

Los módulos XBee permiten 2 tipos de direccionamiento. La de 16 bits y la de 64 bits. La principal diferencia es que en la de 64 bit, es posible obtener una mayor cantidad de direcciones y por lo tanto, una mayor cantidad de nodos o equipos funcionando en la misma red. Son a través de estas direcciones que los módulos se comunican entre sí en bajo nivel.

4.1.1 Direccionamiento de 16 bits.

El comando MY (16 bit Source Address), define un número de 16 bits como dirección del módulo dentro de la red. El rango se encuentra entre 0x0 y 0xFFFFE (la dirección 0xFFFF y 0xFFFFE son para habilitar la dirección de 64-bits, por lo que si se desea utilizar direccionamiento de 16 bits, estos valores no deben ser usados). Para definirla se ingresa el comando ATMY y la dirección en formato hexadecimal, pero sin el '0x'. Por ejemplo si a un módulo se le quiere asignar la dirección 0x3BF1 (15345 en decimal), entonces se debe ingresar el comando ATMY3BF1.

El comando DL (Destination Address Low), permite definir un número de 16 bits

como dirección del módulo de destino dentro de la red al cual se va a realizar la comunicación. El rango debe estar entre 0x0 y 0xFFFFE (las direcciones 0xFFFFE y 0xFFFF se utilizan para direccionamiento de 64 bits).

Así para habilitar el direccionamiento de 16 bits, se debe utilizar una dirección menor a 0xFFFFE con el comando MY, de igual modo para DL y se debe dejar en cero el comando DH (Destination Address High). No se permite usar la dirección 0xFFFFE ni 0xFFFFE para el direccionamiento de 16 bits.

4.1.2 Direccionamiento de 64 bits.

El número 0xFFFF y 0xFFFFE del comando MY, se usa cuando se desea desactivar el direccionamiento de 16 bits, y se habilita el uso de la dirección de 64 bits. Con este direccionamiento ya no es posible definir la dirección de origen del módulo, ya que ésta se asigna automáticamente y se asigna en ROM. En este caso, la dirección del módulo corresponde a su número serial, que viene de fábrica y el cual es imposible de cambiar. Este número se encuentra guardado en dos variables de 32 bits cada una (SL y SH) y es único. SL (Serial Number Low) lee los 32 bits menos significativos del número serial y SH (Serial Number High) los 32 más significativos.

Cuando se utiliza direccionamiento de 64 bits, para asignar una dirección de destino, se utilizan los comandos DL y DH. Éstos son de 32 bits cada uno (para el direccionamiento de 16 bits, DL se maneja como uno de 16, mientras que DH se mantiene en cero) y juntos (DL+DH) forman el número de 64 bits que debe corresponder con el número serial de otro módulo formado por SL+SH. Así para poder enviar algún dato, DL debe ser igual a SL y DH debe ser igual a SH, donde SL+SH corresponden al número serial de un módulo destino configurado para direccionamiento de 64 bits.

Para el direccionamiento de 64 bits, se debe dejar MY como 0xFFFF (ATMYFFFF) o 0xFFFFE (ATMYFFFFE) y elegir una dirección de destino usando DL+DH, que debe corresponder a una dirección de 64 bits de otro módulo, indicando su número serial dado por SL+SH. Para consultar este número se debe ingresar ATSL (32 bit menos

significativos) y luego ATSH (32 bit más significativos), entregando la respuesta en formato hexadecimal.

4.2 Conexión Transparente

Esta es la conexión que viene por defecto y es la forma más sencilla de configurar el módem. Básicamente todo lo que pasa por el puerto UART (DIN, pin 3), es enviado al módulo deseado, y lo recibido por el módulo, es enviado devuelta por el mismo puerto UART (DOUT, pin2).

Existen básicamente 3 tipos de conexión transparente. La diferencia principal radica en el número de nodos o puntos de acceso, y la forma en que éstos interactúan entre sí.

4.2.1 Conexión Punto a Punto.

Es la conexión ideal para reemplazar comunicación serial alambrada. Sólo se debe configurar la dirección. Para ello se utilizan los comandos MY y el DL. La idea, es definir arbitrariamente una dirección para un módulo, usando el comando MY, el cual se va a comunicar con otro que tiene la dirección DL, también definida arbitrariamente. Con esto cada módulo define su dirección con MY, y escribe la dirección del módulo al cual se desea conectar usando DL.

En este modo, el módulo receptor del mensaje envía un paquete al módulo de origen llamado ACK (viene de Acknowledgment) que indica que el mensaje se recibió correctamente.

En la Figura 4.1 se muestra un pequeño ejemplo donde las direcciones se eligieron arbitrariamente:

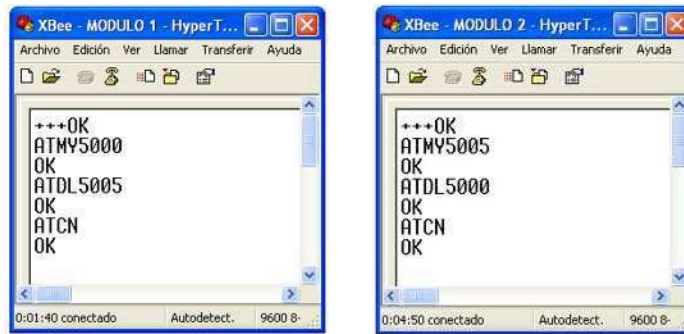


Figura 4.1 Ejemplo de configuración punto a punto

Se observa que en el módulo 1, se ajustó la dirección de origen como 0x5000 (ATMY5000), mientras que la dirección de destino se asignó como 0x5005 (ATDL5005) que corresponde al módulo 2, en donde se observa que se asignó como dirección de origen 0x5005 (ATMY5005) y como dirección de destino 0x5000 (ATDL5000) que corresponde al módulo 1.

Otro ejemplo de una conexión punto a punto es el mostrado en la Figura 4.2, donde muestra que la primera conexión es una punto a punto utilizando direccionamiento de 16 bit, mientras que la segunda utiliza direccionamiento de 64 bits. Una vez configurado, el módem se encuentra listo para funcionar. Así todo lo que se transmite por el pin DIN de un módulo, es recibido por el pin DOUT del otro. Para que el modo Punto a Punto funcione, los módulos deben pertenecer a la misma PAN ID (Identificador de la Red de Área Personal) y al mismo canal.

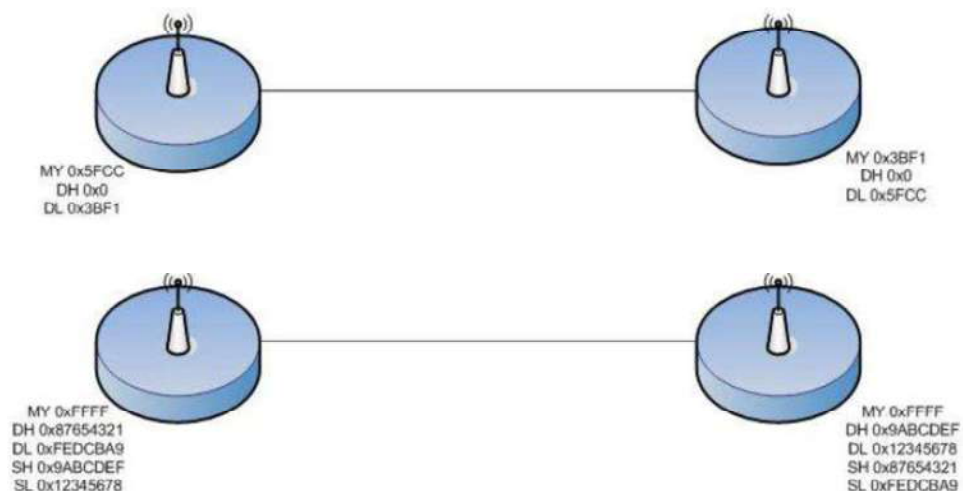


Figura 4.2 Ejemplo direccionamiento 16 y 64 bits.

4.2.2 Conexión Punto a Multipunto.

Esta conexión, permite transmitir información, desde la entrada serial de un módulo (DIN, pin 3) a uno o varios módulos conectados a la misma red de manera más controlada, ya que se necesitan las direcciones de los otros módulos, por lo que existe mayor seguridad. Para esto se necesitan dos comandos más aparte de MY y DL. Se utilizará el direccionamiento de 16 bits.

El primer comando es el ID de la PAN (Personal Area Network- Red de Área Personal). Todos los módulos que tengan idéntico PAN ID, pertenecerán a la misma red. El comando para configurar este valor es ID, es decir, ATID, y su rango va entre 0x0 y 0xFFFF. Por ejemplo si queremos ajustar el PAN ID como 0x3332, se debe ingresar ATID3332. Este parámetro también es arbitrario, al igual que MY y DL.

El otro comando corresponde al canal por el cual se va a comunicar. Según la Figura 4.3, se disponen de 16 canales según el protocolo IEEE 802.15.4. Este estándar indica que entre cada canal, deben existir 5 MHz de diferencia, partiendo de la frecuencia base 2.405 GHz, se llegan hasta los 2.480 GHz.

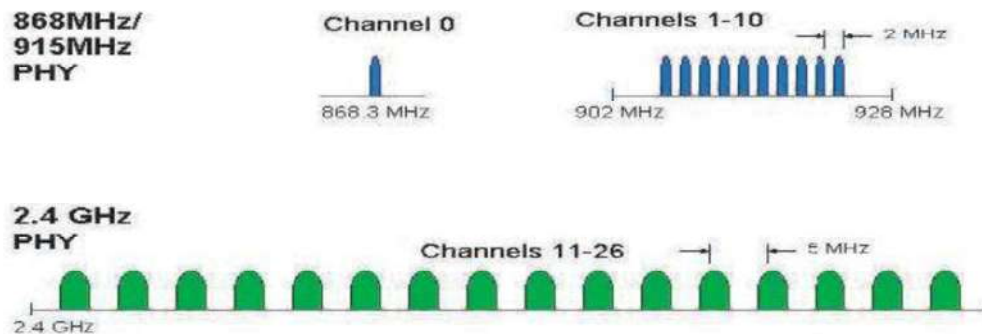


Figura 4.3 Canales disponibles para el protocolo IEE 802.15.4

Se observa que hay 16 canales disponibles, sin embargo, los valores se asignan desde el 11 hasta el 26. Donde CH equivale al número del canal entre 11 y 26. Así para cambiar de canal se utiliza el comando CH con el número de canal en formato hexadecimal. Es decir, si se desea ocupar el canal 15 (0x10), se ingresa ATCH10.

Nota: La elección del canal debe ser cuidadosa, ya que otras tecnologías como WI-FI o Bluetooth utilizan el mismo espectro de frecuencias, por lo que se podría producir

interferencia; con todo lo anterior, es posible configurar una PAN y hacer una conexión punto a multipunto. La red se vería como la mostrada en la Figura 4.4.

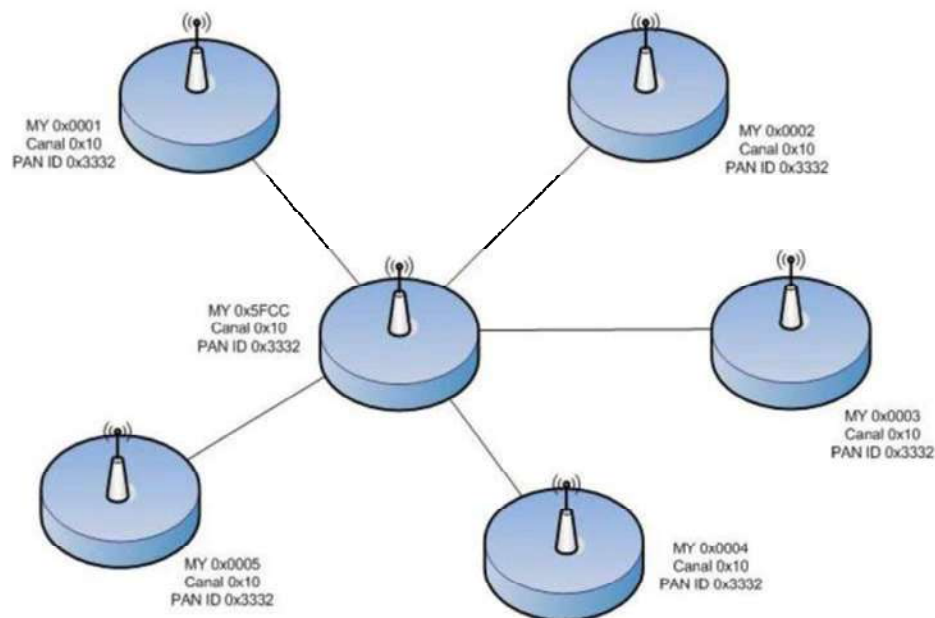


Figura 4.4 Ejemplo de configuración punto multipunto.

Así en cada nodo se configura una dirección MY distinta, pero utilizando el mismo canal y el mismo PAN ID, que en la figura corresponden al canal 15 (0x10) y al ID 0x3332 de la PAN.

Para que cada módulo reciba la información, debe ser estrictamente necesario que tengan tanto el mismo canal, como el mismo PAN ID. Incluso si se trabaja en Broadcast o punto a punto los módulos deben coincidir en ello. Los módulos vienen por defecto configurados con el canal 0x0C y el PAN ID 0x3332.

Esta configuración, permite enviar información más controlada, ya que es necesario pertenecer tanto al mismo canal, como a la misma red. Además para enviar información se debe ingresar la dirección del módulo de destino, por lo que es necesario el conocimiento completo de la estructura de la red.

Nota: En los módulos más avanzados, como XBee PRO de la serie 2, el reconocimiento de la red se realiza automáticamente.

4.2.3 Broadcast.

Esta configuración permite el envío de información desde un nodo a varios nodos en una misma red PAN. La información recibida es la misma para todos los nodos. Para que un módulo entregue datos a todos los nodos, es necesario ajustarlo con la dirección de Broadcast. Cualquier módulo que reciba un paquete con una dirección de destino de Broadcast será aceptado.

La dirección de Broadcast es:

- DL=0x0000FFFF
- DH=0x00000000

Esta dirección puede ser configurada en todos los nodos de la red, ya sea que estén en direccionamiento de 16 o 64 bits. Así se puede ingresar ATDH0 y ATDLD0000FFFF en todos los módulos para que el modo broadcast esté habilitado. Para que este modo funcione, los módulos deben pertenecer a la misma PAN ID y al mismo canal. La Figura 4.5 muestra una red de Broadcast en cada nodo.

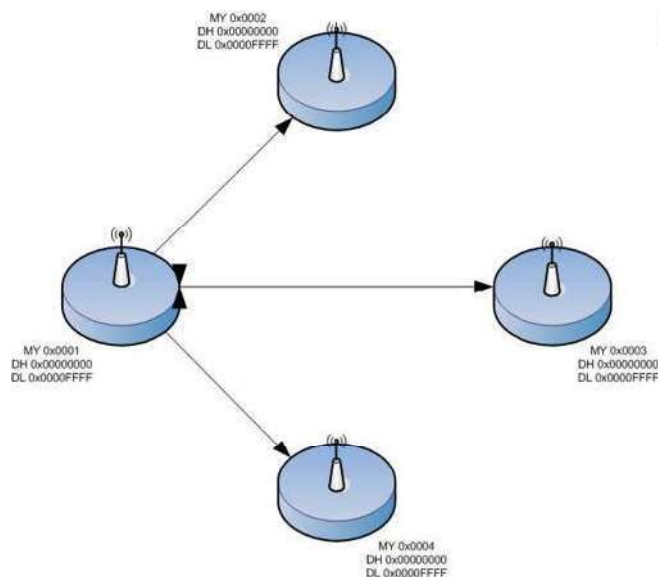


Figura 4.5 Ejemplo red de Broadcast.

