



Universidad Tecnológica de la Mixteca

Diseño y construcción de un módulo transmisor receptor inalámbrico para el manejo de sensores con el protocolo estándar IEEE 802.15.4 (ZigBee)

TESIS

Para obtener el título de:
Ingeniero en Electrónica

Presenta:
Jayro Santiago Paz

Director:
M.C. Fermín Hugo Ramírez Leyva

Asesor:
M.C. José Antonio Moreno Espinosa

Tesis presentada el 31 de Octubre de 2008 ante los siguientes sinodales:
M.C. Alejandro Ernesto Ramírez González
Dr. Felipe de Jesús Rivera López

Bajo la dirección de:
M.C. Fermín Hugo Ramírez Leyva
M.C. José Antonio Moreno Espinosa

Dedicatoria

*A mis padres
Adelfa Paz Marcial y Leobardo Santiago Ruiz.*

*A mis hermanos
Leobardo y Daniel Santiago Paz.*

Agradecimientos

A mi madre, por todo tu amor y comprensión, en especial en aquellos tiempos de mi oscuro silencio. Gracias a ti estoy hoy aquí.

A mi padre, por el mundo feliz de mi infancia, y por mostrarme que las cosas pueden cambiar si uno se esfuerza.

A mi abuelita Rufina Marcial por estar siempre con nosotros y apoyarnos.

A mis hermanos Daniel y Leobardo, por sus sacrificios, y por su manera de ver y compartir la vida con nosotros.

A mi prima Selene, quien siempre está ahí para escucharme.

A toda mi familia, que siempre me ha apoyado.

A mis amigos, William por su amistad y por el apoyo que me brindó durante toda la carrera. Julio por su amistad y la buena música, gracias a los dos por el trip-od. A Mayra y J. Ariadna por su gran amistad y comprensión. A Paula y Gina por su apoyo y gran amistad.

Al profesor Fermín Hugo Ramírez Leyva, por su amistad e incansable apoyo durante la realización de este trabajo.

Al M.C. José Antonio Moreno Espinosa, M.C. Alejandro Ernesto Ramírez González, Dr. Felipe de Jesús Rivera López, por su tiempo para la revisión de este documento.

Y a ti Rocío, hacedora de ilusiones, gracias por tu amistad, apoyo y comprensión, y por este sentimiento que nos une, el amor.

Jayro

Índice general

Índice general	vii
Introducción	xv
Objetivo general	xviii
Objetivos Específicos	xviii
Justificación	xix
Contenido del documento de tesis	xix
Capítulo 1. Descripción del protocolo estándar IEEE 802.15.4	1
1.1 Canales que usa el estándar	1
1.2 Acceso al medio	2
1.3 Componentes de una red	4
1.4 Modelo de transferencia de datos	4
1.4.1 Transferencia de datos hacia un coordinador	4
1.4.2 Transferencia de datos de un coordinador.....	5
1.4.3 Transferencias de datos entre dispositivos semejantes.....	6
1.5 Topologías de red.....	7
1.6 Arquitectura	8
1.7 Estructura de las tramas.....	9
1.7.1 La Unidad de Datos del Protocolo MAC (MPDU).....	10
1.7.2 La Unidad de Datos de Protocolo Físico (PPDU)	11
1.7.3 Tipos de tramas	12
1.8 Transmisión en RF	13
1.9 Aplicaciones actuales	15
Capítulo 2. Diseño del Hardware	19
2.1 Descripción general del sistema.....	19
2.1.1 Sistema XBeeSensor	20
2.1.2 Sistema XBeeUSB	21
2.2 Módulo XBee.	22
2.2.1 Tipo de modulación.....	30
2.2.2 Antena.....	32
2.3 Entradas y salidas digitales	32
2.4 Entrada y salida analógica.....	36
2.5 Indicador de nivel.....	39
2.6 Fuente de alimentación	41
2.7 Sistema XBeeUSB.....	45
Capítulo 3. Pruebas y resultados	49
3.1 Descripción de los sistemas XBeeSensor y XBeeUSB	49
3.2 Configuración y pruebas.....	51
3.2.1 Pruebas del sistema XBeeUSB	51

3.2.1.1 Comunicación entre dos módulos XBeeUSB	52
3.2.2 Pruebas del sistema XBeeSensor	54
3.2.2.1 Entradas y salidas digitales	55
3.2.2.2 Configuración y prueba de la entrada y salida analógica	58
3.2.3 Configuración del XBee como coordinador	62
3.2.4 Configuración del módulo como dispositivo final	63
3.2.5 Configuración del módulo como router	65
Capítulo 4. Conclusiones	67
Referencias.....	71
Apéndice A. Manual de usuario del XBeeSensor	A-1
A.1 Alimentación.....	A-3
A.2 Entradas y salidas digitales.....	A-3
A.3 Entrada y salida analógica	A-4
A.4 Puerto serial	A-4
A.5 Selección del módulo XBee	A-5
A.6 Indicadores luminosos.....	A-5
A.7 Diagramas.....	A-5
Apéndice B. Manual de usuario del XBeeUSB	B-1
B.1 Modo de funcionamiento	B-3
B.2 Diagramas.....	B-4
Apéndice C. Instalación y manejo del programa X-CTU	C-1
C.1 PC Settings	C-1
C.2 Range Test	C-3
C.3 Terminal.....	C-3
C.4 Modem Configuration.....	C-4

Índice de figuras

Figura i.1. Tecnologías en la banda de 2.4GHz.....	xvi
Figura i.2. Sistema de medición WS300.....	xviii
Figura 1.1. Canales del estándar IEEE 802.15.4.....	2
Figura 1.2. Ejemplo de la estructura de la supertrama.....	3
Figura 1.3. Comunicación hacia un coordinador, en una red con beacons... 5	5
Figura 1.4. Comunicación hacia un coordinador, en una red sin beacons... 5	5
Figura 1.5. Comunicación de un coordinador en una red con beacons.....	6
Figura 1.6. Comunicación de un coordinador en una red sin beacons.....	6
Figura 1.7. Topologías de red, soportadas por el estándar IEEE 802.15.4... 7	7
Figura 1.8. Equivalencia entre las capas del modelo OSI y las capas de ZigBee.....	8
Figura 1.9. Vista esquemática de la trama IEEE 802.15.4.....	10
Figura 1.10. Tipos de tramas del estándar IEEE 802.15.4.....	12
Figura 1.11. Carga útil de la trama beacon.....	13
Figura 1.12. Técnica de espectro disperso.....	14
Figura 1.13. Diagrama funcional para la técnica de modulación.....	14
Figura 1.14. Componentes del kit ZigBee de Atmel.....	16
Figura 1.15. Kits de desarrollo ZigBee de Texas Instruments.....	17
Figura 2.1. Diagrama funcional de una conexión con ambos sistemas.....	20
Figura 2.2. Diagrama a bloques del sistema XBeeSensor.....	21
Figura 2.3. Diagrama a bloques del sistema XBeeUSB.....	22
Figura 2.4.a) Imagen del XBee. b) Diagrama a bloque del control de flujo. 25	25
Figura 2.5. Diagrama esquemático del XB24-AWI-001.....	27
Figura 2.6. Diagrama de constelación.....	30
Figura 2.7. Modulador QPSK.....	31
Figura 2.8. Datos de entrada y los dibits.....	31
Figura 2.9. a) Par Darlington como inversor. B) Esquemático del ULN2803A.....	33
Figura 2.10. Arreglo de transistores para las entradas-salidas digitales.	34
Figura 2.11. Esquemático de las entradas-salidas digitales con el XBee....	35
Figura 2.12. Mapa de bits para el comando AT IO.....	36
Figura 2.13. Diagrama para adecuar las señales analógicas.....	37
Figura 2.14. a) Diagrama del LM358. b) Encapsulado SO8.....	37
Figura 2.15. Circuito para adecuar las entradas analógicas.....	38
Figura 2.16. Circuito para recuperar la señal analógica.....	38
Figura 2.17. Diagrama a bloques para detectar el nivel de energía.....	39
Figura 2.18. a) Diagrama esquemático del LMV339. b) Encapsulado TSSOP de 14 terminales.....	40
Figura 2.19. Esquemático del detector de nivel de energía.....	40
Figura 2.20. Diagrama a bloques del módulo de alimentación.....	42

Figura 2.21. a) Esquemático del convertidor de CD/CD. B) Fotografía del convertidor CD/CD.....	42
Figura 2.22. a) Voltaje de salida del MAX1674EUA. B) Corriente que demanda el MAX1674EUA.....	43
Figura 2.23. a) Diagrama de conexiones del LF33CV. B) Encapsulado TO-220.	44
Figura 2.24. Esquemático del bloque de alimentación.	45
Figura 2.25. a) Encapsulado LQFP-32 del FT232BL. b) Esquemático del FT232BL.	46
Figura 2.26. Esquemático del convertidor USB a TTL.....	47
Figura 3.1. Fotografía del módulo XBeeSensor.....	50
Figura 3.2. Fotografía del módulo XBeeUSB.....	50
Figura 3.3. Montaje para probar el puerto USB.	51
Figura 3.4. Interfaz principal del software X-CTU.	52
Figura 3.5. Lectura del módulo XBee con el software X-CTU.	52
Figura 3.6. Prueba del sistema XBeeUSB.	53
Figura 3.7. a) Programa que envía una trama. B) Programa que reenvía la trama.....	53
Figura 3.8. Prueba de alcance.	54
Figura 3.9. Diagrama a bloques de la conexión de entrada o salida digital.	55
Figura 3.10. a) Configuración para entradas digitales. b) Configuración para salidas digitales.	56
Figura 3.11. Señales obtenidas en la prueba de las entradas-salidas digitales.	57
Figura 3.12. Prueba de entradas-salidas digitales.....	57
Figura 3.13. Trama recibida con información de las entradas digitales.	57
Figura 3.14. Diagrama de conexiones para la entrada-salida analógica.	59
Figura 3.15. a) Configuración para la entrada analógica. B) Configuración para la salida analógica.....	60
Figura 3.16 a). Conversión de niveles de voltaje. b) Porcentaje de error en la conversión de niveles.	61
Figura 3.17. Trama recibida con información de la señal analógica.....	61
Figura 3.18. a) Voltaje de salida de PWM con un voltaje de entrada de 0.4V. b) Voltaje de entrada 2.2V. c) Voltaje de entrada 3.8V. d) Voltaje de entrada 5V.....	62
Figura 3.19. Configuración del módulo XBee como coordinador de la red..	64
Figura 3.20. Configuración del módulo XBee como dispositivo final.	65
Figura A.1. Vista del lado componentes del XBeeSensor.	A-1
Figura A.2. Vista del lado soldadura del XBeeSensor.	A-2
Figura A.3. Diagrama conceptual del XBeeSensor.....	A-3
Figura A.4. Diagrama esquemático del XBeeSensor.....	A-6
Figura A.5. Diagrama de montaje del XBeeSensor.	A-6
Figura A.6. Layout del XBeeSensor.....	A-7
Figura B.1. Vista superior del XBeeUSB.....	B-1
Figura B.2. Vista inferior del XBeeUSB.....	B-2
Figura B.3. Diagrama conceptual del XBeeUSB.....	B-2
Figura B.4. Conexión del sistema XBeeUSB con la PC.	B-3
Figura B.5. Diagrama esquemático del XBeeUSB.....	B-4

<i>Figura B.6. a) Layout del XBeeUSB. b) Diagrama de montaje del XBeeUSB.</i>	<i>B-5</i>
<i>Figura C.1. Interfaz principal del programa X-CTU.....</i>	<i>C-2</i>
<i>Figura C.2. a) Mensaje de error. b) Mensaje con información del módulo.</i>	<i>C-2</i>
<i>Figura C.3. a) Ventana de la prueba de alcance del módulo. b) Ventana durante la realización de la prueba.</i>	<i>C-3</i>
<i>Figura C.4. Ventana para configuración mediante comandos AT.</i>	<i>C-4</i>
<i>Figura C.5. Uso de la ventana de comandos AT.</i>	<i>C-4</i>
<i>Figura C.6. Opciones de actualización del firmware.....</i>	<i>C-5</i>
<i>Figura C.7. Lectura de los parámetros del módulo.</i>	<i>C-5</i>
<i>Figura C.8. Modificación de parámetros del módulo.....</i>	<i>C-6</i>

Índice de tablas

<i>Tabla 1.1. Frecuencia de los canales en IEEE 802.15.4</i>	2
<i>Tabla 1.2. Productos que cumplen con el estándar ZigBee.</i>	15
<i>Tabla 2.1. Diferentes modelos XBee de la firma MaxStream.</i>	23
<i>Tabla 2.2. Especificaciones del XB24-AWI-001 de MaxStream.</i>	24
<i>Tabla 2.3. Terminales del XB24-AWI-001.</i>	27
<i>Tabla 2.4. Ejemplo del uso de los comandos AT.</i>	28
<i>Tabla 2.5. Principales comandos AT.</i>	28
<i>Tabla 2.6. Comandos AT para las entradas digitales.</i>	35
<i>Tabla 2.7. Comandos AT para las salidas digitales.</i>	36
<i>Tabla 2.8. Comandos AT para la entrada analógica.</i>	38
<i>Tabla 2.9. Comandos AT para la salida analógica.</i>	39
<i>Tabla 2.10. Comandos AT para el indicador visual.</i>	41
<i>Tabla 2.11. Datos del comportamiento del MAX1674EUA.</i>	43
<i>Tabla 2.12. Respuesta del MAX1674EUA con otro rango de alimentación.</i>	44
<i>Tabla 3.1. Datos de la prueba de alcance.</i>	54
<i>Tabla 3.2. Salida de la UART del sistema configurado como salida digital.</i>	58
<i>Tabla 3.3. Conversión de niveles de voltaje.</i>	59
<i>Tabla 3.4. Datos a la salida de la UART.</i>	61
<i>Tabla 3.5. Opciones del coordinador para crear una red.</i>	63
<i>Tabla 3.6. Opciones del dispositivo final para asociarse.</i>	64
<i>Tabla 3.7. Opciones de configuración del router</i>	65
<i>Tabla A.1. Lista de componentes para el sistema XBeeSensor.</i>	A-7
<i>Tabla B.1. Lista de componentes para el sistema XBeeUSB.</i>	B-5

Introducción

En la actualidad, para conocer el estado que guarda una red industrial se requiere de una gran cantidad de sensores, los cuales monitorean el estado de la red y transmiten información hacia el centro de control, en donde es procesada y con base en ella ejecuta la acción de control a realizar [URL1].

Los sensores de presión, temperatura, humedad, etc., normalmente proporcionan información a una velocidad muy baja. Cuando se requiere transmitir datos hacia una estación central, se tiene dos opciones: una es tender cables, y la otra es utilizar una conexión inalámbrica, para realizar dicha transmisión.

En el mercado existe una gran variedad de tipos de redes para la adquisición de datos y transmisión de información en forma inalámbrica. Entre las más importantes se pueden mencionar: RFID y ZigBee para el control de sensores [1], Bluetooth para voz y datos, y WiFi para redes locales inalámbricas [URL2 y URL3], entre otras.

Cuando lo que se necesita es enviar una gran cantidad de información, la alternativa es WiFi o Bluetooth. Sin embargo para una velocidad de transmisión baja, las alternativas tecnológicas son: RFID y 802.15.4. El primero es usado para el control de acceso e inventarios; 802.15.4, también llamado ZigBee, es usado para transmisiones inalámbricas de datos, a una tasa baja, pero con un alcance intermedio (aprox. 30m) [2].

En la figura i.1 se muestra una gráfica con las diferentes tecnologías para comunicaciones inalámbricas, el eje x corresponde a la velocidad de transmisión y el eje y a los diferentes tipos de redes. Éstas son: Las redes de área personal inalámbricas (WPAN), las redes de área local inalámbricas (WLAN), las redes de áreas metropolitanas inalámbricas (WMAN) y las redes de áreas amplias inalámbricas (WWAN).

Las redes WPAN, por sus siglas en Inglés (*Wireless Personal Area Network*), son redes que regularmente cubren distancias de 10 metros, facilitan la intercomunicación de dispositivos personales como pueden ser teléfonos inalámbricos, PDA's, casi siempre con enlaces punto a punto (*point to point*), con una tasa de transferencia baja. En este tipo de redes se usan protocolos simples, con el fin de lograr un consumo de energía bajo, y obtener una mayor autonomía de los dispositivos móviles [3].

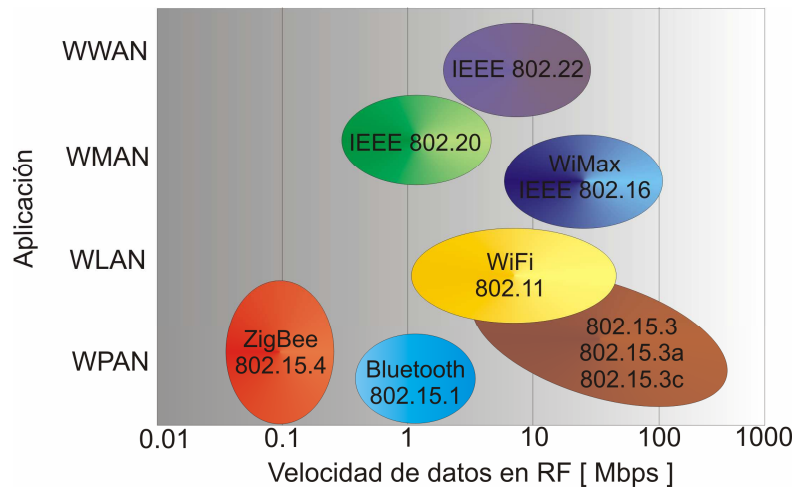


Figura i.1. Tecnologías en la banda de 2.4GHz.

Las redes WLAN, por sus siglas en Inglés (*Wireless Local Area Network*), son tecnologías que permiten establecer conexiones inalámbricas entre dispositivos que se encuentran en un área local. Como pueden ser, un edificio, una Universidad, un aeropuerto, etc. Las WLAN's puede ser de infraestructura o a la medida (*ad hoc*). En infraestructura existen puntos de acceso inalámbricos que permiten la conexión a la red troncal. En la modalidad de *ad hoc* se establecen redes temporales, por ejemplo conferencias con varios dispositivos que se comunican entre si, sin tener un punto de acceso que provea recursos de la red [3]. Las redes *ad hoc* por lo general se establecen solo en tiempos cortos.

Las redes WMAN, por sus siglas en Inglés (*Wireless Metropolitan Area Network*), son usadas para interconectar dispositivos que se encuentran dentro de un área metropolitana. Por ejemplo, la interconexión entre edificios localizados en diferentes calles, sin la necesidad de tender cables para lograr el enlace. Una aplicación de estas redes es la de crear un respaldo para la comunicación de una red cableada. Un grupo de trabajo de IEEE está desarrollando el estándar 802.16 para el acceso inalámbrico de banda ancha, así como las especificaciones para normalizar el desarrollo de estas tecnologías [3].

Las redes WWAN, por sus siglas en Inglés (*Wireless Wide Area Network*), permiten establecer conexiones inalámbricas en redes remotas a través de áreas geográficas extensas. Por ejemplo entre ciudades, mediante el uso de antenas o sistemas satelitales. El sistema más conocido es GSM (*Global System for Mobile Communications*), que es el estándar de comunicaciones móviles más extendido en Europa [3].

Para las aplicaciones con sensores se usan redes del tipo WPAN, por tal motivo son las que se abordarán en el presente trabajo. Las redes de sensores tienen sus inicios en el campo militar. Los Estados Unidos, durante los años de la guerra fría, instalaron una red de boyas sumergidas para

detectar submarinos, empleando sensores de sonido. La investigación en redes de sensores en los años ochenta comenzó con el proyecto redes de sensores distribuidos (*DSN, Distributed Sensor Networks*), de la agencia militar de investigación avanzada de Estados Unidos (*DARPA, Defense Advanced Research Projects Agency*) [URL4].

El desarrollo de los sensores inalámbricos es relativamente nuevo. Esto se debe a los avances logrados en la microelectrónica, la computación y las telecomunicaciones. La miniaturización de los componentes electrónicos ha permitido diseñar circuitos que sean capaces de procesar información digital y/o analógica, además transmitirla en ondas de radiofrecuencia en módulos pequeños, que pueden ser fácilmente colocados en espacios reducidos [4].

En el mercado existen equipos para el monitoreo remoto, los cuales pueden transmitir la información en forma digital hacia una estación de procesamiento. Existen sistemas ya preconfigurados, los cuales envían y suministran la salida en formato digital (1 lógico ó 0 lógico), para sensores digitales; o voltajes de 0V a 5V o corriente de 4mA a 20mA, para sensores analógicos.

Algunos ejemplos de sensores inalámbricos, son productos tales como el sensor de presión (modelo GC63-Wireless de la compañía S3C [URL5]), sensor de gas LP (modelo AG002-SIGLP de AG electrónica), medidor de nivel (modelo XYR5000-WA510 de la empresa Honeywell [5]), entre otros.

Por otra parte, existen sistemas que ofrecen una solución total a determinadas aplicaciones. Por ejemplo, la estación meteorológica vía radio (WS300) de la compañía LSB S.L [URL6], proporciona información del clima, registra la velocidad del viento, la precipitación pluvial, la fase de la luna, la hora de salida y puesta de sol y pronostica el tiempo. El sensor se puede colocar a una distancia de 100m de la estación base, además, se le pueden agregar hasta ocho sensores adicionales (ASH 2200). Transmite la información a una frecuencia de 868MHz. En la figura i.2 se muestra una fotografía del sistema WS300.

El protocolo estándar IEEE 802.15.4, comúnmente denominado ZigBee, es una tecnología inalámbrica para tasas bajas de envío de datos, usa la banda libre ISM (*Industrial, Scientific and Medical*) de 2.4GHz, con una velocidad de transferencia máxima de 250kbps, y un alcance aproximado de 30m. Las topologías de red que soporta el estándar es la estrella y malla, y cada red puede soportar hasta 65535 nodos distribuidos en subredes de 255 nodos, su consumo de energía es bajo, lo cual maximiza la vida de las pilas [URL7].



Figura i.2. Sistema de medición WS300.

Objetivo general

Describir la forma en que está estructurado el protocolo IEEE 802.15.4 (ZigBee) y su uso para el control de sensores inalámbricos. Al mismo tiempo diseñar y construir un sistema que controle sensores digitales y analógicos, con bajo consumo de energía y que funcione con pilas.

Objetivos Específicos

- Documentar el protocolo de comunicaciones IEEE 802.15.4 (ZigBee), con el fin de describir sus características más importantes para el manejo de sensores.
- Hacer una investigación en el mercado, para saber los principales distribuidores de dispositivos que cumplen con este estándar.
- Diseñar, construir y probar un sistema que cumpla con las características del protocolo IEEE 802.15.4 (ZigBee), que permita la interconexión de sensores de tipo digital y analógico.
- La alimentación del sistema, deberá de ser capaz de funcionar con dos pilas AA para los sistemas remotos, y con una fuente de alimentación para el coordinador.
- El sistema podrá operar como esclavo o coordinador, de acuerdo a la configuración del software.
- Indicador visual de intensidad del nivel de la señal de Radio Frecuencia (RF).
- Diseñar el manejador del sistema con puerto USB y/o RS-232, para que pueda manipular a los sensores remotos con el protocolo ZigBee desde una computadora personal.
- Manejo de sensores con salida digital y analógica (de voltaje de 0 a 5V).

Justificación

En los últimos años han surgido nuevas tecnologías encaminadas al monitoreo remoto de sensores, motivado por el bajo costo de los sistemas para la transmisión inalámbrica, ZigBee es una de ellas. Por tal motivo con el presente trabajo de tesis se pretende explicar la forma en que funciona dicho protocolo, con el fin de que en un corto plazo se pueda enseñar en los cursos de electrónica, ya que es una tecnología que está teniendo mucha aceptación en el mercado [6], [URL8].

Una aportación de este trabajo, es el desarrollo de un sistema para el manejo de sensores digitales y analógicos con base en el protocolo IEEE 802.15.4. El sistema va a poder funcionar con pilas o una fuente de voltaje externa, para hacerlo flexible y adaptable a las diferentes condiciones que se necesitan en este tipo de aplicaciones. Se van a dejar varios sistemas contruidos para que a futuro se puedan probar las diferentes capacidades del estándar.

En forma personal, con este trabajo se mostrarán las capacidades para desarrollar un sistema y aplicar los conocimientos adquiridos durante la carrera de electrónica, en el área de comunicaciones, electrónica de potencia y sistemas digitales.

En esta Universidad no se han realizado trabajos acerca de redes de sensores y sus diversas aplicaciones, por lo que, con esta tesis se pretende mostrar su importancia, así como sentar las bases para futuras investigaciones y desarrollos.

Contenido del documento de tesis

La presente tesis esta organizada en cuatro capítulos, además de la introducción y tres apéndices. El contenido de cada uno de los capítulos es el siguiente:

En el capítulo 1 se presenta la descripción general del protocolo estándar IEEE 802.15.4 (ZigBee).

En el capítulo 2 se describe cada uno de los bloques que comprende el diseño del hardware.

En el capítulo 3 se presentan las pruebas realizadas, así como los resultados obtenidos.

En el capítulo 4 se presentan las conclusiones obtenidas en la elaboración de la presente tesis, se mencionan también los posibles desarrollos futuros que se pueden realizar a partir del presente trabajo.

Capítulo 1. Descripción del protocolo estándar IEEE 802.15.4

El estándar IEEE 802.15.4 o ZigBee, define el protocolo para la interconexión de módulos de bajo consumo de energía, tasa de transferencia bajas, y facilidad de instalación de los dispositivos. Entre sus principales características se encuentran [7]:

- Transferencia de datos en el rango de 20kbps, 40kbps, 100kbps y 250kbps, para la conexión a velocidad baja.
- Topología estrella (multipunto) o punto a punto (*point to point*). Para crear diferentes configuraciones de acuerdo a las necesidades.
- Asignación de direcciones cortas de 16 bits (para redes de hasta 65536 dispositivos), o extendidas de 64 bits (para usar direcciones IEEE MAC).
- Transferencia de tipo espectro disperso, con asignación opcional de ranuras de tiempo garantizado (*GTS, Guaranteed Time Slot*). Para cubrir la latencia de los dispositivos (tiempo que tarda la transmisión del paquete de datos, del emisor al receptor).
- Indicador de la calidad de enlace. Para conocer la calidad del mismo en forma visual.
- Bajo consumo de energía. Para operar con pilas y ahorrar energía.

1.1 Canales que usa el estándar

El estándar IEEE 802.15.4 define 27 canales en las tres bandas de frecuencia utilizadas, las cuales se distribuyen de la siguiente manera:

- 1 canal en la banda 868 MHz.
- 10 canales en la banda de 915 MHz.
- 16 canales en la banda de 2.4 GHz.

En la figura 1.1 se muestra la distribución de los canales en el espectro de frecuencias. Se muestra, además, la separación que existe entre las frecuencias centrales de cada canal.

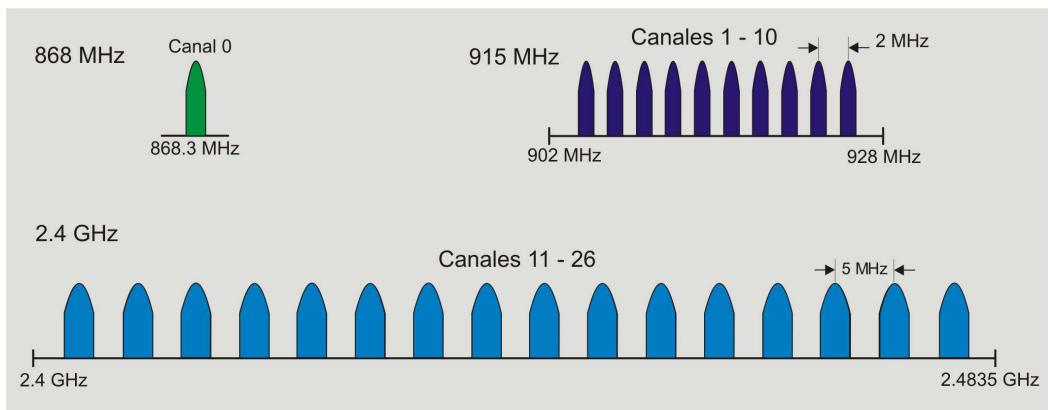


Figura 1.1. Canales del estándar IEEE 802.15.4.

La frecuencia central de estos canales se define tal como se muestra en la tabla 1.1.

Tabla 1.1. Frecuencia de los canales en IEEE 802.15.4

Frecuencia central (F_c) [MHz]	Número de canal (k)
$F_c = 868.3$	$K = 0$
$F_c = 906 + 2(k - 1)$	$K = 1, 2, \dots, 10$
$F_c = 2405 + 5(k - 11)$	$K = 11, 12, \dots, 26$

1.2 Acceso al medio

El acceso al medio define la forma en que los usuarios de la red podrán hacer uso del canal para transmitir sus datos. Una WPAN puede ser configurada de acuerdo al mecanismo de acceso al medio físico que emplee. El estándar especifica que existen dos formas diferentes de realizarlo, que son:

- Con *beacons*. Se emplea una estructura llamada supertrama, que define los tiempos de acceso al medio mediante contención y reserva espacio a transmisiones dedicadas.
- Sin *beacons*. El acceso al canal se realiza empleando el protocolo de acceso múltiple con detección de portadora y prevención de colisiones (CSMA-CA, *Carrier Sense Multiple Access-Collision Avoidance*) no ranurado [7].

Cuando se usa *beacons* (señales enviadas por el coordinador de la red para la sincronización de dispositivos), el coordinador de la red configura los tiempos de acceso del canal de los dispositivos conectados a ella. Esto lo realiza por medio de la cadena llamada supertrama. Una supertrama esta delimitada por la transmisión de una trama *beacon* y puede tener una parte activa y otra de inactividad. El coordinador puede entrar en modo de bajo consumo durante el periodo de inactividad.

En la figura 1.2 se muestra un ejemplo de la estructura de la supertrama. La supertrama esta dividida en 16 ranuras de tiempos iguales, dicha supertrama puede durar desde 15ms a 245s. Las partes que la forman son: un *beacon*, un periodo de acceso por contención (*CAP*, *Contention Access Period*), un periodo opcional libre de contención (*CFP*, *Contention Free Period*), y una porción opcional de inactividad.

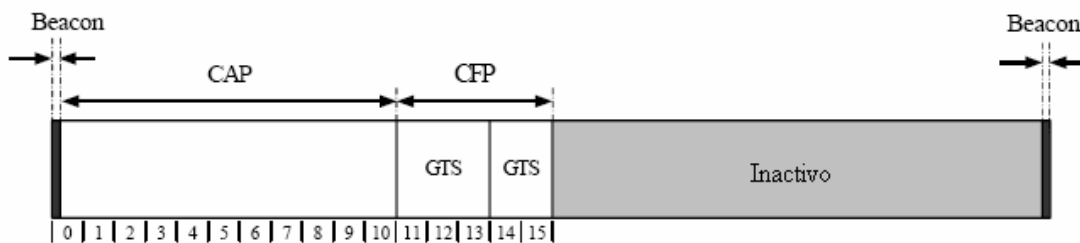


Figura 1.2. Ejemplo de la estructura de la supertrama.

En el CAP, los dispositivos que quieran comunicarse compiten por el medio usando el mecanismo CSMA-CA. Cuando la longitud del CFP es cero, el CAP se termina al final de la parte activa de la supertrama.

El CFP estará formado por las ranuras de tiempo garantizado (*GTS*, *Guaranteed Time Slot*) las cuales ocupan ranuras contiguas. Las ranuras son asignadas por el coordinador PAN (*Personal Area Network*) a los dispositivos que requieran anchos de banda específicos, y ninguna transmisión durante el CFP usa CSMA-CA para acceder al canal. El coordinador puede asignar hasta siete GTS al mismo tiempo, dependiendo de la capacidad de la supertrama. Los datos transmitidos en una GTS usarán únicamente direcciones cortas (16 bits).

Para transmitir usando CSMA-CA se siguen las siguientes reglas:

1. El dispositivo escucha el medio para ver si esta libre.
2. Si el medio esta libre, el dispositivo transmite.
3. Si el medio esta ocupado, el dispositivo espera un tiempo aleatorio para volver a intentar la transmisión (volviendo al paso 1).

Para la versión ranurada del protocolo CSMA-CA, la cual es empleada cuando se usa la supertrama, los periodos de espera de cada dispositivo están alineados con el inicio de la supertrama.

1.3 Componentes de una red

Los componentes de la red de este tipo se pueden clasificar por su funcionalidad y son:

- Dispositivo de función completa (FFD), por sus siglas en Inglés (*Full-Function Device*). Este dispositivo puede funcionar como coordinador o *router*.
- Dispositivo de función reducida (RFD), por sus siglas en Inglés (*Reduced-Function Device*). Estos dispositivos son pensados para aplicaciones extremadamente simples, tal como encendido y/o apagado de luces o sensores infrarrojos pasivos, ellos no tienen la necesidad de enviar largas tramas de datos.