Se observa en la figura anterior la configuración de Broadcast. Si se envía algún dato por el módulo 0x0001, la información enviada será recibida por igual en el resto de los módulos (0x0002, 0x0003 y 0x0004). Del mismo modo si se envía algún dato por otro

módulo, por ejemplo por el 0x0004, este dato le llegará al resto, es decir, al 0x0001, 0x0002 y al 0x0003. Cabe mencionar que este tipo de red o de envío de datos, no entrega respuesta de recibo o ACK, por lo que no es posible saber si el paquete fue entregado correctamente o si es que llegó.

Si se ajusta la dirección PAN ID del módulo como ID=0xFFFF, se produce Broadcast a todas las redes PAN. Esto es, los datos son transmitidos a las distintas redes PAN, pero no se confirma la entrega de éstos (no se recibe ACK). Si se ingresa ID=0xFFFF y además DL=0xFFFF se realiza doble broadcast, es decir, además de transmitirse los datos a todas las redes PAN, el mensaje es transmitido a todos los módulos de cada una de ellas. Si se ingresa ID=0xFFFF y DL=0xAAAA (dirección arbitraria), los datos son transmitidos a todos los módulos que posean la dirección AAAA, pero que no necesariamente se encuentren en la misma red PAN.

4.3 Conexión NonBeacon. Peer-to-Peer.

Una red peer-to-peer permite que todos los módulos, se conecten con todos, es decir, se crea una conexión de par en par con cada uno de los módulos de la red. El modo de conexión NonBeacon es la configuración por defecto y permite establecer una red peer-to-peer donde cada módulo puede hacer las funciones de maestro o esclavo.

La configuración de red Non-Beacon, se refiere a que cada nodo primario (o nodo central maestro) se mantiene despierto siempre. Por lo que los demás dispositivos que se conectan a él, pueden entrar en modo SLEEP (ahorro de energía), y sólo despertarse cuando sea necesario para enviar datos. En una red Beacon, los dispositivos enrutadores (o nodos primarios) están siempre en modo SLEEP, y envían señales de su existencia (llamadas Beacon) cada cierto intervalo al resto de la red. Así para poder comunicarse, deben estar todos los dispositivos totalmente organizados, ya que de no ser así, existe la posibilidad de perder la señal Beacon y no poder enviar hasta la próxima entrega. La ventaja de las redes Beacon, es el ahorro de energía. Por este motivo las redes Non-Beacon están pensadas para dispositivos que posean una alimentación segura, mientras las Beacon, para alimentación autónoma, como baterías. Los módulos Xbee Series 1, sólo soportan redes Non-Beacon.

Para esto, cada módulo se debe configurar como Dispositivo Terminal (End Device) y todos deben tener el mismo canal (ATCH) y la misma PAN (ATID). Para configurar los módulos como dispositivos terminales, se debe ingresar el comando CE=0 (Coordinador Enable, ATCE0).

4.4 Conexión NonBeacon con Coordinador.

Es básicamente lo mismo que una red punto-multipunto, con la diferencia de que existe un módulo central que posee ciertas propiedades y características que le permiten administrar la red. En esta red, el módulo central es llamado Coordinador, mientras que el resto de módulos son llamados Dispositivos Terminales (End Device). Un mismo módulo XBee puede ser configurado para funcionar como Coordinador o como Dispositivo Terminal.

Para configurar esta red, todos los módulos deben tener el mismo canal (ATCH) y la misma PAN (ATID). El módulo Coordinador se configura como ATCE=1 (ATCE1), mientras que todos los demás, los cuales serán llamados Dispositivos Terminales, se configuran como ATCE=0 (ATCE0).

En este tipo de red, los Coordinadores pueden ser usados para usar transmisiones directas o indirectas. En las directas, la información es enviada de inmediato, mientras que en la indirecta, la información es guardada un tiempo dado por el parámetro SP (Cyclic Sleep Period). Si SP=0, la transmisión es directa. Si SP está en un rango entre 1 y 0x68B0 (x10 milisegundos), es el tiempo que espera antes de enviar.

Para este tipo de configuraciones NonBeacon con Coordinador, se requiere crear una relación llamada Asociación. Ésta mantiene un control del Coordinador sobre los Dispositivos Terminales. Este tipo de configuración con un Coordinador se utiliza cuando se requiere una unidad central para enviar mensajes a varios módulos, o juntar información proveniente de varios Dispositivos Terminales, asignar canales o ID de redes PAN.

Una red de datos RF consistente de un Coordinador y uno o varios Dispositivos Terminales, forman lo que se llama una PAN (Personal Area Network). Cada dispositivo en una PAN tiene un identificador llamado ID (ATID), el cual debe ser el mismo para todos los módulos de la misma PAN.

Se observa en la Figura 4.6, que existen tres redes PAN, donde no necesariamente coinciden en el número de dispositivos terminales, ni en el ID de la PAN, ni en el canal, excepto en dos redes. Ahí no existirá problema, sin embargo puede haber interferencia por el uso del mismo canal, por lo que se recomienda usar un canal exclusivo por cada PAN.

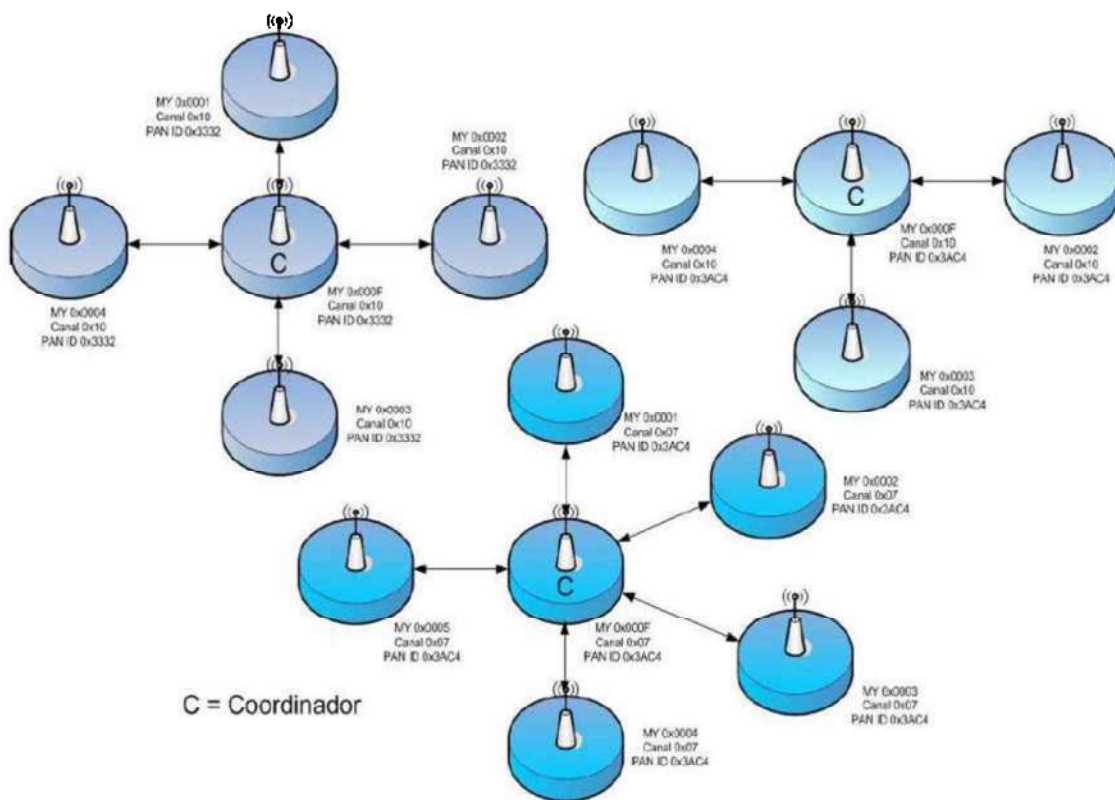


Figura 4.6 Ejemplo varias redes PAN NonBeacon con Coordinador.

El ID del Coordinador se debe configurar utilizando dos comandos. El primero el ya visto ID (ATID), mientras que el segundo corresponde al A2 (ATA2 – Coordinator Association). Un dispositivo Terminal se puede asociar a un Coordinador, sin saber la dirección, el PAN ID o el canal al cual está conectado. El parámetro A1 (ATA1 – End Device Association), asigna dinámicamente la dirección, canal y PAN ID para asignarse a

un coordinador. Además este parámetro determina la flexibilidad de un dispositivo Terminal para realizar la asociación. En los siguientes párrafos se explicará en detalle estos dos comandos.

Cabe mencionar, que tanto los módulos en modo Coordinador, como los de en modo Dispositivos Terminales deben tener la misma versión del Firmware.

Como se indicó, una red PAN, puede ser configurada usando varios módulos como Dispositivos terminales y uno maestro como Coordinador. Los dispositivos terminales se configuran con el comando A1, mientras que los Coordinadores con el A2.

El comando A1 puede tener un rango entre 0 y 0xF (16 en decimal y 1111 en binario). Se observa que escrito en binario, éste valor posee 4 bits. Luego cada uno de esos bits configura ciertas características del Dispositivo Terminal cuando CE=0.

La Tabla 4.1 indica el nombre de cada bit y su configuración dado cierto valor.

Tabla 4.1 Configuración Dispositivo Terminal. Comando A1.

No	Bit Number	Valor	Configuración Dispositivo Terminal usando A1
0	ReassignPanID	0	Se asociará con un Coordinador que opere en una PAN ID que coincida con la del Nodo identificador.
		1	Se pude asociar con un Coordinador que opere en cualquier PAN ID.
1	ReassignChannel	0	Se asociará con el Coordinador que opere en el mismo canal que el valor de CH (Canal) del nodo.
		1	Se pude asociar a un Coordinador que opere en cualquier canal.
2	AutoAssociate	0	El dispositivo no intentará asociarse.
		1	El dispositivo intentará asociarse hasta que tenga éxito.
3	PollCoordOnPinWake	0	El PIN WAKE, no le preguntará al Coordinador por datos pendientes.
		1	El PIN WAKE, enviará Solicitudes de Encuesta al Coordinador para extraer cualquier data pendiente.

Por ejemplo, la configuración por defecto es 0x06 (0110 en binario), donde el bit numero 0, corresponde al último dígito en la secuencia.

El comando A2 puede tener un rango entre 0 y 0x07 (111 en decimal). Cada uno de estos bits, configura el modo de operación del coordinador, en caso de que el dispositivo se encuentre configurado como Coordinador (CE=1). Esta configuración se muestra en la Tabla 4.2.

Tabla 4.2 Configuración Coordinador. Comando A2.

No.	Bit Number	Valor	Configuración Coordinador usando A2
0	ReassignPanID	0	Coordinador no realizará Active Scan para localizar PAN ID disponibles. Operará sobre su PAN dada por el parámetro ID.
		1	Coordinador realizará Active Scan para determinar una PAN ID disponible. Si una PAN ID tiene conflicto, el parámetro ID cambiará.
1	ReassignChannel	0	Coordinador no realizará Energy Scan para determinar canales libres. Operará en el canal determinado por el parámetro CH.
		1	Coordinador realizará Energy Scan para encontrar canales libres. Luego operará sobre ese canal.
2	AllowAssociate	0	Coordinador no permitirá a ningún dispositivo asociarse a él.
		1	Coordinador permitirá que dispositivos se asocien.

4.5 Conexión API.

Esta conexión, agrega información extra a los paquetes de datos RF. Ya no son enviados de forma transparente, sino que cada paquete de datos, son almacenados dentro de un frame, con una estructura definida que permite una forma más robusta para enviar datos. Esto permite entre otras cosas determinar el origen de algún paquete recibido dentro de la red.

Cuando la configuración API está activada, cada paquete RF que se envía o recibe se encapsula en un frame de datos UART. Para esto se utiliza el comando AP (API Enable). El frame se observa en la Figura 4.7.

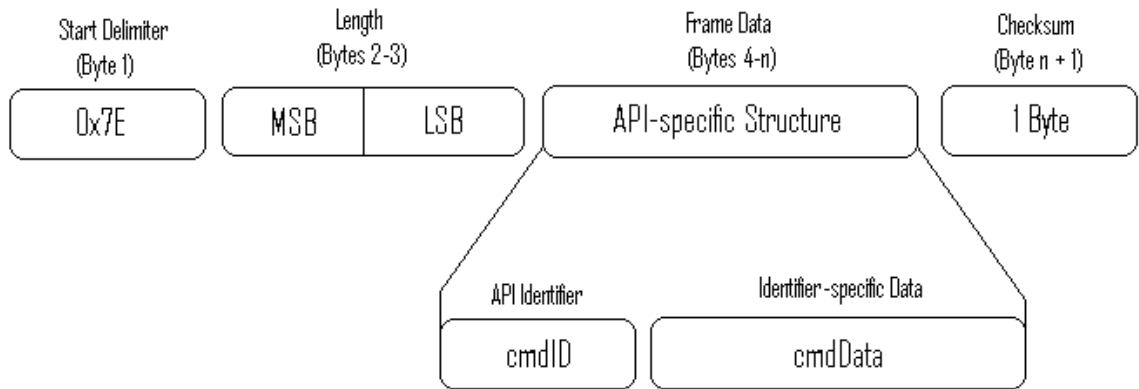


Figura 4.7 Estructura del Frame del modo API.

Existen tres posibilidades de configuración. Con AP=0, se deshabilita el frame API y el módulo trabaja en modo transparente. Con AP=1, el módulo trabaja en el modo API. Con AP=2, el módulo trabaja en modo API, pero con Carácter de Escape. Este modo es necesario sólo cuando se envían datos que interfieren con la estructura del Frame. Éstos son:

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

Este modo, ingresa un carácter de escape, además de otra operación sobre el bytes de interferencia. Esto hace que el frame sea más grande, al agregar bytes, pero evita que la cabecera del frame se confunda con los datos enviados. Otra ventaja es el Checksum, que permite verificar que los datos entregados no se hayan corrompido.

Para calcular el Checksum se suman todos los bytes de datos del Frame, sin incluir en la suma los marcos delimitadores y la longitud, es decir de acuerdo a la Figura 4.7 únicamente se tendrían que sumar el Frame Data y el resultado se debe restar a 0xFF.

Por ejemplo para enviar la cadena de datos “Hello” se tiene que enviar la siguiente cadena de datos hexadecimales: **7E 00 0A 01 01 50 01 00 48 65 6C 6F B8**, donde el inicio

de la cadena debe comenzar con “7E” seguida de la longitud de la cadena siendo para este caso “00 0A”, después del se debe identificar el tipo de paquete que se va enviar para este caso es “01” y seguido del frame ID “01”, posteriormente va la dirección destino al que se va enviar el paquete “50 01” seguida del opción byte. Después de enviar los bytes mencionados se envían los datos “48 65 6C 6C 6F” que son los valores ASCII en hexadecimal de la cadena “Hello”. Por último se envía el checksum que para nuestro caso se calcula de la siguiente manera: $01 + 01 + 50 + 01 + 00 + 48 + 65 + 6C + 6C + 6F = 247$; $FF - 247 = B8$; siendo el “B8” el valor del checksum.

Entre las posibilidades que permite la API, es la de cambiar parámetros a través de comandos AT, enviándolos al módulo de destino. Así, desde un módulo, es posible configurar otro utilizando el modo API. También es posible consultar sobre el estado de algún parámetro en otro módulo. Además se puede consultar sobre el estado del módem, como saber si está asociado a un coordinador, o si el módulo es o no un coordinador.

Existen diferentes tipos de comandos API, los cuales son determinados por el API Identifier, que se encuentra dentro del Frame Data y determina el mensaje contenido dentro del Identifier-specific Data.