Otra clasificación de los dispositivos se puede realizar en base a su papel dentro de la red:

- Coordinador: Se encarga de inicializar una red, envía los paquetes para sincronización (*beacons*) y puede servir de enlace con otras redes.
- Router: Sirve como repetidor ya que se encarga del enrutamiento de mensajes que requieren saltos múltiples.
- Dispositivo final: Son los dispositivos más básicos de la red, son los sensores o actuadores de la red y solo se pueden comunicar con un coordinador o router.

1.4 Modelo de transferencia de datos

El estándar IEEE 802.15.4 (ZigBee) especifica que en una red de este tipo, pueden existir tres tipos de transferencia de datos:

- De un dispositivo hacia un coordinador.
- De un coordinador hacia un dispositivo.
- Entre dispositivos semejantes.

En seguida se muestran las secuencias que se realizan para establecer la comunicación entre los dispositivos de una red, tanto en una red establecida con *beacons* o en una red que no hace uso de ellos.

1.4.1 Transferencia de datos hacia un coordinador

Cuando la red tiene habilitados los *beacons*, el dispositivo que desea transmitir escucha primero el canal para sincronizarse con la estructura de

la supertrama. Cuando tiene acceso al medio envía la trama de datos hacia el coordinador empleando el protocolo CSMA-CA ranurado. El coordinador puede confirmar la recepción completa enviando opcionalmente una trama de reconocimiento (*ACK, Acknowledgment*). La figura 1.3 muestra la secuencia que se realiza en este tipo de transmisión.

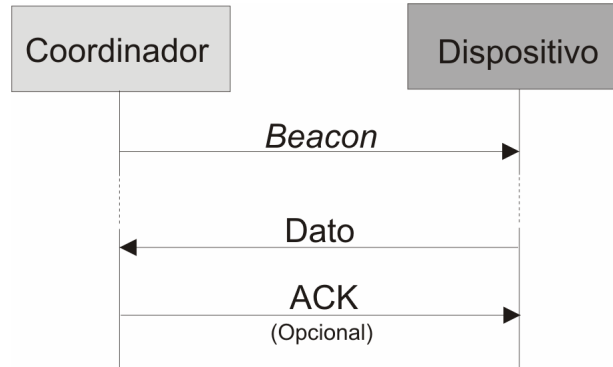


Figura 1.3. Comunicación hacia un coordinador, en una red con beacons.

En una red donde no se emplean los beacons, la comunicación se realiza de la siguiente manera: el dispositivo envía la trama de datos al coordinador usando CSMA-CA no ranurado, el coordinador puede confirmar la recepción completa enviando una trama opcional ACK. La figura 1.4 muestra la secuencia realizada para la transmisión de la trama de datos.

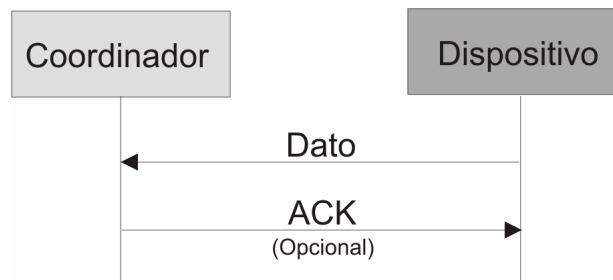


Figura 1.4. Comunicación hacia un coordinador, en una red sin beacons.

1.4.2 Transferencia de datos de un coordinador

En una red que hace uso de los *beacons*, el coordinador indica que existen datos pendientes por enviar, los dispositivos de la red escuchan periódicamente el medio, si uno de ellos reconoce que los datos son para él, envía un comando MAC solicitando la trama de datos usando CSMA-CA ranurado, el coordinador entonces envía una trama ACK confirmando la solicitud e inmediatamente transmite la trama de datos usando CSMA-CA ranurado. El dispositivo puede confirmar la recepción completa enviando opcionalmente una trama ACK. El coordinador elimina después el mensaje de datos pendientes de la red con *beacons*. La figura 1.5 muestra la secuencia realizada en esta transmisión.

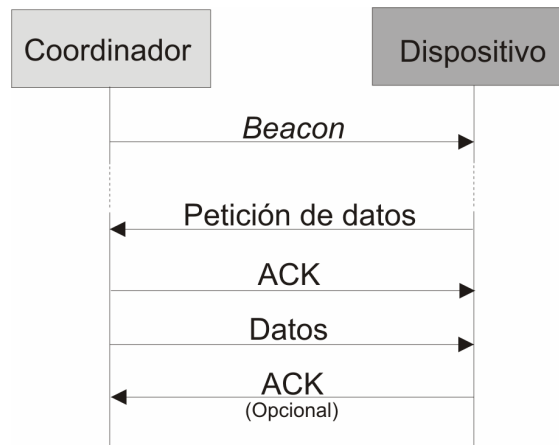


Figura 1.5. Comunicación de un coordinador en una red con beacons.

En una red sin *beacons*, el coordinador almacena los datos hasta que un dispositivo le envíe una trama MAC solicitándolos, el dispositivo emplea CSMA-CA no ranurado, el coordinador confirma la recepción enviando una trama ACK y si los datos existen los envía usando CSMA-CA no ranurado. El dispositivo puede opcionalmente enviar una trama ACK para confirmar la recepción. La secuencia de esta transmisión se muestra en la figura 1.6.

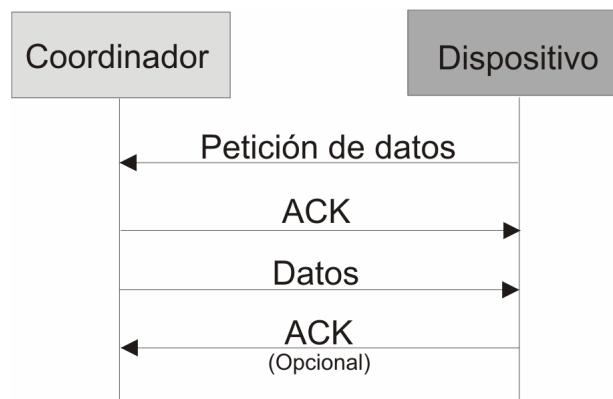


Figura 1.6. Comunicación de un coordinador en una red sin beacons.

1.4.3 Transferencias de datos entre dispositivos semejantes.

En este caso, los dispositivos se pueden comunicar con cualquier otro siempre y cuando esté dentro de su rango de alcance. Para realizar eficazmente la transferencia, los dispositivos deben estar recibiendo constantemente o deben sincronizarse entre ellos. En último caso pueden simplemente transmitir usando CSMA-CA no ranurado.

1.5 Topologías de red

Una red IEEE 802.15.4 está conformada por varios componentes. El más básico es un dispositivo que puede ser un FFD o un RFD. Dos o más dispositivos dentro de un espacio de operación personal (*POS, Personal Operating Space*) comunicándose en el mismo canal físico constituye una WPAN. Sin embargo, la red incluirá al menos un dispositivo funcionando como coordinador de la PAN.

Dependiendo de la aplicación final, se puede trabajar con una de las dos topologías que considera el estándar, ya sea topología en estrella o malla. En la figura 1.7 se muestra el diagrama de las dos topologías que se pueden utilizar para configurar los distintos elementos de la red. Ambas topologías están compuestas por dispositivos de función completa (FFD) y dispositivos de función reducida (RFD).

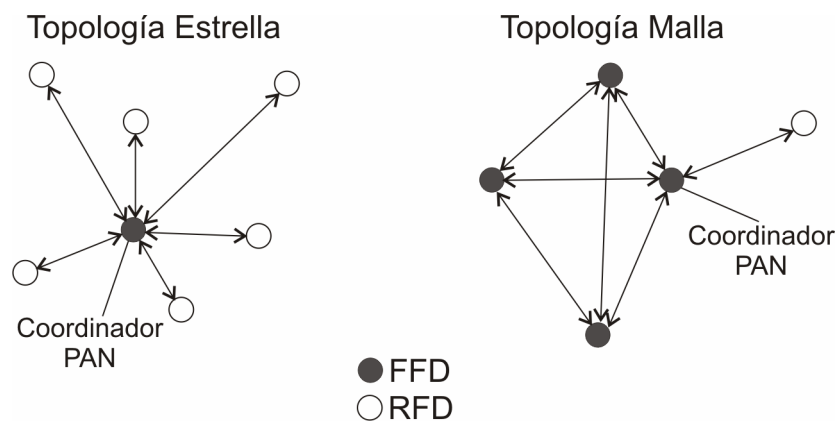


Figura 1.7. Topologías de red, soportadas por el estándar IEEE 802.15.4.

En la topología estrella se establece un módulo central, que es el coordinador de la red, llamado coordinador PAN. El coordinador puede tener una aplicación específica, pero además, es empleado para inicializar, terminar o encaminar las comunicaciones alrededor de la red. Todas las comunicaciones se realizan entre el coordinador y los dispositivos, es decir, si algún dispositivo se quiere comunicar con otro, la comunicación se realiza mediante el coordinador. Esta característica permite que no existan colisiones entre los paquetes que envía cada estación.

El coordinador PAN es alimentado generalmente por una fuente de energía externa, debido a que tiene un mayor consumo de energía. Los demás dispositivos pueden ser alimentados mediante baterías.

En la topología de malla puede existir también un coordinador PAN. La diferencia es que en este tipo de topología, los módulos pueden establecer la comunicación con cualquier otro que se encuentre dentro de su rango de alcance. En esta topología los datos pueden seguir caminos

diferentes para llegar a su destino. Las aplicaciones de esta red pueden ser en control industrial, red de sensores, agricultura inteligente, etc.

1.6 Arquitectura

La arquitectura IEEE 802.15.4 se definió con base en el modelo de siete capas del modelo de referencia para la interconexión de sistemas abiertos (OSI, *Open Systems Interconnection*). En la figura 1.8 se observan las capas del modelo OSI y la parte que cubre el estándar, que básicamente son la capa física y la subcapa MAC (*Medium Access Control*) la cual forma parte de la capa de enlace de datos.

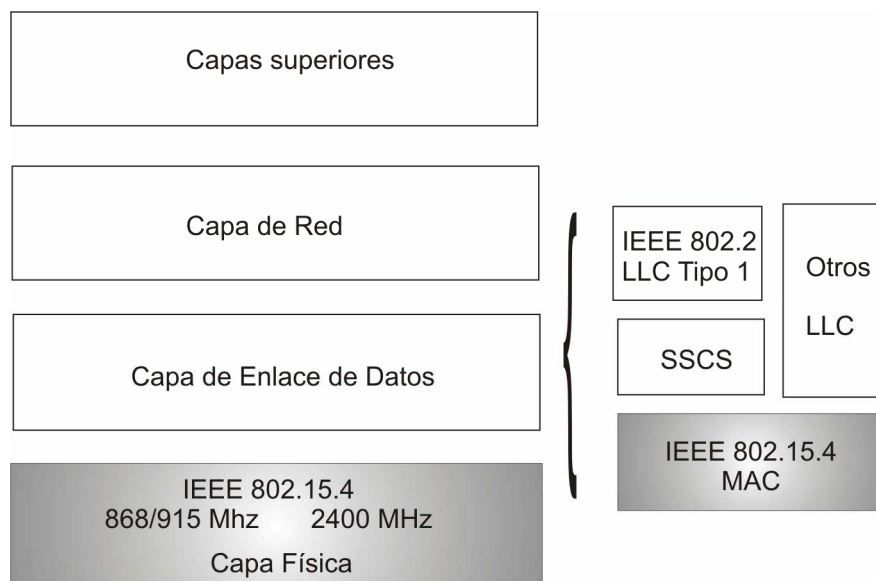


Figura 1.8. Equivalencia entre las capas del modelo OSI y las capas de ZigBee.

La capa física se encarga de la transmisión y recepción de los bits a través del medio de comunicación. La capa de enlace de datos se encarga de tomar los datos de la capa física y dejarlos libres de errores para la capa superior, además de procesar los acuse de recibo que devuelve el receptor. Otra de sus funciones es regular el flujo de los datos, para que un transmisor veloz no sature a un receptor más lento [8].

La capa física para este estándar es un enlace de Radio Frecuencia (RF), con transferencias en espectro disperso. Las frecuencias que se utilizan se dividen en bandas y son diferentes de acuerdo a la región geográfica en la que van a funcionar. Estas son:

- 868-868.6 MHz (Europa).
- 902-928 MHz (Norte América).
- 2400-2483.5 MHz (Mundial).

La subcapa MAC, especificada en el estándar IEEE 802.15.4, se encarga de la administración de los *beacons*, asociación y disociación de los dispositivos, confirmación y entrega de tramas, validación de tramas, mecanismos de acceso al canal, garantizar el manejo de espacios de tiempo (ranuras) y manejo de señalizaciones.

El IEEE 802.2, el cual forma parte de la serie de estándares IEEE 802, especifica las características del control de enlace lógico (*LLC, Logical Link Control*) de la subcapa superior de la capa de enlace de datos [9]. El LLC provee un camino para las capas superiores hacia cualquier tipo de subcapa MAC. Con respecto a los servicios que ofrecen el LLC son tres:

- Tipo 1 (sin conexión). La transferencia de datos se realiza de forma aislada, sin garantía de entrega, es usado donde se requiere la mayor simplicidad posible con poco retardo a costa de no tener fiabilidad en la comunicación (ejemplo, muestreo periódico de sensores).
- Tipo 2 (orientado a conexión). Intercambio de datos a través del establecimiento, mantenimiento y liberación de conexiones, entrega de datos garantizada y control de flujo.
- Tipo 3 (sin conexión confirmado). Intercambio de datos sin conexión, pero se realiza la confirmación de llegada de cada unidad enviada.

La subcapa MAC provee dos tipos de servicios, el servicio de datos que transporta unidades de datos del protocolo de la Subcapa de Convergencia de Servicio Específico (de sus siglas en Inglés *service specific convergence sublayer* SSSC), y los servicios de administración el cual permite el transporte de los comando de administración con la capa superior. Tales servicios se acceden a través de dos puntos de acceso a servicio (*SAP, Service Access Point*), que son:

- Servicios de datos de la MAC, accesada a través del punto de acceso a servicio de datos de la parte común de la subcapa MAC (*MCPS – SAP, MAC Common Part Sublayer-Service Access Point*).
- Servicios de administración de la MAC, accesada a través del punto de acceso a servicio de la MLME (*MLME-SAP, MAC Sublayer Management Entity-Service Access Point*).

Un LLC propietario puede acceder a los servicios de la subcapa MAC directamente sin tener que usar la SSSC.

1.7 Estructura de las tramas

La estructura de las tramas fue diseñada para tener una complejidad mínima y al mismo tiempo hacerlas lo suficientemente robustas para su transmisión en canales con ruido. En la figura 1.9 se muestra la estructura de la trama IEEE 802.15.4.

La subcapa MAC genera un paquete, formado por: el encabezado MAC (MHR, *Mac Header*), la unidad de datos de servicio MAC (MSDU, *MAC Service Data Unit*), y el fin de trama (MFR, *MAC Footer*). Este paquete, recibe el nombre de Unidad de Datos del Protocolo MAC (MPDU, *MAC Protocol Data Unit*) y puede tener una longitud máxima de 127 bytes.

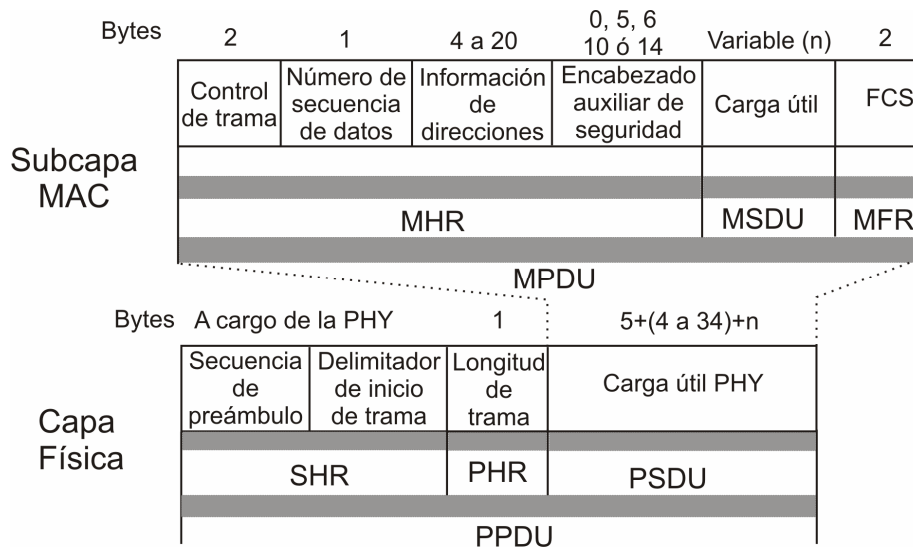


Figura 1.9. Vista esquemática de la trama IEEE 802.15.4.

La MPDU pasa a la capa física como la unidad de datos de servicio físico (PSDU, *PHY service data unit*) y constituye la carga útil física (PHY payload). La PSDU junto con el encabezado de sincronización (SHR, *Synchronization Header*), y el encabezado físico (PHR, *Physical Header*) forman la unidad de datos del protocolo físico (PPDU, *PHY protocol data unit*). La PPDU puede tener una longitud máxima de 133 bytes.

En las siguientes secciones se explica con más detalle cada uno de estos campos.

1.7.1 La Unidad de Datos del Protocolo MAC (MPDU)

La MPDU está formada por el MHR, la MSDU y el MFR. El MHR contiene información de los datos transmitidos o recibidos, está compuesto por 4 campos que son:

- El control de trama (*Frame control*). Tiene una longitud de dos bytes, y se encarga de indicar el tipo de trama a transmitir, especificar el formato del campo de dirección, y habilitar el procesamiento de la seguridad.
- Número de secuencia (*Data sequence number*). Tiene una longitud de un byte y especifica el identificador de secuencia de la trama. Es

una secuencia de números que enlaza a las tramas de reconocimiento con las transmisiones anteriores.

- Información de las direcciones (*Address information*). Tiene una longitud variable entre cuatro y 20 bytes dependiendo de las banderas de la trama de control. Contiene los datos de la dirección destino y de la dirección de la fuente, así como los identificadores de las redes PAN, tanto la red fuente como la red destino.
- Encabezado auxiliar de seguridad (*Auxiliary Security Header*). Contiene la información requerida para el procesamiento de la seguridad. Este campo solo está presente cuando el subcampo de seguridad está habilitado (dentro de *Frame Control*). Esta información se emplea para saber qué llave de seguridad MAC está siendo usada.

La MSDU contiene la carga útil (*Data Payload*), y tiene una longitud variable tomando en cuenta que la trama MAC puede tener una longitud máxima de 127 bytes. El tipo de información que contiene depende del tipo de trama de que se trate.

El MFR contiene el campo de secuencia de chequeo de trama (*FCS, Frame Check Sequency*) el cual lleva un código de verificación de errores. Es de tipo de secuencia de redundancia cíclica de 16 bits.

1.7.2 La Unidad de Datos de Protocolo Físico (PPDU)

La PPDU es el paquete que se transmite o se recibe a través del medio vía radio frecuencia (RF). Como se ve en la parte inferior de la figura 1.9, la PPDU es lo que se envía por la capa física y está formada por el SHR y el PHR y la PSDU.

La función que realiza el SHR, es el de sincronizar y fijar el flujo de bits. Está formado por dos campos que son:

- La secuencia de preámbulo (*Preamble sequence*). Sirve para que el transceptor obtenga la sincronización de símbolos con el mensaje entrante.
- El delimitador de inicio de trama (*Start Frame delimiter*). Indica el final del encabezado y el inicio del paquete de datos.

El PHR está formado solo por un campo de información, llamado longitud de la trama (*Frame Length*). En éste se especifica el número total de bytes contenidos en la carga útil.

La PSDU contiene la carga útil obtenida de la subcapa MAC.

1.7.3 Tipos de tramas

En la sección anterior se describió la estructura general de una trama IEEE 802.15.4. A continuación se describirán las tramas definidas por el estándar.

El estándar IEEE 802.15.4 define cuatro tipos de tramas que son:

- Trama ACK. Usada para confirmar la recepción completa de la trama.
- Trama de comandos. Usada para manejar todas las transferencias de control de la entidad MAC.
- Trama de datos. Usada para la transferencia de los datos.
- Trama *beacon*. Usada por el coordinador para transmitir guías llamadas *beacons*.

En la figura 1.10 se muestran las estructuras de las cuatro tramas. Como se puede observar, exceptuando la trama ACK, las demás tienen los mismos campos. La trama ACK solo contiene los campos de control de trama, el campo de número de secuencia y el campo de FCS.

Control de trama	Número de secuencia de datos				FCS	ACK
Control de trama	Número de secuencia de datos	Información de direcciones	Encabezado auxiliar de seguridad	Carga útil del comando	FCS	COMANDOS
Control de trama	Número de secuencia de datos	Información de direcciones	Encabezado auxiliar de seguridad	Carga útil de datos	FCS	DATOS
Control de trama	Número de secuencia de datos	Información de direcciones	Encabezado auxiliar de seguridad	Carga útil del Beacon	FCS	BEACON
MHR				MSDU	MFR	
MPDU						

Figura 1.10. Tipos de tramas del estándar IEEE 802.15.4.

La MSDU, es decir, la carga útil, cambia dependiendo del tipo de trama que se trate. A continuación se menciona el contenido de este campo para cada tipo de trama:

- Trama ACK. Esta trama no contiene el campo de carga útil. Sirve para confirmar la recepción completa de una trama.
- Trama de comandos. Permite el control o configuración de un dispositivo a distancia, contiene dos campos que son:
 - Identificador de la trama de comandos. Es de un byte y contiene el identificador del comando que está siendo usado.

- Carga útil del comando. Es de longitud variable y contiene el comando en si.
- Trama de datos. Contiene los datos que se desean transmitir, estos datos provienen de las capas superiores.
- Trama *Beacon*. Permite la sincronización de los dispositivos en la red, además de informar la existencia de datos a transmitir. En la figura 1.11 se muestran los 7 campos que contiene, los cuales son:

Bytes 2	1	0/1	Variable	1	Variable	Variable
Especificación de la supertrama	Especificación GTS	Direcciones GTS	Lista GTS	Especificación de dirección pendiente	Lista de direcciones	Carga útil <i>beacon</i>

Figura 1.11. Carga útil de la trama *beacon*.

- Especificación de la supertrama. Indica el intervalo de transmisión de los *beacons*, el intervalo de tiempo en el cual la supertrama esta activa, señala el final de la parte activa, indica si el coordinador de la PAN esta permitiendo asociaciones, entre otros.
- Especificación GTS. Indica si el coordinador de la PAN está aceptando solicitudes de GTS.
- Direcciones GTS. Contiene una máscara que identifica las direcciones de los GTS en la supertrama.
- La lista de GTS. Posee la lista de los descriptores GTS que representa a los GTS que se encuentran en la red.
- Especificación de dirección pendiente. Indica el número de direcciones cortas y extendidas que se encuentran en el campo de lista de direcciones de la trama *beacon*.
- La lista de direcciones. Contiene la lista de direcciones de los dispositivos que actualmente tienen mensajes pendientes con el coordinador de la red.
- La carga útil de la trama *beacon*. Contiene una secuencia opcional para ser transmitida en la trama por la capa próxima más alta.

1.8 Transmisión en RF

Para la transmisión de datos en RF, el estándar define la utilización de la técnica de codificación de espectro disperso de secuencia directa [7]. Esta técnica utiliza un patrón de bits redundante (señal de chip) por cada uno de los bits que componen la trama. La señal de chip es un código de ruido pseudo-aleatorio (*PN*, *Pseudo-random Noise*), que aumenta el ancho de banda de la transmisión y reduce la densidad de potencia espectral.

Es decir si la señal original tiene un ancho de banda B , cuando se le aplica la técnica de espectro disperso, se genera una señal con un ancho de

banda W , donde $W > B$. Con esta dispersión la potencia del ancho de banda B se distribuye en el ancho de banda W . En la figura 1.12 se muestra el efecto de esta técnica en el espectro de frecuencias.

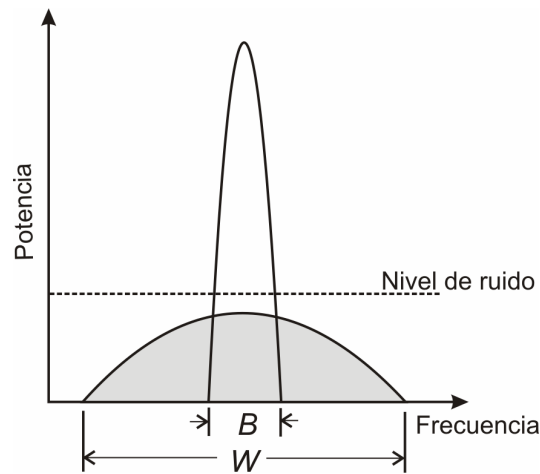


Figura 1.12. Técnica de espectro disperso.

La utilización de esta técnica permite que coexistan distintos dispositivos dentro del mismo medio, ya que los demás dispositivos solo escuchan 'ruido' si no tienen la misma secuencia pseudo-aleatoria para reconstruir la información [URL9].

Dentro de las especificaciones del protocolo estándar IEEE 802.15.4, se define el tipo de modulación a emplear dependiendo de la frecuencia utilizada. En la frecuencia de 2.4GHz se define una velocidad de transmisión de 250kbps, y se emplea una técnica de modulación M-ario cuasi-ortogonal, con $M=16$ [7].

En la figura 1.13 se muestra el diagrama a bloques funcional de la especificación física de 2.4GHz para la modulación. Éste consta de tres bloques que son: Bit a símbolo, Símbolo a chip y el Modulador O-QPSK.

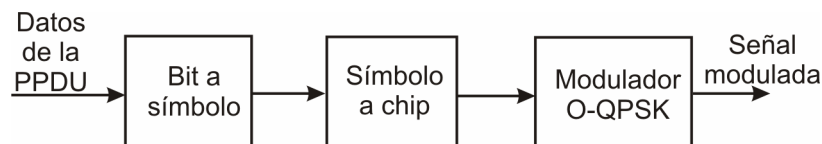


Figura 1.13. Diagrama funcional para la técnica de modulación.

El módulo Bit a símbolo se encarga de recibir los bytes provenientes de la unidad de datos de la capa física (PPDU), los separa en el nibble alto y bajo, primero procesa el bajo y después el alto. Cada nibble representa uno de los 16 símbolos que se pueden formar (de 0000 a 1111 en binario). El símbolo es la salida de este bloque.

El módulo Símbolo a chip, recibe un símbolo y de acuerdo a su valor, es sustituido por una secuencia PN de chip de 32 bits. Por ejemplo el





símbolo 0101 es sustituido de acuerdo a la tabla 24 del estándar [7], por la secuencia de chip: 0 1 1 1 1 0 1 1 1 0 0 0 1 1 0 0 1 0 0 1 0 1 1 0 0 0 0 0 1 1 1. Estas secuencias son las salidas de este bloque.

Las secuencias de chip que representan cada símbolo son modulados en la portadora usando transmisión por desplazamiento de fase cuaternaria de compensación (*O-QPSK, Offset Quadrature Phase-Shift Keying*).

1.9 Aplicaciones actuales

ZigBee Alliance, es el nombre de la asociación de empresas que buscan el desarrollo de este estándar, mediante la definición de las principales características que deben de cumplir los dispositivos reconocidos por ella [URL10]. De esta forma se asegura la interoperatividad entre los módulos de todas las empresas participantes. Algunas de las compañías de la alianza que fabrican módulos con base en este estándar, se muestran en la tabla 1.2.

Tabla 1.2. Productos que cumplen con el estándar ZigBee.

Empresa	Producto	Descripción	Figura
Ad-Sol Nissin Corporation [URL11]	ES706R077	Productos multipropósito, que cuentan con varios tipos de interfaces incluyendo la interfaz serial, USB, I/O digitales y entradas A/D	
NEC Engineering, Ltd [URL12]	ZB24FM-Z	Módulos empotrados que permiten la comunicación y monitoreo de personas que lleven el dispositivo dentro de un área determinada	
MaxStream [URL13]	XBee y XBee-PRO	Módulos que tienen I/O digitales, puerto serial y entradas A/D	
S3C [URL5]	XM2400	Sensores de presión diferencial para mediciones de presión, temperatura, flujo y humedad	

En estos dispositivos, el uso del estándar es completamente transparente, desde el punto de vista del usuario. La configuración de las modalidades de operación, se hace a través de comandos de módem que traen implementado estos dispositivos.

Los dispositivos mencionados anteriormente ofrecen una solución total a determinadas aplicaciones, sin embargo, empresas tales como ATMEL y Texas Instruments, entre otras, ofrecen dispositivos para el desarrollo de aplicaciones por parte de los usuarios. A continuación se mencionan las opciones que ofrecen estas empresas.

La empresa ATMEL, que también es parte de la alianza, ofrece kits de demostración como por ejemplo el ATAVRRZRAVEN 2.4GHz, en la figura 1.14 se muestran los componentes. El kit contiene dos tarjetas AVR Raven (AVRRAVEN) con transceptores a 2.4GHz, y una tarjeta USB (AVRRZUSBSTICK) con un transceptor a 2.4GHz para conexiones USB con una PC.

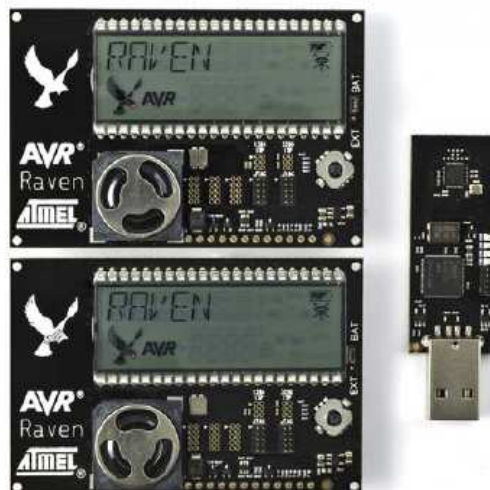


Figura 1.14. Componentes del kit ZigBee de Atmel.

Las tarjetas AVRRAVEN se alimentan con un par de pilas o una fuente externa de 5-12V, consume 20mA en estado activo y 600nA en modo de *sleep*. Tiene dos microcontroladores, un ATmega1284P para controlar el radio (AT86RF230), y un ATmega3290P para controlar el LCD [10].

La empresa Texas Instruments desarrolló el transceptor CC2520 que es un producto de segunda generación de IEEE 802.15.4. El cual se alimenta con voltajes de 1.8 a 3.8V, tiene un alcance de 400m en línea de vista, consume 18.5mA y 33.6mA en modo de recepción y transmisión respectivamente. Maneja una transferencia de datos a 250kbps [URL14].

La empresa antes mencionada ofrece kits de desarrollo como por ejemplo el CC2520DK, el cual incluye software y hardware que permite rápidamente probar el funcionamiento del CC2520 y ofrece una plataforma

que permite desarrollar prototipos avanzados de RF [URL15]. En la figura 1.15 se muestran los componentes del kit de desarrollo.



Figura 1.15. Kits de desarrollo ZigBee de Texas Instruments.

Capítulo 2. Diseño del Hardware

El objetivo principal de la tesis es el diseño de un sistema inalámbrico para el manejo de sensores con salida TTL o analógicos, el cual debe cumplir con las características del estándar IEEE 802.15.4. Para lograr el objetivo propuesto se realizó el diseño tomando como base el circuito integrado XB24-AWI-001, de la firma MaxStream [11]. Este dispositivo cumple con todas las características del estándar [7]. Forma parte de la alianza ZigBee y existe un distribuidor en México de la firma MaxStream.

De forma funcional, las características con las que cuenta el sistema para sensores inalámbricos son:

- Cuatro entradas o salidas digitales con nivel TTL.
- Una entrada analógica en el rango de 0 a 5V.
- Una salida analógica en el rango de 0 a 3.3V.
- Puerto USB opcional para la conexión de este sistema hacia la computadora.
- Alimentación con un par de pilas tipo AA e independiente.
- Indicador visual del nivel de RF en la recepción.

Las entradas y salidas digitales van a servir para interconectar sensores con salidas a transistor. Las entradas analógicas serán utilizadas para interconectar sensores con salida de voltaje. La alimentación de esos sensores no será proporcionada por este sistema.

2.1 Descripción general del sistema

Para cumplir con todos los requerimientos se decidió dividir todo el sistema en dos bloques independientes, uno de ellos servirá cuando se conecte el sistema al puerto USB (que se le denominará XBeeUSB) y otro para el manejo de sensores remotos (el cual se llamará XBeeSensor). El XBeeUSB va a funcionar como coordinador PAN, con el fin de probar las diferentes opciones del protocolo haciendo conexiones con una PC, entre otras. El XBeeSensor, al ser alimentado por pilas, puede ser usado para monitorear sensores remotos o como repetidor de comunicaciones.

En la figura 2.1 se muestra un diagrama conceptual de lo que se plantea. Como se puede apreciar, en la red IEEE 802.15.4 van a existir dispositivos para el manejo de sensores o, en su defecto, conectar computadoras e integrarlas en esta red para hacer pruebas y verificar el rendimiento de este estándar. A continuación se explican las características de cada uno de ellos.

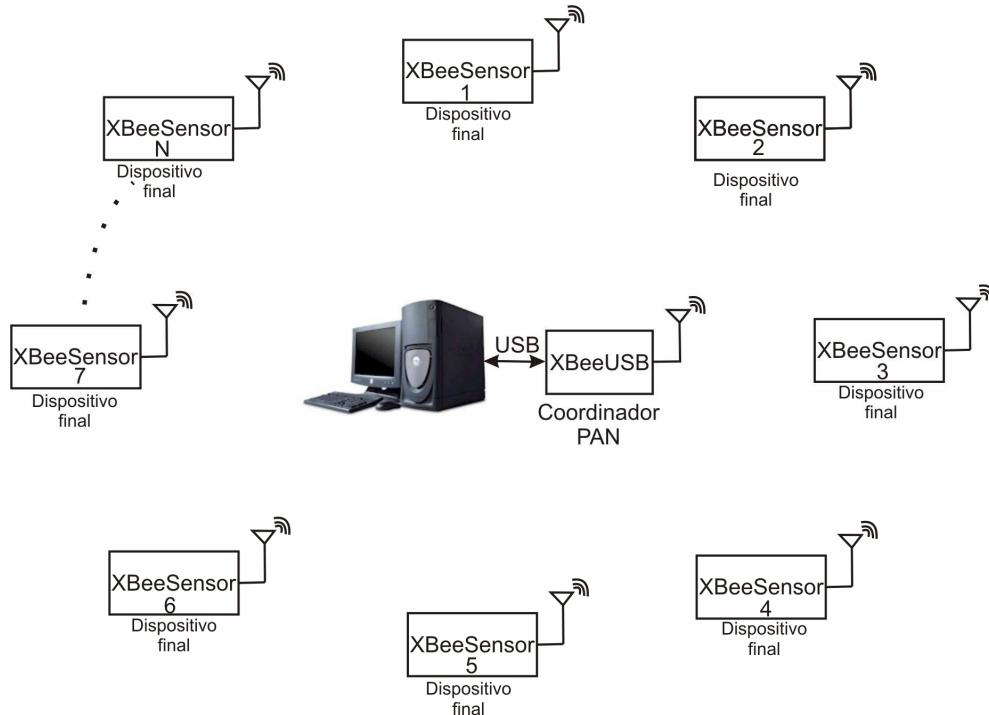


Figura 2.1. Diagrama funcional de una conexión con ambos sistemas.

2.1.1 Sistema XBeeSensor

Como se mencionó anteriormente, este sistema puede manipular sensores de tipo TTL y tiene la capacidad de funcionar con dos fuentes de alimentación, cumpliendo todas las características del protocolo IEEE 802.15.4. Para satisfacer los requerimientos antes expuestos, el sistema se dividió en seis bloques, mostrados en la figura 2.2. Las características generales de cada bloque son:

- **Módulo XBee.** Es el transceptor que envía y recibe las tramas siguiendo el estándar IEEE 802.15.4. Su voltaje de operación es de 3.3V. Posee un puerto de comunicaciones seriales donde los niveles de las señales digitales es igual a la de su alimentación. Se puede conectar a una computadora personal (PC) para su configuración a través del sistema XBeeUSB.
- **Entradas digitales.** Este módulo permite conectar entradas digitales con niveles TTL al módulo XBee. Cuando ocurre un cambio de estado en sus

entradas, este evento es transmitido hacia la computadora personal o hacia un dispositivo final.

- Salidas digitales. Este módulo acondiciona los voltajes de salida del XBee (3.3V) a TTL. El estado de la salida es función del comando recibido por el módulo XBee, ya sea por una computadora o un módulo remoto.
- Entradas analógicas. Este módulo acondiciona la señal analógica del rango de 0 a 5V al rango de alimentación del convertidor analógico digital del módulo XBee. Esto con el fin de que el valor digitalizado de la señal analógica sea transmitido.
- Fuente de alimentación. Este módulo suministra el voltaje de alimentación de todos los demás módulos. Debe tener la capacidad de operar con dos pilas AA o con el voltaje suministrado por una fuente de voltaje externa.
- Indicador de nivel. Este módulo provee un indicador visual del nivel de intensidad de la señal de Radio Frecuencia (RF) recibida.

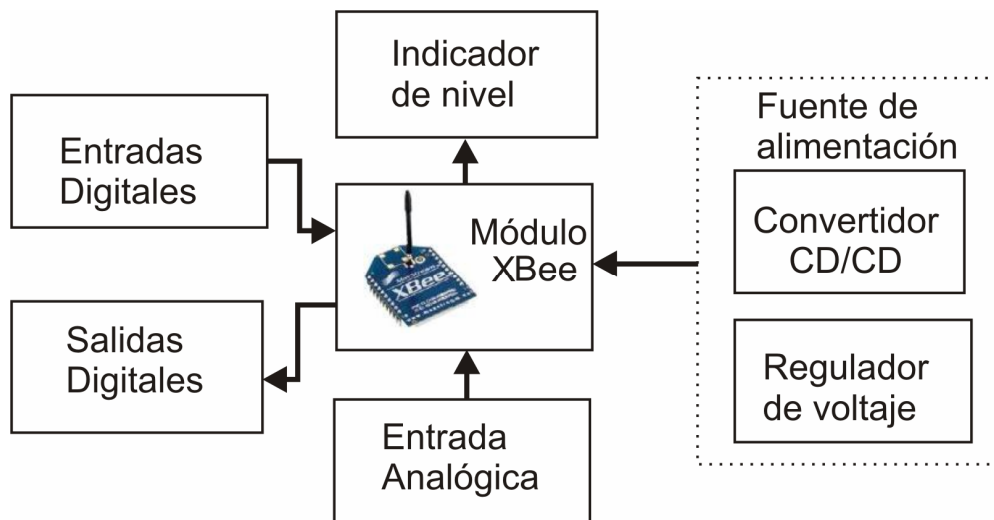


Figura 2.2. Diagrama a bloques del sistema XBeeSensor.

2.1.2 Sistema XBeeUSB

Este sistema tiene la capacidad de transmitir los datos que le lleguen por el puerto USB de una Computadora Personal (PC), con el fin de dotar de este tipo de interfaz a una o varias PC's y de esta forma generar una red IEEE 802.15.4 con varios componentes. La figura 2.3 muestra el diagrama a bloques conceptual del XBeeUSB, el cual está formado por tres partes: El módulo XBee, el Convertidor USB-Serial y los indicadores luminosos. Las características de cada bloque se describen a continuación:

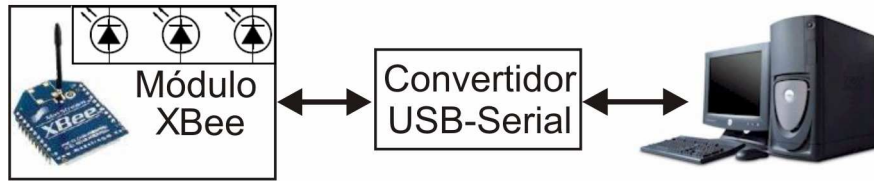


Figura 2.3. Diagrama a bloques del sistema XBeeUSB.

- Módulo XBee. Como se mencionó anteriormente, este módulo consta de un transceptor bajo el protocolo IEEE 802.15.4. Por medio del puerto serial que tiene el XBee se establecerá la comunicación con la PC.
- Convertidor USB-Serial. Este módulo recibe las tramas seriales del módulo XBee, y las envía hacia una computadora en formato USB, permitiendo de esta manera establecer la comunicación con la computadora.
- Indicadores luminosos. Permiten al usuario conocer de una manera rápida el estado del sistema XBeeUSB. Indicarán si el sistema XBeeUSB esta conectado al puerto USB, si se esta realizando una transmisión de datos entre la PC y el convertidor de nivel, y también indicarán si el módulo XBee conectado esta asociado a una red.

A continuación se describen con más detalle cada uno de los bloques de ambos sistemas.

2.2 Módulo XBee.

Es el módulo más importante, ya que es el encargado de recibir y transmitir los datos cumpliendo las normas del estándar IEEE 802.15.4, más comúnmente llamado ZigBee. Los demás bloques sirven de soporte para que este dispositivo trabaje correctamente. Como se mencionó en la introducción, en el mercado existen varios fabricantes que venden módulos que cumplen con éste estándar, entre los más importantes destacan los de MaxStream.

La firma MaxStream ofrece dispositivos que cumplen con la alianza ZigBee, a los cuales les denomina XBee. Para satisfacer los diferentes requerimientos de las aplicaciones en que se puede usar, ofrece siete módulos agrupados en dos series (la 1 y la 2) y uno independiente. Las principales diferencias entre ellos son, el tipo de red que pueden formar, la potencia de transmisión y el número de canales de entrada-salida. En la tabla 2.1 se muestran las principales características de los diferentes modelos [URL16].

Son dos lo dispositivos de la serie 1, su potencia de transmisión es de 1mW y 64mW. De la serie 2 existen cuatro modelos, con potencias de 2mW hasta 50mW. En cada modelo la terminación PRO indica una mayor

potencia de salida y capacidad para formar redes más grandes. Todos los modelos de la serie 1 y 2 son compatibles terminal a terminal, sin embargo tiene la desventaja de que no se pueden comunicar entre ellos. Esto quiere decir que un dispositivo de la serie 1 no puede establecer una red con uno de la serie 2 y viceversa.

Todos los dispositivos de la serie 2 comparten el mismo *hardware* entre ellos, por lo tanto, los dispositivos pueden ser convertidos de una plataforma a otra cargando el *firmware* que se desee usar. Los dispositivos de la serie 2 pueden operar en una red ZigBee como coordinador, *router* o dispositivo final. De acuerdo a la aplicación se elige el *firmware* que se adapte a las necesidades del usuario final. El *firmware* se obtiene de manera gratuita con el fabricante de los módulos XBee [URL16].

Tabla 2.1. Diferentes modelos XBee de la firma MaxStream.

Característica	Modelo de XBee						
	Serie 1		Serie 2				XBee Pro XSC
	XBee	XBee Pro	XBee Znet 2.5	XBee Pro Znet 2.5	XBee ZB ZigBee	XBee Pro ZB ZigBee	
Potencia de salida en transmisión	1 mW	63 mW	2 mW	50 mW	2 mW	50 mW	100 mW
Alcance interiores	30 m	100 m	40 m	120 m	40 m	120 m	370 m
Alcance en línea de vista	100 m	1.6 Km	120 m	1.6 Km	120 m	1.6 Km	24 Km
Régimen de RF en datos: 250 Kbps	SI	SI	SI	SI	SI	SI	9.6 Kbps
Baud Rate de la UART	Hasta 115.2 Kbps	Hasta 115.2 Kbps	Hasta 1 Mbps	Hasta 1 Mbps	Hasta 1 Mbps	Hasta 1 Mbps	Hasta 57.6 Kbps
Frecuencia de operación: 2.4 GHz	SI	SI	SI	SI	SI	SI	900 MHz
Opciones de antena: Conector U. FL, antena de chip, dipolo	SI	SI	SI	SI	SI	SI	Conector U. FL, antena de chip
Topologías de red soportadas	Estrella	Estrella	Estrella Malla	Estrella Malla	Estrella Malla	Estrella Malla	Estrella
Número de canales	16	12	16	16	16	13	7
Terminales de entrada-salida digital	8	8	10	10	10	10	-
Terminales de entrada analógica (ADC 10 bits)	7	7	4	4	4	4	0

EL módulo XBee PRO XSC tiene una potencia de 100mW, por lo cual es usado cuando se requiere un mayor alcance, sin embargo no es compatible con los dispositivos de la serie 1 y 2 porque transmite a 900MHz y lo otros a 2.4GHz. Es compatible con otros productos de la marca MaxStream, específicamente con el dispositivo XStream XH9-009 (el cual no pertenece al grupo XBee), maneja voltajes TTL, tiene un alcance en línea de vista de 11km, y transmite en RF a 19.2kbps con la versión de *firmware* 42B5.

El transceptor que se empleó en la implementación del sistema es el modelo XB24-AWI-001 de la firma MaxStream [11], el cual pertenece a la serie 1. La razón por la que se decidió usarlo es porque es uno de los dispositivos más completos que hay en el mercado, es de bajo costo, tiene un excelente soporte técnico y hay un distribuidor de MaxStream en México.

Su característica más importante, que lo hace ideal para el control de sensores, es que tiene un bajo consumo de energía. Existen modelos con diferentes capacidades de potencia de RF (desde 1mW a 63mW) en la banda de 2.4GHz. En la parte de baja velocidad maneja un *baud rate* de 1200 a 115200bps. Tiene modelos con antena de chip, dipolo o con conector para una antena externa (para mejorar el alcance). En la tabla 2.2 se muestran las principales características del XB24-AWI-001.

Tabla 2.2. Especificaciones del XB24-AWI-001 de MaxStream.

Rendimiento	Alcance en ambientes interiores /zonas urbanas	Hasta 30 m
	Alcance en línea de vista para ambientes exteriores	Hasta 100 m
	Potencia de salida en transmisión	1 mW (0 dBm)
	Régimen de RF en datos	250 000 bps
	Sensibilidad del receptor	-92 dBm
Requerimientos de potencia	Voltaje de alimentación	2.8 a 3.4 V
	Corriente de transmisión	45 mA @ 3.3 V
	Corriente de recepción	50 mA @ 3.3 V
	Corriente <i>Power-down</i>	< 10 μ A
Información general	Frecuencia de operación	ISM 2.4 GHz
	Temperatura	-40 a 85 °C (Industrial)
	Dimensiones	2.438 cm x 2.761 cm
	Opciones de antena	Conector U.FL, antena de chip, antena de alambre
Trabajo en red y seguridad	Topologías de red soportadas	Punto a Punto, Punto a Multipunto
	Número de canales	16
	Capas de filtración de la red	Identificador de la PAN y direcciones de 64 bits.
Entradas*	Digitales	4
	Analógicas	1
Salidas*	Digitales	4

* Tanto las entradas y salidas digitales, así como las entradas analógicas comparten las mismas terminales, por lo que es necesario configurarlos, mediante comando AT, para indicar su uso.

Entre lo más destacable del módulo XBee, está un alcance hasta de 100 m cuando no hay obstáculos entre el emisor y receptor (para la potencia

de 1mW). El voltaje de alimentación es pequeño para operar con pilas (de 2.8 a 3.4V). Frecuencia de transmisión de 2.4GHz, en la banda industrial, científica y medica (*ISM, Industrial, Scientific and Medical*). Topologías de red soportadas punto a punto o multipunto.

El módulo XBee tiene ocho terminales de entradas o salidas digitales y siete terminales de entradas analógicas las cuales son configurables, es decir cada terminal es habilitada de acuerdo a lo que se necesite. Sin embargo, tres de estas terminales realizan funciones de control de la UART como es: Solicitud de envío (*RTS, Request To Send*), libre para envío (*CTS, Clear To Send*) y terminal de datos listo (*DTR, Data Terminal Ready*). Por lo tanto, en el presente trabajo se utilizaron cuatro terminales para entrada o salida digital y una terminal para entrada analógica, dejando las demás terminales para el control.

El módulo XBee internamente tiene un convertidor Analógico Digital (ADC), lo cual permite que directamente se le puedan conectar sensores de tipo analógico, sin necesidad de usar un microcontrolador con o un ADC externo. Estas características hacen posible que el XBee pueda manejar directamente sensores o que funcione como radio módem.

En la figura 2.4(a) se muestra una fotografía del módulo XB24-AWI-001, el cual posee una antena de chip en la parte superior derecha de la figura. Tiene 20 terminales distribuidas en dos hileras de diez pines cada una, la separación entre ellas es de 2mm, lo cual no es compatible con las tablas de interconexión (*protoboard* de 2.5mm). Para hacer pruebas a nivel de *protoboard* es necesario fabricarle una base especial. En la figura 2.4 (b) se muestra el diagrama a bloques del módulo XBee, el cual se divide en cinco bloques que son:

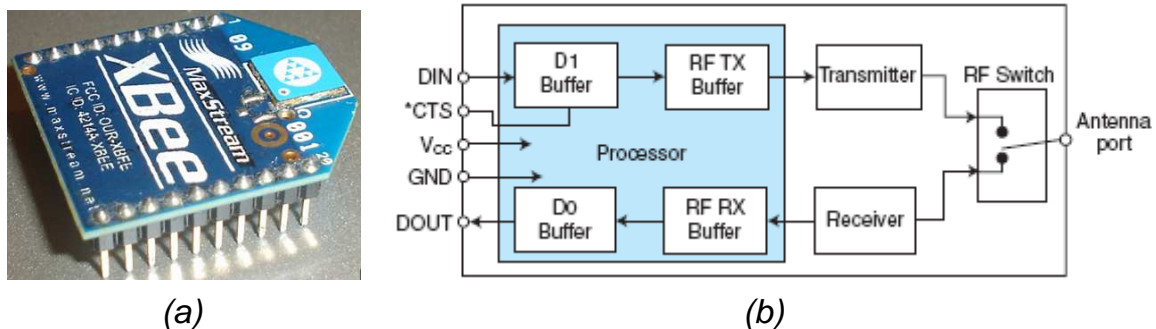


Figura 2.4.a) Imagen del XBee. b) Diagrama a bloque del control de flujo.

- La antena. Es el dispositivo que convierte la señal eléctrica del trasmisor en una onda electromagnética. Es de tipo pasivo y como la frecuencia de operación es muy grande, permite que sea factible usar antenas de chip.
- El interruptor de antena. Es el que conmuta la conexión de la antena al transmisor (para enviar) y al receptor (cuando se reciben datos), a través del medio de RF. Por tal motivo, solo soporta conexiones de tipo *half duplex*.

- El transmisor. Es el que envía los datos al puerto de la antena, para que éstos sean transmitidos al medio. La transmisión se puede realizar en uno de los canales disponibles, y la selección del canal esta a cargo del procesador, de acuerdo a la configuración realizada en el dispositivo.
- El receptor. Se encarga de recibir los datos provenientes del medio de RF a través del puerto de la antena, los demodula y los envía al módulo de procesador.
- El procesador. Se encarga de recibir tramas seriales de baja velocidad del puerto serial hacia el transmisor, y de recibir las tramas (a alta velocidad 250000bps) del receptor y adaptarlas a un *baud rate* bajo (desde 1200bps a 115200bps). Además, maneja las terminales de entrada y salida así como las señales de control de la interfaz. Este dispositivo está basado en un microcontrolador.

Cuando un paquete es recibido, por medio del receptor de RF, los datos se almacenan en el buffer de recepción de RF, después de procesarlos (quitar los datos del protocolo y dejar solo la carga útil de datos), éstos se almacenan en el buffer de salida, para su envío por la terminal **DOUT**. Los datos seriales, para transmitir, entran por la terminal denominada **DIN**, y son almacenados en el buffer de entrada, posteriormente se les adhiere el encabezado y demás partes que especifica el estándar IEEE 802.15.4. El paquete se almacena en el buffer de transmisión de RF, posteriormente el módulo *Transmitter* modula los bits y los acondiciona para ser radiados por la antena transmisora. El *RF Switch* conmuta la conexión de la antena al transmisor o el receptor.

El procesador se encarga, entre otras cosas, de que los datos recibidos en el puerto serial sean tratados para que sigan el protocolo IEEE 802.15.4, mediante el *firmware* implementado en él. El *firmware* es un programa el cual se encuentra empotrado en el módulo XBee, realiza entre otras funciones, el monitoreo y control de las terminales entrada-salida del dispositivo, y habilita o deshabilita los ADC dependiendo de la configuración actual de las terminales. Dependiendo de la versión del *firmware*, el dispositivo identifica e interpreta los comandos AT (algunos comandos no son reconocidos por ciertas versiones de *firmware*).

Las 20 terminales del módulo XB24-AWI-001 se muestran en el diagrama esquemático de la figura 2.5, en ella la terminal uno corresponde al voltaje de alimentación y la diez a la de tierra. En la tabla 2.3 se nombra y explica brevemente la función de cada una de las señales, cabe la pena aclarar que cuando el nombre de la señal esta en negritas, ésta es activa en bajo.

Las conexiones mínimas que se deben realizar para que el módulo XB24-AWI-001 se pueda conectar hacia una computadora son: VCC, GND, DIN, DOUT, RTS y DTR. Es importante hacer notar que estas señales deben de ser acondicionadas a los niveles de voltaje que maneja el dispositivo (de 0 a 3.3V). Para que se comunique con la computadora, ésta debe ejecutar un

programa para el envío o recepción de tramas seriales como el Terminal de Windows. Una vez realizadas, el dispositivo puede ser usado como transceptor o para actualizar su *firmware*.

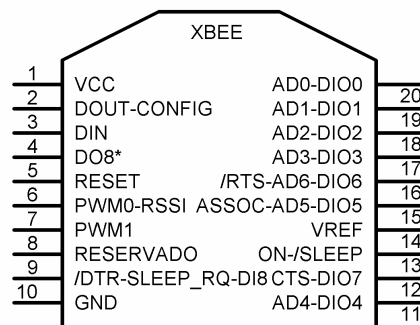


Figura 2.5. Diagrama esquemático del XB24-AWI-001.

Tabla 2.3. Terminales del XB24-AWI-001.

Terminal	Nombre	Dirección	Descripción
1	VCC	-	Alimentación
2	DOUT	Salida	Salida <i>UART</i>
3	DIN/CONFIG	Entrada	Entrada <i>UART</i>
4	DO8*	Salida	Salida digital 8
5	RESET	Entrada	Reset del módulo
6	PWM0/RSSI	Salida	Salida <i>PWM0</i> , Indicador de nivel de la señal RF
7	PWM1	Salida	Salida <i>PWM1</i>
8	[RESERVADO]	-	No conectar
9	DTR/SLEEP_RQ/DI8	Entrada	Control de flujo, terminal de <i>sleep</i> , entrada digital 8
10	GND	-	Tierra
11	AD4/DIO4	Ambas	Entrada analógica 4 o I/O digital 4
12	CTS/DIO7	Ambas	Control de flujo, I/O digital 7
13	ON/SLEEP	Salida	Indicador del estatus del módulo
14	VREF	Entrada	Referencia de voltaje para las entradas analógica
15	ASOCIACIÓN/AD5/DIO5	Ambas	Entrada analógica 5 o I/O digital 5
16	RTS/AD6/DIO6	Ambas	Control de flujo
17	AD3/DIO3	Ambas	Entrada analógica 4 o I/O digital 4
18	AD2/DIO2	Ambas	Entrada analógica 2 o I/O digital 2
19	AD1/DIO1	Ambas	Entrada analógica 1 o I/O digital 1
20	AD0/DIO0	Ambas	Entrada analógica 0 o I/O digital 0

Todas las funciones del XB24-AWI-001 y de los demás módulos XBee son configurados con comandos AT de módem. Para poder ejecutarlos, es necesario que se conecte a algún puerto de comunicaciones seriales, de tipo USB o RS-232, que le haga llegar éstos comandos al puerto de datos (Pin DIN) del módulo.

Para leer o modificar los parámetros del módulo XBee es necesario entrar a modo de comandos. En este modo el XBee interpreta los datos recibidos como comandos. Existen dos modos de comandos soportados: modo de comando AT y modo de comandos API (*Application Programming*

Interface). El modo de comandos API, ofrece una alternativa para interactuar con las capacidades del módulo a través de estructuras definidas que contienen información de operaciones o eventos dentro del módulo.

Para entrar en modo de comandos AT se envía una secuencia de tres caracteres “+++”, el módulo responde con “OK”. Para enviar los comandos se usa la siguiente sintaxis:

AT + Comando + Espacio + Parámetro + Retorno
 ASCII (opcional) (opcional en HEX)

Cuando se quiere leer el valor del parámetro en el módulo XBee, se omite el campo de parámetro. En la tabla 2.4 se muestra un ejemplo del uso de los comandos AT, en el ejemplo se empleará el comando CH para leer y posteriormente modificar el canal de transmisión del dispositivo.

Tabla 2.4. Ejemplo del uso de los comandos AT.

Comando AT enviado	El módulo responde	Descripción de la acción
+++	OK </n >	Entra al modo de comandos.
ATCH <ENTER>	{VALOR ACTUAL}</n >	Lee el valor actual del canal.
ATCH0C <ENTER>	OK </n >	Escribe el valor 0x0C en el parámetro del canal.
ATWR <ENTER>	OK </n >	Escribe en la memoria no volátil del módulo.
ATCN <ENTER>	OK </n >	Sale del modo de comandos.

La lista de comandos es muy grande, ya que existe uno para todas las opciones del módulo, para consultar la lista completa puede ver la referencia [11]. Por tal motivo en la tabla 2.5 se muestran algunos de los comandos más importantes, junto con su descripción.

Tabla 2.5. Principales comandos AT.

Comando AT	Descripción	Rango del parámetro
WR	<i>Write</i> . Escribe el valor del parámetro en su memoria no volátil, para que las modificaciones persistan.	-
DH	<i>(Destination Address High)</i> . Escribe o lee los 32 bits más altos de la dirección destino de 64 bits.	0 – 0xFFFFFFFF
DL	<i>(Destination Address Low)</i> . Escribe o lee los 32 bits menos significativos de la dirección destino de 64 bits.	0 – 0xFFFFFFFF
MY	<i>(16 bits Source Address)</i> . Lee o escribe la dirección fuente de 16 bits del módulo. Escribir MY= 0xFFFF para deshabilitar la recepción de paquetes con direcciones de 16 bits.	0 – 0xFFFF
NI	<i>(Node Identifier)</i> . Almacena una cadena de identificación.	Cadena de 20 caracteres ASCII.
D8	<i>(Dl8 Configuration)</i> . Selecciona o lee las opciones para la línea DI8 (terminal 9) del módulo.	0-3 0= Deshabilitado 3= DI (1,2,4 y 5 no se usan)

D7	<i>(DIO7 Configuration)</i> . Selecciona o lee las opciones para la línea DIO7 (terminal 12) del módulo.	0 - 5 0= Deshabilitado 1= Control de flujo CTS 2= no se usa 3= DI 4= DO en bajo 5= DO en alto
D6	<i>(DIO6 Configuration)</i> . Selecciona o lee las opciones para la línea DIO6 (terminal 16) del módulo.	0 - 5 0= Deshabilitado 1= Control de flujo RTS 2= no se usa 3= DI 4= DO en bajo 5= DO en alto
D5	<i>(DIO5 Configuration)</i> . Selecciona o lee las opciones para la línea DIO5 (terminal 15) del módulo.	0 - 5 0= Deshabilitado 1= Indicador de asociación 2= ADC 3= DI 4= DO en bajo 5= DO en alto
D0-D4	<i>(DIO0- DIO4 Configuration)</i> . Selecciona o lee las opciones para las siguientes líneas: AD0/DIO0 (terminal 20), AD1/DIO1 (terminal 19), AD2/DIO2 (terminal 18), AD3/DIO3 (terminal 17) y AD4/DIO4 (terminal 11) del módulo.	0 - 5 0= Deshabilitado 1= no se usa 2= ADC 3= DI 4= DO en bajo 5= DO en alto
IU	<i>(I/O Output enable)</i> . Habilita o deshabilita los datos I/O recibidos para ser enviados por la UART. El dato es enviado usando la estructura API.	0 - 1 0= Deshabilitada 1= Habilitada
IT	<i>(Samples before TX)</i> . Escribe o lee el número de muestras que el módulo debe recolectar antes de transmitir el dato.	1- 0xFF
IO	<i>(Digital Output Level)</i> . Escribe el nivel de la salida digital para permitir que las líneas que están definidas como salidas puedan ser cambiadas a través del modo de comando.	-
IC	<i>(DIO Change Detect)</i> . Habilita o deshabilita el monitoreo de los cambios en la terminales de I/O, si se detecta un cambio el dato I/O es transmitido.	0 - 0xFF (campo de bits)
IR	<i>(Sample Rate)</i> . Escribe o lee el tiempo de muestro. Cuando el parámetro es escrito, el módulo muestrea todas las entradas habilitadas en un intervalo específico.	0 - 0xFFFF (x 1 ms)
IA	<i>(I/O Input Address)</i> . Escribe o lee una dirección específica con la cual los datos pueden ser compartidos y así modificar sus salidas.	0 - 0xFFFFFFFFFFFFFFFF
T0-T7	<i>([D0 - D7] Output Timeout)</i> . Lee o escribe el tiempo para que las líneas D0 - D7 permanezcan en estado activo.	0 - 0xFF (x 100 ms)
P0	<i>(PWM0 Configuration)</i> . Selecciona o lee la función de la terminal PWM0.	0 - 2 0= Deshabilitado 1= RSSI 2= Salida PWM
P1	<i>(PWM1 Configuration)</i> . Selecciona o lee la función de la terminal PWM1.	0 - 2 0= Deshabilitado 1= RSSI 2= Salida PWM

RP	(<i>RSSI PWM Timer</i>). Sirve para habilitar la salida PWM del módulo. La salida es calibrada para mostrar el nivel de la señal de RF.	0 – 0xFF (x 100 ms)
M0	(<i>PWM0 Output Level</i>). Escribe o lee el nivel de la salida PWM0.	0 – 0x03FF
M1	(<i>PWM1 Output Level</i>). Escribe o lee el nivel de la salida PWM1.	0 – 0x03FF
CT	(<i>Command Mode Timeout</i>). Lee o escribe el tiempo de inactividad después del cual el módulo automáticamente sale del modo de comandos AT.	2 – 0xFFFF [x100 ms]
CN	(<i>Exit Command Mode</i>). Salida explícita del modo de comandos AT.	-

Como son muchos los comandos y las opciones, lo cual resulta en ocasiones difícil de dominar, una alternativa es usar el programa X-CTU, que es suministrado gratuitamente por el fabricante MaxStream. Este programa permite realizar la configuración de los módulos XBee, sin necesidad de conocer los comandos. El programa X-CTU funciona para el sistema operativo Windows XP, posee una interfaz gráfica desde la cual se acceden todos los recursos del XBee, también se pueden realizar pruebas del alcance de transmisión del dispositivo y del nivel de señal recibido [11]. En el apéndice C se describe a detalle este programa.

2.2.1 Tipo de modulación

El módulo XBee emplea la tecnología de secuencia directa en espectro disperso (*DSSS, Direct Sequence Spread Spectrum*) con transmisión por desplazamiento de fase cuaternaria (*QPSK, Quadrature Phase-Shift Keying*) [URL16].

En QPSK se tienen cuatro posibles fases de salida, para una sola frecuencia de portadora [12]. Para seleccionar una de estas fases se emplean dos bits de entrada llamados dibits. Cada dibit genera una de las cuatro fases posibles. En la Figura 2.6 se muestra el diagrama de constelación de QPSK.

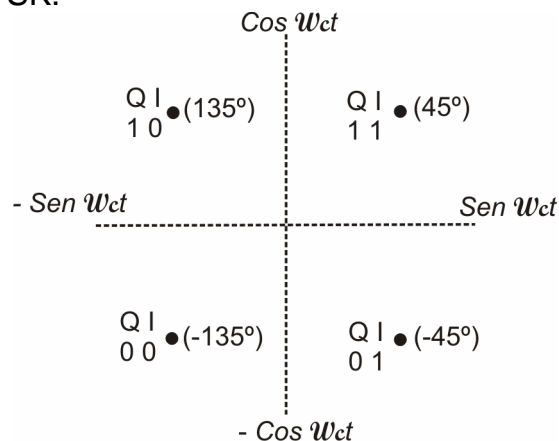


Figura 2.6. Diagrama de constelación.

En la figura 2.7 se muestra el diagrama a bloques de un modulador QPSK. Los datos de entrada se separan en díbits los cuales ingresan en forma paralela, un bit al canal I, mientras que el otro bit entra al canal Q. El bit I modula una portadora que esta en fase con el oscilador de referencia, el bit Q modula una portadora que esta en cuadratura (desfasado 90°) con el oscilador de referencia. El sumador combina las dos señales teniendo como resultado cuatro posibles fases.

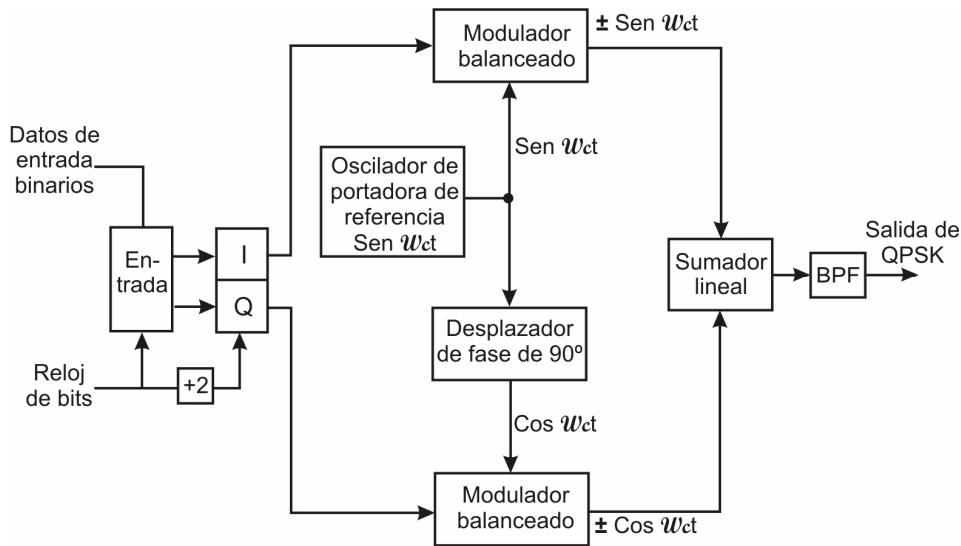


Figura 2.7. Modulador QPSK.