Los diferentes tipos de API Identifier son los siguientes:

- 0x8A: Estado del modem (Modem Status).
- 0x08: Comando AT (AT Command).
- 0x09: Comando AT-Valor de parámetros de colecta (AT Comandos-Queue Parameter Value).
- 0x88: Respuesta de comando AT (AT Command Response).
- 0x00: Transmitir a dirección de 64 bit (TX (Transmit) Request: 64-bit address).
- 0x01: Transmitir a dirección de 16 bit (TX (Transmit) Request: 16-bit address).
- 0x89: Estado de la transmisión (TX (Transmit) Status).
- 0x80: Recibe paquete dirección 64 bit (RX (Receive) Packet: 64-bit Address).
- 0x81: Recibe paquete dirección 16 bit (RX (Receive) Packet: 16-bit Address).

Las estructuras del Identifier-specific Data correspondientes a cada identificador API utilizado durante la elaboración de la red de monitoreo y control del tipo punto multipunto, serán vistas mas adelante a detalle.

4.6 Software X-CTU.

Si bien es cierto que es posible utilizar la Hyperteminal de Windows para configurar un módulo XBee, existe un programa llamado X-CTU, el cual permite realizar estas operaciones de manera más natural, fácil y rápida. Al ejecutar dicho programa aparece una ventana como la mostrada en la Figura 4.8, la cual muestra la opción “PC Settings”.

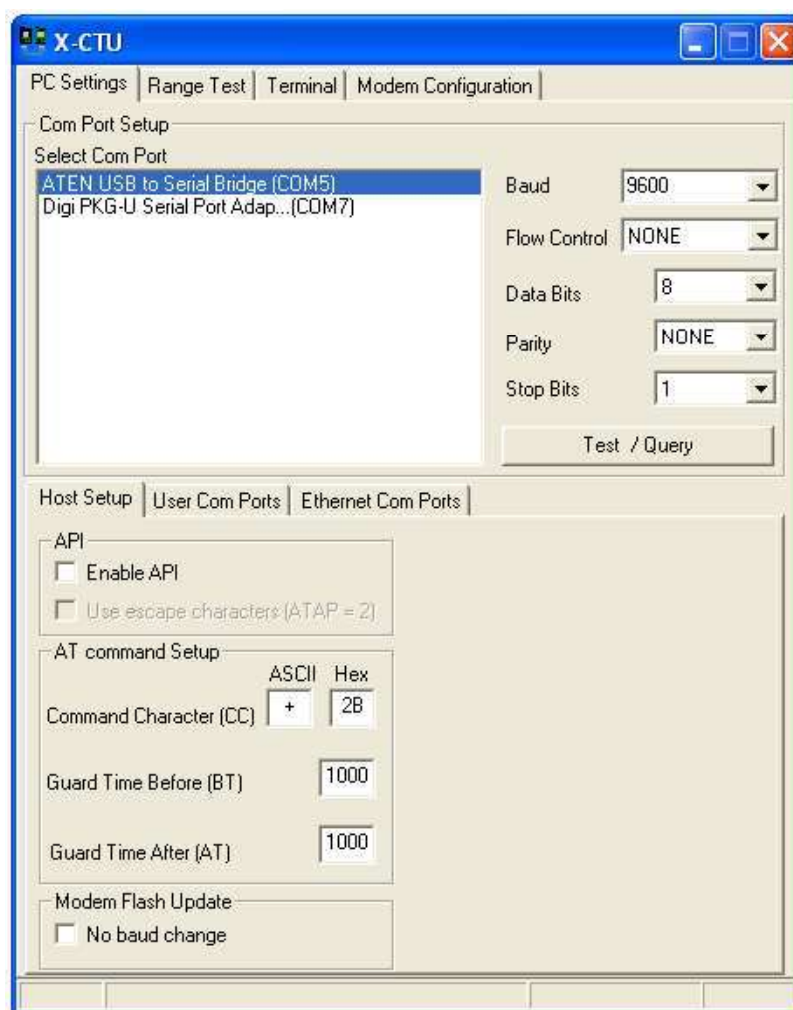


Figura 4.8 Opción “PC Settings”.

En la pestaña llamada PC Settings es posible configurar el número y la velocidad del puerto serial, así como la paridad, entre otras cosas. Además permite configurar opciones más generales para los comandos AT, como el signo elegido para salir del modo de comandos, que por defecto corresponde al signo + (2B en hexadecimal).

En la pestaña Range Test, es posible enviar una cadena de datos de cualquier tipo para probar el rango de alcance de la señal. Esto genera automáticamente datos y los envía por el módulo, de tal forma que permite verificar cuales datos llegan adecuadamente y cuáles no, a partir de esa estadística se determina el rango o alcance de la señal. Esta pestaña se muestra en la Figura 4.9.

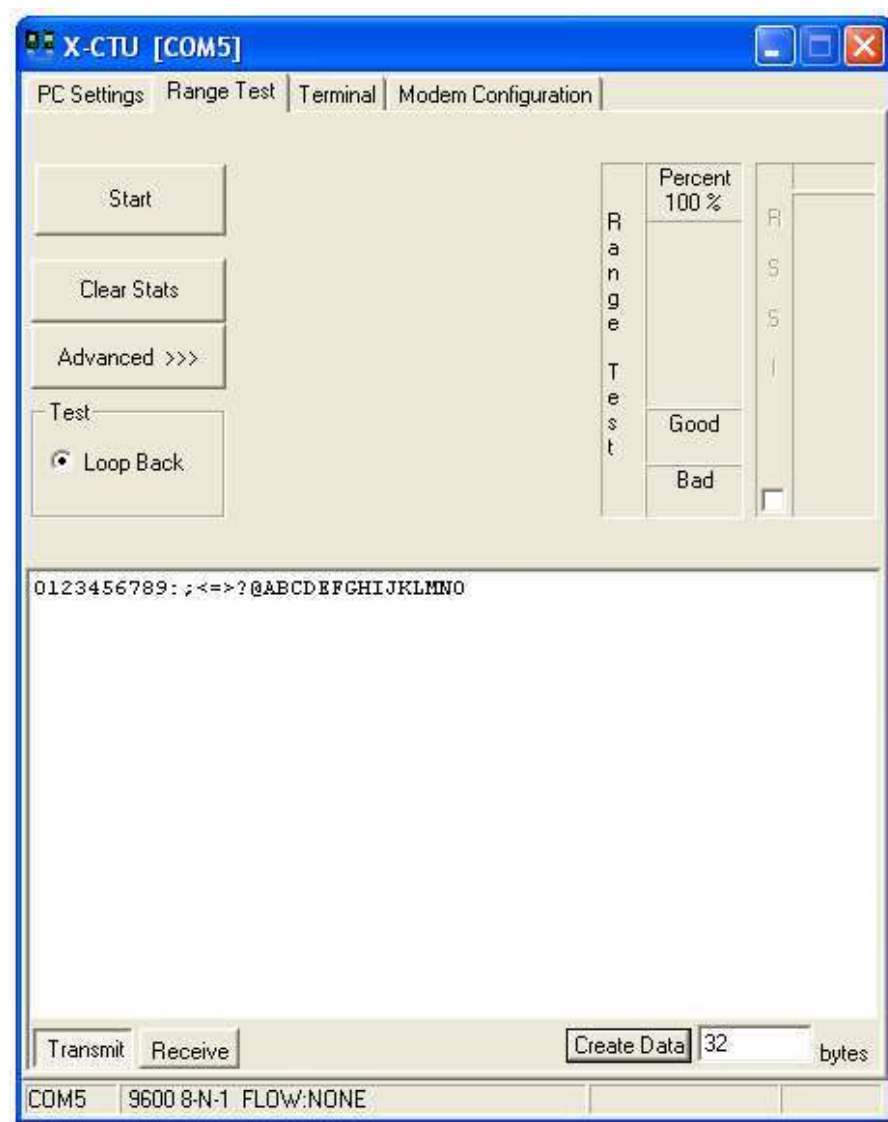


Figura 4.9 Opción “Range Test”.

En la pestaña de Terminal, el funcionamiento es idéntico al del Hyperterminal. Todo lo escrito aquí, entra directamente al módulo como si estuviera en el modo de comandos. También permite ensamblar paquetes para ser enviados, trabajando en modo API. Dicha pestaña es la mostrada en la Figura 4.10.

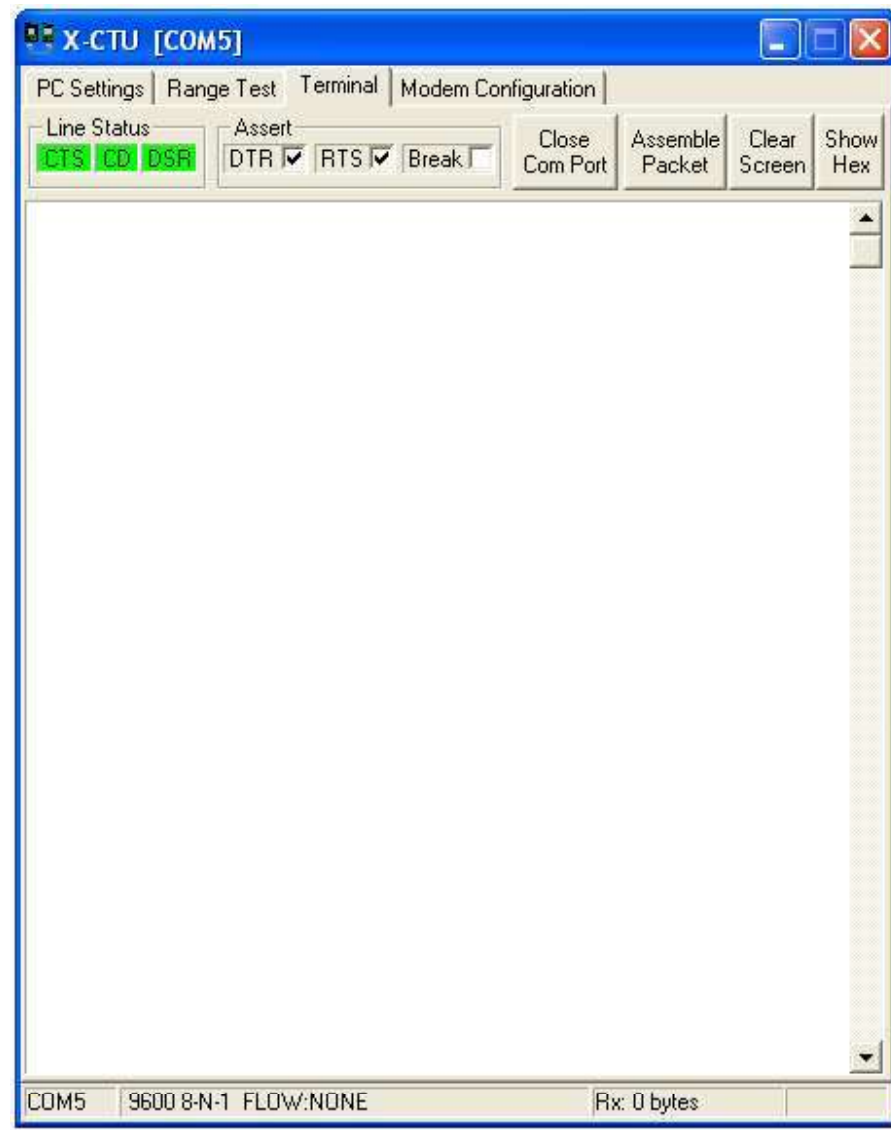


Figura 4.10 Opción “Terminal”.

La pestaña mostrada en la Figura 4.11 es la de MODEM Configuración y la cual permite leer, guardar o cargar cierta configuración predeterminada. Permite ver cómo está configurado cada módem, cambiar alguna característica o luego guardarla o cargarla de una previamente guardada.

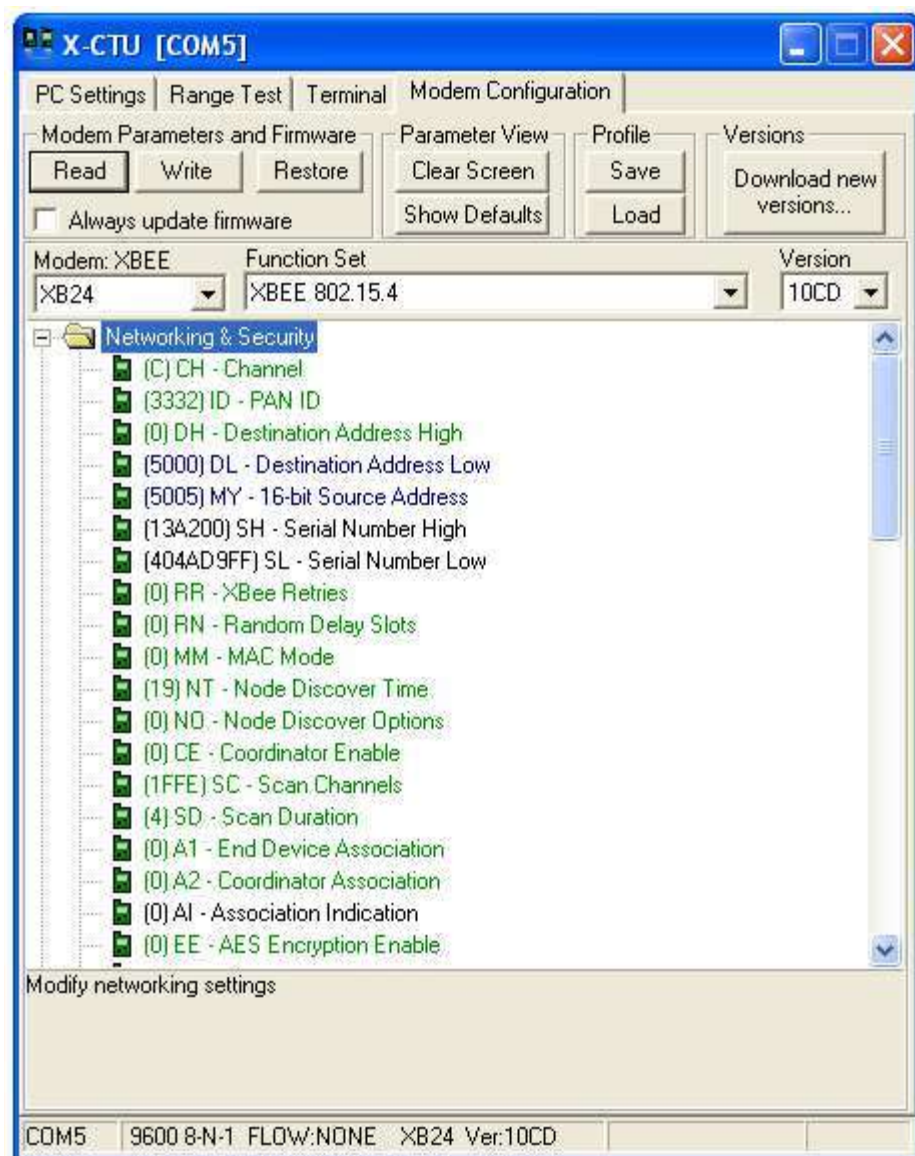


Figura 4.11 Opción “Modem Configuration”.

Capítulo 5

Diseño del Hardware y Software para el monitoreo y control de una red ZigBee del tipo punto-multipunto.