Como los datos de entrada se dividen en dos canales, la frecuencia de bit en el canal I o en el canal Q es igual a la mitad de la frecuencia de los datos de entrada ($f_b/2$). El circuito QPSK alarga el tiempo de bit de Q e I, por lo tanto la frecuencia de Q o I es un cuarto de la frecuencia de los datos de entrada ($f_b/4$). En la figura 2.8 se esquematizan las señales de entrada y de los díbits para obtener el ancho de banda mínimo.

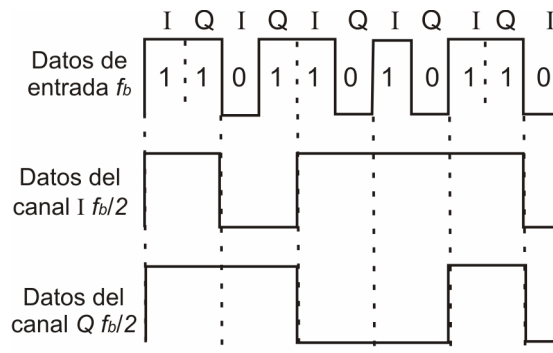


Figura 2.8. Datos de entrada y los díbits.

Entonces el ancho de banda (B) mínimo requerido por los moduladores balanceados es dos veces la frecuencia de Q o I, por lo tanto se tiene que B esta dado por la ecuación 2.1.

$$B = 2\left(\frac{f_b}{4}\right) = \frac{f_b}{2} \quad (2.1)$$

Los modelos XBee y XBee-PRO de la firma MaxStream usan 8 chips/bit, como la velocidad de los datos es de 250Kbps, al final se tiene un velocidad total de 2 Mchips/s, que son los que finalmente se transmiten a 2.4GHz. Usando la ecuación 2.1 se tiene que el ancho de banda que utiliza el módulo es de 1MHz, el cual es mucho menor que el ancho de banda entre canales, que es de 5MHz. Cabe la pena aclarar que la referencia [13] afirma que el ancho de banda es de 2MHz.

2.2.2 Antena

Una antena es el sistema conductor metálico capaz de radiar y recibir ondas electromagnéticas. Se utiliza como la interfaz entre un transmisor y el espacio libre o el espacio libre y el receptor [12].

Como se mencionó, el módulo XBee usado transmite a 2.4GHz, lo cual hace posible que use antenas tipo chip o antenas dipolo, debido a que sus dimensiones son pequeñas. Para el caso de la antena dipolo, la teoría dice que debe ser de $\frac{1}{4}$ de la longitud de onda. Es decir, la longitud del dipolo se calcula con la ecuación 2.2.

$$l = \frac{\lambda}{4} = \frac{c}{4f} \quad (2.2)$$

Donde: λ = Longitud de onda en metros.

l = la longitud de la antena dipolo en metros.

c = Velocidad de la luz en m/s (3×10^8 m/s).

f = Frecuencia en Hz (2.4GHz).

Sustituyendo los valores se tiene que:

$$l = \frac{3 \times 10^8}{4(2.4 \times 10^9)} = \frac{0.125m}{4} = 3.1cm$$

Para comparar el valor teórico contra el real, las dimensiones de la antena se midieron con una regla. La longitud del dipolo fue de 2.9cm, la cual, como se puede ver, coincide en órdenes de magnitud con el resultado obtenido.

2.3 Entradas y salidas digitales

De las 20 terminales del módulo XB24-AWI-001, ocho corresponde a entradas o salidas digitales (configurable por comandos de módem). Esto

tiene la ventaja de que el XBee puede controlar o sensar directamente sin necesidad de un microcontrolador externo. En el presente trabajo se aprovechó esta característica para estar monitoreando sensores con salida de tipo digital. Al sistema XBeeSensor se le dotó con cuatro entradas-salidas digitales con niveles TTL, por lo cual es necesario realizarle una etapa de acondicionamiento entre los niveles TTL a los que maneja el XBee.

Los niveles lógicos del módulo XBee son 3.3V para un 1 lógico y 0V para 0 lógico, que difieren en el 1 para TTL (que es de 5V). Por tal motivo es necesario implementar una etapa que adapte ambos niveles. Para realizarla se utilizó la configuración de un transistor Darlington como inversor, ya que tiene la ventaja de poseer una ganancia de corriente muy grande ($\beta > 1000$), por tal motivo se pone en corte o saturación con poca corriente.

En la figura 2.9 (a) se muestra la forma de realizar un inversor con el par Darlington. Cuando el voltaje de la resistencia de base (IN) es positivo, provoca que la salida del colector se sature, haciendo que el voltaje de salida sea 0V. Cuando el voltaje en IN es 0V, el transistor se pone en corte, haciendo que el voltaje en Out sea igual a Vcc. Para acondicionar de TTL a 3.3V los niveles lógicos, se pone $V_{cc}=3.3V$, pero si se quiere acondicionar de 3.3V a TTL $V_{cc}=5V$.

Como son varias las señales que se necesitan adaptar (cuatro señales de entrada y cuatro de salida), se necesitarían varios transistores discretos, lo cual ocuparía mucha área en el circuito impreso. Una alternativa para solucionar este problema, es utilizar un circuito integrado con ocho pares Darlington independientes. El circuito es el modelo ULN2803A de la firma *STMicroelectronics* [14]. Los ocho arreglos Darlington que contiene permiten manejar, individualmente, una corriente de hasta 500 mA. En la figura 2.9 (b) se muestra el arreglo de un par Darlington que contiene dicho circuito integrado.

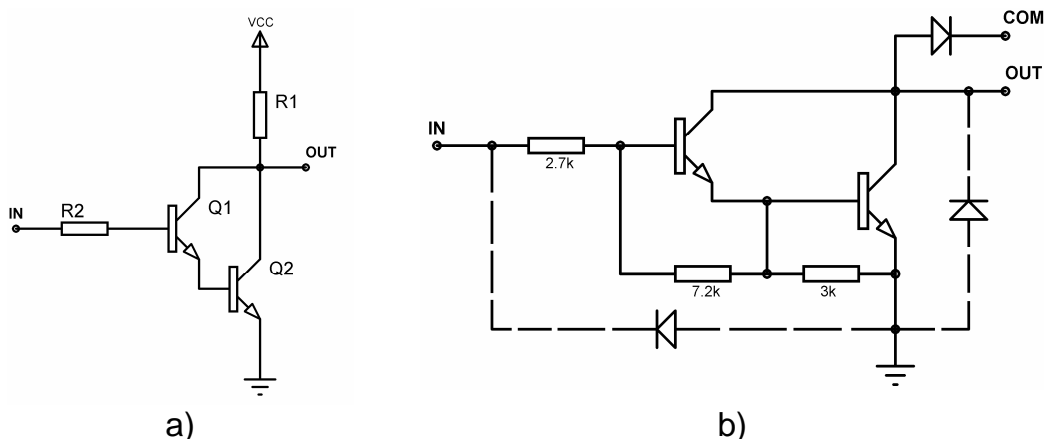


Figura 2.9. a) Par Darlington como inversor. B) Esquemático del ULN2803A.

Como el sistema va a tener cuatro entradas-salidas digitales, la cual es configurable por software. Es necesario hacer un arreglo que permita el poder manejar ambas configuraciones (como entrada o como salida), así

como un interruptor para seleccionar la entrada o la salida. En la figura 2.10 se muestra el arreglo de transistores que se utilizó para resolver este problema.

Cuando la terminal del módulo XBee es configurada como salida, el nivel de voltaje de 3.3V ingresa al par Darlington por la resistencia de base (IN1) y satura el transistor, por lo que a la salida (OUT1) se tiene un valor de 0V. Cuando el voltaje en la resistencia de base (IN1) es 0 a la salida se tiene 5V. En el conector J1 deben estar puenteados los puntos **a** y **c** para tener de esta forma la salida con nivel TTL.

Cuando la terminal del módulo XBee es configurada como entrada, los puntos **b** y **d** en el conector J1 deben estar puenteados. De este modo el voltaje de nivel TTL ingresa a la resistencia de base (IN2) y satura o pone en corte el par Darlington. Cuando esta en corte a la salida (OUT2) se tiene 3.3V los cuales entran a la terminal del XBee.

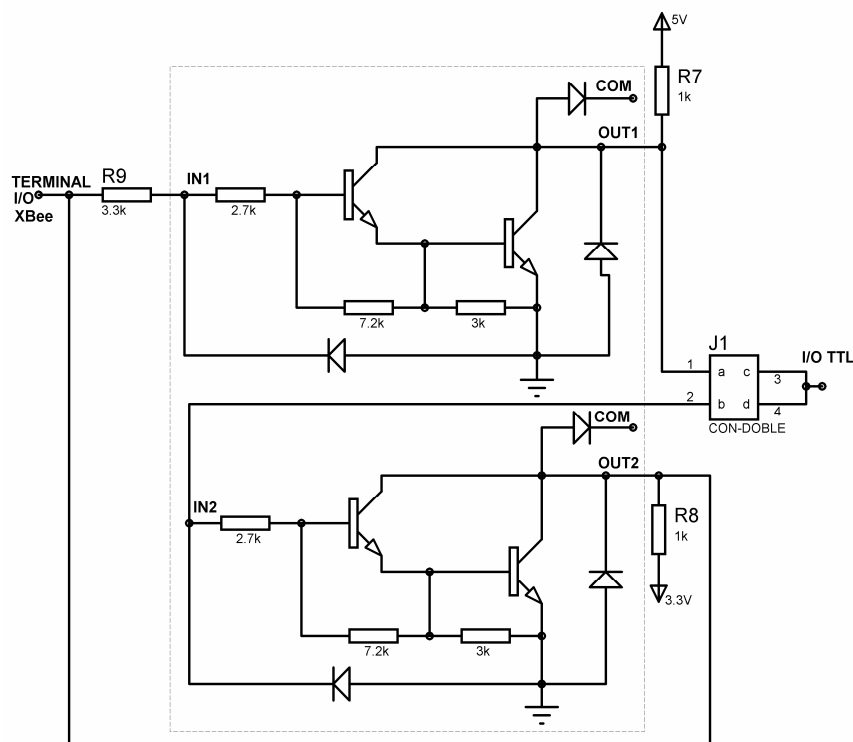


Figura 2.10. Arreglo de transistores para las entradas-salidas digitales.

En la figura 2.11 se muestra el diagrama esquemático del circuito completo que maneja las entradas-salidas con conversión de niveles de voltaje. Al circuito se agregaron unos conectores que permitirán seleccionar si las señales son entradas o salidas (de J6 a J9), esto se realizó con la finalidad de aprovechar la característica del módulo XB24-AWI-001 de que las mismas terminales se pueden configurar ya sea como entradas o como salidas.

Las terminales del módulo XBee que se usan en este trabajo son: La 20 (ADIO0), 18 (ADIO2), 17 (ADIO3) y 11 (ADIO4). Es necesario tener en cuenta esto al momento de realizar la configuración de entradas o salidas, y

para poner los niveles de salida con los comandos AT. En la tabla 2.6 se muestran los comandos AT para configurar las terminales como entradas digitales.

Tabla 2.6. Comandos AT para las entradas digitales.

Comando	Valor	Acción
D0	3	Configura la terminal 20 como entrada
D2	3	Configura la terminal 18 como entrada
D3	3	Configura la terminal 17 como entrada
D4	3	Configura la terminal 11 como entrada
IC	1D	Habilita el monitoreo de las terminales de entrada
IR	1	Activa el tiempo de muestreo de la entradas a 1ms
IT	5	Especifica que debe recolectar cinco muestras antes de trasmitirlas
WR	-	Guarda los parámetros en la memoria no volátil

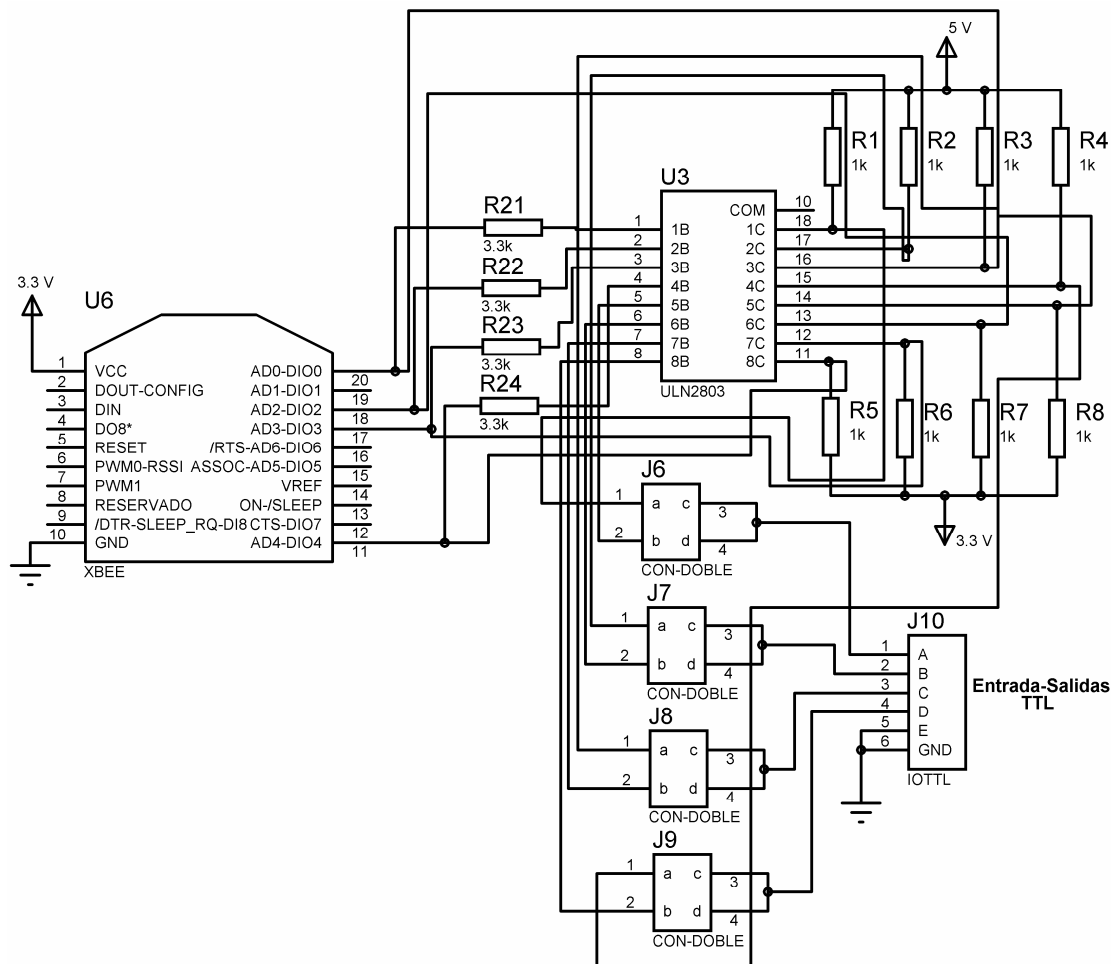


Figura 2.11. Esquemático de las entradas-salidas digitales con el XBee.

Para leer el estado de la entrada se usa el comando IS, el cual realiza un muestreo a las terminales de entrada-salida y a los ADC habilitados.

Para configurar las terminales del módulo como salidas digitales se emplean los comandos que se muestran en la tabla 2.7.

Tabla 2.7. Comandos AT para las salidas digitales.

Comando	Valor	Acción
D0	4/5	Configura la terminal 20 como activa en bajo o alto
D2	4/5	Configura la terminal 18 como activa en bajo o alto
D3	4/5	Configura la terminal 17 como activa en bajo o alto
D4	4/5	Configura la terminal 11 como activa en bajo o alto
T0	0	Mantiene su estado actual
T2	0	Mantiene su estado actual
T3	0	Mantiene su estado actual
T4	0	Mantiene su estado actual
WR	-	Guarda los parámetros en la memoria no volátil

Para cambiar el estado de la salida por medio de comandos, se usa el comando IO. Este comando considera las terminales como un mapa de bits, tal como se muestra en la figura 2.12. Como se ha mencionado anteriormente solo se usan las terminales 20, 18, 17 y 11 para entradas-salidas digitales, y las terminales que no se usan están sombreadas en la figura 2.9. Así para tener todas las salidas en alto se debe enviar el dato 0x1D.

Terminal	12	16	15	11	17	18	19	20
Bit	7	6	5	4	3	2	1	0
Función	CTS	RTS	Asociación	I/O 3	I/O 2	I/O 1	ADC	I/O 0

Figura 2.12. Mapa de bits para el comando AT IO.

2.4 Entrada y salida analógica

El módulo XBee tiene la capacidad de recibir señales analógicas y digitalizarlas. Internamente posee un ADC de diez bits. Las siete terminales de salida pueden ser configuradas para ser entradas al ADC, sin embargo para el sistema XBeeSensor, solo se dejó una terminal para este propósito.

El XBee no tiene un convertidor Digital Analógico (DAC), pero se puede generar una salida analógica en una salida digital usando un Modulador por Ancho de Pulso (PWM). El XBee proporciona dos salidas de este tipo y en este trabajo se explora esta alternativa.

El rango de voltajes que maneja la entrada analógica es de 0V a 3.3V. Sin embargo se pretende usar un rango de voltajes de 0V a +5V, por lo cual es necesario realizar una etapa de acondicionamiento con una alta impedancia de entrada.

La alternativa elegida fue utilizar un amplificador operacional (OPAMP) en configuración de seguidor. El OPAMP debe trabajar con una sola fuente de alimentación. Por tal motivo es necesario implementar un circuito que realice la atenuación para adaptarse al rango de operación del XBee. En la figura 2.13 se muestra el diagrama a bloques del circuito.

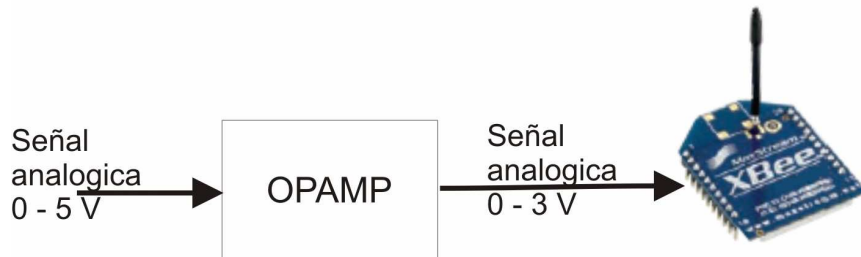


Figura 2.13. Diagrama para adecuar las señales analógicas.

EL circuito integrado que se usó es el LM358 de la marca National Semiconductor, en su presentación de ocho terminales con encapsulado SO8, de montaje superficial [15]. El integrado se alimenta con una sola fuente de 5V. En la figura 2.14 (a) se muestra el diagrama interno del integrado, en ella se observa que cuenta con dos OPAMP en el mismo encapsulado. En la figura 2.14 (b) se muestra una fotografía del circuito integrado.

Se diseñó un divisor de voltaje para obtener un voltaje máximo de 3.3V a una entrada de 5V. Con el fin de tener una alta impedancia de entrada, se usaron resistencias grandes (de 1.17M Ω y 2.15M Ω) en el divisor. La salida del divisor se conecta al OPAMP en configuración de seguidor de voltaje. En la figura 2.15 se muestra el diagrama esquemático del circuito implementado, donde se ve que la salida del OPAMP se conecta a la terminal 19 del XBee.

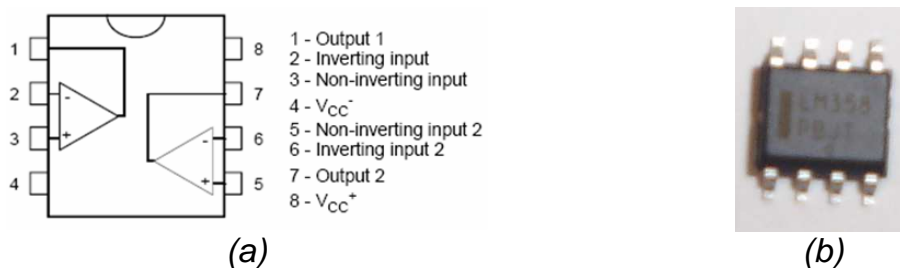


Figura 2.14. a) Diagrama del LM358. b) Encapsulado SO8.

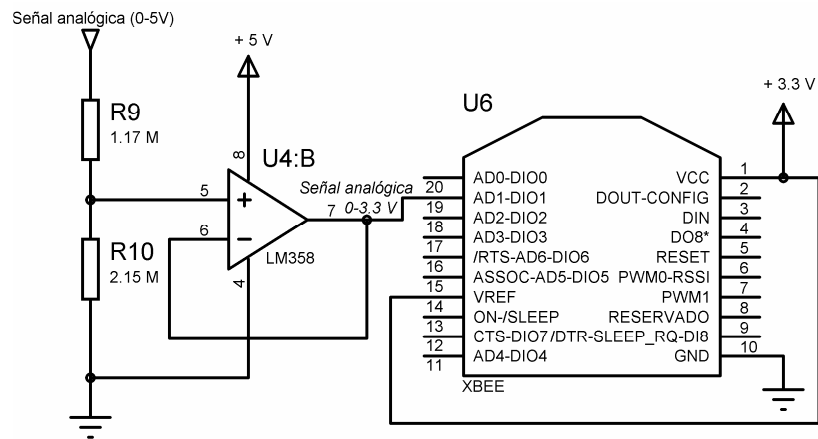


Figura 2.15. Circuito para adecuar las entradas analógicas.

Los comandos AT de configuración utilizados en el módulo XBee para que sea capaz de aceptar una señal analógica, se muestran en la tabla 2.8.

Tabla 2.8. Comandos AT para la entrada analógica.

Comando	Valor	Acción realizada
D1	2	Configura la terminal 19 como entrada analógica
IR	1	Activa el tiempo de muestreo de la entradas a 1ms
IT	5	Especifica que debe recolectar cinco muestras antes de transmitir las

La salida analógica se implementó con una salida digital a través de la técnica de PWM. En esta señal el voltaje de salida es proporcional al voltaje promedio de la señal de PWM. Para recuperarla, es necesario utilizar un filtro pasa bajas que elimine los componentes de alta frecuencia.

En la figura 2.16 se muestra el diagrama esquemático del circuito que genera la salida analógica. El filtro implementado es de primer orden de tipo RC, con una frecuencia de corte de 100Hz. Su salida está acoplada a un OPAMP como seguidor de voltaje, esto con el fin de tener una impedancia de salida baja y evitar los efectos de la carga. Para este fin se utilizó uno de los dos OPAMP que posee el circuito integrado LM358.

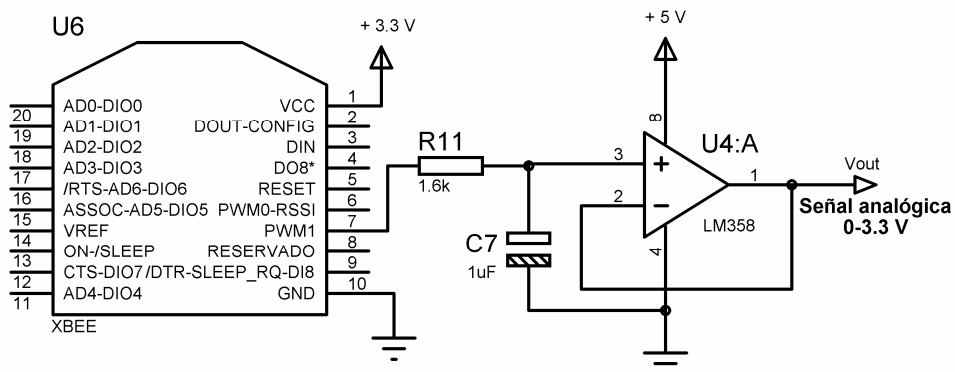


Figura 2.16. Circuito para recuperar la señal analógica.

Los parámetros del PWM se configuran también por comandos AT. Los comandos de configuración utilizados en el módulo XBee para que genere la señal PWM en base a la entrada analógica se muestran en la tabla 2.9

Tabla 2.9. Comandos AT para la salida analógica.

Comando AT	Valor	Acción
P1	2	Configura la terminal siete como salida de tipo PWM
IU	1	Habilita la UART para mostrar los datos recibidos

2.5 Indicador de nivel

La norma del estándar IEEE 802.15.4 especifica que se debe tener un indicador visual para verificar la calidad del enlace de RF. Los módulos XBee tienen una terminal con una salida PWM, cuyo ancho de pulso es función del nivel de energía del último paquete de RF recibido (la terminal seis). Cuando esta señal se hace pasar por un filtro pasabajas, se tiene el voltaje promedio de las señal de PWM. Usando comparadores de voltaje y tres LED se tiene el indicador visual del nivel de RF. En la figura 2.17 se muestra el diagrama a bloques del circuito que se implementó.

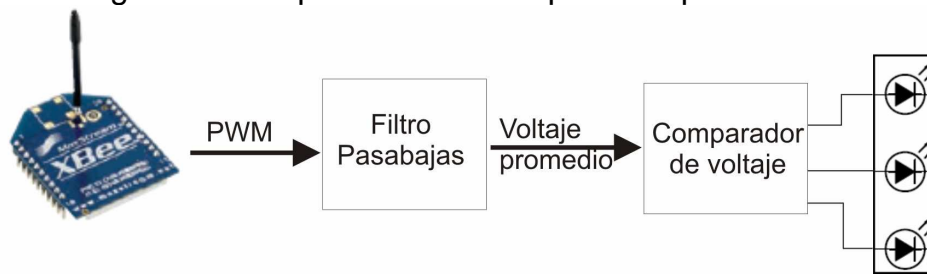


Figura 2.17. Diagrama a bloques para detectar el nivel de energía.

El tiempo en alto del PWM del módulo XBee va de 24% a 100% dependiendo del nivel detectado. Un valor inferior al 24% indica que el nivel detectado está por debajo del nivel de sensibilidad del módulo. Si la salida del PWM es cero significa que el PWM se encuentra inactivo.

El circuito integrado que se utilizó para la implementación de los comparadores de voltaje, es el LMV339 de la marca National Semiconductor. El LMV339 cuenta con cuatro circuitos de este tipo, 14 terminales y su voltaje de alimentación es de 3.3V [16]. Se eligió este integrado por tener el mismo voltaje de alimentación que el módulo XBee. En la figura 2.18 (a) se muestra su diagrama de conexiones, donde se ven el símbolo de los cuatro comparadores. En la figura 2.18 (b) se observa la fotografía del encapsulado tipo TSSOP del circuito integrado, el cual es de montaje superficial.

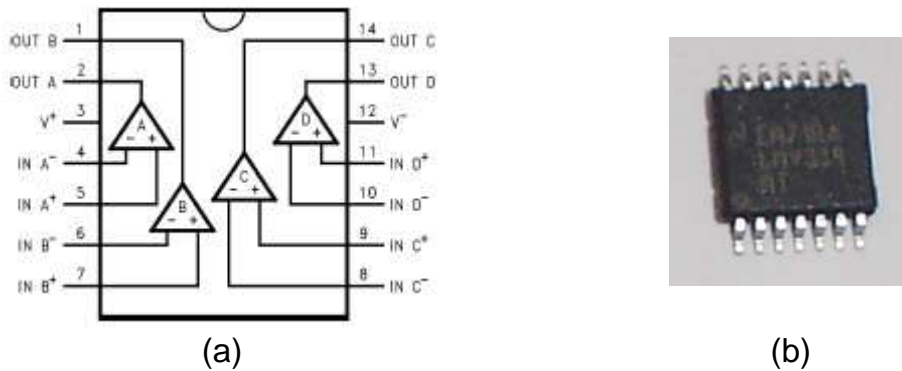


Figura 2.18. a) Diagrama esquemático del LMV339. b) Encapsulado TSSOP de 14 terminales.

En la figura 2.19 se muestra el diagrama esquemático del circuito indicador de nivel con el módulo XBee. Como se puede ver, la salida PWM del XBee es la terminal seis. El filtro pasa bajas es un RC con frecuencia de corte de 1.5Hz. La salida del filtro (en el capacitor C8) se conecta a la entrada negativa de tres comparadores. Para tener el voltaje fijo, contra el cual comparar, se hizo un divisor resistivo con cuatro resistencias (68kΩ, 56kΩ, 56kΩ y 150kΩ (de R16 a R19), las cuales entran en la terminal positiva de los OPAMP. Los LED se activan en bajo, por tal motivo cuando la salida del filtro es mayor que el voltaje de referencia, la salida del OPAMP se pone en bajo y enciende el LED correspondiente (son tres en total).

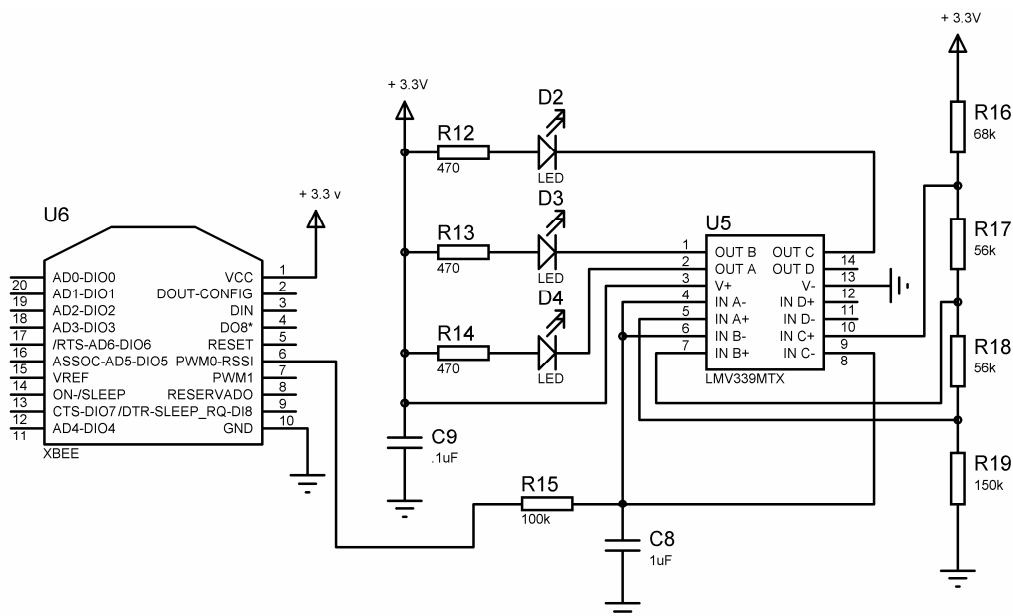


Figura 2.19. Esquemático del detector de nivel de energía

La salida del indicador del nivel de la señal recibida (*RSSI, Received Signal Strength Indication*) es activada mediante comandos AT. En la tabla 2.10 se muestra la descripción de los dos comandos asociados a esta función.

Tabla 2.10. Comandos AT para el indicador visual.

Comando	Valor	Acción
P0	1	Configura la terminal seis como salida de tipo RSSI (PWM proporcional al nivel de señal de RF)
RP	32	Indica el tiempo que permanecerá la salida del RSSI después del último paquete recibido

2.6 Fuente de alimentación

La fuente de alimentación, es un módulo que debe ser capaz de suministrar los voltajes necesarios para que funcione el módulo XBee (3.3V) y los demás componentes del sistema (5V). La energía será proporcionada por una fuente de voltaje externa (de 5 a 9V) o dos pilas tipo AA (2.4V). Los requerimientos que debe cumplir son:

- Voltaje de salida de 5V y 3.3V.
- Capacidad de operar con dos fuentes de voltaje distintas, 2.4V de pilas y una fuente externa de 6 a 9V.
- Capacidad de corriente de un Amper para alimentar el sistema.

Para poder elevar el voltaje de las pilas a +5V, se utiliza un convertidor CD/CD elevador, con lo cual se cumple el requerimiento de funcionar con pilas. Posteriormente con un regulador de 3.3V se obtiene el voltaje requerido por el módulo XBee.

Para alargar la vida de las pilas, el sistema XBeeSensor puede trabajar con una fuente de voltaje externa, y de ésta toma la energía requerida. Para seleccionar entre una y otra fuente de voltaje, se utiliza un relevador, el cual es activado por la fuente de voltaje externa. Cuando está apagado, conecta la salida de las pilas hacia el regulador. Cuando se activa, conecta la salida regulada de 5V de la fuente a la salida del interruptor, lo anterior se aprecia en la figura 2.20.

Para determinar el convertidor de CD/CD a usar, se hizo una investigación en Internet con los diferentes fabricantes de estos dispositivos, tomando en cuenta de que fuera de fácil adquisición y cumpliera con los requisitos de corriente. Se eligió el circuito integrado MAX1674EUA de la marca MAXIM [17] ya que cumple con las características requeridas.