Dentro del diseño de una red de comunicaciones es importante el iniciar evaluando ciertos aspectos que podrían influir en los requerimientos para la realización de la misma. Como el lugar físico donde se va implementar la red. Otro aspecto notorio es el hecho de conocer si los elementos que se van a utilizar en el control de la red son de fácil obtención, ya que en caso contrario el diseño podría estancarse en un punto en el cual resulte imposible utilizar los medios necesarios para desarrollar con éxito el sistema de monitoreo y control. Razones por las cuales en el presente capítulo se describe la red de monitoreo y control implementada, así como el hardware necesario para la realización de la red y el software que se desarrollo, durante la elaboración del proyecto.

5.1 Descripción del prototipo a implementarse

El prototipo que se implemento fue una red de monitoreo y control, enfocada hacia una implementación domótica o inmótica futura, pero solamente se desarrollo físicamente la captura de 2 sensores de temperatura, debido a que el objetivo primordial es la implementación de la red de datos y no la forma de adquirir los datos. Sin embargo esta información se utilizó para implementar una red de monitoreo de energía y una red de control de acceso.

Cuando se habla de topología de red, ésta se refiere a la forma tanto física como lógica en la que se encuentran interconectados los elementos que pertenecen a la misma. Y de acuerdo a las especificaciones técnicas de los módulos XBee que se utilizaron en el diseño del dispositivo de comunicación; estos elementos soportan ciertas topologías, las cuales

fueron descritas con anterioridad en el capítulo 2. De acuerdo a lo visto se implementó una red del tipo punto-multipunto, debido a que esta es la más conveniente, pensando en la aplicación futura deseada.

La red del tipo punto-multipunto que se implementó cuenta con un coordinador y dos dispositivos finales como se muestra en el diagrama de bloques del la Figura 5.1.

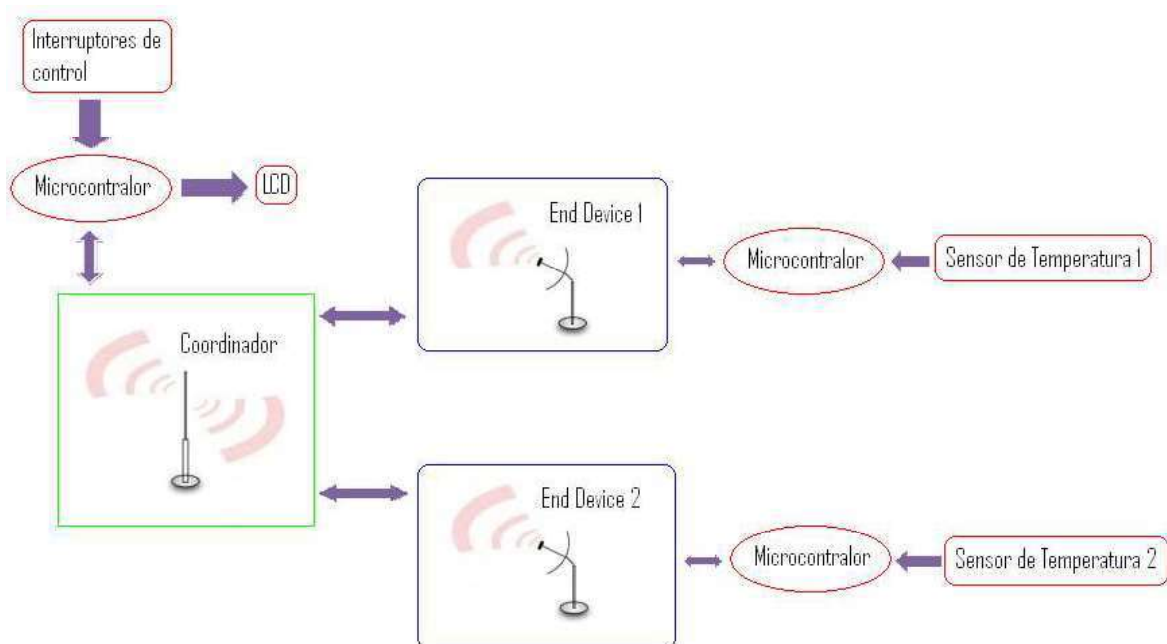


Figura 5.1 Diagrama a bloques del prototipo.

5.2 Diseño del Hardware

Para el diseño del hardware se deben considerar muchas cosas, empezando por las funciones que este debe cumplir y que es lo que debe llevar para el correcto funcionamiento. Entre los principales dispositivos que se necesitan para la implementación del hardware se encuentran microcontroladores, sensores de temperatura, reguladores de voltaje de 3.3V, los módulos XBee y un display LCD. Los cuales serán descritos más adelante. Y razón por la cual en el presente tema se describe el proceso de selección y diseño de los dispositivos; y los componentes requeridos para el funcionamiento de la red.

5.2.1 Funciones del Hardware.

El hardware implementado entre las responsabilidades que tiene es incluir dispositivos para la transmisión y recepción de datos formando una red inalámbrica bajo el estándar Zigbee.

Permitir la interacción del coordinador con el usuario mediante el uso de interruptores. Permitir la comunicación serial entre el XBee y el microcontrolador. Proporcionar el interfaz necesario para la programación del software requerido por los nodos. Suministrar la energía requerida para el funcionamiento de los distintos módulos. Adquirir información del exterior (temperatura) y trasmitirla. Proyectar en un display LCD la información transmitida.

5.2.2 Herramientas de desarrollo y evaluación.

Para el desarrollo del proyecto, se ha valido de diferentes herramientas de hardware para la implementación, programación, depuración del sistema. A continuación se describen e indican su importancia dentro del proyecto.

El primero en mencionar es el kit de desarrollo ZigBee de MaxStream el cual se muestra en la Figura 5.2.



Figura 5.2 Kit de desarrollo ZigBee de MaxStream.

Como se puede observar en la figura anterior el kit de desarrollo incluye una tarjeta de interface USB, una tarjeta de interface serial, dos módulos XBee PRO, un cable USB, un cable serial RS-232, un convertidor DB9 null modem, software X-CTU y manuales, broche para pila de 9 volts, eliminador de baterías con adaptadores universales. Con el kit de desarrollo es posible ver los datos que se están mandando de un modulo a otro, de esta forma podemos monitorear de forma independiente nuestra comunicación inalámbrica.

Otra herramienta empleada es el programador/depurador MPLAB ICD2, el cual se muestra en la Figura 5.3.

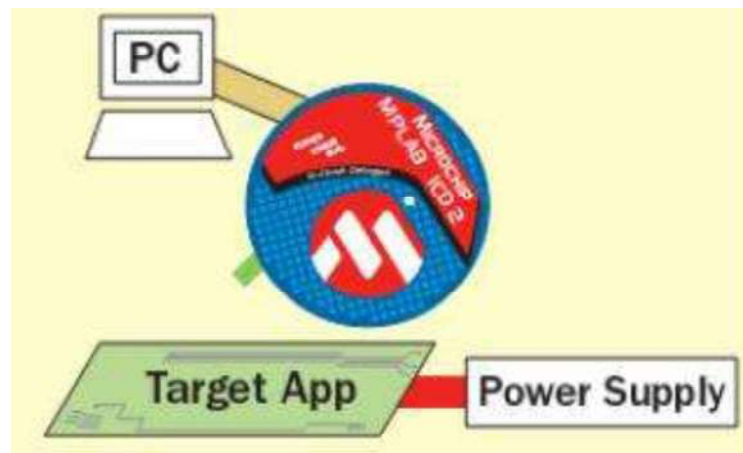


Figura 5.3 Programador/depurador MPLAB ICD2.

Existen en el mercado, una gran variedad de hardware de programación para cargar el código fuente a los microcontroladores PIC. Sin embargo, muy pocos de ellos son útiles para programar aquellos de la familia 18 (debido a la gran cantidad de memoria de programa que dispone). Por ello, se optó por el programador MPLAB ICD2 de MICROCHIP que permite cargar el código de máquina sin necesidad de desmontar el PIC del circuito y además tiene la ventaja de ayudar a la depuración del código al permitir la ejecución paso a paso del mismo.

5.2.3 Módulo Coordinador.

Este módulo como su nombre lo indica es el encargado de coordinar toda la red, es decir es que controla el envío y recepción de información dentro de la red. Un diagrama a bloques de este dispositivo es el mostrado en la Figura 5.4.

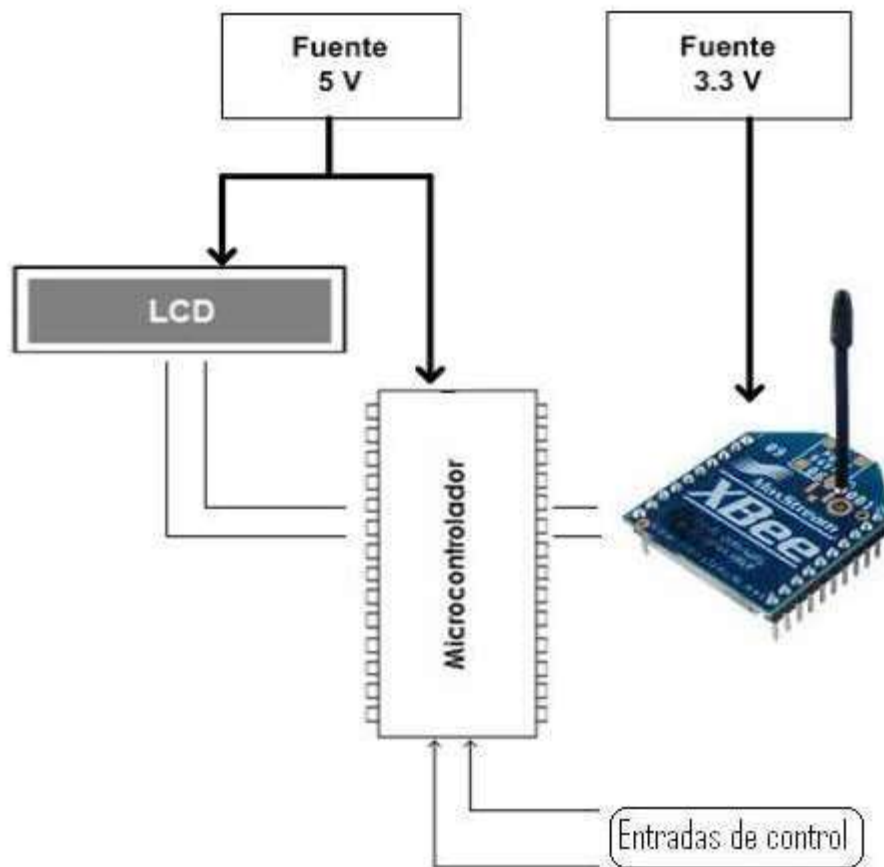


Figura 5.4 Diagrama a bloques del Coordinador.

Como se puede observar en la Figura 5.4 el coordinador está conformado, por un microcontrolador, el módulo de radiofrecuencia, el display LCD, las fuentes de voltaje y las entradas de control. Dichos componentes se describen a continuación.

La alimentación del coordinador es mediante una fuente de voltaje de 5V, de donde se obtiene mediante el circuito regulador LD33V los 3.3 V necesarios para alimentar el XBee, dicho circuito regulador se muestra en la Figura 5.5 donde se ve su configuración de pines.

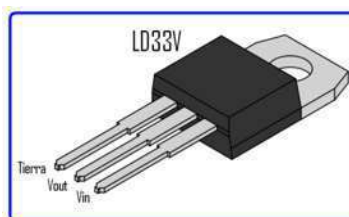


Figura 5.5 Configuración del regulador LD33V.

Otro dispositivo empleado para formar el coordinador es el modulo XBee, donde la información referente a dicho modulo se encuentra en el Apéndice B.

El microcontrolador que se empleo para el coordinador y para cada dispositivo final es el PIC18F4550 de microchip, el cual se muestra su diagrama de pines en la Figura 5.6.

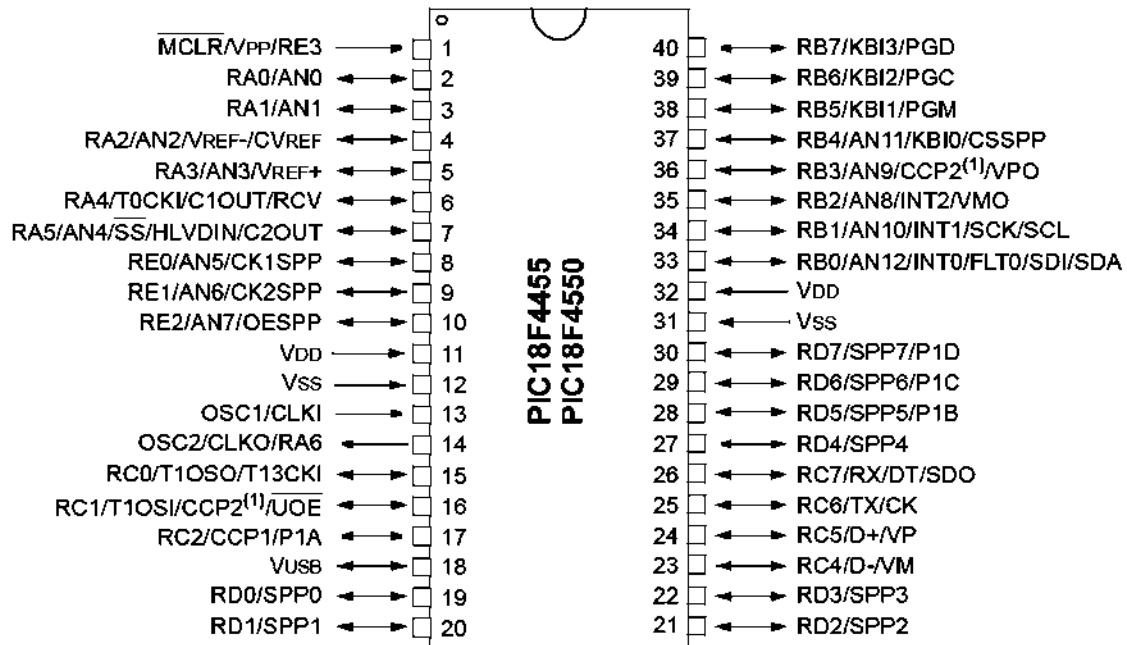


Figura 5.6 Diagrama de pines del PIC18F4550.

El otro dispositivo que forma parte del coordinar es el display LCD (Liquid Crystal Display) donde se proyecta parte de la información transmitida. Este dispositivo dispone de 14 pines de los cuales 2 son para alimentación (VSS y VDD), 1 para ajuste de contraste (V0), 3 para control (RS, R/W y E) y los restantes 8 para transmisión/recepción de datos (D0-D7).

En la Figura 5.7 se muestra el aspecto y posición de los pines del módulo LCD utilizado. La forma más sencilla de controlar los módulos LCD es a través de un microcontrolador. Para ello se empleo el puerto B del PIC18F4550 conectado al módulo LCD.

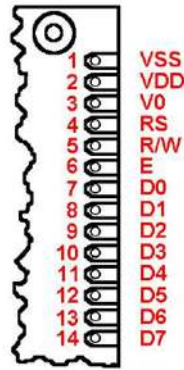


Figura 5.7 Diagrama de pines del display LCD.

Una vez descritos los principales componentes del coordinador se prosigue a describir la forma en que se interconectan los diferentes dispositivos.

Como ya se había mencionado los módulos XBee operan con un voltaje de 3.3V, por lo que los 5V obtenidos de la fuente que alimenta al microcontrolador y al LCD, son regulados para alimentar al XBee. Este dispositivo tiene una conexión serial con el microcontrolador, trabajando este último con valores TTL, por lo que la señal proveniente del microcontrolador al modulo XBee, tiene que pasar por un divisor de tensión, para evitar dañar el modulo XBee, tal como se muestra en el diagrama esquemático de la Figura 5.8.

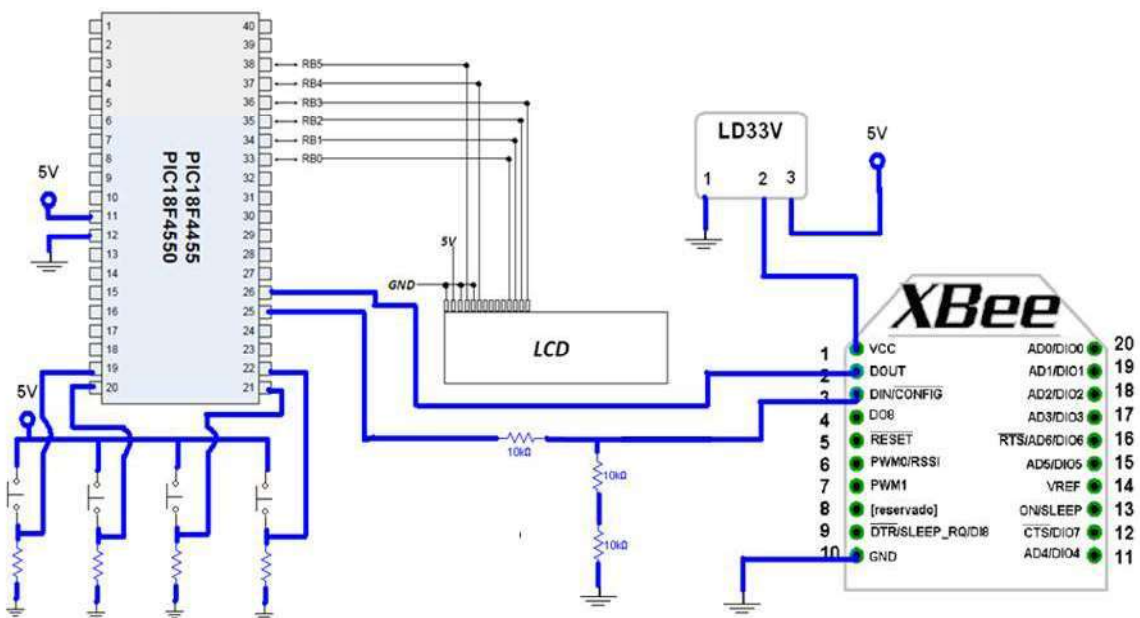


Figura 5.8 Diagrama esquemático del coordinador.

5.2.4 Módulos “End Device”.

Estos módulos son los dispositivos finales, los encargados de adquirir y transmitir dicha información que para nuestro caso es temperatura. En la red que se construyó, se fabricaron únicamente dos módulos “End Device” debido a que son exactamente igual. El esquema general de un módulo de este tipo se muestra en la Figura 5.9.

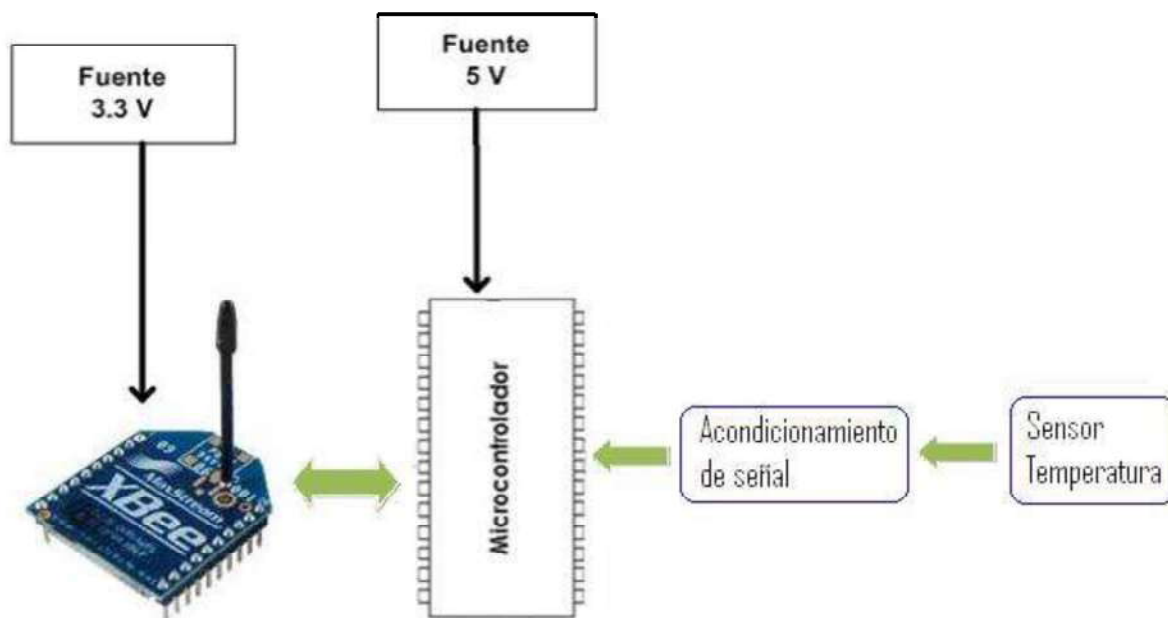


Figura 5.9 Diagrama a bloques del End Device.

Como se puede observar en la figura anterior, la parte de alimentación del dispositivo es igual que el coordinador, al igual que la interconexión del microcontrolador con el módulo XBee.

En los módulos End Device se emplean los mismos componentes que en el coordinador a diferencia que a estos no se les conecta el LCD, en cambio llevan integrado un sensor de temperatura con su respectivo acondicionamiento de señal.

El sensor de temperatura empleado es el LM35, el cual es un circuito integrado cuyo voltaje de salida es linealmente proporcional a la temperatura en grados Celsius o Centígrados. No requiere de calibración externa o regulación para proveer medidas con variaciones de $\pm 1.4\text{ }^{\circ}\text{C}$ en habitación y $\pm 3.4\text{ }^{\circ}\text{C}$ en exteriores sobre una escala completa de -

55 a 150 °C. Características como la baja impedancia de salida, salida lineal y una calibración interna precisa facilitan la interfaz de lectura y control. En la Figura 5.10 se puede observar la distribución de pines del sensor, así como su configuración típica.

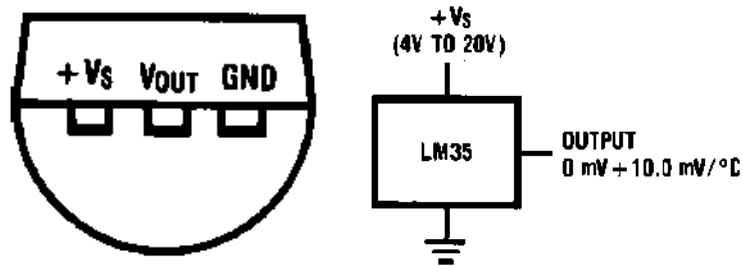


Figura 5.10 Distribución de pines y configuración típica del LM35.

El sensor entrega a su salida 10mV por cada grado centígrado por lo que no es lo suficientemente grande para introducir la señal directamente al convertidor analógico digital del microcontrolador, razón por la cual esta señal hay que introducirla a una etapa previa de acondicionamiento. Esta etapa consiste en amplificar la señal que se obtiene del sensor con una ganancia aproximada de 5, para obtener a la salida 50 mV/°C. Dicha amplificación se realiza mediante un circuito amplificador operacional, en su configuración no inversora.

Después de esta etapa de amplificación se tiene una señal de 0 Volts a una temperatura de 0 °C y de 5 Volts a una temperatura de 100 °C.

Se coloca un diodo zener en paralelo de 5.1V para proteger la entrada del microcontrolador en contra de voltajes altos. Es puede ser observado en del diagrama esquemático de la Figura 5.11.

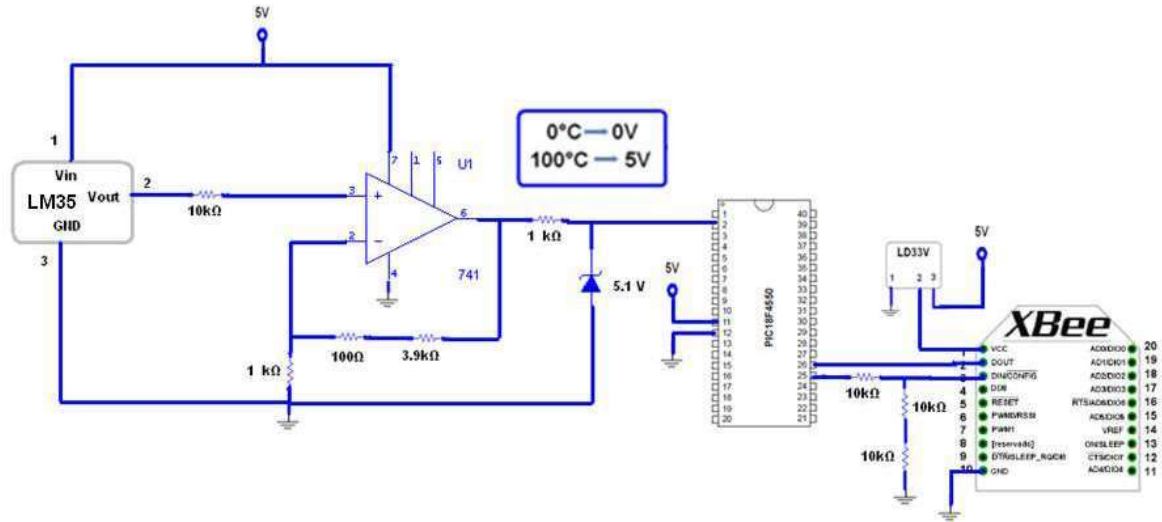


Figura 5.11 Diagrama esquemático del End Device.

5.3 Diseño del Software

El presente tema detalla el proceso de diseño del software, requerido para el funcionamiento y control de la red del tipo punto-multipunto.

El software del proyecto se compone del código fuente desarrollado para los microcontroladores PIC presentes en el coordinador y los dispositivos terminales.

Previo a la descripción del software desarrollado se detalla el protocolo de comunicaciones usando el modo API, así como una breve descripción de las herramientas utilizadas en el desarrollo del software.

Para una mejor comprensión del código del software y pensando en la aplicación futura de domótica e inmótica, se asignaron las direcciones de los módulos XBee pensando en lo anterior. Además se estableció que en la red creada sólo se emplearían direcciones de 16 bits, las cuales son de la forma 0xFFFF expresadas en hexadecimal.

Por lo que se asigna que el byte más significativo representa el tipo de entorno y dispositivo sobre el que trabaja el modulo XBee, es decir, este byte indicara si se trata de un coordinador, un router, o si está actuando sobre una venta, una puerta, una lámpara, etc. En

cuanto el byte que le prosigue indica el piso en que se encuentra dicho dispositivo. Seguido del cuarto en que se encuentra. Y por último el byte menos significativo indica el número de dispositivo que se trata. Lo anterior se puede observar de mejor manera en la Figura 5.12.



Figura 5.12 Asignación de direcciones de 16 bits.

Propuestas de diferentes tipos de dispositivos se muestran en la siguiente lista:

- | | |
|--------------------------|----------------|
| 0 – Genérico. | 8 – Puertas. |
| 1 – Coordinadores. | 9 – Persianas. |
| 2 – Router. | A – Ventanas. |
| 3 – Temperatura. | B – Audio. |
| 4 – Humedad. | C – Video. |
| 5 – Corriente o voltaje. | D – Genérico. |
| 6 – Alarmas. | E – Genérico. |
| 7 – Movimiento. | F – Genérico. |

De lo anterior se puede observar que, por ejemplo si se tiene en un dispositivo la dirección 0x3417, esta indica que se trata de un dispositivo “End Device” el cual es el séptimo dispositivo, que se encuentra en la primera habitación del cuarto piso que esta monitoreando temperatura.

5.3.1 Descripción del protocolo de comunicaciones utilizando API.

Este modo de operación de los módulos XBee fue tratado con mayor detalle en la sección 4.5, donde se menciona que existen diferentes tipos de identificador API, que sirven para identificar el tipo de paquete que se transmite o recibe. A continuación se detallan los paquetes de datos que emplea la red creada.

El primer paquete empleado es la transmisión (Tx) a una dirección de 16 bits, identificándose con un 0x01 en el byte 4, como ya se había mencionado, dicha estructura se muestra en la Figura 5.13.

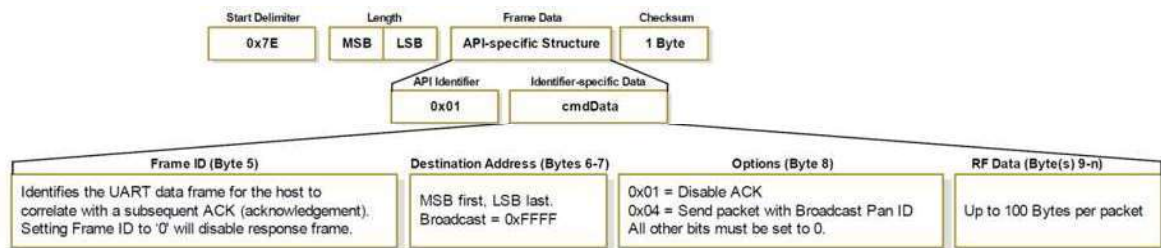


Figura 5.13 Paquete de transmisión Tx a dirección de 16 bits.

Una vez que una petición de Tx es completada, es decir un paquete es enviado, el modulo envía un mensaje de estado de Tx, en donde el mensaje de dicho paquete indicará si el paquete enviado fue transmitido satisfactoriamente o este fracaso. Este tipo de paquetes se identifican con un 0x89 como se puede observar en la Figura 5.14.

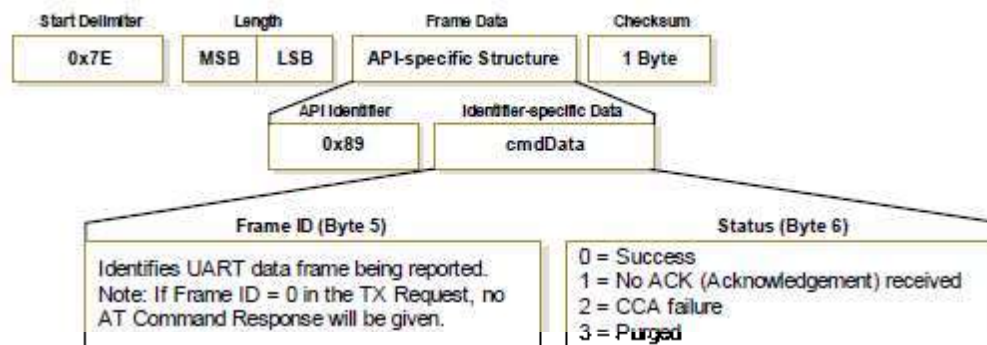


Figura 5.14 Paquete de estado Tx.

Y por último cuando el módulo recibe un paquete de datos proveniente de un modulo con dirección de 16 bits, este tiene la forma del paquete que se muestra en la Figura 5.15, donde se puede observar que su identificador API es el 0x81.

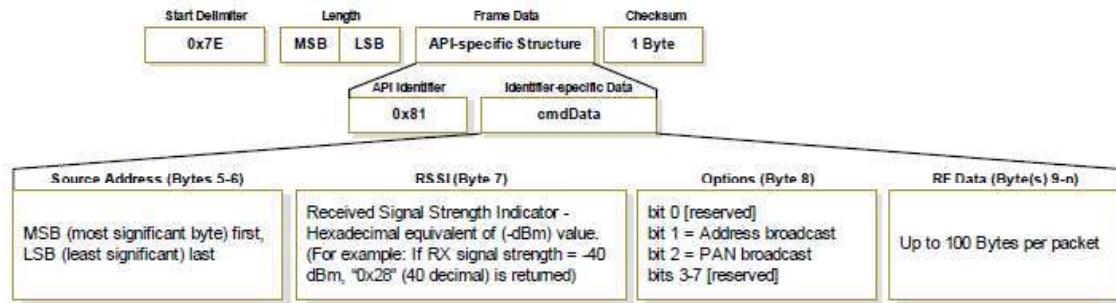


Figura 5.15 Paquete de recepción Rx de dirección de 16 bits.