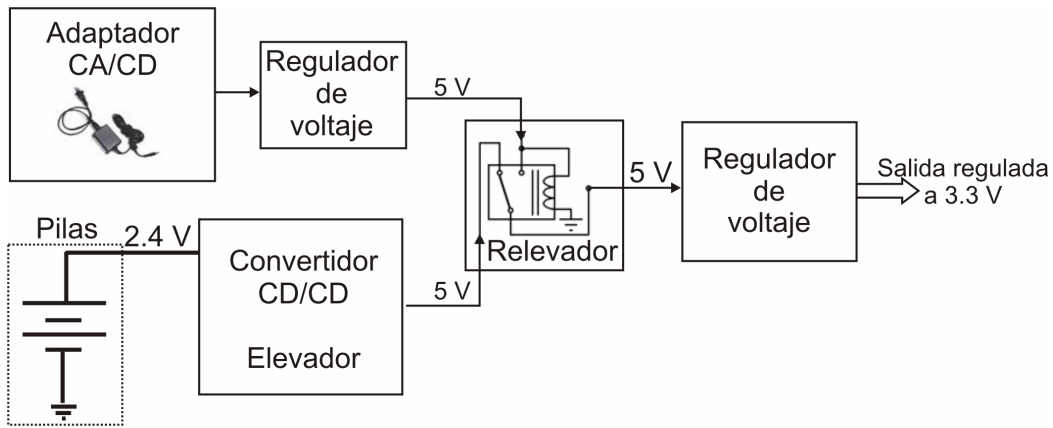


Figura 2.20. Diagrama a bloques del módulo de alimentación.

El MAX1674EUA tiene la capacidad de poder generar voltajes de 3.3V ó 5V, posee ocho terminales, una de las cuales sirve para configura el voltaje de salida. El voltaje de entrada debe estar en el rango de 0.7 a 5V o 3.3V (en función de la salida que tenga configurada). Posee una terminal de control denominada **FB**, con la cual se selecciona la salida de voltaje (se conecta a tierra para 5V, o se conecta a la terminal de salida del voltaje para 3.3V). Para su operación requiere de algunos capacitores y un inductor externo de 22μH. El fabricante recomienda, aunque no es necesario, usar un diodo schottky para aplicaciones que se alimentan con una sola pila.

En la figura 2.21 (a) se muestra el diagrama esquemático del convertidor CD/CD en configuración de 5V. En la figura 2.21 (b) se muestra una fotografía del MAX1674EUA. Como se puede apreciar tiene ocho terminales y un encapsulado tipo μMAX para montaje superficial, debido a que es la única presentación que proporciona el fabricante.

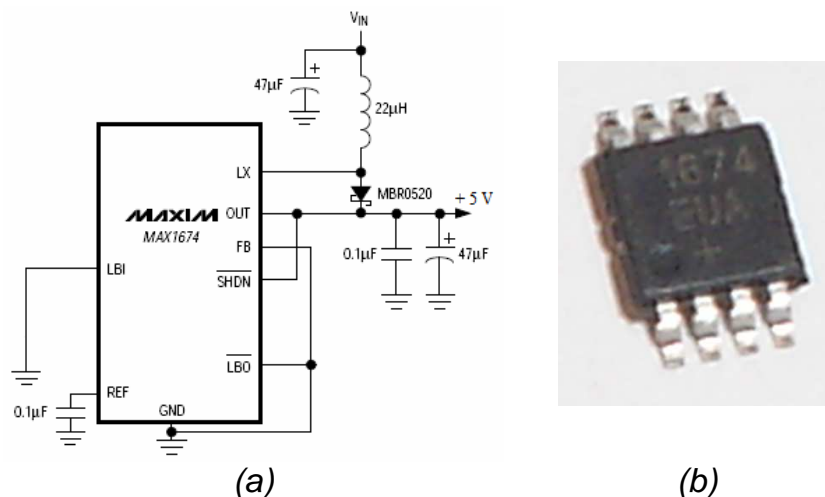


Figura 2.21. a) Esquemático del convertidor de CD/CD. B) Fotografía del convertidor CD/CD.

Para verificar el funcionamiento correcto de este dispositivo se hicieron dos pruebas, variando el voltaje de entrada (de 0.5V a 2.5V) y la

resistencia (sin carga, 470 Ω , 100 Ω , 56 Ω y 22 Ω). En la figura 2.22 (a) se muestra una gráfica del voltaje de salida ante estas condiciones. Como se puede ver en esta figura, cuando la resistencia de carga es mayor a 56 Ω , el voltaje de salida se estabiliza a 5V una vez que el voltaje de entrada es mayor a 1.3V. Con estos resultados se podría concluir que puede trabajar con una sola fuente, sin embargo al arranque requiere de un voltaje mayor.

Otra medición que se hizo fue el de la corriente que le demanda a la fuente en función del voltaje de entrada. La respuesta obtenida se muestra en la figura 2.22 (b). Como se puede ver, cuando el voltaje es pequeño demanda una gran cantidad de corriente (cerca de 900mA para la carga de 55 Ω y 100 Ω), lo cual hace que tenga una eficiencia baja. Con excepción de la carga de 22 Ω , en las demás cargas la corriente tiende a un valor constante a medida que el voltaje de entrada es superior a 1.3V.

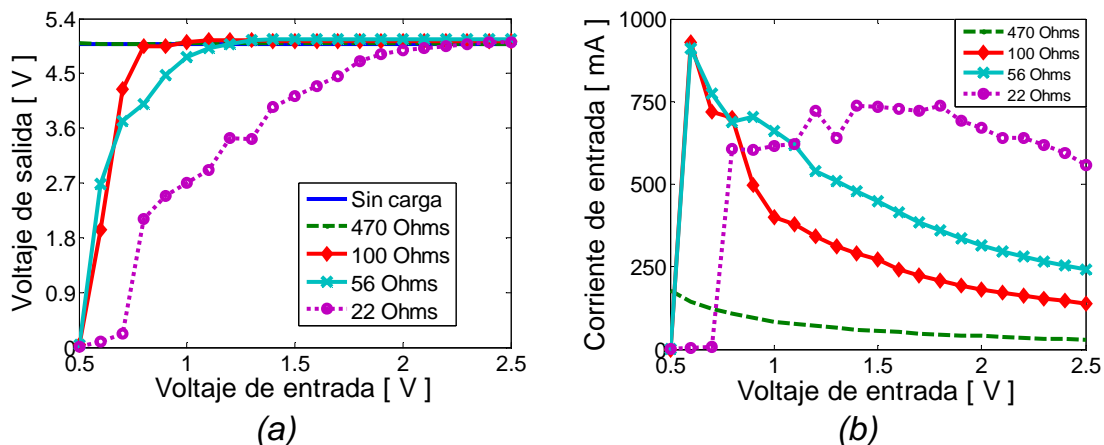


Figura 2.22. a) Voltaje de salida del MAX1674EUA. B) Corriente que demanda el MAX1674EUA.

Una medida cuantitativa del rendimiento del MAX1674EUA, ante las diferentes condiciones a las que fue caracterizado, se muestra en la tabla 2.11, en la cual se tabuló el voltaje de salida promedio y su desviación estándar. Como se puede ver, para la carga de 470 Ω (que demanda una corriente de 100mA), el voltaje de salida es prácticamente 5V y sus variaciones de ± 7 mV. Para la carga de 56 Ω (que demanda 900mA), el voltaje promedio es de 4.5V con una desviación de ± 1.19 V.

Tabla 2.11. Datos del comportamiento del MAX1674EUA.

Resistencia de carga [Ω]	Promedio del voltaje de salida [V]	Desviación estandar
470	4.99234286	0.00690649
100	4.59882381	1.25025144
56	4.54103	1.19710497
22	3.49814	1.68230554

Las variaciones obtenidas son muy grandes, sin embargo si se garantiza que el voltaje de entrada sea mayor a 1.5V, la desviación estándar

es mínima. Esto indica que la salida de voltaje es más estable, por lo tanto, es recomendable tener una alimentación de entrada mayor de 1.5V. Los datos calculados a partir de un voltaje de entrada de 1.5V se muestran en la tabla 2.12.

Tabla 2.12. Respuesta del MAX1674EUA con otro rango de alimentación.

Resistencia de carga [Ω]	Promedio de la corriente de entrada [mA]	Promedio del voltaje de salida [V]	Desviación estándar del voltaje
470	40.9090909	4.99271818	0.0060008
100	190	5.02601818	0.00403431
56	327.181818	5.06123636	0.00491269
22	666.727273	4.73924545	0.31286461

Como el módulo XBee requiere un voltaje de 3.3V, es necesario utilizar un regulador de voltaje para proporcionárselo. Después de hacer una investigación de los diferentes reguladores, se eligió el circuito integrado LF33CV de la marca *STMicroelectronics* [18]. En la figura 2.23 (a) se muestra el diagrama de conexiones del regulador de voltaje. En la figura 2.23 (b) se muestra una fotografía de este circuito integrado, donde se observa que el tipo de encapsulado es TO-220 con tres terminales.

Las principales características del LF33CV, es que tiene una capacidad de corriente de 500mA, lo cual satisface la demanda de corriente del sistema; tiene una baja caída de voltaje (0.45V) y bajas pérdidas, que lo hace particularmente apropiado para aplicaciones de bajo ruido. Es recomendado para aplicaciones con pilas o baterías.

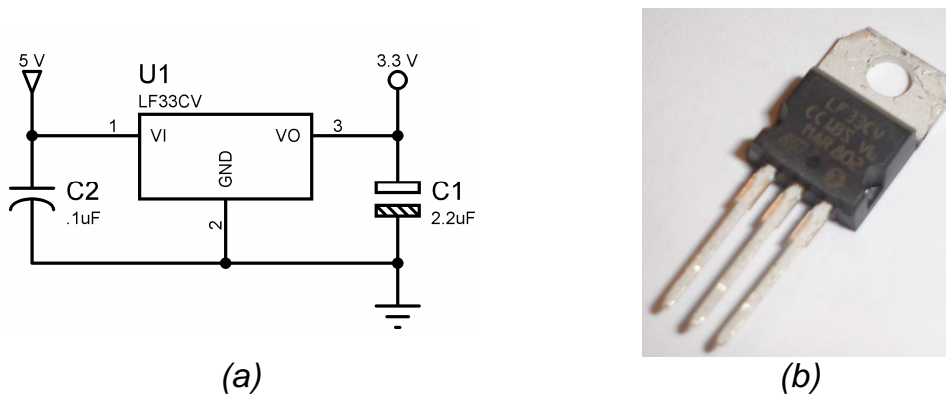


Figura 2.23. a) Diagrama de conexiones del LF33CV. B) Encapsulado TO-220.

La fuente de voltaje externa que alimenta también al sistema, puede tener variaciones de 6V a 9V, por tal motivo es necesario convertir este voltaje a 5V. Para realizar esto se usó un regulador de voltaje de 5V. El circuito integrado que se empleó es el LM7805 de la marca *STMicroelectronics* [19].

En la figura 2.24 se muestra el diagrama esquemático de todo el módulo de la fuente de alimentación. En esta figura se muestran el conector J11 que es por donde se conecta el voltaje externo, también están las pilas. El relevador RL1 conmuta la salida del regulador LM7805 o la salida del MAX1674EUA. El disparo del relevador es realizado por la fuente de voltaje externa.

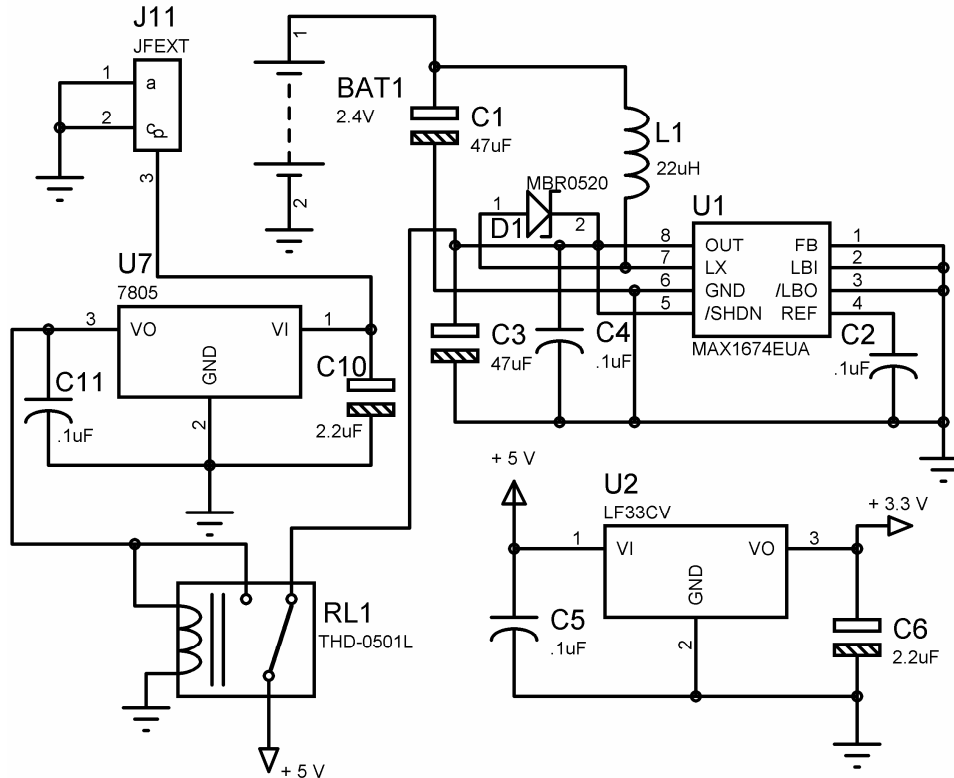


Figura 2.24. Esquemático del bloque de alimentación.

2.7 Sistema XBeeUSB

Como se dijo en la sección 2.1.2, el XBeeUSB es un sistema que se usará cuando se quiera conectar el módulo XBee a una computadora personal a través del puerto USB. Para cumplir con estos requerimientos se propone el diagrama a bloques de la figura 2.3, el cual consta de tres módulos, el XBee, el convertidor de USB a serial y el indicador. El módulo XBee es el mismo descrito en una sección anterior, por lo que en este apartado solo se describirá el bloque del convertidor de USB a serial.

Para convertir de nivel USB a TTL, y manejar todas las opciones del puerto USB, en el mercado existen varios dispositivos que permiten realizar esto en un solo circuito integrado. El manejador que se utilizó en este proyecto es el circuito integrado modelo FT232BL de la marca FTDI (*Future Technology Devices Internacional*) [20]. En la figura 2.25 (a) se muestra una fotografía del circuito integrado, donde se observa que el tipo de

encapsulado es LQFP-32 de montaje superficial. En la figura 2.25 (b) se muestra el diagrama esquemático del circuito integrado.

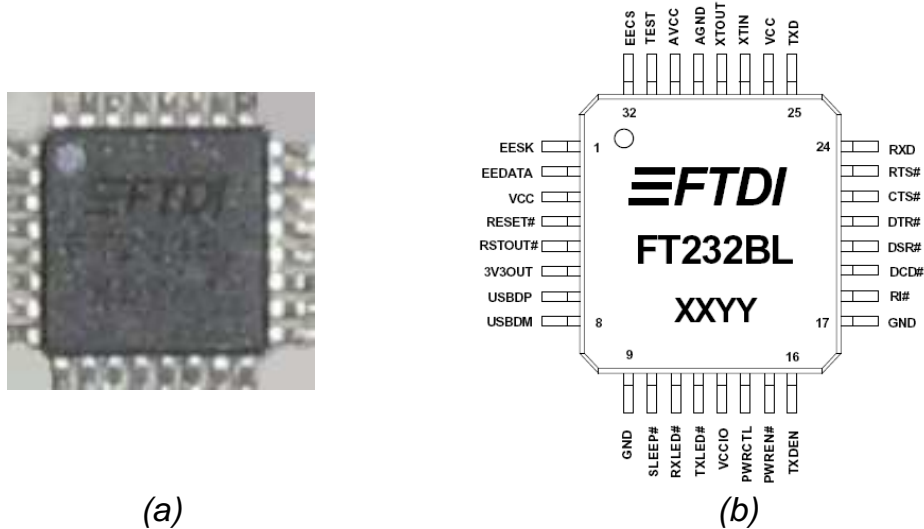


Figura 2.25. a) Encapsulado LQFP-32 del FT232BL. b) Esquemático del FT232BL.

El circuito integrado FT232BL tiene 32 terminales y convierte los niveles USB a formato serial, se alimenta con 5V. Las salidas seriales que genera pueden ser TTL ó 3.3V, esto se logra alimentando una de sus terminales (terminal **VCCIO**) con el voltaje de salida que se desea, 5V para niveles TTL, ó 3.3V para salidas con este nivel. Como el dispositivo XBee trabaja con 3.3V, se utilizó este voltaje para alimentar la terminal **VCCIO**.

Para que el FT232BL sea reconocido por el sistema operativo de la computadora, se requiere de un programa que realice esta función (mejor conocido como *driver*). Para el sistema operativo Windows XP y posteriores, se obtiene gratuitamente el *driver* de la página web del fabricante [URL17].

El circuito integrado es compatible con USB 1.1 o USB 2.0. Una vez que se instala el controlador en la computadora, ésta reconoce al FT232BL como un puerto virtual de comunicaciones seriales, de tipo COM [21].

Para aplicaciones de alta velocidad el FT232BL requiere de una memoria serial como buffer. Sin embargo para esta aplicación no es necesario por lo cual se omitió. La alimentación tanto del FT232BL como del módulo XBee que se conectará al circuito es tomada directamente del puerto USB de la computadora. El voltaje del puerto USB de la computadora es de 5V, por lo cual se utilizó un regulador de voltaje para obtener los 3.3V que necesita el dispositivo XBee. El circuito integrado que se empleó como regulador es el LF33CV, el cual ya fue descrito anteriormente.

En la figura 2.26 se muestra el diagrama esquemático de todo el sistema XBeeUSB. El conector J1 corresponde al puerto USB, las salidas de datos del manejador de USB, RTS#, CTS#, DTR#, TXD y RXD

(terminales 23, 22, 21, 25 y 24) del FT232BL se conectan a las terminales 17, 12, 9, 3 y 2 del módulo XBee para establecer la comunicación.

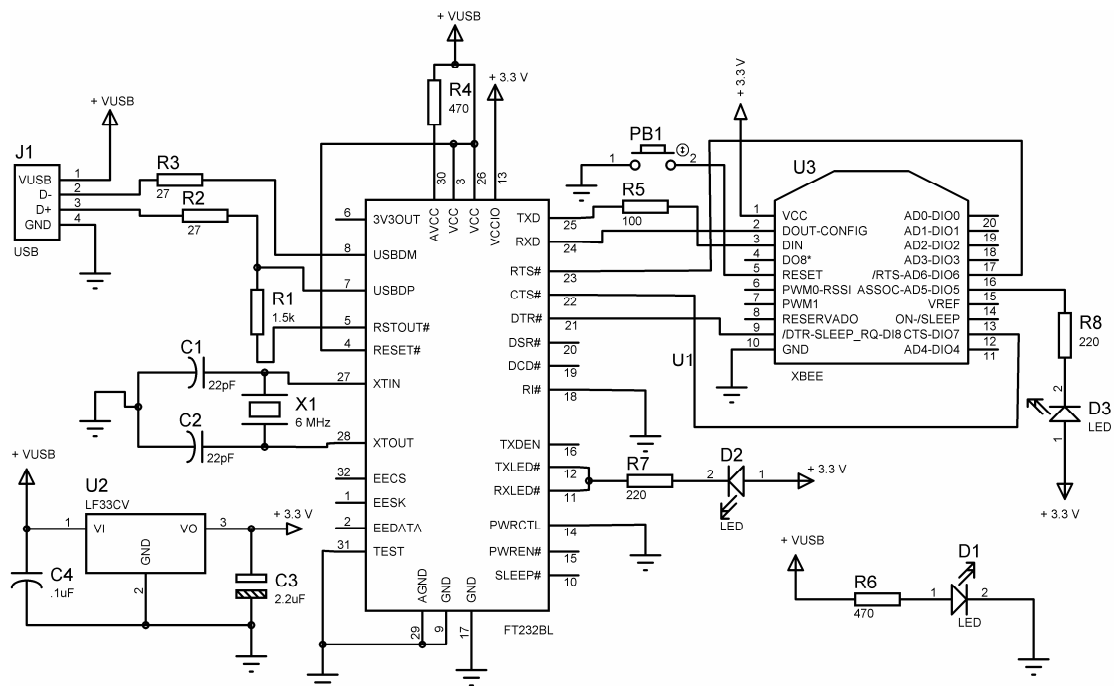


Figura 2.26. Esquemático del convertidor USB a TTL.

El circuito tiene tres LED que permiten tener un indicador visual de las actividades del sistema XBeeUSB. Un LED indica que el XBeeUSB está conectado al puerto USB, otro de ellos muestra que se está realizando una transferencia de datos entre el sistema XBeeUSB y la computadora, finalmente el otro LED indica si el módulo XBee conectado al sistema está asociado a una red.

Una vez que el XBee este montado en su zócalo, para interactuar con él se puede hacer uso de un programa para comunicaciones seriales como el HyperTerminal de Windows o el X-CTU que proporciona el fabricante MaxStream.

Capítulo 3. Pruebas y resultados

En este capítulo se describen las pruebas realizadas a nivel de sistema de los dos bloques que se fabricaron. Para probar y configurar el rendimiento de los sistemas XBeeSensor y XBeeUSB, se utilizó el programa X-CTU que es suministrado gratuitamente por la empresa MaxStream, fabricante de los módulos XBee.

Una vez finalizado el diseño del sistema, se hicieron pruebas a nivel de tableta de conexiones, con el fin de verificar el correcto funcionamiento de cada uno de los módulos. Se tuvieron que realizar algunos ajustes para que funcionara correctamente. Posteriormente se diseñaron y fabricaron las tarjetas de circuito impreso del XBeeSensor y el XBeeUSB. Finalmente se montaron los componentes y se probó que funcionará de acuerdo a como se había diseñado. La técnica de fabricación empleada fue la de planchado.

3.1 Descripción de los sistemas XBeeSensor y XBeeUSB

Como se mencionó en el capítulo dos, el sistema XBeeSensor permite manejar cuatro sensores con entrada o salida digital (niveles TTL), una entrada analógica (en el rango 0 a 5V) y una salida analógica de 0 a 3.3V. Toda la información es enviada o recibida en forma inalámbrica siguiendo las normas del protocolo IEEE 802.15.4. El dispositivo que permite realizar todas estas funciones es el XB24-AWI-0001 de la marca MaxStream. Todo el sistema puede ser alimentado por dos pilas AA o una fuente de voltaje externa de 6 a 9V.

En la figura 3.1 se muestra la vista superior (lado componentes) del sistema XBeeSensor. En la parte central de la figura se ve el módulo XBee. En la parte superior izquierda están el conector para la fuente de voltaje externa y el de las pilas. Las terminales del extremo derecho corresponden a las entradas-salidas digitales (I/O 0 a la 4). Las dimensiones de la tarjeta son de 9.5cm x 5cm. Las terminales marcadas como Vin y Vout son para el voltaje de entrada y salida analógico. Se dejaron disponibles las señales de manejo de una interfaz de comunicaciones seriales, en el conector J5 (RTS, CTS y DTR).

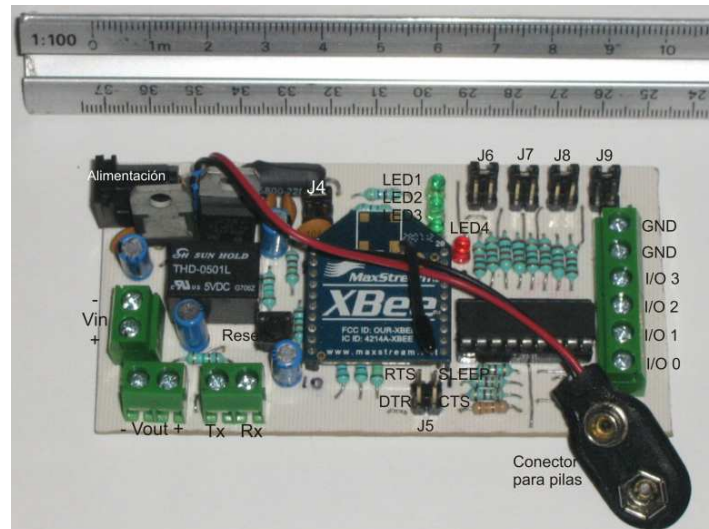


Figura 3.1. Fotografía del módulo XBeeSensor.

El sistema XBeeSensor tiene la capacidad de manejar módulos XBee de la serie 1 ó 2, el puente J4 (*jumper*) se usa para seleccionar el tipo de módulo XBee a usar. La posición que tiene J4, en la figura 3.1, sirve para usar un módulo de la serie 1. Los puentes J6 a J9 configuran las terminales, I/O 0 a I/O 3, como entradas o salidas. En el apéndice A se muestran con más detalle las características del sistema XBeeSensor.

El sistema XBeeUSB permite establecer la comunicación entre un módulo XBee y una computadora personal, de tal manera que le da la capacidad de que se conecte a una red de este tipo. También sirve para configurar las diferentes opciones de los módulos XBee que estén integrados a una red. Para hacerlo más compacto, se decidió que se alimentara directamente con el voltaje que provee el puerto USB de la computadora. Con un regulador de voltaje se baja éste de 5V a 3.3V.

En la figura 3.2 se muestra la fotografía del sistema XBeeUSB, cuyas dimensiones son de 5cm x 4.5cm. Como se puede ver, en la parte izquierda de ella esta el conector USB. El manejador de USB, el FT232BL, no se ve porque esta en la cara de soldadura de la placa. El XBeeUSB soporta a los dispositivos XBee de la serie 1 y 2 sin necesidad de realizar un cambio en el hardware, esto es posible debido a que son compatibles en la distribución de terminales.

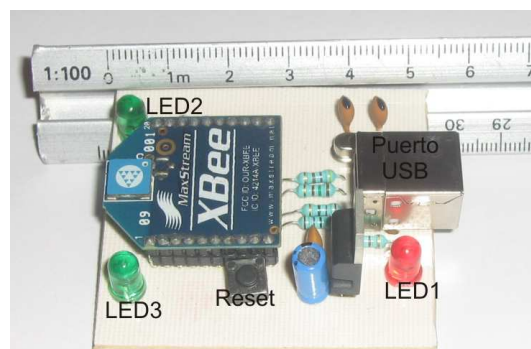


Figura 3.2. Fotografía del módulo XBeeUSB.

3.2 Configuración y pruebas

Una vez que se mostró la forma final de los dos sistemas, lo siguiente es probar el correcto funcionamiento de ambos módulos. Por tal motivo la primera prueba fue verificar la conexión de ambos módulos con y hacia la computadora. Las siguientes pruebas fueron verificar las entradas y salidas digitales, así como las analógicas. Posteriormente se probaron algunas opciones de configuración de los módulos de la serie 1 y 2.

Para realizar las configuraciones y monitoreo de los diferentes tramas y opciones de trabajo de ambos módulos, se usó el programa X-CTU, que es utilizado como terminal de comunicaciones seriales. Para mayor información acerca de este programa consultar el apéndice C.

3.2.1 Pruebas del sistema XBeeUSB

La primera prueba que se ejecutó en el sistema XBeeUSB fue verificar la existencia de comunicación entre éste y la PC, así como leer la configuración del módulo a través del puerto USB. Cuando se ejecuta el programa X-CTU en la PC se pueden ver las opciones de configuración que trae de fábrica o modificarlas. La figura 3.3 muestra las conexiones que se realizaron entre el puerto USB de una computadora y el sistema XBeeUSB. La computadora utilizada es una portátil marca Toshiba con procesador Intel Core Solo T1350 a 1.86GHz, con 1GB de RAM y sistema operativo Windows XP SP2.

La primera vez que se conecta el módulo XBeeUSB a la computadora, se debe instalar el *driver* del USB (el cual, como ya se mencionó se descarga del sitio del fabricante). Siguiendo todas las instrucciones, cuando se termina la instalación el sistema operativo lo reconoce como un puerto virtual de tipo COM. En este caso el puerto asignado fue el COM4. Posteriormente se ejecuta el programa X-CTU, cuya ventana principal se muestra en la figura 3.4. Si todo esta bien el módulo XBee es detectado en la ventana **Selecc Com Port**, desde la cual se pueden cambiar las opciones de comunicación (Baud rate, número de bits, paridad, control de flujo).

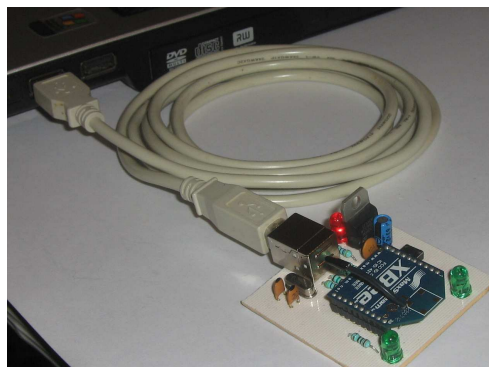


Figura 3.3. Montaje para probar el puerto USB.

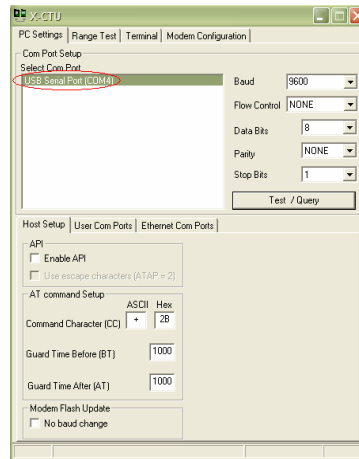
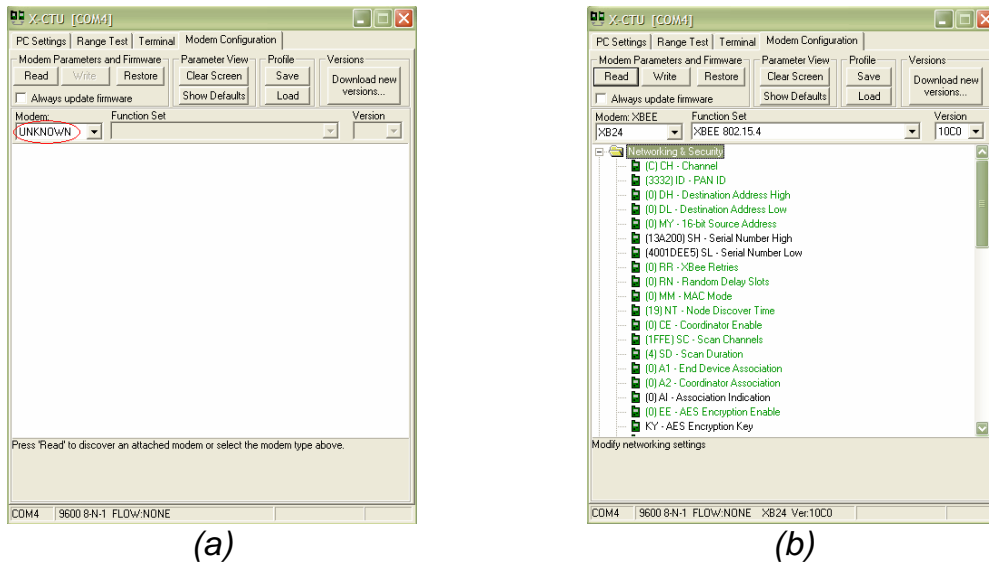


Figura 3.4. Interfaz principal del software X-CTU.

En la opción **Modem Configuration**, cuya interfaz se muestra en la figura 3.5 (a), se lee la configuración que tiene el módulo XBee que esta conectado a la PC. Presionando el botón **Read**, el programa lee la configuración actual del módulo XBee, la información recibida se muestra en la figura 3.5 (b) (ésta puede variar dependiendo de cada módulo).



(a) (b)
Figura 3.5. Lectura del módulo XBee con el software X-CTU.

3.2.1.1 Comunicación entre dos módulos XBeeUSB

Para verificar el correcto funcionamiento del sistema XBeeUSB, se realizó una prueba que consiste en enviar y recibir datos entre dos XBeeUSB, usando para ello, dos PC's. En la figura 3.6 se muestra el diagrama conceptual de esta prueba.

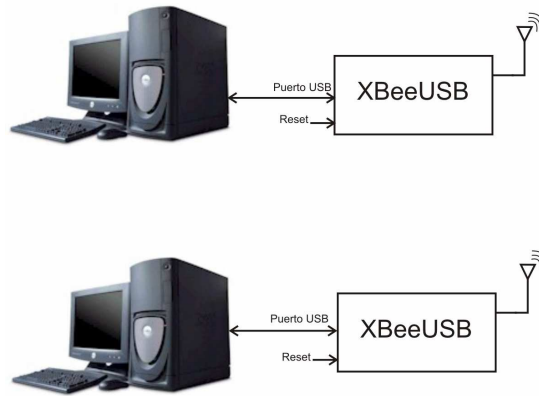


Figura 3.6. Prueba del sistema XBeeUSB.

Con el fin de verificar la tasa de error de transmisión de datos entre ambos equipos, se procedió a enviar datos de una computadora a otra, el transmisor envía una trama de 100 caracteres, el receptor los recibe y los reenvía. El transmisor hace una comparación entre los datos enviados y los recibidos, con base en ello se obtiene la tasa de error. Ambos programas se hicieron en Microsoft Visual Basic 6.0. El transmisor se le llamó XBeeUSB TX-RX y el receptor XBeeUSB REPETIDOR, sus interfaces de usuario se muestran en la figura 3.7 (a) y (b).