5.3.2 Herramientas de desarrollo.

Cada microcontrolador necesita de un programa que lo instruya sobre los diferentes procesos y decisiones a tomar. El programa o “código de máquina”, denominado así por hallarse escrito en formato binario, se compone de las instrucciones de operación del microcontrolador y es cargado en la memoria de este mediante un dispositivo programador.

Recurriendo a un lenguaje de programación estructurado, se puede generar códigos sencillos y de fácil entendimiento para el programador, que luego serán “traducidos” al lenguaje binario que utiliza el microcontrolador.

En seguida, se justifica la selección y utilización del lenguaje de programación, y se describe brevemente las funciones de las herramientas necesarias para generar el código de cada nodo de la aplicación.

El desarrollo del código de los microcontroladores PIC se realiza en lenguaje C, debido a que libera al programador de realizar análisis a bajo nivel, y por las bibliotecas disponibles en este lenguaje para controlar diferentes periféricos existentes.

Pese al mayor consumo de memoria de programa que se requiere en comparación a

utilizar el lenguaje ensamblador, los PIC de la familia 18 están optimizados para el uso del lenguaje C.

En cuanto al entorno de desarrollo del proyecto, se recurre al programa MPLAB IDE versión 8.15, que permite desarrollar aplicaciones basadas en microcontroladores Microchip.

Es denominado un Entorno de Desarrollo Integrado (IDE), porque provee un único “ambiente” para el desarrollo del código, manejo del compilador, enlazamiento de archivos, generación del código máquina y la utilización de los programadores y/o depuradores como es el caso del MPLAB ICD2.

Por último, para la compilación del código se utiliza el programa MPLAB C18 de Microchip, el cual convierte las sentencias C en código de máquina para un PIC de la familia 18. Este compilador soporta las expresiones y tipos de variables definidas en el estándar ANSI para este lenguaje, excepto en puntos donde existen conflictos con la eficiencia de los microcontroladores PIC. Adicionalmente, el compilador MPLAB C18 se integra con MPLAB IDE para facilitar la administración de proyectos.

5.3.3 Coordinador.

En la presente subsección se describe la forma en que se configuró el coordinador, así como la descripción del software empleado en el mismo. Para un mayor entendimiento del software, este se presenta en forma de tablas donde se muestran las entradas y salidas de cada función del programa, así como una breve descripción de lo que se hace en esa parte.

Las funciones principales del software del coordinador es el configurar el módulo USART para tener comunicación serial con el XBee. Así como el definir qué información de la recibida por el puerto USART es relevante y proyectar en un LCD, dicha información.

Otra de las funciones primordiales es el administrar la información de y hacia el modulo USART. En cuanto a la configuración del modulo USART y de la proyección de

información en el LCD, se evitará dar grandes detalles debido a que la configuración de los mencionados, es muy común y se puede obtener mucha información muy fácilmente, así como las bibliotecas para su configuración. Además que el objetivo de este trabajo es el explicar la creación y funcionamiento de la red basada en el protocolo de comunicaciones ZigBee.

En la Tabla 5.1 se muestran las funciones que conforman al módulo coordinador, así como las variables que recibe y regresa cada función, así como una breve descripción de su funcionamiento.

Tabla 5.1 Funciones del módulo coordinador.

Función	Recibe	Regresa	Descripción
EnvioDatos	NoDatos, adress_destino	Nada	Se encarga de armar el paquete (USART Data Frame) de acuerdo a los datos que se van enviar y a la dirección destino.
ReciboDatos	Nada	Nada	Se encarga de extraer los datos valiosos del buffer de entrada, los cuales fueron recibidos por la interrupción.
SendXbee	DatoByte	Nada	Es el que envía cada byte del frame ensamblado por “EnvioDatos” por el puerto USART hacia el modulo XBee.
CalculaSuma	NoDatos	Suma	Calcula la suma de los bytes de datos que se van enviar para poder calcular el checksum.
Prende	direccion_destino	Nada	Envía el dato necesario al “End Device” deseado para iniciar la transmisión de datos de temperatura.
Apaga	direccion_destino	Nada	Envía el dato necesario al “End Device” deseado para parar la transmisión de datos de temperatura.
Indice	PaqueteActual, desplazamiento	PaqueteActual	Indica la posición actual del dato que se desea almacenar, para poder emplear un buffer circular en el buffer de los datos de entrada.

Cabe mencionar que la recepción de datos RF tanto en el coordinador como en los dispositivos finales, se hace mediante una interrupción, la cual es la misma para ambos

casos y se describe en un apartado más adelante.

5.3.4 Dispositivos finales.

El software de los dispositivos finales es exactamente igual, excepto la dirección de cada módulo XBee, esta se asignó de acuerdo a los parámetros ya mencionados. La función primordial del software de cada dispositivo final creado, es el de adquirir los datos analógicos del sensor y convertirlos a digitales, para poder ser enviados por el puerto USART hacia el módulo XBee y su subsecuente transmisión RF. Así como el recibir la información proveniente del coordinador, para hacer un control del parámetro que se está monitoreando.

En los módulos “End Device” de igual manera que en el coordinador se configura el puerto USART, así como se utilizan las bibliotecas “EnvioDatos”, “ReciboDatos”, “SendXbee”, “CalculaSuma” e “Indice”, las cuales se describen en la Tabla 5.1. Adicionalmente en el dispositivo final se configura el convertidor analógico a digital y se emplea la biblioteca mostrada en la Tabla 5.2.

Tabla 5.2 Funciones del módulo “End Device”.

Función	Recibe	Regresa	Descripción
Int2Char	Temperatura	Nada	Genera los datos que se enviarán al coordinador, así como el dato de temperatura obtenido se separa en bytes para poder ser enviado y se convierte a valores ASCII para que pueda ser interpretado por el LCD del coordinador.

5.3.3 Interrupción.

Esta es la encargada de revisar todos los datos que lleguen al módulo XBee vía RF, y se encarga de verificar si es un dato válido, en caso de ser válido este es almacenado en el buffer de entrada, para una posterior obtención de los datos por medio de la función “ReciboDatos”. La principal ventaja del buffer de entrada es que se trata de un buffer circular. Es decir es un espacio o región de memoria en la cual, al llenarse esta región, el elemento subsiguiente al último es el primero y así sucesivamente.

5.4 Análisis de costos

En cuanto a costos, en esta sección se provee una idea aproximada de cuanto costo montar la red del prototipo planteada. En la Tabla 5.1 se detallan los costos referenciales de acuerdo a los elementos presentes en el mercado. El costo se da en dólares americanos.

Tabla 5.3 Costos de la red punto-multipunto.

Dispositivo	Cantidad	Valor unitario	Subtotal
Kit de desarrollo ZigBee de Max Stream	1	307	307
MPLAB ICD2	1	54	54
Target	3	24	72
Modulo XBee	1	27	27
Fuente de alimentación 5V	1	6	6
Pilas de 9V	2	2.5	5
Conector Fuente	1	.2	.2
Conector Baterías	2	.46	.92
Regulador LM7805	1	.9	.9
Regulador LD33V	3	2	6
LCD	1	13	13
Interruptores	4	.15	.3
Resistencias	19	.08	1.04
Diodo zener 5.1V	2	.2	.4
Amplificador operacional 741	2	.9	1.8
Sensor de temperatura LM35	2	2.5	5
Protoboard	3	6	18
TOTAL			518.56

Capítulo 6

Pruebas de operación y resultados.

Una vez comprobada la correcta comunicación entre los diferentes elementos del prototipo construido, se procedió a probar la correcta conectividad de todo el prototipo así como el funcionamiento adecuado de las tareas que debía cumplir.

Por lo que en el presente capítulo se desarrollan las diferentes pruebas realizadas con el prototipo ya armado y funcionando en diferentes condiciones. Así como una medición de la cantidad de energía consumida por los dispositivos elaborados.

6.1 Pruebas de funcionamiento del sistema

Estas pruebas consisten básicamente en experimentar con los prototipos elaborados, es decir, se pusieron a funcionar y se observaron las características de funcionamiento tanto del coordinador como de los “End Device” elaborados. Estos prototipos se muestran en las figuras siguientes, siendo la Figura 6.1 el módulo coordinador.

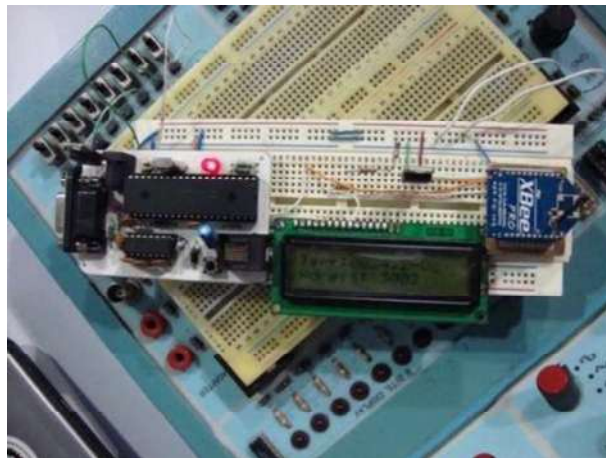


Figura 6.1 Modulo Coordinador.

Y en la Figura 6.2 se muestran los dos “End Device” construidos.

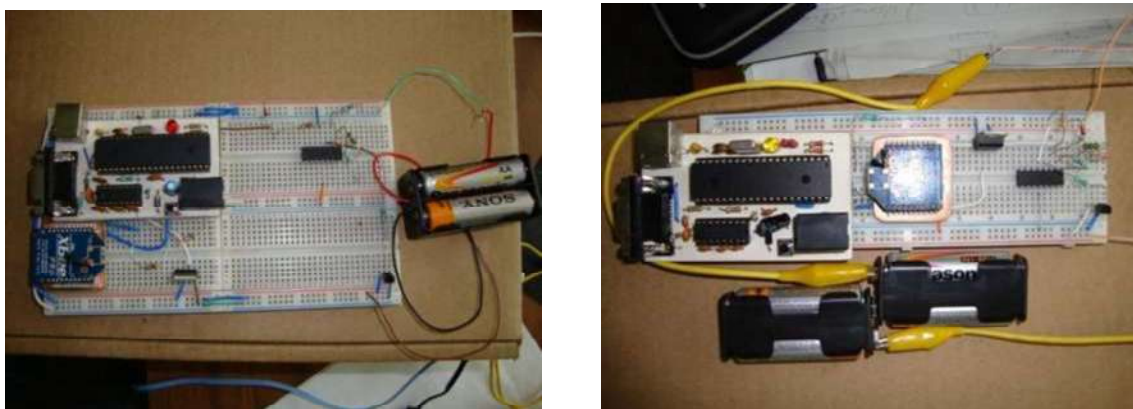


Figura 6.2 Módulos “End Devices”.

Una vez armado el prototipo del coordinador, como se puede observar en la Figura 6.1 este cuenta con cuatro interruptores, los cuales son para realizar el control de los dispositivos finales. Este control consiste en iniciar o detener la transmisión de datos de la temperatura capturada por el “End Device”, siendo un interruptor que envía la orden de inicio a una terminal, otro interruptor para enviar la orden de paro a la terminal y los otros dos interruptores fungen las mismas funciones pero para otro “End Device” distinto.

La asignación de direcciones se realizó de acuerdo a los parámetros ya mencionados en el capítulo anterior, esta asignación se puede observar mejor en la Figura 6.3.

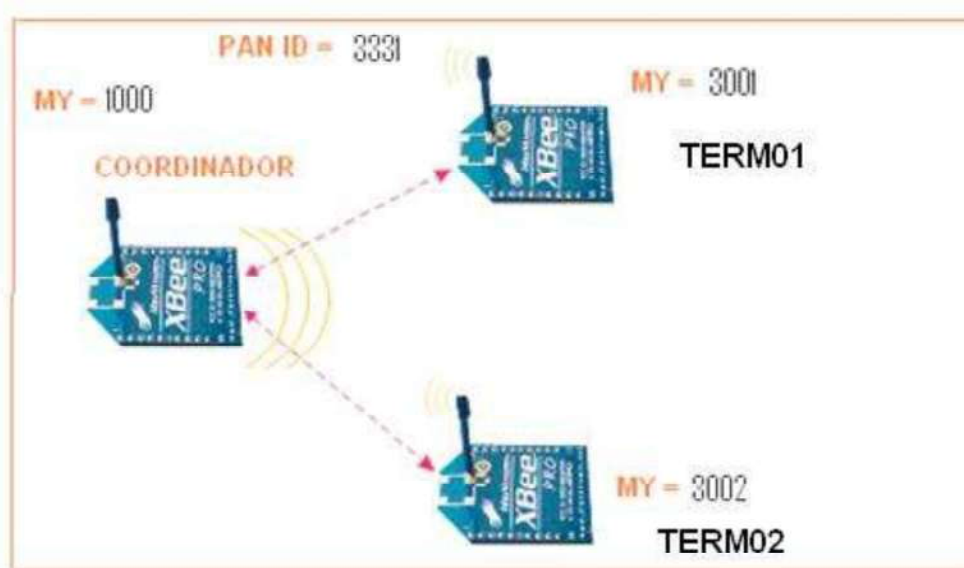


Figura 6.3. Asignación de direcciones.

Otra de las principales pruebas que se le realizaron al equipo es la comparación de los valores de temperatura obtenidos, encontrando que existe una pequeña variación entre el valor obtenido de los “End Device” y un termómetro comercial, el cual se utilizó un multímetro de la marca STEREN, modelo MUL-600, obteniendo que existe una variación de 1.4 grados centígrados, como se esperaba debido a las propias características del sensor de temperatura, esto se puede observar en la Figura 6.4.

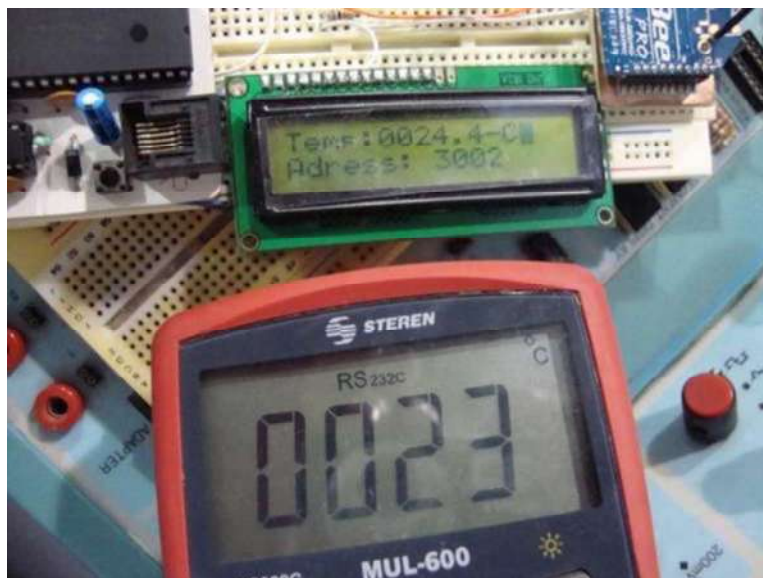


Figura 6.4. Comparación de temperatura.