Las velocidades que se probaron fue desde 9600bps hasta 115200 bps, en todos los casos la tasa de error fue del 0%. Los caracteres enviado y recibidos se observan en la figura 3.7.

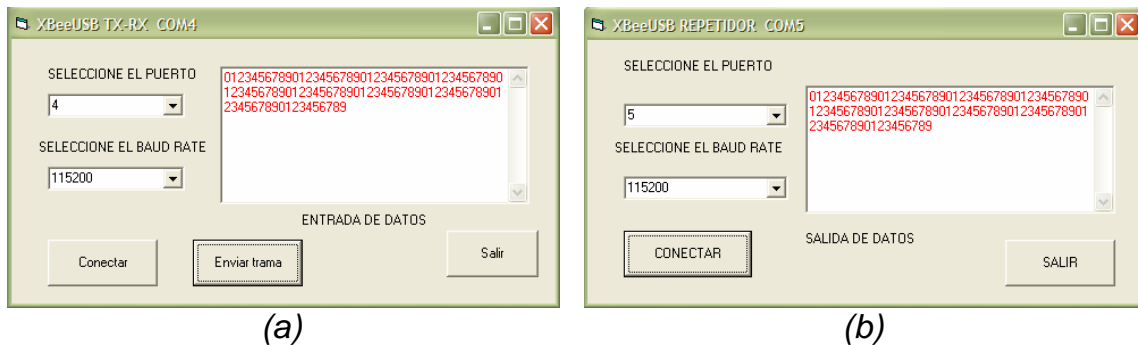


Figura 3.7. a) Programa que envía una trama. B) Programa que reenvía la trama.

Otra prueba que se realizó fue la de alcance. Para ello se utilizó un XBeeUSB y un XBeeSensor, a una velocidad de los datos de 115200 bps. El módulo XBeeSensor se configuró en modo de “*loop back*” (los datos que recibe por su puerto serie se conectan en el transmisor, uniendo TX con RX). El XBeeUSB se conectó a una computadora portátil y se ejecutó el programa X-CTU en la opción de “*range test*” (prueba de alcance). La trama enviadas constaba de 32 caracteres que fueron: 0123456789;:;<=>?@ ABCDEFGHIJKLMNOP. El X-CTU permite, en modo de *loop back*, que la trama que envía la reciba y si algún carácter es erróneo, considera la trama inválida, además tiene un medidor del nivel de la señal de RF en dBm. Se

enviaron y recibieron 50 veces la misma trama. En la figura 3.8 se muestra el diagrama conceptual de esta prueba.

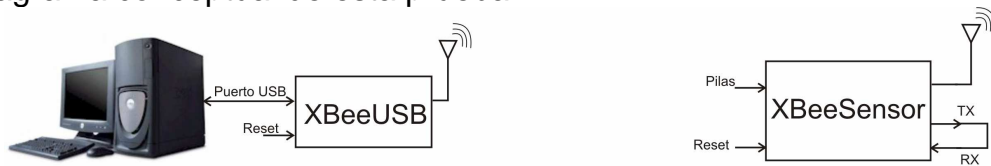


Figura 3.8. Prueba de alcance.

El transmisor y el receptor se colocaron sobre sillas a una altura de 50cm sobre el nivel del piso. Ambos elementos tenían línea de vista. Se dejó fijo el XBeeUSB y se varió la distancia del XBeeSensor. La distancia de separación se varió de 10m a 50m con incrementos de 10m, finalmente se probó en un pasillo a una distancia de 120m. Los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 3.1, como se puede ver hasta los 50m la tasa de error fue del 0%. Sin embargo a 120m, la tasa de error fue del 18%, pero el nivel de la señal fue de -94dBm, aproximadamente se tiene una atenuación de 3dBm por cada 10m.

Tabla 3.1. Datos de la prueba de alcance.

Distancia [m]	Tasa de error [%]	Nivel [dBm]
10	0	-63
20	0	-66
30	0	-70
40	0	-76
50	0	-79
120	18	-94

También se realizó una prueba dentro de un edificio, entre el emisor y el receptor había una pared de ladrillo rojo a la mitad. El resultado fue que a 17.6m, y con una pared de obstáculo se obtuvo una tasa de error de 0% y un nivel de -70dBm, igual al que se tenía a 30m con línea de vista.

3.2.2 Pruebas del sistema XBeeSensor

Para probar las diferentes opciones del XBeeSensor, se utilizaron dos módulos de este tipo, uno va a funcionar como **entrada remota** y otro como **salida remota**, de tal manera que el estado que cambie en la entrada remota, es transferido hacia la salida remota sin intervención de otro módulo o una computadora. Las opciones a verificar son las entradas y salidas digitales, la entrada y salida analógica y el módulo trabajando como coordinador o dispositivo final.

Antes de realizar las pruebas es necesario configurar cada módulo XBee de los dos módulos XBeeSensor. Para ello es necesario desconectarlo de su zócalo y conectarlo en el sistema XBeeUSB, correr el programa X-CTU, configurar las entradas-salidas digitales o la entrada analógica dependiendo de la prueba a realizar, así como establecer las

direcciones de la fuente y el destino (entrada o salida remota respectivamente) para el envío de datos.

El equipo de medición usado para realizar las pruebas fueron: Para medir las entradas-salidas digitales un analizador de estados lógicos modelo E9340A [22], para las mediciones analógicas el osciloscopio modelo 54621^a [23] y para generar señales TTL o senoidal el generador de funciones modelo 33120^a [24], todos ellos de la firma Agilent Technologies. Estos equipos tienen la opción de enviar las mediciones hacia una PC vía una interfaz GPIB, por lo cual todas las mediciones se obtuvieron de esta forma.

3.2.2.1 Entradas y salidas digitales

En esta prueba se emplean los dos sistemas XBeeSensor, antes de comprobar las entradas o salidas digitales, lo primero que hay que hacer es indicarle al módulo XBee cuál va a ser entrada o salida. Una vez que se ha definido esto, el estado de la entrada puede ser monitoreado desde la PC o, de forma automática, la entrada de un módulo puede ser enviada hacia la salida de otro módulo (cuando ocurre un cambio de estado).

En la figura 3.9 se muestra un diagrama conceptual de la prueba. El módulo que funciona como monitor del estado lógico se le llamará **entrada remota** y el que pone su salida se le llamará **salida remota**. Esta opción tiene que ser previamente configurada. La señal digital de tipo TTL es proporcionada por el generador de funciones, la cual se conecta a la terminal I/O 0 del módulo denominado entrada remota. El estado que tenga esta terminal se va mostrar en la terminal I/O 0 de módulo denominado salida remota. Ambas terminales se monitorean con el analizador de estados lógicos.

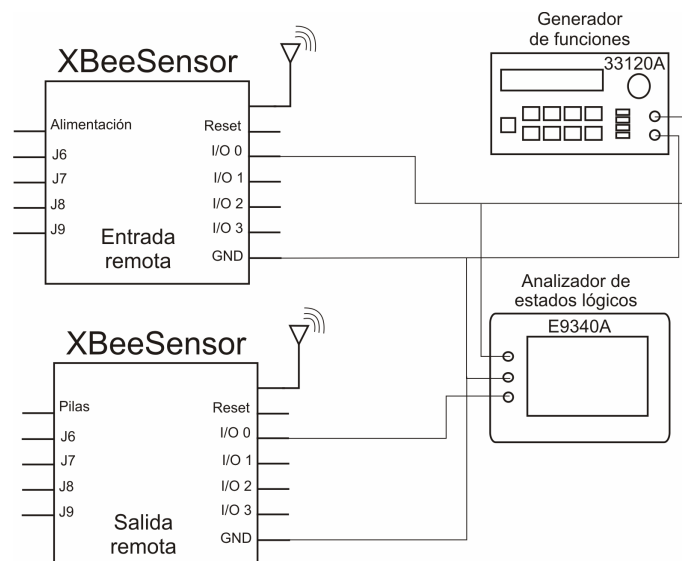


Figura 3.9. Diagrama a bloques de la conexión de entrada o salida digital.

La serie de comandos empleados para configurar las terminales del módulo XBee como entradas o salidas se muestran en la figura 3.10(a) y (b) respectivamente. En esta figura se muestra la ventana *Terminal* del programa X-CTU con los comandos AT empleados para realizar esto. Los caracteres que están en color azul son ingresados por el usuario, los de color rojo son los que devuelve el módulo XBee como respuesta al comando usado.

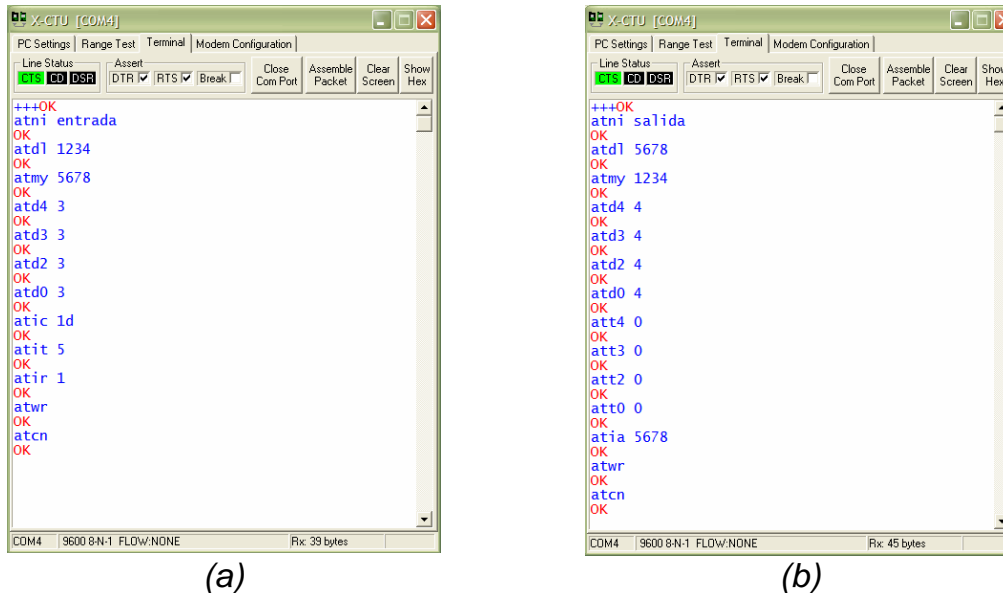


Figura 3.10. a) Configuración para entradas digitales. b) Configuración para salidas digitales.

La configuración del sistema **entrada remota** son: Las 4 terminales entradas digitales, tiempo de muestreo de 1ms, número de muestras 5, dirección del módulo 5678 y la dirección destino 1234. La configuración de **salida remota** es: Dirección fuente 5678 (acepta los datos de cualquier dirección si es configurado con el comando ATIA con un valor de FFFF), las 4 terminales digitales son salidas y la salida de la UART del módulo XBee esta habilitada.

En la figura 3.11 se muestran las señales medidas con el analizador de estados lógicos. La señal del generador que se conecta en la **entrada remota**, es la marcada en color azul en el canal 0 (llamada **Pod2:Ch0**), es una señal cuadrada de 10Hz. La señal de color rojo en el canal 1 (nombrada **Pod2:Ch1**), es la que sale del módulo **salida remota** y tiene la misma frecuencia que la entrada (10Hz). Con los marcadores de la figura, se observa que existe un retraso en la señal de salida de 4.922ms con respecto a la señal de entrada. Este retardo es función del tiempo que tarda en adquirir la medición, enviarla al módulo remoto y poner el nivel en la salida.

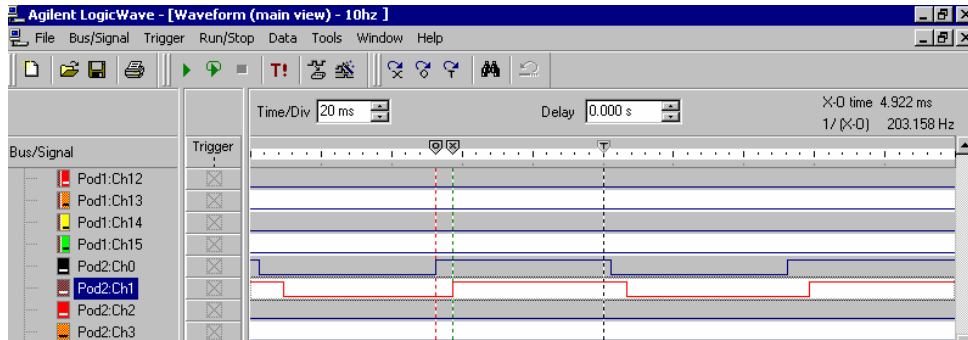


Figura 3.11. Señales obtenidas en la prueba de las entradas-salidas digitales.

Otra prueba fue el conectar la misma entrada digital a las cuatro entradas remotas y verificar los estados de las salidas remotas. En la figura 3.12 se muestran las mediciones obtenidas, las 4 señales de entrada se monitorean con los canales 0 al 3 del analizador de estados lógicos (se denominan Pod2:Ch0 – Pod2:Ch3) y las 4 señales de salida se conectan a los canales 4 al 7 (llamados Pod2:Ch4 – Pod2:Ch7). En esta prueba se observa un tiempo de retraso de 10.397ms con respecto a la señal de entrada y no hay ninguna variación en la frecuencia (10Hz). El aumento en el retraso se debe a que cada módulo tiene que procesar más información que si se usa una sola entrada o salida.

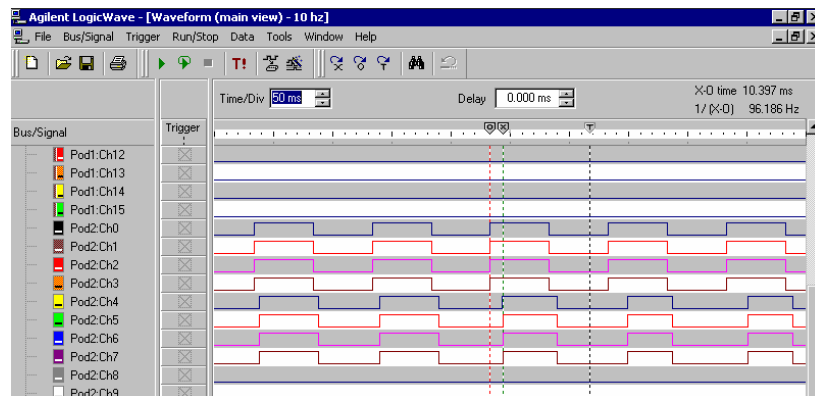


Figura 3.12. Prueba de entradas-salidas digitales.

Para ver el flujo de datos entre la entrada y salida remota, al módulo **salida remota** se le habilitó la salida de datos a la UART, de tal manera que todos los datos válidos que son recibidos por RF se envían al puerto serial del módulo XBee. Dichos datos están en formato de interfaz de programación de aplicaciones (*API, Application Programming Interface*). En la figura 3.13 se muestra un ejemplo de la trama recibida con datos de las entradas digitales, éstos se muestran en formato Hexadecimal.

```
7E 00 12 83 56 78 2E 00 05 00 1D 00 14 00 14 00 14 00 14 00 14 FA
```

Figura 3.13. Trama recibida con información de las entradas digitales.

La interpretación del significado de cada dato de la trama de la figura 3.13 se muestra en la tabla 3.2. Esta trama consta de 22 bytes. El primer y último byte corresponden al delimitador de inicio y al verificador de errores.

Tabla 3.2. Salida de la UART del sistema configurado como salida digital.

Byte	Descripción
7E	Delimitador de inicio
00 12	Longitud en Bytes
83	Byte del identificador API para direcciones de 16 bits.
56 78	Bytes de la dirección fuente
2E	Bytes del valor RSSI
00	Byte de opción
05	Byte que indica la cantidad de muestras
00 1D	00000000 00011101 Indicador del mapeo de las terminales*
00 14 00 14 00 14 00 14 00 14	Datos obtenidos de las terminales configuradas como entradas digitales. Que indican que la entrada 0 (I0)= 0, I1=1, I2=0, I3=1.
FA	Check Sum

*Mapeo de los bits donde se indica qué terminales están habilitadas. Ax corresponde a los ADCx y Dx corresponde a las entradas-salidas digitales.

MSB = 00								LSB = 1D							
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	1
-	A5	A4	A3	A2	A1	A0	D8	D7	D6	D5	D4	D3	D2	D1	D0

3.2.2.2 Configuración y prueba de la entrada y salida analógica

El sistema XBeeSensor tiene una entrada analógica en un rango de 0 a 5V, la cual es digitalizada por su convertidor ADC. El valor digitalizado es enviado hacia un módulo remoto o la computadora. El mismo módulo tiene una salida de PWM cuyo ancho de pulso es función del voltaje promedio que se requiere a la salida. Pasando esta señal por un filtro pasa bajas se recupera la señal analógica en el rango de 0 a 3.3V.

Para probar la entrada y salida analógica se emplearon dos sistemas XBeeSensor, cada uno con su respectivo módulo XBee. Uno de ellos será denominado **entrada remota** y es por el cual ingresará la señal analógica en el rango de 0 a 5V. El circuito que convierte el valor digital recibido en la señal analógica, llamado **salida remota**, es el que recupera la señal analógica en el rango de 0 a 3.3V. Estas conexiones se esquematizan en la figura 3.14.

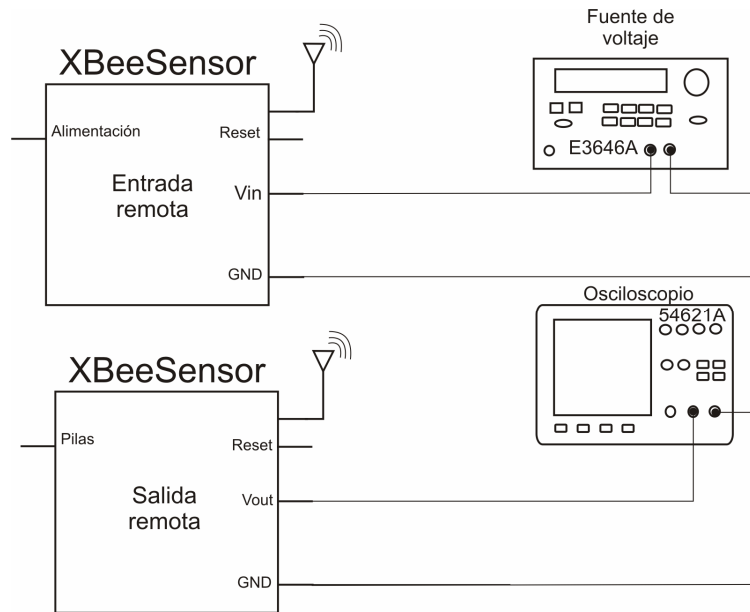


Figura 3.14. Diagrama de conexiones para la entrada-salida analógica.

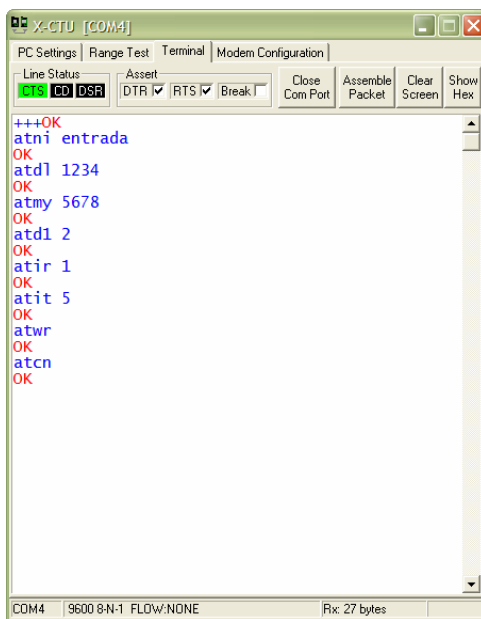
Los comandos AT para configurar la entrada y salida analógica se muestran en la figura 3.15(a) y (b) respectivamente. El módulo **entrada remota**, tiene una frecuencia de muestreo de 1ms, su dirección es 5678 y toma cinco muestras antes de enviar las mediciones, éstas las empieza a tomar inmediatamente después de que es configurado. El módulo denominado **salida remota**, acepta datos provenientes de la dirección fuente 5678 (acepta datos de cualquier dirección si es configurado con el valor FFFF).

Como el voltaje de entrada esta en el rango de 0 – 5V y el de salida de 0 – 3.3V, existe una atenuación, la cual se ve afectada por el divisor de voltaje que lo realiza. En la Tabla 3.3 se muestra la caracterización del efecto del divisor de voltaje, las mediciones obtenidas se comparan con el valor teórico esperado. En el módulo **entrada remota** se ingresó el voltaje en el rango de 0 – 5V, y en la salida remota se tomaron las lecturas del voltaje de salida.

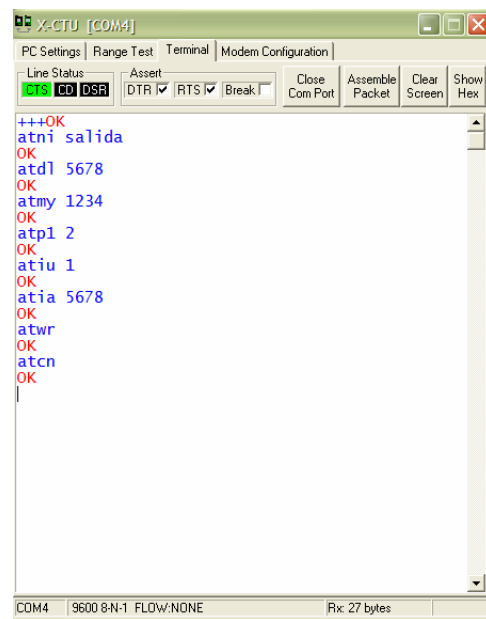
Tabla 3.3. Conversión de niveles de voltaje.

Vin [V]	Vout teórico [V]	Vout medido [V]	% de error
0.1	0.0648	0.085	31.1728
0.2	0.1295	0.1486	14.7490
0.4	0.2590	0.2792	7.7992
0.6	0.3886	0.4094	5.3525
0.8	0.5181	0.535	3.2619
1	0.6476	0.673	3.9222
1.2	0.7771	0.811	4.3624
1.4	0.9066	0.919	1.3677
1.6	1.0361	1.046	0.9555
1.8	1.1657	1.169	0.2831
2	1.2952	1.298	0.2162
2.2	1.4247	1.423	0.1193
2.4	1.5542	1.554	0.0129

2.6	1.6837	1.686	0.1366
2.8	1.8133	1.813	0.0165
3	1.9428	1.938	0.2471
3.2	2.0723	2.074	0.0820
3.4	2.2018	2.201	0.0363
3.6	2.3313	2.324	0.3131
3.8	2.4608	2.455	0.2357
4	2.5904	2.57	0.7875
4.2	2.7199	2.691	1.0625
4.4	2.8494	2.83	0.6808
4.6	2.9789	2.96	0.6345
4.8	3.1084	3.085	0.7528
5	3.2380	3.211	0.8338



(a)



(b)

Figura 3.15. a) Configuración para la entrada analógica. B) Configuración para la salida analógica.

En la figura 3.16 (a) se muestra la gráfica de voltaje de entrada contra el voltaje de salida, tanto teórico como el medido. Se puede apreciar que casi no hay diferencia entre ambas. Sin embargo, graficando el error (figura 3.16 (b)), en el rango de 1.5V a 4V el error es mínimo.

La salida de datos a la UART del módulo denominado **salida remota** se habilitó para recibir la trama de datos cuando se hacia la prueba. Como se mencionó anteriormente, el módulo utiliza el formato de Programación de Aplicaciones. En la figura 3.17 se muestra un ejemplo de la trama recibida con datos del ADC1.

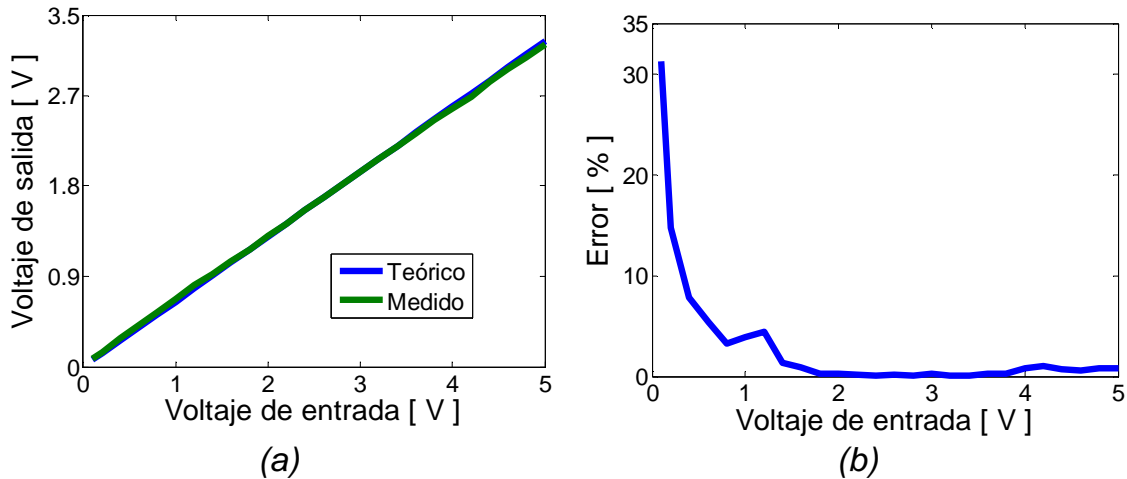


Figura 3.16 a). Conversión de niveles de voltaje. b) Porcentaje de error en la conversión de niveles.

```
7E 00 12 83 56 78 2E 00 05 04 00 02 FB 02 FC 02 FD 02 FC 02 FC 81
```

Figura 3.17. Trama recibida con información de la señal analógica.

La explicación de la información contenida en la trama de datos se muestra en la tabla 3.4. Los datos están en formato hexadecimal, las entradas salidas digitales están deshabilitadas, el voltaje a la entrada del ADC fue de 3.8V. El módulo se configuró para tomar cinco muestras y después de hacerlo transmitirá el valor digital de ellas.

Tabla 3.4. Datos a la salida de la UART.

Byte	Descripción
7E	Delimitador de inicio
00 12	Longitud en Bytes
83	Byte del identificador API para direcciones de 16 bits.
56 78	Bytes de la dirección fuente
2E	Bytes del valor RSSI
00	Byte de opción
05	Byte que indica la cantidad de muestras
04 00	00000100 00000000 Indicador del mapeo de las terminales*
02 FB 02 FC 02 FD 02 FC 02 FC	Datos obtenidos del ADC1. (El voltaje máximo de 3.3V se representa con 03 FF). Por lo tanto 02 FB = 2.461, 02 FC = 2.464, 02 FD = 2.467.
81	Check Sum

*Mapeo de los bits donde se indica que terminales están habilitadas. Ax corresponde a los ADCx y Dx corresponde las entradas-salidas digitales.

MSB = 04								LSB = 00							
0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
-	A5	A4	A3	A2	A1	A0	D8	D7	D6	D5	D4	D3	D2	D1	D0

Para verificar el funcionamiento de la salida analógica del módulo salida remota, se le conectó un osciloscopio a la salida y se realizaron mediciones a la salida del PWM y el filtro. El voltaje de la entrada tomó valores de 400mV, 2.2V, 3.8V y 5V. La respuesta medida se ve en las figura 3.18(a), (b), (c) y (d). Como se puede ver en estas figuras, a medida que se incrementa el voltaje aumenta el tiempo en alto de la salida PWM, de tal manera que cuando el voltaje de entrada es de 5V, el tiempo en alto de la señal es casi 100%. La salida del filtro pasa bajas mantiene el voltaje promedio de la señal de PWM con algunas pequeñas variaciones.

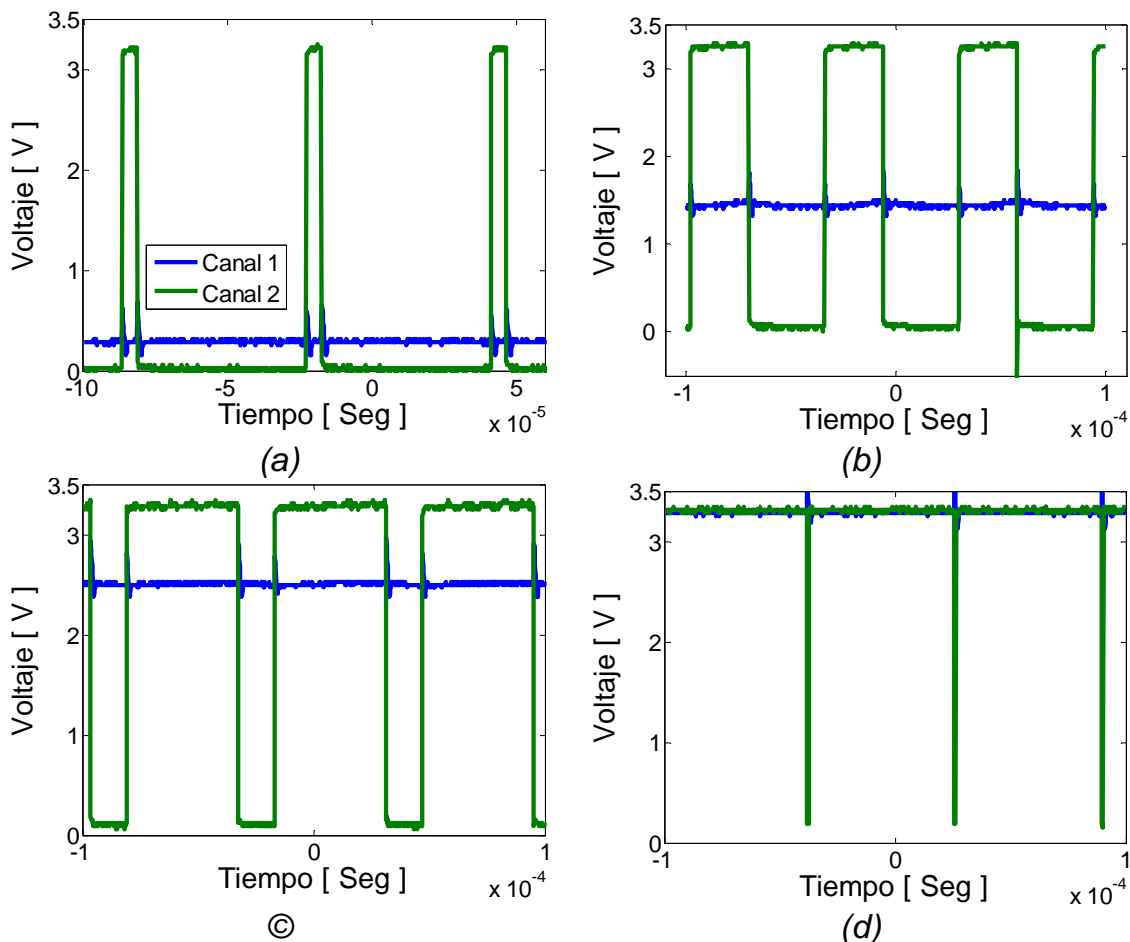


Figura 3.18. a) Voltaje de salida de PWM con un voltaje de entrada de 0.4V. b) Voltaje de entrada 2.2V. c) Voltaje de entrada 3.8V. d) Voltaje de entrada 5V.

3.2.3 Configuración del XBee como coordinador

Con el comando ATCE se establece el papel de cada módulo en una red ZigBee. Cuando su valor es 1 configura al módulo como coordinador, se

emplea también el comando ATA2 para configurar las diferentes opciones para crear una red.

En la tabla 3.5 se muestran las opciones del comando ATA2, las cuales determinan la forma en que el coordinador va a crear una red. En la figura 3.19 se muestran la terminal del programa X-CTU con los comandos para configurar al módulo XBee como coordinador de la red.

Tabla 3.5. Opciones del coordinador para crear una red

Bit	Opciones del coordinador
0 <i>ReassingPanID</i>	0. El coordinador no realiza un escaneo para ubicar un ID (Identificador) PAN disponible. Operará con el identificador establecido por el usuario mediante el comando ATID.
	1. El coordinador realiza un escaneo para determinar un ID disponible. Si el ID establecido por el usuario tiene conflictos, el parámetro del comando ID cambiará.
1 <i>ReassingChannel</i>	0. El coordinador no realiza un escaneo para determinar un canal libre. Operará en el canal establecido por el usuario mediante el comando ATCH.
	1. El coordinador realiza un escaneo para determinar un canal libre y operar en ese canal.
2 <i>AllowAssociate</i>	0. El coordinador no permitirá que ningún dispositivo se asocie a él.
	1. El coordinador permitirá a los dispositivos asociarse a él.
3 – 7	Reservados.

Las opciones configuradas al módulo XBee, permiten que: el coordinador puede reasignar su identificador de red en caso de ocurrir un conflicto al realizar un escaneo, realizar un escaneo para determinar un canal libre y operar en ese canal, finalmente permitir a los dispositivos asociarse a él en la red.