Al igual que se realizó la prueba sobre la temperatura, que censaban los dispositivos finales, también se realizó una prueba la cual consistió en verificar que los datos transmitidos llegan sin pérdida o variación de información, para esto se implementó un dispositivo el cual obtiene datos sobre consumo energético y los proyecta en un display LCD y al mismo tiempo los transmite a un modulo coordinador el cual también proyecta la información recibida, por lo que se comparó la información proyectada en ambos displays, observando que no había pérdida de información o variación de la misma, ya que la información proyectada era exactamente igual en ambos dispositivos, esto se puede observar en la Figura 6.5.

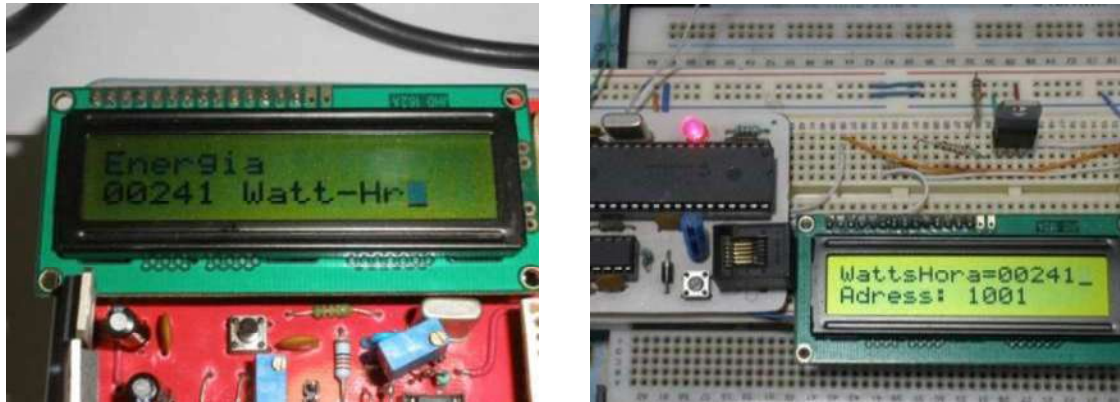


Figura 6.5. Comparación de la información obtenida.

6.1.1 Suministro de voltaje y consumo de energía.

El coordinador se alimenta con una fuente de alimentación de 5 volts; para las pruebas realizadas se empleo la fuente de 5V del laboratorio digital. Al estar conectada la fuente con el coordinador esta brinda una diferencia de potencial de 4.91V cuando se encuentra trabajando el coordinador. También las entradas digitales del microcontrolador, empleadas para el control de los “End Device”, se conectan a los interruptores del laboratorio digital.

En cuanto al consumo de energía del coordinador, este consume una corriente de 97mA cuando el coordinador está recibiendo datos y tiene un consumo de 101.9mA cuando este transmite. Y cuando se encuentra en reposo este consume 96.5 mA. Cabe mencionar que la corriente que consume el coordinador, es la suma de las corrientes que consume el microcontrolador, el LCD y el modulo XBee.

En cuanto a los dispositivos finales, estos se alimentaron con 4 baterías de 1.25V en serie, dando un valor de alimentación al modulo de 5.33 V. Los valores de energía consumidos por los “End Device” están en 99.8mA para cuando se encuentran trasmitiendo y de 96.4 mA cuando se encuentran recibiendo.

6.2 Pruebas de conectividad del prototipo

Para llevar a cabo estas pruebas se definieron varios escenarios de operación: el primer escenario es dentro del laboratorio de electrónica, con línea de visión y con obstáculos, así como en el exterior del laboratorio. El segundo escenario fue el separar los dispositivos a

una distancia considerable y con obstáculos. El tercer escenario se concibió con interferencia de dispositivos que operen a la misma frecuencia y con interferencia electromagnética.

6.2.1 Prueba en interior y exterior.

Estas pruebas primeramente se realizaron dentro del laboratorio de electrónica, siendo la primera, que el coordinador se colocó al centro del laboratorio y los “End Device” se pusieron dentro del mismo laboratorio pero en diferentes posiciones del mismo, observando que no importaba donde se colocará el dispositivo final, seguía transmitiendo los mismos datos y no se observó que existiera alguna pérdida de información en ellos.

El siguiente paso fue el de trasladar uno de los “End Device” al laboratorio de ingeniería eléctrica, para así poder aumentar la distancia entre los dispositivos y los obstáculos entre ellos. Comprobando de esta manera el dispositivo coordinador recibía los datos de manera óptima, al igual que el dispositivo final, responde óptimamente a los comandos de prende y apaga que le envía el coordinador.

Las siguientes pruebas consistieron en retirar los módulos hasta que se perdiera la comunicación, en el primer caso se puso un módulo dentro de la sala de computación del laboratorio de electrónica y se perdió la comunicación hasta que el segundo módulo llegó al monumento de Miguel Hidalgo ubicado dentro de ciudad universitaria.

La última prueba de este tipo implementó dejando un módulo a la entrada del laboratorio de electrónica y la comunicación se perdió hasta después de 30 metros pasando la entrada principal de ciudad universitaria.

6.2.2 Prueba con interferencias de dispositivos a la misma frecuencia de operación.

Esta prueba consistió en poner en funcionamiento la red de monitoreo y control creada, con otros dispositivos inalámbricos que operan a la misma frecuencia de 2.4GHz.

Esta prueba se realizó prendiendo el bluetooth de dos celulares y transmitiendo de

manera muy cercana; así como se operó la red en presencia de redes wifi. Concluyendo que no causa ninguna pérdida de los datos.

6.2.3 Prueba con interferencia electromagnética.

Esta prueba se realizó, colocando el coordinador en el laboratorio de electrónica y un dispositivo final en el laboratorio de ingeniería eléctrica. Después se prosiguió a energizar una bobina de tesla cerca del modulo del depósito, observando que nuevamente los datos que llegan no sufren alguna operación.

Capítulo 7

Conclusiones y Trabajos Futuros.

En el presente capítulo se plasman las conclusiones a las cuales se llegó durante la elaboración del prototipo. En las cuales se dan conclusiones generales del prototipo y conclusiones particulares a los problemas presentados en la elaboración de la red inalámbrica de monitoreo y control. Por último se mencionan algunos de los trabajos que pueden realizar posteriormente.

7.1 Conclusiones

Se exhibió que la tecnología Zigbee, desde el punto de vista técnico, permite crear soluciones de bajo costo que requieren implementar redes que necesitan un ancho de banda reducido y bajo consumo de potencia.

Se expuso que Zigbee requiere de dispositivos muy sencillos, un microcontrolador y de un transceiver RF cuyas dimensiones, potencia y costos muy reducidos son un factor a favor. El transceiver RF tiene como responsabilidad soportar las capas definidas por el estándar IEEE 802.15.4, es decir, la capa física y de acceso al medio. Mientras, el microcontrolador tiene a su cargo controlar el transceiver y soportar las capas de red y aplicación definidas por el estándar Zigbee.

Se comprobó que el uso de aparatos tales como teléfonos inalámbricos y microondas no afectó el desempeño del prototipo, pues no se presentó pérdidas de datos o interferencia en la señal. El estándar ZigBee ofrece una baja complejidad y una baja exigencia de recursos.

Se puede concluir que el prototipo construido del coordinador requiere necesariamente de una fuente para su alimentación, aunque existe la posibilidad de usar una batería, con el inconveniente del tiempo de duración de la misma.

Las características y funcionalidades de un producto se ven limitadas al costo. El incremento de funcionalidades y la utilización de dispositivos de mejores características implican un aumento del costo de implementación de un equipo. El diseñador debe balancear la relación costo-beneficio con el objeto de que su producto cubra satisfactoriamente las necesidades requeridas, manteniendo un precio atractivo para su comercialización.

El correcto direccionamiento que se les dé a cada uno de los dispositivos pertenecientes a la red ZigBee, evitará la pérdida de datos, pues si éstos transmiten en el momento requerido y reciben de la misma forma, no existirá una posible colisión en el entorno de RF que influya en una pérdida de información. De esto se concluye que fue de gran utilidad utilizar un protocolo de comunicación que facilita el intercambio de información entre los nodos de una red, verificando además que la información recibida sea la correcta.

El lenguaje C mostró su gran adaptabilidad y poder, al permitir implementar una arquitectura de red utilizando un microcontrolador sencillo.

Uno de los beneficios tangibles que se puede obtener de este proyecto, es el hecho de que ZigBee mejora la comunicación entre dispositivos tomando en cuenta las distancias entre ellos (hasta 100 metros en interiores), pues si se compara estas longitudes con respecto a Bluetooth, está claro que se pueden cubrir más áreas con menos dispositivos.

Gracias a que no existen cables entre los dispositivos que se conectan entre sí, resulta más fácil el montaje de la red, pues no se debería colocar materiales como canaletas y otros elementos que demoran el proceso de implementación y contribuyen a desmejorar el aspecto propio del lugar donde se instalen, pues saltan claramente a la vista; este es un factor que con la comunicación inalámbrica se puede evitar.

El prototipo diseñado trabaja bien en condiciones reales y con distancias que permitan la correcta comunicación entre los dispositivos, un factor decisivo para la comunicación es la existencia de muchas barreras tales como un elevado número de paredes, o que éstas sean

muy gruesas y de materiales difíciles de penetrar entre los módulos, los mismos no se comunicarán correctamente aunque se tenga una distancia menor a 100 metros.

Para determinar el valor real de una magnitud física, se realiza medidas de ella, normalmente mediante la cuenta de un número de sucesos o por comparación con una unidad de medida. Cuando medimos algo se debe hacer con gran cuidado, para evitar alterar el sistema que observamos. Por otro lado, no hemos de perder de vista que las medidas se realizan con algún tipo de error, debido a imperfecciones del instrumental o a limitaciones del medidor, como es el caso del termómetro utilizado.

Durante el proyecto se alcanzaron los diferentes objetivos planteados, exponiendo las excelentes prestaciones del protocolo Zigbee y demostrando la factibilidad de un sistema electrónico e inalámbrico para monitoreo y control. Se espera que el sistema presentado sea mejorado de forma continua y llegue a formar parte de una red tipo malla.

Igualmente, se anhela que el presente trabajo sirva de base para crear proyectos más ambiciosos que utilicen la tecnología Zigbee.

7.2 Trabajos Futuros

Se pueden realizar bastantes trabajos futuros para ampliar el proyecto desarrollado durante la elaboración de la tesis, entre los que destacan los siguientes.

Perfeccionar y ampliar la red mediante ruteadores que mejoren el alcance del sistema y permitan incrementar el número de posibles nodos dentro de la red, formando redes de topologías de mayor complejidad.

Implementar la topología de red en forma de malla, mediante software, así como trabajar con los módulos XBee de la serie 2, que permiten realizar las redes en forma de malla en forma automática.

Optimizar la comunicación del coordinador con el usuario mediante la utilización de

un LCD gráfico con la suficiente resolución para exhibir los valores medidos en tiempo real y en horas, minutos o segundos antes, de tal forma que permita realizar una comparación y sacar conclusiones de la variación obtenida si ese fuese el caso.

Implementar el sistema en una casa, donde se empleen las direcciones propuestas y se desarrollen varios dispositivos finales con diferentes aplicaciones.

Gracias a las librerías realizadas se pudo integrar la red ZigBee en otras aplicaciones como en un equipo de monitoreo de consumo de energía eléctrica, este equipo permite conocer voltaje RMS, corriente RMS, energía consumida por una carga, potencia aparente, potencia real y factor de potencia. Y al mismo tiempo ser transmitida esta información a un modulo remoto para su procesamiento mediante una red inalámbrica ZigBee.

Además de integrar un sistema de control de acceso que emplea tecnología RFID con una red ZigBee, para el envío de información y poder administrar el sistema de control de accesos.

Apéndices

A. Principales Comandos AT

A continuación se enlistan y explican los comandos de programación más importantes de los módulos XBEE. Cabe destacar que los comandos AT se encuentran divididos en varias categorías, para un mejor entendimiento de los mismos:

- Especiales.
- Networking y Seguridad.
- Interfaz RF.
- Modo Sleep (Bajo Consumo).
- Parámetros I/O.
- Diagnóstico.
- Comandos AT opcionales.

A.1 Comandos AT especiales.

Se tienen los comandos que se muestran en la Tabla A1.

Tabla A1. Comandos AT especiales.

Comando AT	Nombre y Descripción	Rango de Valores	Valor por Defecto
WR	Write, Escribe todas los parámetros deseados en la memoria no volátil del dispositivo. Una vez que se envía este carácter, no podemos enviar otro comando AT hasta recibir respuesta de confirmación del módulo.	-	-
RE	Restore Defaults, Restaura los parámetros de los módulos a los valores por defecto.	-	-
FR	Software Reset, Responde. inmediatamente con un OK, luego realiza un reset profundo del dispositivo el cuál toma alrededor de 100ms.	-	-

A.2 Comandos AT para networking y seguridad.

En la Tabla A2. Se muestran los comandos AT mas sobresalientes que caben dentro de esta categoría.

Tabla A2. Comandos AT de networking y seguridad.

Comando AT	Nombre y Descripción	Rango de Valores	Valor por Defecto
CH	Channel, define o lee el número del canal usado para transmitir y recibir datos entre módulos RF.	0x0B – 0x1A	0x0C (12d)
DH	Destination Address High, Define o lee los 32 bits más altos de la dirección de destino de 64 bits. Combinado con DL, conforman la dirección completa de destino. Para transmitir usando direcciones de 16 bits, este parámetro se coloca a cero mientras el parámetro DL debe ser menor a 0xFFFF.	0 – 0xFFFFFFFF	0
DL	Destination Address Low, Define o lee los 32 bits más bajos de la dirección de destino de 64 bits. Combinado con DH, conforman la dirección completa de destino. Para transmitir usando direcciones de 16 bits, este parámetro se coloca a cero mientras el parámetro DL debe ser menor a 0xFFFF.	0 – 0xFFFFFFFF	0
MY	16 bit Source Address, Define o lee la dirección de origen de 16 bits del módulo RF. Si este parámetro es seteado con el valor 0xFFFF se deshabilitará la recepción de paquetes con direcciones de 16 bits.	0 – 0xFFFFFFFF	0
SH	Serial Number High, Lee los primeros 32 bits de la dirección única del módulo RF designada por la IEEE.	0 – 0xFFFFFFFF (sólo de lectura)	Valor de fábrica
SL	Serial Number Low, Lee los últimos 32 bits de la dirección única del módulo RF designada por la IEEE.	0 – 0xFFFFFFFF (sólo de lectura)	Valor de fábrica

A.3 Comando AT para la interfaz RF.

En esta categoría, solo se cuenta con un comando AT importante el cual se muestra en la Tabla A3.

Tabla A3. Comando AT para interfaz RF.

Comando AT	Nombre y Descripción	Rango de Valores	Valor por Defecto
PL	Power Level, Selección o lee el nivel de potencia con el cuál el módulo transmite los datos.	0 – 4 0 = -10/10 dBm 1 = -6/12 dBm 2 = -4/14 dBm 3 = -2/16 dBm 4 = 0/18 dBm	4

A.4 Comandos AT para bajo consumo (Sleep).

Dentro de esta categoría destacan los comandos AT mostrados en la Tabla A4.

Tabla A4. Comandos AT para bajo consumo (Sleep).

Comando AT	Nombre y Descripción	Rango de Valores	Valor por Defecto
SM	Sleep Mode, Define o lee las configuraciones del modo Sleep.	0 – 5 0 = No Sleep 1 = Pin Hibernate 2 = Pin Doze 3 = Reservado 4 = Cyclic Sleep Remote 5 = Cyclic Sleep Remote con un pin para wake up	0
ST	Time Befote Sleep, Define o lee el periodo en el que el módulo debe permanecer inactivo (sin enviar ni recibir nada), antes de que se habilite el modo Sleep. Este tiempo es válido únicamente si SM es igual a 4 ó 5.	1 – 0xFFFF (x 1ms)	0x1388 5000d

A.5 Comandos AT para la interfaz serial.

En cuanto a la interfaz serial, se pueden configurar varios aspectos, entre los que destacan los mostrados en la Tabla A5.

Tabla A5. Comandos AT para la interfaz serial.

Comando AT	Nombre y Descripción	Rango de Valores	Valor por Defecto
BD	Baud Rate, define o lee el dato de la velocidad de interfaz serial para las comunicaciones, entre el puerto serial del módulo y el host.	0 – 7 0 = 1200 bps 1 = 2400 bps 2 = 4800 bps 3 = 9600 bps 4 = 19200 bps 5 = 38400 bps 6 = 57600 bps 7 = 115200 bps 0x80 – 0x1C200 Para velocidades que no son estándar	3
RO	Packetization Timeout, Define o lee el número de caracteres o retardos entre caracteres, necesarios antes de la transmisión. Si el valor del parámetro está en cero, se transmitirán los datos apenas lleguen al búfer.	0 – 0xFF	3
AP	API Enable, Habilita o deshabilita el modo API.	0 – 2 0 = Deshabilitado 1 = API Habilitado 2 = API habilitado con caracteres de control	0
PR	Pull – up resistor Enable, Define o lee la configuración interna para habilitar resistencias de pull – up para las líneas I/O	0 – 0xFF	0xFF

A.6 Comandos AT para el manejo de los pines I/O.

Los pines I/O pueden ser configurados por separado, de acuerdo a las necesidades del usuario, entre los comandos destacados son los mostrados en la Tabla A6.

Tabla A6. Comandos AT para configuración de pines.

Comando AT	Nombre y Descripción	Rango de Valores	Valor por Defecto
D8	DI8 Configuration, Define o lee las opciones de configuración para la línea DI8 (pin 9) del módulo RF.	0 – 1 0 = Deshabilitado 3 = Entrada Digital (1,2,4,5) no usados	0
D7	DIO7 Configuration, Define o lee las opciones de configuración para la línea DIO7 (pin 12) del módulo RF. También se incluye la configuración para el control de flujo CTS.	0 – 1 0 = Deshabilitado 1 = CTS habilitado 2 = no usado 3 = DI (entrada) 4 = DO (salida en bajo) 5 = DO (salida en alto)	1
D6	DIO6 Configuration, Define o lee las opciones de configuración para la línea DIO6 (pin 16) del módulo RF. También se incluye la configuración para el control de flujo RTS.	0 – 1 0 = Deshabilitado 1 = RTS habilitado 2 = no usado 3 = DI (entrada) 4 = DO (salida en bajo) 5 = DO (salida en alto)	0
D5	DIO5 Configuration, Define o lee las opciones de configuración para la línea DIO5 (pin 15) del módulo RF. También se incluye la configuración para el led	0 – 1 0 = Deshabilitado 1 = Led	0

	indicador de Asociación (se enciende cuando el módulo se asocia).	Indicador 2 = ADC 3 = DI (entrada) 4 = DO (salida en bajo) 5 = DO (salida en alto)	
D0 – D4	(DIO0 – DIO4) Configuration, Define o lee las configuraciones para las siguientes líneas: AD0/DIO0 (pin 20), AD1/DIO1 (pin 19), AD2/DIO2 (pin 18), AD3/DIO3 (pin 17), AD4/DIO4 (pin 11). También se incluye configuraciones para líneas ADC.	0 – 1 0 = Deshabilitado 1 = no usado 2 = ADC 3 = DI (entrada) 4 = DO (salida en bajo) 5 = DO (salida en alto)	0
IU	I/O Output Enable, Deshabilita o Habilita los datos digitales recibidos para ser enviados vía UART. Los datos son enviados usando una trama API sin importar el estado del parámetro AP.	0 – 1 0 = Disabled 1 = Enabled	1
IT	Samples before TX, Define o lee el número de muestra a tomar antes de transmitir los datos. El máximo número de muestras depende del número de entradas habilitadas.	1 – 0xFF	1
IS	Force Simple, Obliga a leer todas las entradas habilitadas (DI o ADC). El dato se devuelve a través del UART. Si no hay entradas habilitadas (DI o ADC), este comando enviará un mensaje de error.	Mapa de bits de 8 bits (cada bit representa el nivel de una línea I/O configurada como salida)	-
IO	Digital output level, Devuelve el nivel digital de las salidas para permitir cambios en aquellas líneas configuradas como salidas a través del modo de comandos.	-	-
IC	DIO Change Detect, Habilita o deshabilita el monitoreo de las líneas DIO 0 – 7. Si un cambio es detectado, el dato es transmitido solo con los datos digitales. Cualquier muestra es puesta en la cola antes para ser enviadas, serán transmitidas primero.	0 – 0xFF	0 deshabilitado
IR	Sample Rate, Define o lee la tasa de	0 – 0xFFFF	0

	muestreo. Cuando se configura este parámetro, el módulo muestrea todas las entradas habilitadas cada cierto intervalo específico.		
AV	ADC Voltage Reference, Define o lee el voltaje de referencia ADC.	0 – 1 0 = VREF pin 1 = internal	0
T0 – T7	(D0 – D7) Output Timeout, Define o lee el tiempo de los valores de salida que corresponden a los pines D0 – D7. Cuando una salida es configurada con un nivel diferente al de defecto, un temporizador empieza a contar hasta terminar en cero, cuando esto ocurre, la salida regresa a su valor por defecto. Cuando un paquete digital válido es recibido, el timer se resetea.	0 – 0xFF	0xFF
P0	PWM0 Configuration, Define o lee las funciones para el pin PWM0.	0 – 2 0 = Deshabilitado 1 = RSSI 2 = Salida PWM	1
P1	PWM1 Configuration, Define o lee las funciones para el pin PWM1.	0 – 2 0 = Deshabilitado 1 = RSSI 2 = Salida PWM	0
M0	PWM0 Output Level, Define o lee el nivel de salida del pin PWM0.	0 – 0x03FF	-
M1	PWM1 Output Level, Define o lee el nivel de salida del pin PWM1.	0 – 0x03FF	-

A.7 Comandos AT para diagnostico.

Estos comandos sirven para determinar el estado de ciertos parámetros propios del sistema, entre los principales se tienen los mostrados en la Tabla A7.

Tabla A7. Comandos AT para diagnostico.

Comando AT	Nombre y Descripción	Rango de Valores	Valor por Defecto
VR	Firmware Version, Lee la versión del software del módulo RF.	0 – 0xFFFF (sólo lectura)	Configuración de fabrica
HV	Hardware Version, Lee con detalle la versión del hardware.	0 – 0xFFFF (sólo lectura)	Configuración de fabrica
EA	ACK Failures, Resetea o lee el número de fallas en los acuses de recibo.	0 – 0xFFFF	-

A.8 Comandos AT opcionales.

Estos se describen en la Tabla A8.

Tabla A8. Comandos AT opcionales.

Comando AT	Nombre y Descripción	Rango de Valores	Valor por Defecto
CN	Exit Command Mode, Abandona definitivamente el Modo de Comandos AT.	-	-
AC	Apply Changes, Específicamente aplica los cambios de los parámetros configurados y reinicia el módulo.	-	-
GT	Guard Times, Determina el período de silencio antes y después de una secuencia de comandos AT.	2 – 0x0CE4 (x 1 ms)	0x3E8 (1000d)

B. Hoja de Datos XBee

En la Figura B1 se muestra el diagrama de pines de los módulos XBee.

Pin #	Name	Direction	Description
1	VCC	-	Power supply
2	DOUT	Output	UART Data Out
3	DIN / CONFIG	Input	UART Data In
4	DO8*	Output	Digital Output 8
5	RESET	Input	Module Reset (reset pulse must be at least 200 ns)
6	PWM0 / RSSI	Output	PWM Output 0 / RX Signal Strength Indicator
7	[reserved]	-	Do not connect
8	[reserved]	-	Do not connect
9	DTR / SLEEP_RQ* / D18	Input	Pin Sleep Control Line or Digital Input 8
10	GND	-	Ground
11	AD4* / DIO4*	Either	Analog Input 4 or Digital I/O 4
12	CTS / DIO7*	Either	Clear-to-Send Flow Control or Digital I/O 7
13	ON / SLEEP	Output	Module Status Indicator
14	VREF*	Input	Voltage Reference for A/D Inputs
15	Associate / AD5* / DIO5*	Either	Associated Indicator, Analog Input 5 or Digital I/O 5
16	RTS* / AD6* / DIO6*	Either	Request-to-Send Flow Control, Analog Input 6 or Digital I/O 6
17	AD3* / DIO3*	Either	Analog Input 3 or Digital I/O 3
18	AD2* / DIO2*	Either	Analog Input 2 or Digital I/O 2
19	AD1* / DIO1*	Either	Analog Input 1 or Digital I/O 1
20	AD0* / DIO0*	Either	Analog Input 0 or Digital I/O 0

Figura B1. Diagrama de pines de los módulos XBee y XBee-PRO.

En la Figura B2 se muestran las características eléctricas de dichos módulos, presentando en una primera parte, las características en corriente continua, seguidas de las características cuando se encuentran operando los módulos.

Por último se muestran en la Figura B3 los detalles físicos de los módulos XBee y XBee-PRO, mostrando tanto su vista superior como lateral.

Table 1-03. DC Characteristics (VCC = 2.8 - 3.4 VDC)

Symbol	Characteristic	Condition	Min	Typical	Max	Unit
V_{IL}	Input Low Voltage	All Digital Inputs	-	-	$0.35 \cdot V_{CC}$	V
V_{IH}	Input High Voltage	All Digital Inputs	$0.7 \cdot V_{CC}$	-	-	V
V_{OL}	Output Low Voltage	$I_{OL} = 2 \text{ mA}$, $V_{CC} \geq 2.7 \text{ V}$	-	-	0.5	V
V_{OH}	Output High Voltage	$I_{OH} = -2 \text{ mA}$, $V_{CC} \geq 2.7 \text{ V}$	$V_{CC} - 0.5$	-	-	V
I_{IN}	Input Leakage Current	$V_{IN} = V_{CC}$ or GND, all inputs, per pin	-	0.025	1	μA
I_{OZ}	High Impedance Leakage Current	$V_{IN} = V_{CC}$ or GND, all I/O High-Z, per pin	-	0.025	1	μA
TX	Transmit Current	$V_{CC} = 3.3 \text{ V}$	-	45 (XBee) 215 (PRO)	-	mA
RX	Receive Current	$V_{CC} = 3.3 \text{ V}$	-	50 (XBee) 55 (PRO)	-	mA
PWR-DWN	Power-down Current	SM parameter = 1	-	< 10	-	μA

Table 1-04. ADC Characteristics (Operating)

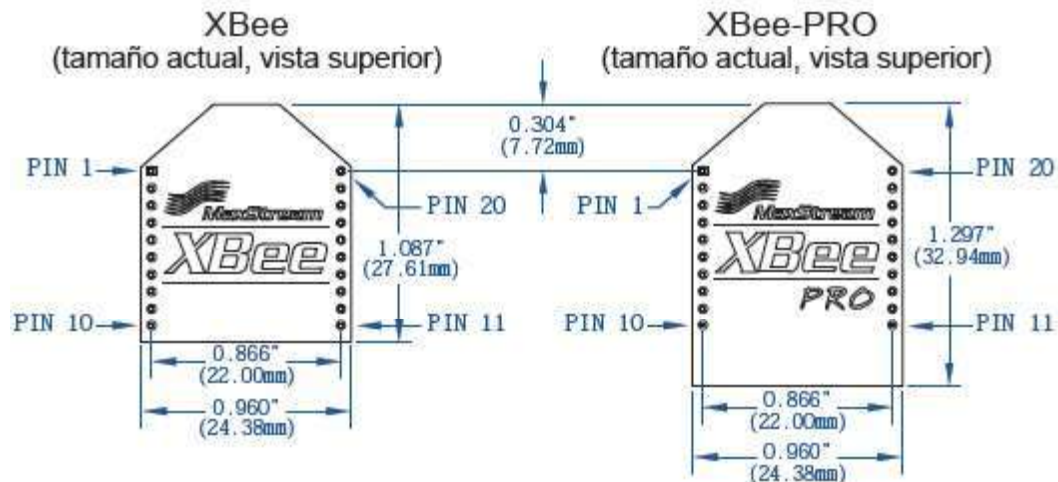
Symbol	Characteristic	Condition	Min	Typical	Max	Unit
V_{REFH}	VREF - Analog-to-Digital converter reference range		2.08	-	V_{DDAD}	V
I_{REF}	VREF - Reference Supply Current	Enabled	-	200	-	μA
		Disabled or Sleep Mode	-	< 0.01	0.02	μA
V_{INDC}	Analog Input Voltage ¹		$V_{SSAD} - 0.3$	-	$V_{DDAD} + 0.3$	V

1. Maximum electrical operating range, not valid conversion range.

Table 1-05. ADC Timing/Performance Characteristics¹

Symbol	Characteristic	Condition	Min	Typical	Max	Unit
R_{AS}	Source Impedance at Input ²		-	-	10	k Ω
V_{AIN}	Analog Input Voltage ³		V_{REFL}	-	V_{REFH}	V
RES	Ideal Resolution (1 LSB) ⁴	$2.08 \text{ V} \leq V_{DDAD} \leq 3.6 \text{ V}$	2.031	-	3.516	mV
DNL	Differential Non-linearity ⁵		-	± 0.5	± 1.0	LSB
INL	Integral Non-linearity ⁶		-	± 0.5	± 1.0	LSB
E_{ZS}	Zero-scale Error ⁷		-	± 0.4	± 1.0	LSB
E_{FS}	Full-scale Error ⁸		-	± 0.4	± 1.0	LSB
E_{IL}	Input Leakage Error ⁹		-	± 0.05	± 5.0	LSB
E_{TU}	Total Unadjusted Error ¹⁰		-	± 1.1	± 2.5	LSB

Figura B2. Características Eléctricas.



XBee & XBee-PRO
(tamaño actual, vista lateral)

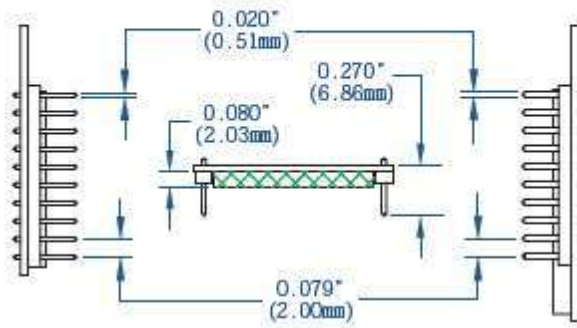


Figura B3. Detalles físicos.

Referencias

Internet:

[ZigBee Alliance 2009]

ZigBee Alliance. Página Principal. 28 de febrero de 2009. <http://www.zigbee.org>

[Ingeniería MCI Ltda 2009]

Ingeniería MCI Ltda. Tutorial Foro. 27 de febrero de 2009. <http://www.olimex.cl>

[Wikipedia 2009]

Wikipedia. ZigBee. 28 de febrero de 2009. <http://es.wikipedia.org/wiki/ZigBee>

[Osiris ZIG 2009]

Osiris ZIG. Principal. 28 de febrero de 2009.

<http://www.osiriszig.com/content.aspx?co=15&t=21&c=2>

Institución:

[MaxStream 2007]

MaxStream. *Product Manual v1.xAx - 802.15.4 Protocol*. Lugar. 2007.

[MaxStream 2007]

MaxStream. *Product Manual v8.xIx Beta - ZigBee Protocol*. Lugar, 2007.