3.2.4 Configuración del módulo como dispositivo final

El elemento con menores prestaciones en una red ZigBee es el dispositivo final. Con el comando ATCE con un valor de 0, se configura al módulo XBee como dispositivo final. Cabe la pena señalar que los módulos XBee por default están configurados como dispositivos finales. Se emplea también en comando ATA1 para configurar las diferentes opciones de asociarse a una red.



Figura 3.19. Configuración del módulo XBee como coordinador de la red.

En la tabla 3.6 se muestran las opciones que se pueden asignar al dispositivo final para asociarse a una red. En la figura 3.20 se muestran los comandos utilizados para realizar la configuración del dispositivo final mediante el programa X-CTU.

Tabla 3.6. Opciones del dispositivo final para asociarse.

Bit	Opciones del dispositivo final
0 <i>ReassingPanID</i>	0. Solamente se asociará a un coordinador operando con el ID PAN que corresponde al parámetro del comando ATNI. 1. Puede asociarse con un coordinador operando con cualquier ID PAN.
1 <i>ReassingChannel</i>	0. Solamente se asociará a un coordinador operando con el canal que corresponde al parámetro del comando ATCH. 1. Puede asociarse con un coordinador operando con cualquier canal.
2 <i>AutoAssociate</i>	0. El dispositivo no intentará asociarse. 1. El dispositivo intentará asociarse hasta conseguirlo.
3 <i>PollCoordOnPinWake</i>	0. El dispositivo no sondeará al coordinador para datos pendientes. 1. El dispositivo enviará una solicitud para extraer cualquier dato pendiente.
4 – 7	Reservados.

Esta configuración permite al módulo XBee actuar como dispositivo final dentro de una red. Con los datos mostrados en la figura 3.20, se activa

la opción de reasignar su identificador de la red para asociarse con un coordinador operando en cualquier red. Puede asociarse a un coordinador operando en cualquier canal, el módulo intentará asociarse hasta conseguirlo y envía una solicitud al coordinador para extraer datos pendientes para él.

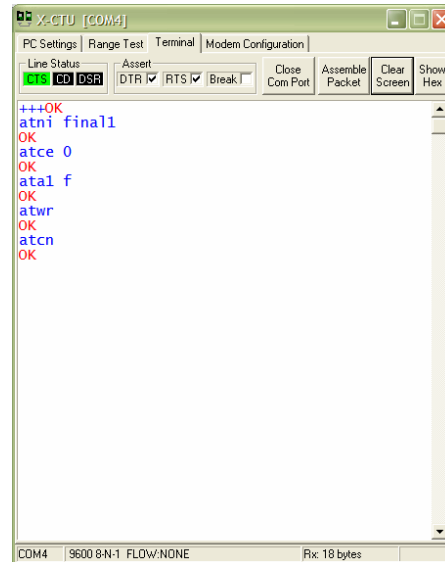


Figura 3.20. Configuración del módulo XBee como dispositivo final.

3.2.5 Configuración del módulo como router

Para las configuraciones anteriores (coordinador, dispositivo final) se emplearon módulos XBee de la serie 1. Para realizar la configuración del módulo como *router* es necesario usar un módulo de la serie 2, ya que esta serie permite este modo de trabajo y la serie 1 no.

Para configurar un módulo XBee como *router*, se debe seleccionar el *firmware* adecuado en el programa X-CTU. Los parámetros establecidos de fábrica permiten al módulo funcionar como router por default. Los comandos a utilizar para realizar un escaneo de canales, cambiar el canal de comunicación, el identificador de red y el tiempo de asociación son: ATSC, ATCH, ATID, ATNJ respectivamente. Los comandos ATD5, ATAI permiten conocer el estado del router. En la tabla 3.7 se muestra la descripción de estos comandos [25].

Tabla 3.7. Opciones de configuración del router

Comando AT	Descripción	Rango del parámetro
SC	<p><i>Scan Channels</i>. Establece o lee la lista de canales para ser escaneados.</p> <p>Coordinador. Lista de canales para elegir antes de empezar una red.</p> <p><i>Router</i>, dispositivo final. Lista de canales que serán escaneados para encontrar un coordinador o un router y asociarse a él.</p>	1 – 0xFFFF

CH	<i>Operating Channel.</i> Lee el número de canal usado entre los módulos para transmitir y recibir.	0, 0x0B – 0X1A
ID	<i>PAN ID.</i> Establece u obtiene el identificador de la PAN. <i>Coordinador.</i> Estable el ID preferido. <i>Router, dispositivo final.</i> Establece el ID deseado.	0 – 0x3FFF, 0XFFFF
NJ	<i>Node Join Time.</i> Establece o lee el tiempo en el que el coordinador o <i>router</i> permiten que los nodos se asocien a ellos.	0 – 0x40, 0Xff [x 1 seg]
D5	<i>(DIO5 Configuration).</i> Configura las opciones para la línea DIO5 (terminal 15) del módulo.	0 – 5 0= Deshabilitado 1= Indicador de asociación 3= DI 4= DO en bajo 5= DO en alto
AI	<i>Association Indication.</i> Lee la información acerca de la última solicitud de asociación del nodo.	0 – 0XFF [solo lectura]

La figura 3.21 muestra la ventana del programa X-CTU cuando se ha cargado el *firmware* que le permite funcionar como router. Son los que se muestran de color verde y que se explicaron en la tabla 3.7.

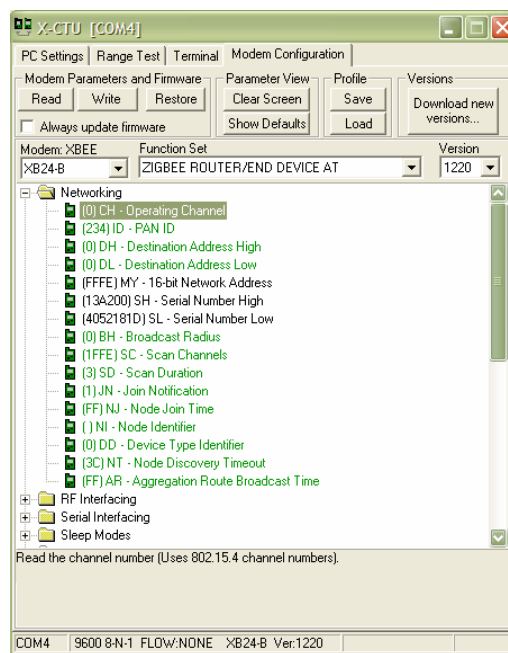


Figura 3.21 Valores de fabrica para el router.

Capítulo 4.

Conclusiones

En el presente trabajo se mostró la forma en que fue desarrollado un sistema para crear una red inalámbrica de sensores bajo el protocolo IEEE 802.15.4. Después de haber terminado el trabajo, y tomando en cuenta todas las fases del desarrollo, se ha llegado a las siguientes conclusiones:

- Para cumplir con los objetivos planteados se desarrollaron dos sistemas denominados XBeeUSB y XBeeSensor. El primero permite que una PC se integre a una red ZigBee; el segundo es un módulo que funciona con pilas y que permite monitorear sensores con salidas TTL respectivamente. Ambos sistemas se dejaron a nivel de circuito impreso.
- Los sistemas fueron probados obteniendo los resultados esperados, por lo cual se considera haber cumplido completamente los objetivos del presente trabajo. Además, se documentó la forma en la que los módulos se deben configurar, de acuerdo a la función que va a realizar.
- El sistema XBeeUSB permitirá realizar aplicaciones de redes de sensores que se puedan comunicar con una PC de una manera rápida mediante el puerto USB.
- La capacidad de funcionar con pilas del sistema XBeeSensor hace a este sistema totalmente portátil. Además puede funcionar con una fuente de voltaje externa, cuando se dispone de una fuente de energía.
- El sistema XBeeSensor fue desarrollado para trabajar con módulos XBee de la serie 1, sin embargo, en la actualidad en el país se pueden adquirir módulos de la serie 2, que tiene una pequeña diferencia en sus terminales. Por tal motivo se tuvieron

que realizaron algunas modificaciones al sistema para soportar ambas series. Los elementos de la serie 2 pueden funcionar como repetidores y tienen un mayor alcance que los de la serie 1.

- El sistema XBeeUSB puede operar con módulo XBee de ambas series, ya que los módulos comparten la misma distribución de sus terminales, desde el punto de vista del puerto serial.
- Se utilizó un convertidor de CD/CD en su configuración de elevador, con el fin de cumplir con el objetivo de alimentar al sistema con un par de pilas. Se utilizó un convertido comercial y se comprobó que es relativamente sencillo de usar, para lo cual solo requiere de un inductor externo. El principal problema que se tuvo fue en conseguir la inductancia y hacer el impreso del convertidor, ya que es de montaje superficial.
- A pesar de que los módulos XBee no cuentan con salida analógica, se utilizó una salida digital con modulación PWM. Por lo cual una contribución de este trabajo es el haber usado este tipo de salida para generar una señal continua, sin la necesidad de usar un convertidor digital analógico.
- En el documento se explicó la forma en que se probaron todas las capacidades del XBeeSensor y el XBeeUSB, así como la forma en que se realizan las configuraciones de estos dispositivos. En el mercado, la empresa *Daintree Networks* cuenta con un software analizador de redes de sensores *Daintree (SNA, Sensor Network Analyzer)*, que permite probar y analizar una red IEEE 802.15.4 conformada con hardware propietario, además de identificar algunos kits de desarrollo de otras empresas [URL18]. Sin embargo, no identifica los dispositivos de MaxStream.

Trabajos futuros

Algunos posibles trabajos futuros que le den continuidad a este trabajo son:

- Hacer pruebas de las diferentes opciones que especifica el estándar, como son la transmisión con y sin *beacons*, hacer pruebas de alcance y cobertura, con el fin de tener completamente caracterizado la forma en que operan estos dispositivos.

- Usar el módulo para automatizar alguna tarea, como puede ser el control de los parámetros de un invernadero, y/o aplicaciones de seguridad para el control de sensores de presencia inalámbricos, lo que facilitaría enormemente la instalación de sistemas de vigilancia y control de acceso.
- Interconectar el sistema XBee a una red de área local, con el fin de ampliar las capacidades de este tipo de dispositivos.

Referencias

Bibliografía

- [1] Roger Smith, "RFID: A Brief Technology Analysis", CTOnet.org, 2004.
- [2] Módulos de RF ZigBee™/802.15.4 versión OEM fabricados por MaxStream, Inc., 2005.
- [3] Microsoft, "Notas técnicas de Microsoft Windows Server 2003".
- [4] M. López Villaseñor, M. A. Gutiérrez Galindo, R. Marcelín Jiménez, "De sensores inalámbricos, mitigación de riesgos y sistemas autoorganizados", Área de Redes y Comunicaciones, Depto. De Ing. Eléctrica, UAM–Iztapalapa, 2007.
- [5] Honeywell, XYR500 WG510/WA510, Wireless Gauge and Absolute pressure transmitters, 12/2004, ISBN: 34-XY-01-01.
- [6] David Geer, "Users make a beeline for ZigBee sensors technology", Published by the IEEE Computer Society, Diciembre 2005.
- [7] IEEE Computer Society, "IEEE Standard for Information technology – Telecommunications and information exchange between systems. Local and metropolitan area networks. Specific requirements. Part 15.4: Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications for Low-Rate Wireless Personal Area Networks (WPANs)", USA, 08/09/2006, ISBN: 0-7381-4997-7.
- [8] Tanenbaum Andrew S., "Redes de computadoras", Tercera edición, Pearson Educación, 1997, ISBN: 968-880-958-6.
- [9] Hesselbach Serra Xavier, Altés Bosch Jordi, "Análisis de redes y sistemas de comunicaciones", Primera edición, Edicions UPC, 2002, ISBN: 84-8301-611-7.
- [10] ATMEL, "AVR2016: RZRAVEN Hardware User's Guide", Rev. 8117D – AVR- 04/08.
- [11] MaxStream, "Product Manual v1.xAx, Xbee/Xbee PRO 802.15.4 OEM RF Modules v1.xAx", 13/10/2006.
- [12] Wayne Tomasi, "Sistemas de comunicaciones electrónicas", Segunda edición, Pearson Educación, 1996, ISBN: 968-880-674-9.
- [13] Tomás García Sotelo, "Emulación de RFID activo mediante la plataforma MICAz", Trabajo final de carrera, Universidad Politécnica de Cataluña, 24 de febrero de 2006.
- [14] SGS-THOMSON MICROELECTRONICS, "Eight Darlington Arrays ULN2801A - ULN2802A - ULN2803A - ULN2804A - ULN2805A".
- [15] National Semiconductor, "LM158/LM258/LM358/LM2904, Low Power Dual Operational Amplifiers", DS007787, © 2000 National Semiconductor Corporation.
- [16] National Semiconductor, "LMV331 Single / LMV393 Dual / LMV339

- Quad General Purpose, Low Voltage, Tiny Pack Comparators”, DS100080, © 2004 National Semiconductor Corporation.
- [17] Maxim, “High-Efficiency, Low-Supply-Current, Compact, Step-Up”. DC-DC Converters, MAX1674/MAX1675/MAX1676.
- [18] STMicroelectronics, “LF00 Series, very low drop voltage regulators with inhibit”.
- [19] STMicroelectronics, “LM78XX Series, very low drop voltage regulators”.
- [20] FTDI Chip, “FT232BL USB UART (USB – Serial) I.C.”, DS232BL Version 1.8 ©, Future Technology Devices Intl. Ltd. 2005.
- [21] Paz Carreño Rodolfo, “Diseño y construcción de un controlador de cargas por interfaz serial bajo el protocolo de comunicaciones MODBUS”. Tesis de licenciatura, Universidad Tecnológica de la Mixteca, México, 2008.
- [22] Agilent Technologies, “E9340A LogicWave 34-Channel, PC-Hosted Logic Analyzer”, USA, Noviembre de 2000, ISBN : 5968-5560E.
- [23] Agilent Technologies, “54600-Series Oscilloscopes, Data Sheet”, USA, 16/11/2004, ISBN : 5968-8152EN.
- [24] Agilent Technologies, “Agilent 33120A Function/Arbitrary Waveform Generator, Data Sheet”, USA, 01/05/2004, ISBN: 5968-0125EN.
- [25] MaxStream, “Product Manual v1.x.2x, XBee Series 2 OEM RF Modules”, 19/07/2007, ISBN: 90000866_B.

Internet

- [URL1] <http://es.wikipedia.org/wiki/Automatizaci%C3%B3n>, “Automatización industrial”, última visita: 4 de Febrero de 2008.
- [URL2] <http://spanish.bluetooth.com/Bluetooth/Technology/>, “Página Principal de la organización bluetooth”, última visita: 4 de Febrero de 2008.
- [URL3] http://www.wi-fi.org/knowledge_center_overview.php, “Página principal de la organización wi-fi”, última visita: 4 de Febrero de 2008.
- [URL4] http://es.wikipedia.org/wiki/Red_de_sensores, “Red de sensores”, última visita: 4 de Febrero de 2008.
- [URL5] http://www.s3cinc.com/press_rel_111406.htm, “s3c sensor”, última visita: 30 de Abril de 2008.
- [URL6] <http://www.albedo.biz/products/004/002/>, “Estación meteorológica ws300”, última visita: 4 de Febrero de 2008.
- [URL7] <http://es.wikipedia.org/wiki/ZigBee>, “Zigbee”, última visita: 30 de Abril de 2008.
- [URL8] www.domodesk.com, “¿Que opinan las empresas de Zigbee?”, última visita: 30 de Abril de 2008.
- [URL9] http://es.wikipedia.org/wiki/Espectro_ensanchado, “espectro ensanchado”, última visita: 13 de Octubre de 2008.
- [URL10] <http://www.zigbee.org/en/>, “Pagina principal de zigbee”, última visita: 4 de Febrero de 2008.

- [URL11] http://www.zigbee.org/en/certification/certified_products.asp, "certified products alliance zigbee", última visita: 4 de Febrero de 2008.
- [URL12] <http://www.nec-eng.com/pro/zigbee/>, "Manufacturer Specific Certified Products zigbee", última visita: 4 de Febrero de 2008.
- [URL13] <http://www.digi.com/products/wireless/point-multipoint/xbee-series1-module.jsp>, "XBee de maxstream", última visita: 30 de Abril de 2008.
- [URL14] <http://focus.ti.com/docs/prod/folders/print/cc2520.html>, "Second generation 2.4 GHz ZigBee/IEEE 802.15.4 RF transceiver", última visita: 30 de Abril de 2008.
- [URL15] <http://focus.ti.com/docs/toolsw/folders/print/cc2520dk.html>, "CC2520 Development Kit", última visita: 30 de Abril de 2008.
- [URL16] <http://www.digi.com/products/wireless/>, "Pagina principal de digi", última visita: 16 de Junio de 2008.
- [URL17] <http://www.ftdichip.com/Drivers/VCP.htm>, "Pagina principal de ftdi", última visita: 16 de Junio de 2008.
- [URL18] <http://www.daintree.net/products/sna.php>, "sna de daintree", última visita: 22 de Agosto de 2008.

Apéndice A. Manual de usuario del XBeeSensor

El sistema XBeeSensor permite establecer una red de área personal inalámbrica (WPAN) bajo el protocolo IEEE 802.15.4, y manejar sensores con salidas digitales (nivel TTL) o analógicas (0 – 5 Volts). Cuenta con indicadores visuales cuyo encendido es función de la intensidad de la señal de RF recibida. El alma de este sistema es el circuito integrado de la firma MaxStream modelo XBee serie 1 ó 2. Éste cumple con todas las normas del estándar IEEE 802.15.4, mejor conocido como ZigBee.

La figura A.1 muestra una fotografía del sistema XBeeSensor, cuyas dimensiones son 9.5cm x 5cm x 2.5cm. Puede ser alimentado con un par de pilas AA o una fuente externa. El módulo XBee se encuentra en la parte central de la figura, donde su número de parte es el XB24-AWI-001, en el cual se observa la antena tipo dipolo.

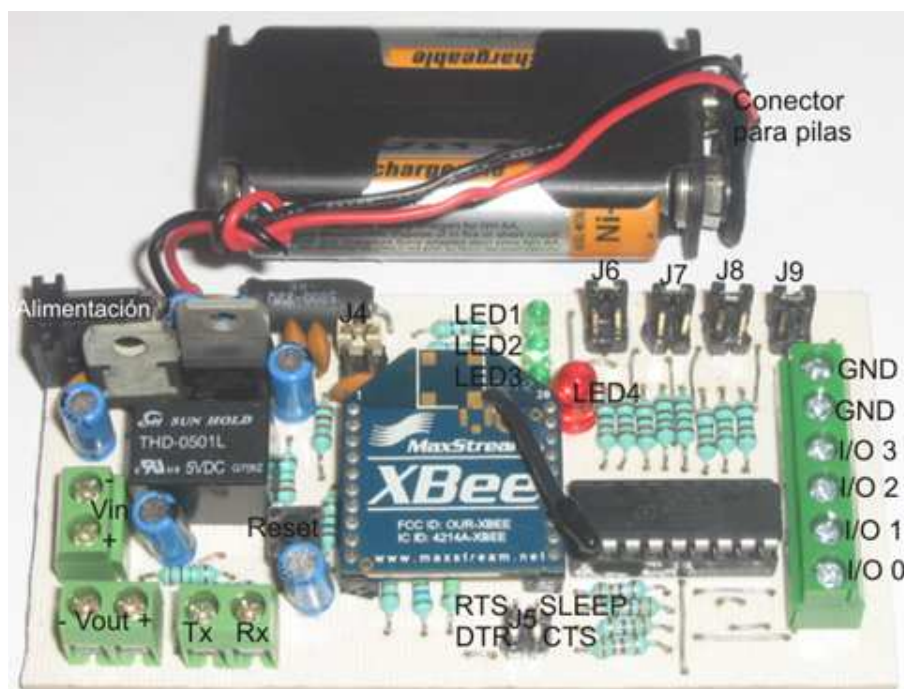


Figura A.1. Vista del lado componentes del XBeeSensor.

En la figura A.2 se muestra una fotografía de la parte inferior del XBeeSensor, en ella se observan los elementos de montaje superficial empleados en la elaboración del sistema. Los cuales son:

1. MAX1674EUA. Convertidor de CD/CD.
2. MBR0520. Diodo Schottky.
3. LM358D. Doble amplificador operacional.
4. LMV339MTX. Comparadores de voltaje.

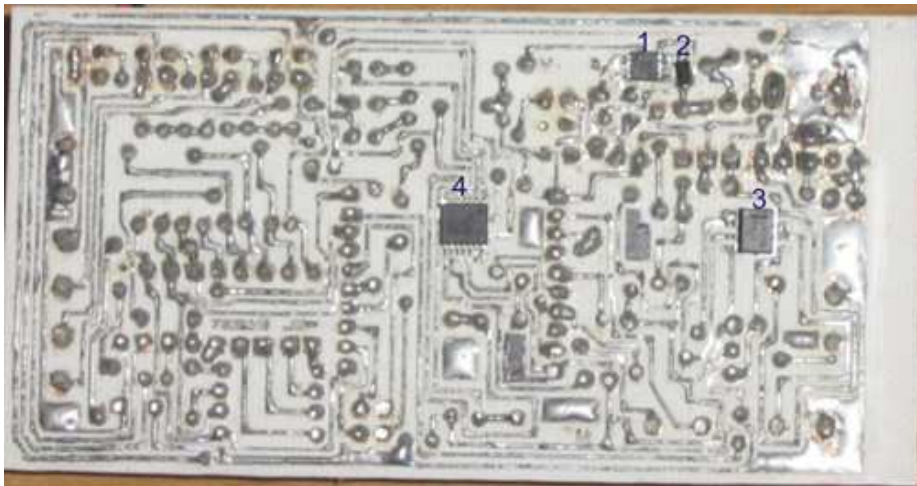


Figura A.2. Vista del lado soldadura del XBeeSensor.

Conceptualmente, el sistema XBeeSensor se puede modelar como un bloque de entradas-salidas como el que se muestra en la figura A.3. Las entradas y salidas del sistema, haciendo referencia a las leyendas de la figura A.1, son:

- Cuatro entradas salidas digitales (I/O 0 a I/O 3).
- Selector del tipo de entrada o salida digital (J6 a J9).
- Botón de reset.
- Conector para la fuente de alimentación de 6 a 9V (Alimentación).
- Conector para pilas AA.
- Voltaje de entrada analógico (V_{in}).
- Voltaje de salida analógico (V_{out}).
- Terminales para el manejo de comunicaciones seriales (RTS, CTS y DTR).
- Transmisión (TX) y recepción de datos (RX) seriales.
- Indicadores luminosos de la intensidad de RF (LED1 a LED3).
- Indicador luminoso de asociación a una red (LED4).

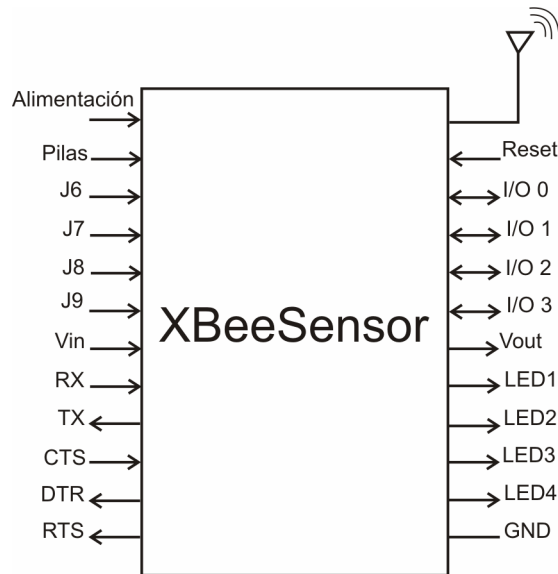


Figura A.3. Diagrama conceptual del XBeeSensor.

A continuación se describen cada uno de los elementos que conforman el sistema XBeeSensor, y los diferentes modos de uso de dicho sistema.

A.1 Alimentación

El XBeeSensor se alimenta con una fuente de voltaje de 6 a 9V o con dos pilas AA (2.4V). La fuente de voltaje debe tener una capacidad de corriente de 1A. El elemento que tiene la leyenda “Alimentación”, de la figura A.1, es en donde se conecta el voltaje externo. La parte central del conector corresponde al positivo y la parte externa el negativo. Las pilas se conectan a las terminales marcadas como “Pilas”, el voltaje de éstas debe ser de 2.4V, aunque admite variaciones desde 1.2V a 3.3V.

Por omisión el XBeeSensor se alimenta con pilas. Si se tiene ambas fuentes de energía, conectadas al mismo tiempo, usa la fuente de voltaje. La conmutación entre una y otra fuente la hace con un relevador. Al final, ambas fuentes poseen la circuitería necesaria para adaptar su voltaje a +5V.

A.2 Entradas y salidas digitales

El sistema XBeeSensor tiene la capacidad de manejar cuatro entradas/salidas digitales con niveles TTL. Para ello cuenta con un conector de seis tornillos, los cuales se encuentran en la parte lateral derecha de la placa, que se muestra en la figura A.1. Internamente las entradas-salidas se manejan como un byte, de tal manera que el bit menos significativo

corresponde a la entrada-salida 0 (I/O 0) y así sucesivamente. Este conector tiene disponibles dos terminales con tornillos para la tierra y son las que se encuentran marcadas como "GND".

La configuración de cualquier terminal como entrada o salida se hace con comandos AT. Una vez hecho esto se conecta a lo que se va a controlar o monitorear. Se usa la misma terminal independiente del uso, por lo cual comparten la misma terminal de tornillos. Con los conectores J6, J7, J8 y J9, que se ubican en la parte superior derecha de la placa, se selecciona por hardware el tipo de función a realizar.

El puente J6 controla a I/O 0, J7 a I/O 1, J8 a I/O 2 y J9 a I/O 3. La configuración que tienen éstos, en la figura A.1, es para salidas. Para las entradas solo se tiene que cambiar de posición. Se puede tener una combinación de entradas y salidas alternadas. La configuración de los puentes debe de corresponder con la realizada por software.

A.3 Entrada y salida analógica

El sistema XBeeSensor tiene la capacidad de aceptar señales analógicas en un rango de 0 a 5V. "Vin" en la figura A.1 es su conector de dos terminales de tornillos. La tierra se conecta a la terminal de tornillo marcada con el signo '-', y la señal positiva se conecta a la terminal de tornillo marcada con el signo '+'. El tipo de señal analógica debe ser de tipo referenciado.

El módulo XBee no tiene salidas analógicas. Sin embargo tiene una salida en PWM, por lo cual en el XBeeSensor se configuró un filtro para obtener la salida analógica en función de una salida digital. El voltaje está en el rango de 0 a 3.3V (que es con el que se alimenta el XBee). La salida se toma en las terminales marcadas como "Vout" de la figura A.1. La tierra corresponde a la terminal marcada con el signo '-'.

A.4 Puerto serial

Las terminales "Tx" y "Rx" del XBeeSensor se conectan al puerto serial del módulo XBee. Los niveles de voltaje son de 3.3V y 0V, aunque el puerto acepta señales con niveles TTL (0 y 5V). La terminal "Tx" de la figura A.1 corresponde a la terminal DOUT del puerto serial del módulo XBee, la terminal "Rx" corresponde a la señal DIN del puerto serial del módulo XBee. La tierra se puede obtener de cualquier conector marcado como "GND" o '-' de las entradas y salidas.

En el *jumper* marcado como “J5” en la figura A.1 se encuentran disponibles las señales de control RTS, CTS y DTR, por si se desea hacer uso de ellas para el control de flujo de datos por Hardware. Sus niveles de voltaje son de 0 a 3.3V.

Este puerto es importante en aplicaciones en las cuales solo se desea usar al XBeeSensor como radio módem, ya que de forma transparente (como si fuera un cable) envía o recibe datos seriales que le sean enviados por otro dispositivo de este tipo.

A.5 Selección del módulo XBee

El XBeeSensor es capaz de manejar módulos XBee de la serie 1 ó 2, el puente “J4” de la figura A.1 configura el tipo de módulo con el que trabaja. Si el módulo XBee es de la serie 1 el puente se coloca de forma horizontal en el parte superior de *jumper*. Si el XBee pertenece a la serie 2 el puente debe ser colocado en la parte inferior de *jumper*, marcado como “J4”. La configuración que se muestra en la figura A.1 corresponde a un módulo XBee de la serie 1.

A.6 Indicadores luminosos

El XBeeSensor posee un indicador luminoso para señalar si éste está asociado a una red ZigBee. Cuando parpadea el LED “LED4” de la figura A.1 indicará que el módulo XBee se encuentra asociado a una red de este tipo. Cuando el módulo XBee no este asociado a una red el LED “LED4” permanecerá apagado.

Los LED marcados como “LED1, LED2 y LED3” de la figura A.1 indican, de manera visual, el nivel de señal de RF recibida en la antena del módulo XBee. Son útiles para saber, de manera sencilla, el alcance de recepción de los módulos XBee. Si los tres LED están encendidos indican un nivel de recepción alta, si solo uno esta encendido indica un bajo nivel de recepción.

A.7 Diagramas

En la figura A.4 se muestra el diagrama esquemático del XBeeSensor. Fue realizado con el software Proteus versión 7.1 de la firma *Labcenter Electronics* ©. El listado completo de componentes se describe en la tabla A.1. Cabe la pena mencionar que muchos de ellos se

consiguieron con diferentes proveedores. El costo tentativo de todo el sistema es de 657.00 pesos.

En la figura A.5 se muestra el diagrama de montaje del sistema XBeeSensor, y en la figura A.6 se muestra el diagrama de conexiones (*layout*) del mismo. La fabricación se hizo por la técnica de planchado, decidiéndose que fuera de una sola cara por ser más fácil de realizar. En total se necesitan 24 puentes para realizar las conexiones en la parte de componentes.

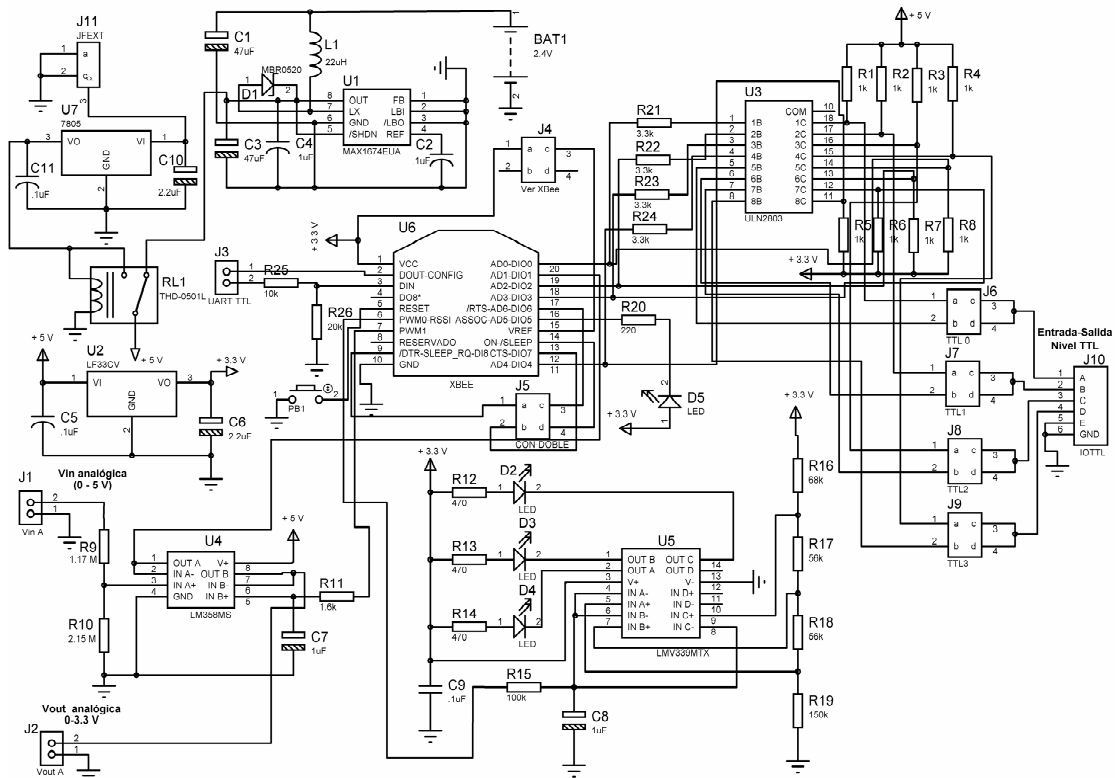


Figura A.4. Diagrama esquemático del XBeeSensor.

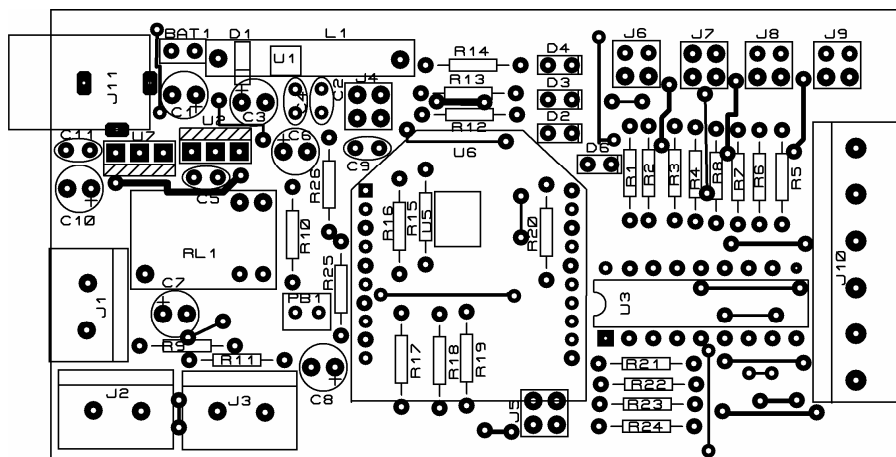


Figura A.5. Diagrama de montaje del XBeeSensor.

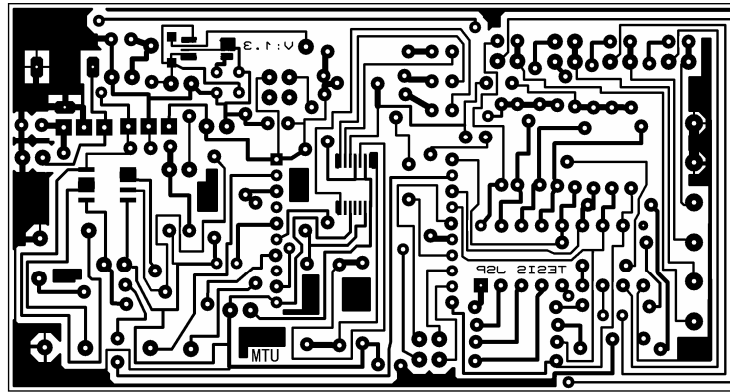


Figura A.6. Layout del XBeeSensor.

Tabla A.1. Lista de componentes para el sistema XBeeSensor.

Cantidad	Referencia	Descripción	Modelo	Precio por unidad	Proveedor
8	R1-R8	Resistencia de 1 K Ω	R1K ½	\$ 0.6	Steren
1	R9	Resistencia de 1.2 M Ω	R1M2 ½	\$ 0.6	Steren
1	R10	Resistencia de 2.2 M Ω	R2M2 ½	\$ 0.6	Steren
1	R11	Resistencia de 1.6 K Ω	R1K5 ½	\$ 0.6	Steren
3	R12 – R14	Resistencia de 470 Ω	R470 ½	\$ 0.6	Steren
1	R15	Resistencia de 100 K Ω	R100K ½	\$ 0.6	Steren
1	R16	Resistencia de 68 K Ω	R68K ½	\$ 0.6	Steren
2	R17, R18	Resistencia de 56 K Ω	R56K ½	\$ 0.6	Steren
1	R19	Resistencia de 150 K	R150K ½	\$ 0.6	Steren
1	R20	Resistencia de 220 Ω	R220 ½	\$ 0.6	Steren
3	R21 – R24	Resistencia de 3.3 K Ω	R3K3 ½	\$ 0.6	Steren
1	R25	Resistencia de 10 K Ω	R10K ½	\$ 0.6	Steren
1	R26	Resistencia de 20 K Ω	R22K ½	\$ 0.6	Steren
2	C1, C3	Capacitor electrolítico de 47 μ F	CE-47/25V	\$ 2.7	Ag electrónica

5	C2, C4, C5, C9, C11	Capacitor cerámico de 0.1 μ F	CC-.1/50V	\$ 2.2	Ag electrónica
2	C6, C10	Capacitor electrolítico de 2.2 μ F	CE-2.2/50V	\$ 2.7	Ag electrónica
2	C7, C8	Capacitor electrolítico de 1 μ F	CE-.1/50V	\$ 2.2	Ag electrónica
1	U1	Convertidor de Cd/Cd	MAX1674E UA	\$ 76.00	AG. Electrónica
1	U2	Regulador lineal de 3.3V	LF33CV	\$ 13.1	Ag electrónica
1	U3	Circuito integrado con 8 par darlington	ULN2803A	\$ 6.1	Ag electrónica
1	U4	Amplificador operacional	LM358D	\$ 5.217	Ag electrónica
1	U5	Comparador de voltaje	LMV339M TX	\$ 11.00	NEWARK
1	U6	Transceptor de 2.4GHz	XB24-AWI-001	\$ 260.00	Ag electrónica
1	U7	Regulador lineal de 5V	LM7805	\$ 5.217	Ag electrónica
1	D1	Diodo Schottky	MBR0520L	\$ 1.1	NEWARK
4	D2 – D5	Led		\$ 1.8	Ag electrónica
1	L1	Bobina de 22 μ H	5800-220-RC	\$ 16.3	NEWARK
1	RL1	Relevador de 5V	THD-0501L	\$ 17.00	Steren
1	PB1	Push-Button	AU-1012	\$ 4.00	Steren
1	BAT1	Conector para 2 pilas AA		\$ 10.00	Steren
3	J1 – J3	Conector de dos tornillos	TRT-02	\$ 6.00	Steren
6	J4 – J9	Tira doble de 4 pines		\$ 2.00	Ag electrónica
2	J10	Conector de tres tornillos	TRT-03	\$ 9.00	Steren
1	J11	Jack de alimentación		\$ 15.00	Electrónica Aragón
1		Base milimétrica para C.I 20 pines	40PF-MMLINEA	\$ 20.00	Ag electrónica

1		Hoja del impreso		\$ 70.00	Steren
1		Cloruro férrico		\$ 20.00	Steren
1		Placa fenólica		\$ 10.00	Steren

Apéndice B. Manual de usuario del XBeeUSB

El sistema XBeeUSB le permite a una computadora personal, poder conectarse a una red ZigBee. De tal manera que puede enviar o recibir información de y hacia otros dispositivos asociados a esta red. La conexión entre el XBeeUSB y la PC es por el puerto USB. Para hacer más compacto su diseño, se alimenta del mismo puerto, además posee indicadores visuales de encendido y asociación a una red ZigBee. También puede servir como base para la configuración de todos los módulos XBee a usar.

En la figura B.1 se muestra una fotografía de la parte superior de sistema XBeeUSB. En esta imagen se observa el conector del puerto USB, la base para el módulo XBee, y los LED indicadores de estado. La posición que tiene el módulo XBee en el zócalo de la placa es la correcta, si se invierte la posición el módulo se puede dañar.

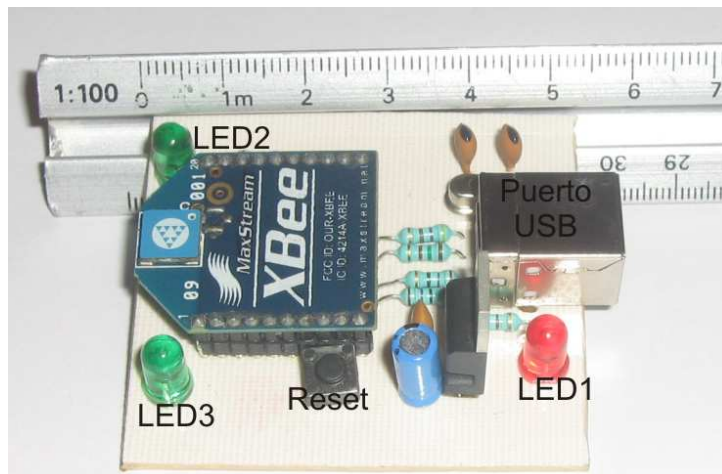


Figura B.1. Vista superior del XBeeUSB.

El sistema XBeeUSB se conecta con la computadora personal mediante el conector USB tipo B. En la figura B.1 se le denomina “Puerto USB”. El interruptor “Reset” sirve para reiniciar al módulo en caso de que existen problemas o se quede ciclado. El indicador visual denominado “LED1” se enciende cuando el sistema XBeeUSB esté conectado en un

puerto USB de una computadora. El “LED2” se ilumina cuando el módulo XBee conectado al sistema se encuentra asociado a una red.

La figura B.2 muestra una fotografía de la parte posterior del XBeeUSB. En esta figura se ve el circuito integrado de montaje superficial FT232BL. Este dispositivo es el encargado de realizar el manejo del puerto USB. A su salida el formato de la trama de datos es serial de tipo COM, con niveles TTL o de 0 a 3.3V, que es el que usa el módulo XBee. Una de sus salidas va conectada al “LED3” (de la figura B.1), el cual se activa cuando se realiza una transferencia de datos entre la computadora y el manejador de USB.

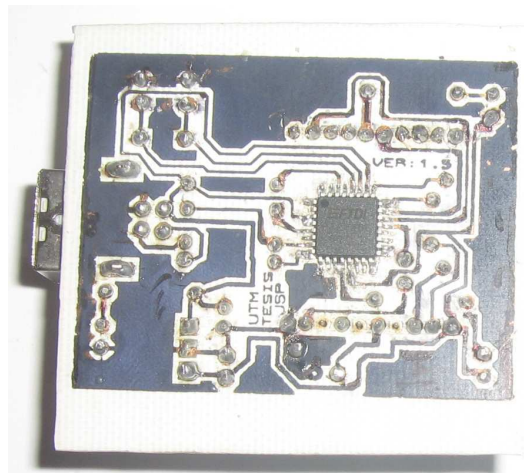


Figura B.2. Vista inferior del XBeeUSB.

Conceptualmente el sistema XBeeUSB se puede modelar como un bloque de entradas salidas, como el que se muestra en la figura B.3. Las entradas y salidas del sistema que hacen referencia a las leyendas de la figura B.1 son:

- Puerto de entrada USB.
- Botón de reset.
- Indicador luminoso de alimentación (LED1).
- Indicador luminoso de asociación a una red (LED2).
- Indicador luminoso de transferencia de datos (LED3).



Figura B.3. Diagrama conceptual del XBeeUSB.

A continuación se describen cada uno de los elementos que conforman el sistema XBeeUSB, y el modo de uso de dicho sistema.

B.1 Modo de funcionamiento

Para realizar la conexión del sistema XBeeUSB a una computadora personal es necesario contar con los siguientes elementos (figura B.4):

1. Computadora personal.
2. XBeeUSB
3. Módulo XBee.
4. Cable USB con terminal tipo macho 'C'.
5. Manejador (Driver) del FT232BL.

La figura B.4 muestra las conexiones realizadas para el uso correcto del sistema XBeeUSB. La alimentación del sistema se realiza directamente del puerto USB de la computadora.

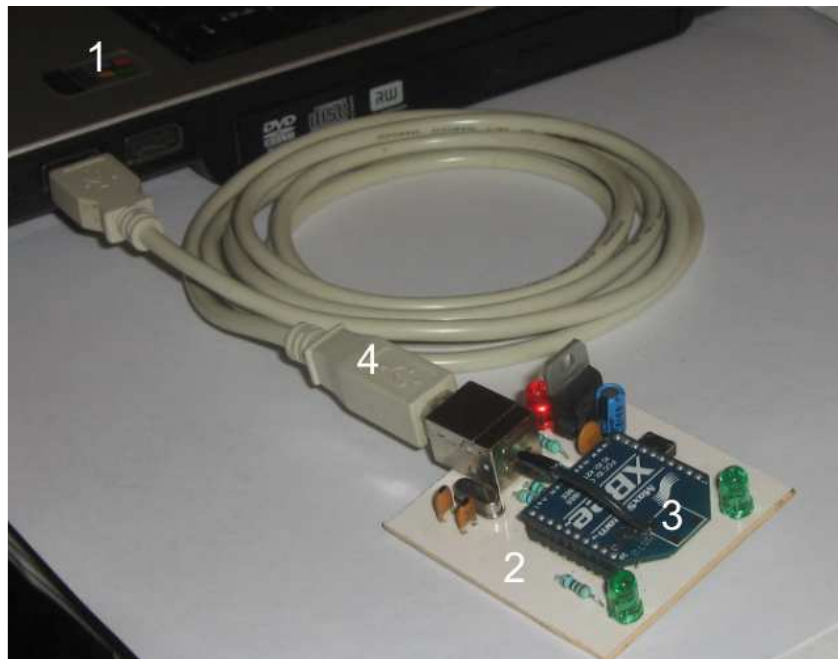


Figura B.4. Conexión del sistema XBeeUSB con la PC.

La primera vez que se conecta el XBeeUSB a la computadora, esta detecta al FT232BL como un dispositivo nuevo, e inmediatamente solicita la ruta de donde tomar los controladores. Siguiendo las ventanas e indicaciones del programa se instala el controlador. Finalmente, si todo está bien, el XBeeUSB es reconocido por la PC como un puerto de tipo COM. Existen versiones del driver o controlador para distintos sistemas operativos, y se obtienen gratuitamente de la página del fabricante [URL17]. Cuando se vuelve a conectar otra vez, la computadora reconoce el dispositivo de manera automática.

Una vez instalados los drivers, el sistema XBeeUSB está listo para ser utilizado. Para comunicarse es necesario cualquier programa que envíe datos por el puerto serie, como el Terminal de Windows, o el X-CTU que es

proporcionado por el fabricante del módulo XBee. Este último tiene más prestaciones que solo enviar datos por el puerto serie, una breve introducción de éste se da en el apéndice C.

B.2 Diagramas

En la figura B.5 se muestra el diagrama esquemático del sistema XBeeUSB, el cual también fue realizado con el software Proteus versión 7.1 de la firma *Labcenter Electronics* ©. El listado completo de componentes se describe en la tabla B.1, siendo el costo tentativo de todo el sistema de 317.00 pesos.

En las figuras B.6 (a) y (b) se muestran el diagrama de conexiones (Layout) del sistema y el diagrama de montaje del sistema respectivamente. La fabricación se hizo por la técnica de planchado, decidiéndose que fuera de una sola cara por ser más fácil de realizar. Se necesitan dos puentes para realizar las conexiones en la parte de componentes.

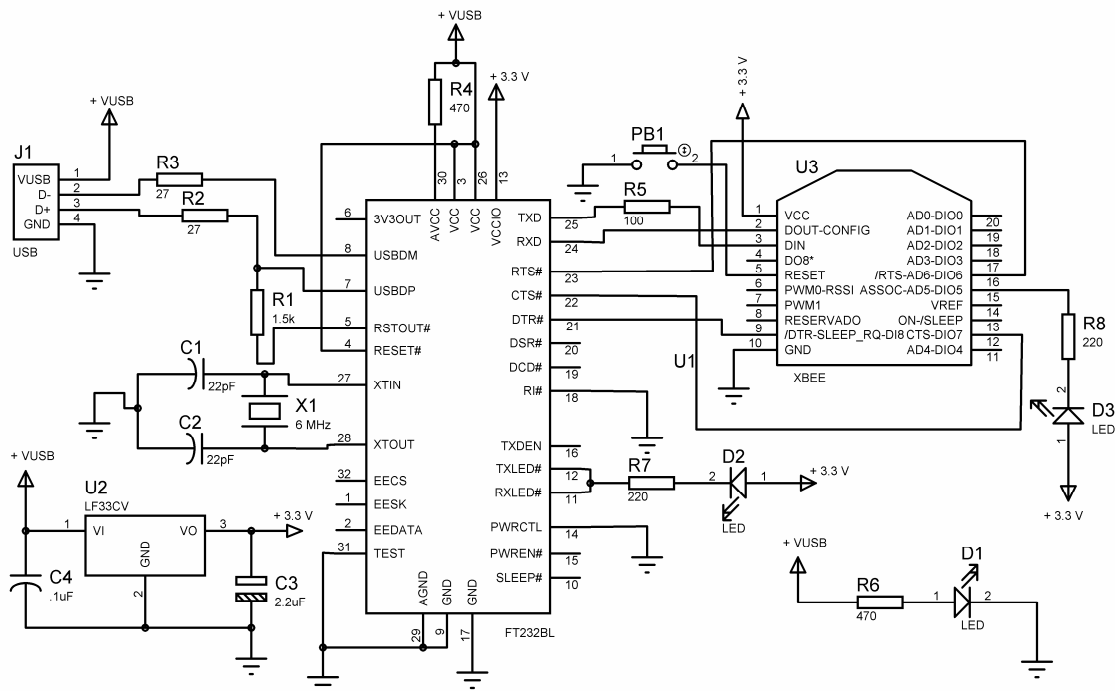


Figura B.5. Diagrama esquemático del XBeeUSB.

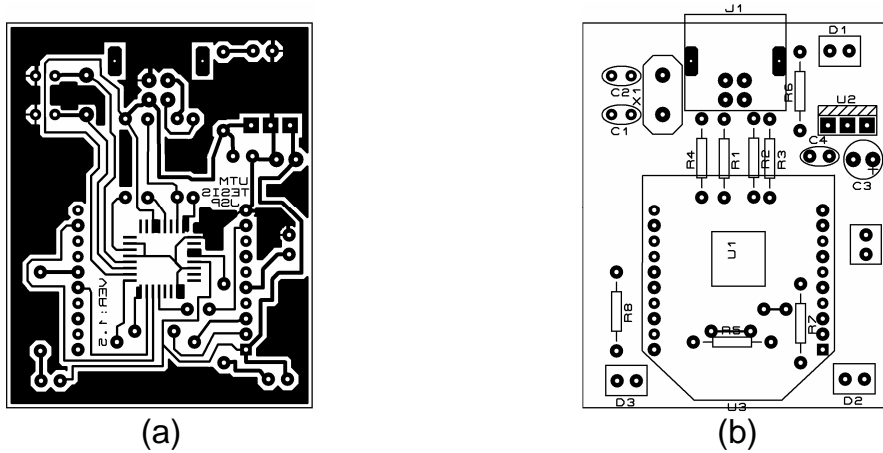


Figura B.6. a) Layout del XBeeUSB. b) Diagrama de montaje del XBeeUSB.

Tabla B.1. Lista de componentes para el sistema XBeeUSB.

Cantidad	Referencia	Descripción	Modelo	Precio por unidad	Proveedor
1	U1	Convertidor USB-TTL	FT232BL	\$ 116.00	AG electrónica
1	X1	Cristal de 6 MHz		\$ 6.1	AG electrónica
2	R2, R3	Resistencia de 27 Ω	R27 1/2	\$ 0.6	Steren
2	R4, R6	Resistencia de 470 Ω	R470 1/2	\$ 0.6	Steren
1	R5	Resistencia de 100 Ω	R100 1/2	\$ 0.6	Steren
1	R1	Resistencia de 1.5 K Ω	R1K5 1/2	\$ 0.6	Steren
2	R7, R8	Resistencia de 220 Ω	R220 1/2	\$ 0.6	Steren
1	U2	Regulador lineal de 3.3 V	LF33CV	\$ 13.1	AG electrónica
2	C1, C2	Capacitor cerámico de 22 pF	CC-22/1000V	\$ 2.2	AG electrónica
1	C3	Capacitor electrolítico de 2.2 μ F	CE-2.2/50V	\$ 2.7	AG electrónica
1	C4	Capacitor cerámico de 0.1 μ F	CC-.1/50V	\$ 2.2	AG electrónica
3	D1-D3	Led		\$ 1.8	AG electrónica
1		Base para C.I 20 pines	40PF-MMLINEA	\$ 20.00	AG electrónica

1	J1	Conector USB		\$ 12.00	Electrónica Aragón
1		Cable USB		\$ 30.00	
1		Hoja del impreso		\$ 70.00	Steren
1		Cloruro férrico		\$ 20.0	Steren
1		Placa fenólica		\$ 10.00	Steren

Apéndice C. Instalación y manejo del programa X-CTU

El software X-CTU se descarga gratuitamente en la página del fabricante MaxStream. Para instalarlo hay que descomprimir el archivo y ejecutarlo. Cuenta con cuatro ventanas principales las cuales son:

- *PC Settings*. En esta parte se configura el formato de la trama serial para comunicarse con el módulo.
- *Range Test*. Permite visualizar de una manera rápida y sencilla el alcance de transmisión del módulo.
- *Terminal*. Desde aquí se envían los comandos AT hacia el módulo XBee o se envían y reciben tramas de y hacia la UART del módulo.
- *Modem Configuration*. Es una interfaz visual desde la cual se configuran los parámetros del módulo XBee, sin necesidad de conocer los comandos AT (de configuración tipo módem). También desde aquí se hace la actualización del firmware.

A continuación se muestra algunas de las características más importantes del programa.

C.1 PC Settings

En la figura C.1 se muestra la imagen de la interfaz principal del programa, en esta ventana se configura el *baud rate*, el tipo de control de flujo, los bits de datos, la paridad y el bit de paro. Por *default* aparecen los valores que se observan en la figura C.1, los cuales son los indicados para poder establecer la comunicación con el módulo XBee.

En esta ventana se muestran los puertos seriales que existen en la computadora, en este caso el XBeeUSB tiene asignado el COM4. Cuando llega una trama al módulo XBee éste la reconoce como datos o como comandos para él. Si son datos los radía, si son comandos los interpreta y se configura o responde, pero esta información no es transmitida. Una

alternativa para enviar una trama de información de y hacia otros módulos XBee se conoce como API (*Application Programming Interface*). Esta opción también se activa en esta ventana. Por omisión se tiene la opción de modo de comandos AT.

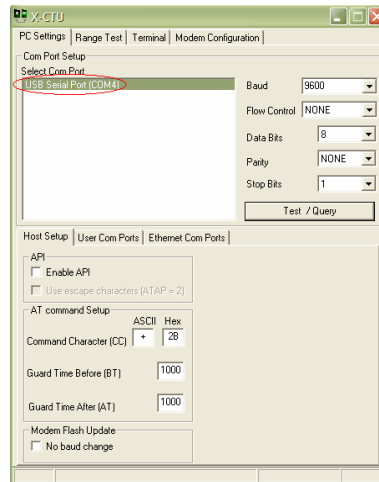
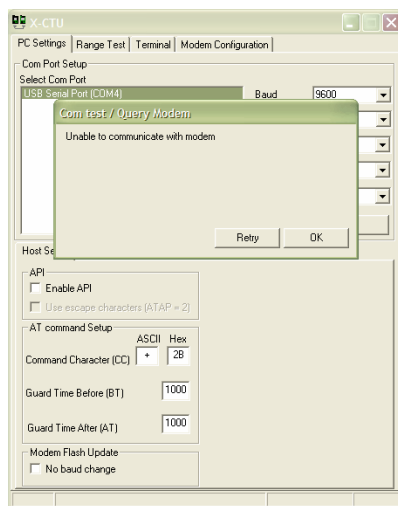
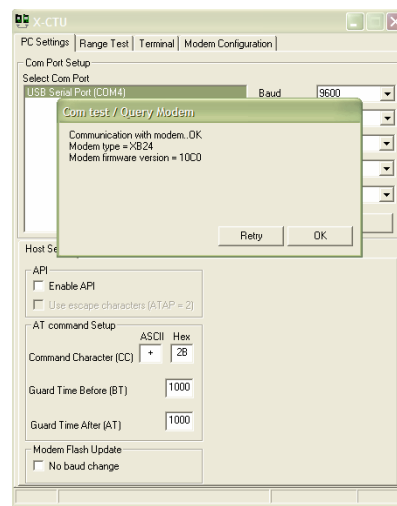


Figura C.1. Interfaz principal del programa X-CTU.

El botón *Test / Query* al ser presionado lee el puerto COM seleccionado para identificar el módulo que esta conectado a él. Si existe un problema en la comunicación, el programa muestra el mensaje de error de la figura C.2 (a). Para solucionarlo es necesario verificar que el módulo este conectado correctamente en el zócalo, o que el baud rate sea de 9600 bps o el adecuado. Cuando la comunicación se realizó sin problemas se muestra una ventana con los datos del tipo de módulo conectado, así como la versión de *firmware* que tiene programado, de forma similar a lo que se ve en la figura C.2 (b).



a)



b)

Figura C.2. a) Mensaje de error. b) Mensaje con información del módulo.

C.2 Range Test

La opción *Range Test* sirve para verificar la calidad del enlace de RF, de la señal recibida por el módulo XBeeUSB conectado a la PC. En la figura C.3(a) se muestra su interfaz. Para iniciar la prueba se pulsa el botón *Start*, si se habilita la casilla del RSSI se tiene un indicador gráfico del nivel de la señal recibida. Para realizar esta prueba se necesitan dos módulos, para que se comuniquen entre ellos.

La figura C.3(b) muestra la misma pestaña en el momento en que se está realizando la prueba. La gama de colores va de rojo (sin conexión) a verde (nivel de señal fuerte). Para finalizar la prueba se debe pulsar el botón de *Stop*.

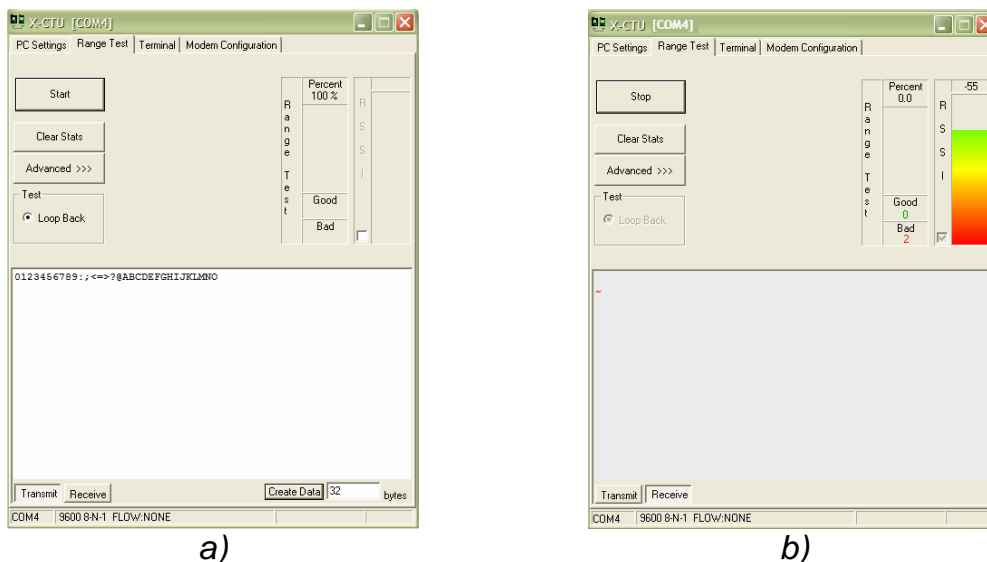


Figura C.3. a) Ventana de la prueba de alcance del módulo. b) Ventana durante la realización de la prueba.

C.3 Terminal

La opción terminal permite enviar comandos AT o información por el puerto COM hacia el módulo XBee. Para iniciar los comandos AT se escribe la secuencia “+++”, a la cual el módulo responde con “OK”, ésto indica que el módulo interpretara los datos recibidos como comandos. La figura C.4 muestra la ventana con esta acción.

El módulo XBee tiene especificado un tiempo de espera antes de salir del modo comando, este tiempo se establece con el comando CT. Si durante este tiempo no es ingresado ningún comando válido, automática-

mente el módulo saldrá del modo de comandos. Con la cadena ATCN se desactiva este modo de trabajo.

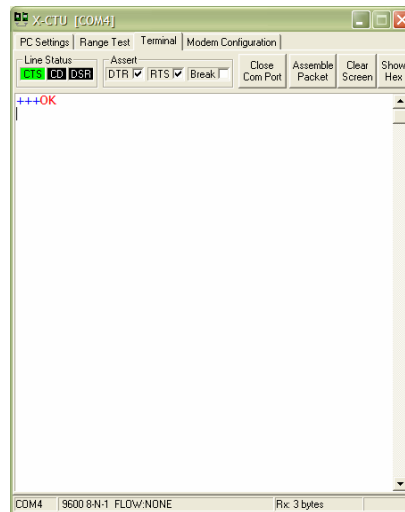


Figura C.4. Ventana para configuración mediante comandos AT.

Para mostrar la forma en que se usan los comandos AT, en la figura C.5 se muestra una secuencia. La información de la computadora hacia el módulo XBee esta en azul y la respuesta en rojo. Se ingrese la secuencia “+++”, la respuesta es OK. Con la cadena “ATV1” se solicita la versión del *firmware*. Finalmente con “ATCN” se sale del modo de comandos.

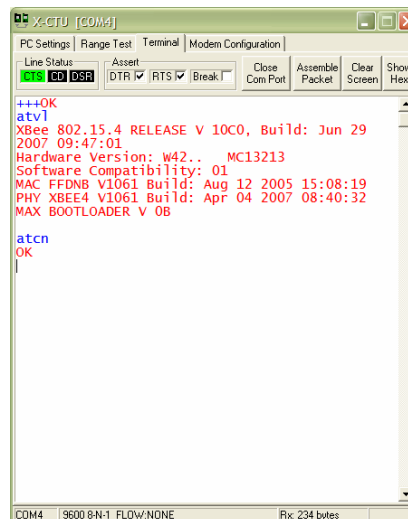


Figura C.5. Uso de la ventana de comandos AT.

C.4 Modem Configuration

La ventana de esta pestaña tiene una opción la cual permite realizar actualizaciones del *firmware*, el cual debe corresponder con el tipo de configuración deseado, por parte del módulo XBee. Dependiendo de la versión del *firmware* se pueden o no emplear determinados comandos AT.

El *firmware* se obtiene de la página de Internet de MaxStream o, si ya se bajó previamente, de un archivo. El programa tiene ambas opciones, es decir directamente se puede conectar al nodo del fabricante o abrir el archivo. Para entrar al modo de descarga del *firmware* se debe pulsar el botón *Download new versions...*, el cual se muestra en la figura C.6. Para tomar el archivo desde la PC se presiona la opción *file*, con el botón *Web* para bajarlo desde una conexión de Internet.

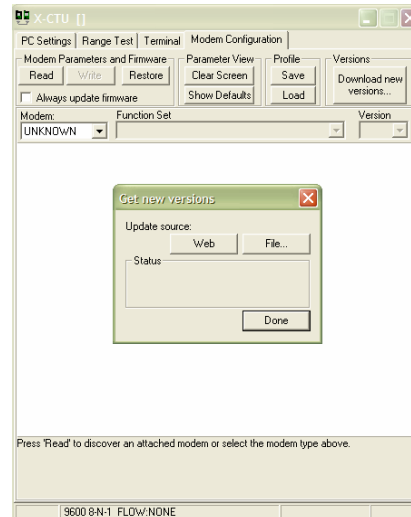


Figura C.6. Opciones de actualización del firmware.

Desde esta misma ventana se configura al módulo XBee, sin la necesidad de conocer todos los comandos AT. Debido a que en esta ventana se muestra toda la configuración del módulo y se puede seleccionar cualquier opción y configurarla. Para leer la configuración del módulo se debe pulsar el botón denominado *Read*, con lo cual el programa reconoce al módulo y muestra los comandos aplicables. La figura C.7 muestra los resultados al leer un módulo (los valores cambian dependiendo de cada módulo).

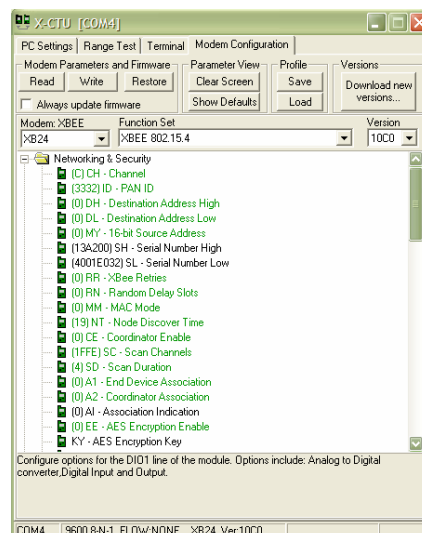


Figura C.7. Lectura de los parámetros del módulo.

Para modificar los parámetros se selecciona el comando, y se elige la opción adecuada o se ingresa el valor; en la parte inferior de la pantalla se muestra información acerca de las opciones de cada comando seleccionado. Una vez realizada la modificación de los parámetros, se debe pulsar el botón denominado *Write*, con lo cual dichas modificaciones se grabarán en la memoria del módulo.

En la figura C.8 se muestra la ventana en la cual se está cambiando el comando MY asignándole un valor de 1234. El comando MY permite leer o establecer la dirección corta de 16 bits del módulo XBee. Presionando Write se guarda automáticamente en la memoria no volátil del módulo XBee.

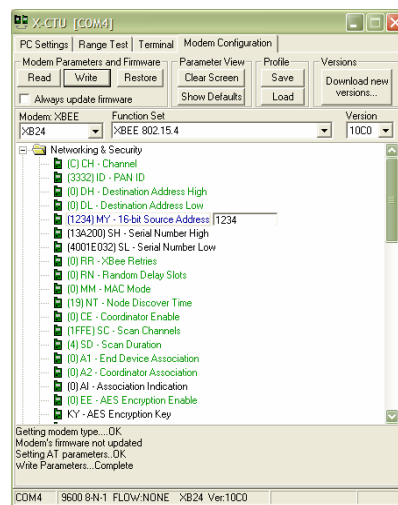


Figura C.8. Modificación de parámetros del módulo.

En la ventana inferior de la pestaña se muestra el estado de las acciones realizadas. Cuando se realiza algún cambio, éste se pone de color azul, como se muestra en la figura C.8. La configuración actual se puede guardar a un archivo presionando el botón *Save*.

En caso de haber problemas de configuración, se puede cargar la de omisión. Esto se hace pulsando el botón *Restore*, con lo cual todos los valores de los parámetros modificados por el usuario son establecidos a sus valores de fábrica.